

刘屹岷,姜继兰,何编.副热带高压气候动力学研究回顾.气象科学,2020,40(5):585-595.

LIU Yimin,JIANG Jilan,HE Bian. Reviews on climate dynamics of the subtropical anticyclone.Journal of the Meteorological Sciences, 2020,40(5):585-595.

副热带高压气候动力学研究回顾

刘屹岷^{1,2} 姜继兰^{1,2} 何编¹

(1 中国科学院大气物理研究所 大气科学和地球流体力学数值模拟国家重点实验室,北京 100029; 2 中国科学院大学,北京 100049)

摘要 基于早期副热带高压气候动力学的研究,本文重点介绍了近10 a在南亚高压和西太平洋副热带高压形成和变异机理方面的动力学研究,包括南亚高压的建立和维持机理、副热带高压的季节变化、年际—年代际变化和未来预估,最后讨论了需要进一步深入研究的方面。

关键词 副热带高压气候动力学; 研究回顾; 海—气相互作用; 青藏高原热力强迫

分类号: P434

doi: 10.3969/2020jms.0081

文献标识码: A

Reviews on climate dynamics of the subtropical anticyclone

LIU Yimin^{1,2} JIANG Jilan^{1,2} HE Bian¹

(1 State Key Laboratory of Numerical Modelling for Atmospheric Sciences and Geophysical Fluid Dynamics, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China;

2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract Based on a brief review of the previous studies on the climate dynamics of the subtropical anticyclone, this article focuses on the review of the formation and variation of the South Asian High and the western Pacific subtropical anticyclone in the past 10 years. The content includes the establishment and maintenance mechanism of the South Asian high, the seasonal variation, interannual-decadal variation and future projections of the subtropical anticyclone. At last, several aspects that need further research are discussed.

Key words climate dynamics of the subtropical anticyclone; reviews; air-sea interaction; thermal forcing of Tibet Plateau

引言

在南北半球的副热带地区,存在副热带高压带,或简称副高带。其向极一侧为西风带,向赤道一侧为东风带。大地形的存在、海洋过程和陆面过程等外部强迫过程改变了大气能量收支,使纬向的副热带高压带在不同高度上断裂为若干个区域副热带高压(简称副高)中心,影响副热带地区天气系统的运动,水汽的传输以及邻近地区的天气气候变化。副高变异也是影响东亚持续天气气候异常的主要环流系统。

早在1960s,已有专家学者就西太平洋副热带高压和南亚高压的变化对我国天气的影响进行了一系列研究^[1-5]。如黄土松等^[4]首次在国际上指出副热带高压的细微结构特征与影响因子及其在大气环流中的作用;考察了脊线位置等诸多副高要素,指出副高结构非常复杂,不但单体之间有不同,同一个高压内部亦不同,当副高移近大陆或位于大陆上时不是纯动力性质的系统。这些研究成果已成为我国天气和短期气候预测的指南。1980s以后,黄土松推翻了“冬季青藏高原南北侧各出现一支西风急流完全是由于山脉动力作用使某一西风

收稿日期(Received):2020-09-16;修改稿日期(Revised):2020-09-20

基金项目:国家重点研发计划项目(2018YFC1505706);国家自然科学基金资助项目(91637312;91937302)

通信作者(Corresponding author):刘屹岷(LIU Yimin).lym@lasg.iap.ac.cn

急流分支的结果”这一结论^[6]；随后杨修群等^[7]的研究揭示了马斯克林高压的强度变化对大气环流的影响；LI, et al^[8]的研究表明，副热带高压对亚非和北美天气和气候异常也有着重要作用。

1990s 中期之前，对副热带高压的研究大致可分为两类^[9]：一类是研究副高自身结构、活动规律及其对天气气候的影响；另一类是对影响副高活动因子的研究。但由于副热带能量关系比其他纬度带复杂，能量方程不能简化，因此对副热带天气气候动力学的深入研究一直是大气科学面临的挑战。1990s 末之后，许多理论性成果纠正了对副高成因的若干传统认识。例如传统理论认为副高是由于下沉运动造成的。但 Hoskins^[10]指出不能用 Hadley 环流的下沉支去解释副高的形成；刘屹岷等^[9]、吴国雄等^[11]发现即使在三维空间也不能用下沉运动去解释副高的形成，尤其是西太平洋副热带高压在 500 hPa 上对应着大范围的上升运动。又如传统理论认为西太平洋副热带高压支配着我国夏季降水，因此常通过预报副高异常进行降水异常预测。但钟中等^[12]指出东太平洋副热带高压强度增强可导致西太平洋副热带高压异常加强并西进；吴国雄等^[13,15-16]、LIU, et al^[14,17]研究表明，我国夏季风降水与西太平洋副热带高压之间是一种相互作用的关系，必须通过大气外热源的异常预测夏季的降水异常，可概述为以下几个方面：

(1) 开拓高、低纬环流间的活动界面（副高脊面）的动力学研究。揭示副高脊面垂直倾斜的季节变化及其与亚洲夏季风爆发的联系。

(2) 推导出包括大气热力结构的内强迫项以及加热和摩擦的外强迫项的全型垂直涡度倾向方程，用于研究副高的形成机制。

(3) 建立“热力适应”理论，揭示外热源激发大气环流异常的机理，提出了“过流”的概念；揭示夏季青藏高原强烈的加热通过诱发大气纬向非对称不稳定形成南亚高压“东部型”和“西部型”双模态以及准双周振荡的机制。

(4) 建立副热带热力涡度制造和行星涡度平流间的 Sverdrup 平衡关系，揭示副热带加热对大气经向风场的影响，建立副热带“四叶型加热”拼图及其影响副高形成和形态变异的模型，不同形式外热源激发环流异常及副高单体形成的机理，证明地球自转效应及外部加热的垂直分布形态是大气中副高基本形态的决定性因子。

(5) 建立“两级热力适应”理论及拓广的

“Lindzen-Nigam”理论，揭示了热带太平洋印度洋海表面温度异常（Sea Surface Temperature Anomaly, SSTa）的“空间分布型”影响着低纬地区对流降水及副高异常。

(6) 指出夏季西太平洋副热带高压存在明显的年代际变化，与此相对应，5 月海平面气压与随后夏季长江中下游地区降水之间的关系也存在明显的年代际变化。

本文将回顾近 10 a 特别是近 5 a 副热带高压气候动力学的研究进展，涉及南亚高压的建立与维持，其热力结构形成与季节、年际/年代际变化，以及西太平洋副热带高压年际/年代际变化等。

1 南亚高压建立及其维持机理

南亚高压是夏季位于亚洲南部对流层上层和平流层低层的强大而稳定的大气活动中心，是热带环流和季风环流相互作用的纽带。冬季欧亚大陆上空盛行西风，大尺度反气旋环流的高压脊从赤道西太平洋向西延伸到中南半岛南部^[18]，4 月南亚高压在中南半岛上空建立^[19]。

1.1 春季南亚高压建立

LIU, et al^[20]指出春末夏初南亚高压首先在中南半岛东南部和南海上空形成，主导因子是亚洲南部次大陆尺度非绝热加热作用的季节变化，4 月下旬随着菲律宾群岛南部对流的发展加强，由于水平非均匀加热作用在其北部上层形成负涡度强迫源。根据热力适应理论^[21-22]，南海东部上空对流层上层出现偏北风，而上层的北风与其西侧的南风共同构成了闭合的局地反气旋，南亚高压雏形从副热带高压带中分离而出，因此春季南亚高压的受激产生，是大气环流对发生在南海和菲律宾南部的上层对流加热所制造的负涡源的 Gill 型响应（图 1）。LIU, et al^[18]通过分析 LASG 参加 IPCC AR5 气候系统模式 FGOALS-s2 对副热带高压季节变化的模拟能力及其误差原因和物理过程指出，海洋大陆—西太平洋上空的凝结潜热对春季对流层上层的南亚高压的建立最为关键（图 1b—c）。

1.2 夏季青藏—伊朗高原热力强迫与南亚高压的热力结构形成

夏季北半球副热带对流层上层环流的主要特征是存在庞大的南亚高压以及强大的对流层上层温度暖中心（UTTM），但 UTTM 在国际上存在争议^[23-24]。WU, et al^[25]对 UTTM 形成机制做出了新的解释，即南亚大陆对流层上层暖中心的纬度与副

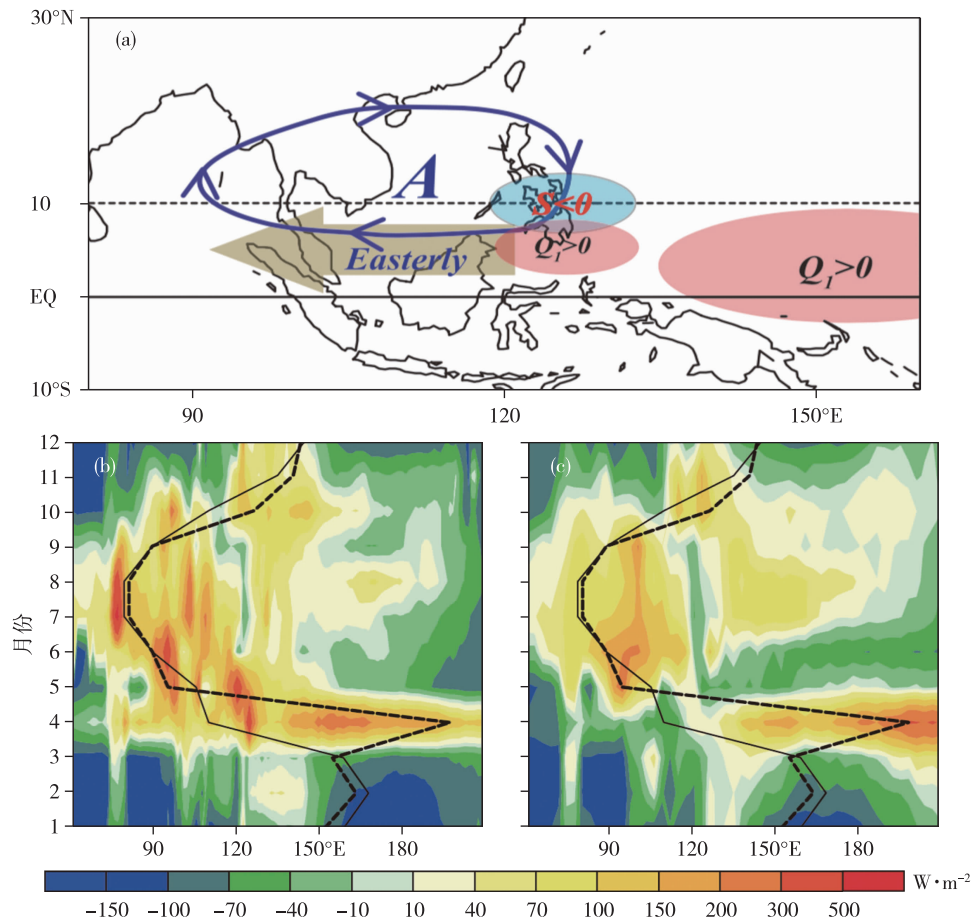


图1 春季南亚高压建立示意(a)、再分析资料(b)和模式(c)模拟的非绝热加热(阴影,单位: $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$)以及南亚高压中心位置季节变化(等值线,实线是再分析资料,虚线是模式结果)^[18,20]

Fig.1 (a) Schematic diagram of the South Asian high formation; the variation of diabatic heating (shading, unit: $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$) and South Asian high center (isoline) along with seasons simulated by (b, solid line) reanalysis data and (c, dashed line) models^[18,20]

高脊线的纬度重合,而它的经度是由大气非绝热加热/冷却的垂直梯度的纬向分布即 $T-Q_z$ 关系来决定。由于在对流层上层对流加热和辐射冷却都随高度递减,加热(冷却)激发出垂直北风(南风)切变,导致加热场西(东)侧和冷却场东(西)侧出现了一个暖(冷)中心(图2、3)。

南亚高压是对流层暖性高压,但在平流层下层为相对冷性的反气旋(图2d)。LIU, et al^[26]和WU, et al^[27]基于数值模拟研究了夏季青藏高原主体上的表面感热加热和潜热加热的特征及其相互作用,以及伊朗—青藏高原感热加热相互作用和影响。从理论和数值模拟上验证了青藏高原上的双加热是通过影响对流层上层的温度场和流场结构形成,在近对流层顶处激发出绝对涡度最小值和异常位涡强迫源;两大高原感热加热存在相互影响和反馈,伊朗高原感热加热减少青藏高原的表面加热,而青藏高原的感热加热减少则增加伊朗高原的表面加热,形成观测到的伊朗高原感热加热—青藏高

原感热加热和凝结潜热释放—大气垂直环流之间的准平衡耦合系统(TIPS)。LIU, et al^[26,28]指出TIPS的加热作用使对流层温度升高,并抬升了其上空的对流层顶,造成平流层下层温度偏低;与欧亚大陆大尺度热力强迫共同作用,形成了对流层上层的暖性但在平流层下层为相对冷性的强大反气旋环流南亚高压,从而影响区域和全球的天气气候。

2 副热带高压的季节变化

2.1 青藏高原和海—气相互作用对季节转换期副高断裂和亚洲夏季风爆发的激发作用

季风爆发的原因一直是影响季节预测的关键科学问题。冬春季,副热带反气旋控制了对流层中层印度洋—西太平洋地区^[18]。WU, et al^[29-30]研究表明孟加拉湾季风爆发涡旋是受到青藏高原和南亚海陆热力对比调控的海—气相互作用的结果。青藏高原在春季使印度上空对流层低层盛行寒冷

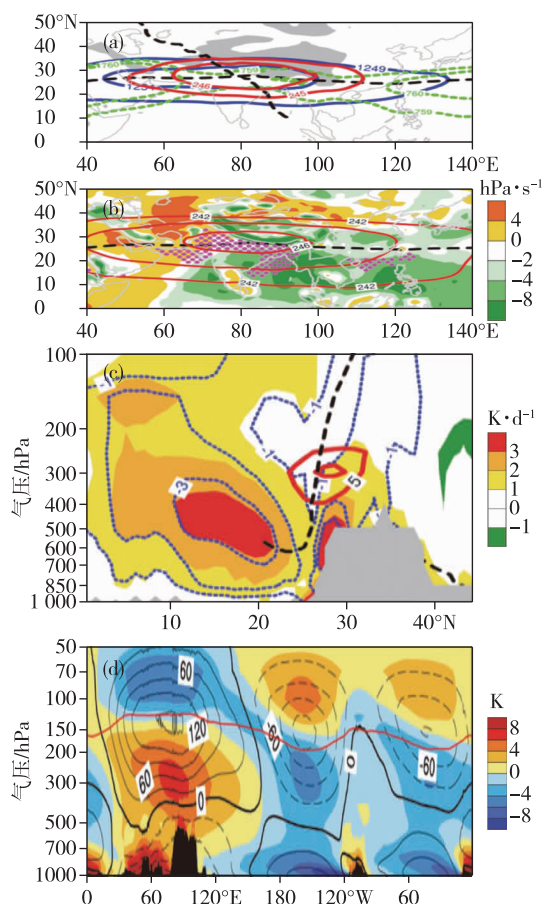


图2 夏季平均(a)200 hPa(蓝色实线)和400 hPa(绿色虚线)位势高度(单位:gpm),200~400 hPa质量加权平均温度(红色实线,单位:K),纬向和经向风零等值线(黑色虚线);(b)500 hPa垂直速度(阴影,单位: $\text{hPa}\cdot\text{s}^{-1}$),200~400 hPa质量加权平均温度(红色轮廓,单位:K),表面熵 $>356\text{ K}$ (紫色点,单位:K),300 hPa风零等值线(黑色虚线);(c)($60^{\circ}\sim 100^{\circ}\text{E}$)平均非绝热加热率 $Q1/c_p$ (阴影,单位: $\text{K}\cdot\text{d}^{-1}$)和非绝热加热率(蓝色虚线,单位: $\text{K}\cdot\text{d}^{-1}$),副高脊线(黑色虚线)和温度对($0^{\circ}\sim 50^{\circ}\text{N}$, $40^{\circ}\sim 160^{\circ}\text{E}$)区域面积平均的偏差(红色实线,单位: $^{\circ}\text{C}$);(d)沿 30°N 的位势高度(等值线,单位:gpm)和温度(阴影,单位:K)的纬向偏差,及用位涡(PV)为2 PVU等值线表示的对流层顶(红粗实线)^[25-26]

Fig.2 The JJA mean distributions of (a) geopotential height at 200 hPa (blue solid) and 400 hPa (green dashed, unit: gpm), 200—400 hPa mass-weighted mean temperature (red solid, unit: K), and zero zonal and meridional wind contours (black dashed); (b) 500 hPa vertical velocity (shading, unit: $\text{hPa}\cdot\text{s}^{-1}$), 200—400 hPa mass-weighted mean temperature (red contour, unit: K), surface entropy $> 356\text{ K}$ (purple stippled, unit: K), and contour of $u = 0$ at 300 hPa (black dashed); (c) ($60^{\circ}\sim 100^{\circ}\text{E}$) mean diabatic heating $Q1/c_p$ (shading, unit: $\text{K}\cdot\text{d}^{-1}$) and adiabatic heating (blue dotted contour, unit: $\text{K}\cdot\text{d}^{-1}$), ridge line (black dashed line), and temperature deviation from the ($0^{\circ}\sim 50^{\circ}\text{N}$, $40^{\circ}\sim 160^{\circ}\text{E}$) area mean (red contour, unit: $^{\circ}\text{C}$); (d) zonal deviation of geopotential height (contour, unit: gpm) and temperature (shading, unit: K), and tropopause (red solid line) represented by potential vorticity (PV) = 2 PVU contour along 30°N in JJA mean based on CFSR reanalysis data (1 PVU = $10^{-6}\text{K}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$)^[25-26]

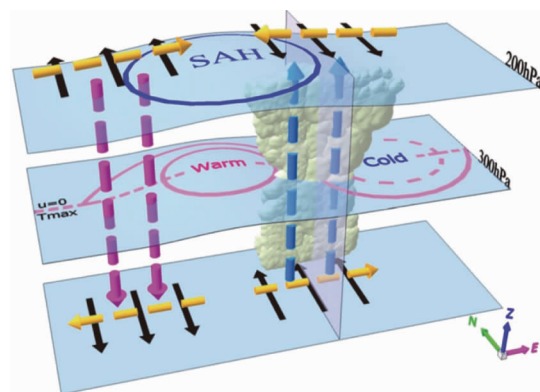


图3 $T-Q_z$ 关系影响对流层暖中心 UTMM 经向位置机理示意^[25]

Fig.3 Schematic diagram of the $T-Q_z$ mechanism contributing to the longitudinal location of the UTMM^[25]

的西北风,因而印度大陆表面感热加热释放,形成了强烈的表面气旋和沿孟加拉湾西北部的西南风。该西南风诱导本地的离岸流和上升流,与近赤道西风一起形成表面反气旋在孟加拉湾大部分地区下沉,使一个独特的 BOB 春季暖池发展和近赤道的气旋环流和孟加拉湾南部上升运动。偏高的大气有效位能转换成动能,导致季风爆发涡旋形成及加剧,并向北移动到海表温度 (Sea Surface Temperature, SST) 较高和表面感热较强的地区,涡旋东部西南风与副热带西风汇合,副热带高压断裂,亚洲夏季风爆发。

2.2 西太平洋副热带高压季节推进异常与淮河梅雨洪涝

梅雨期降水受东亚大气环流的控制,是亚洲气候的组成部分,对其异常的研究及预测具有重要的科学意义和应用价值。HONG, et al^[31] 和刘屹岷等^[32] 研究发现,6月淮河流域洪涝与亚洲环流和中国东部降水联合模态的第二模态密切相关,是东亚和西太平洋季风区季节推进超前的反映,与长江流域洪涝对应的南亚高压和中高纬环流异常几乎相反(图4)。该模态在我国东部降水特征上表现为以长江为界北增南减的“梅雨偶极型”分布:低层风场呈倾斜的以台湾为界,以南地区的西太平洋存在异常气旋环流,以北为反气旋环流。这些特征与前期春季澳大利亚东北向海域海洋关键区热含量异常偏高显著相关,该关键区海洋热含量变化是太平洋热含量变化第一模态—三极型变化的一部分,且从春季到夏季信号稳定。它激发正感热加热异常控制菲律宾以东到夏威夷以北的广大热带—副热带西太平洋地区,其北侧黑潮延伸体区为负感热区。两者共同作用激发出的局地反气旋位于其北部,局

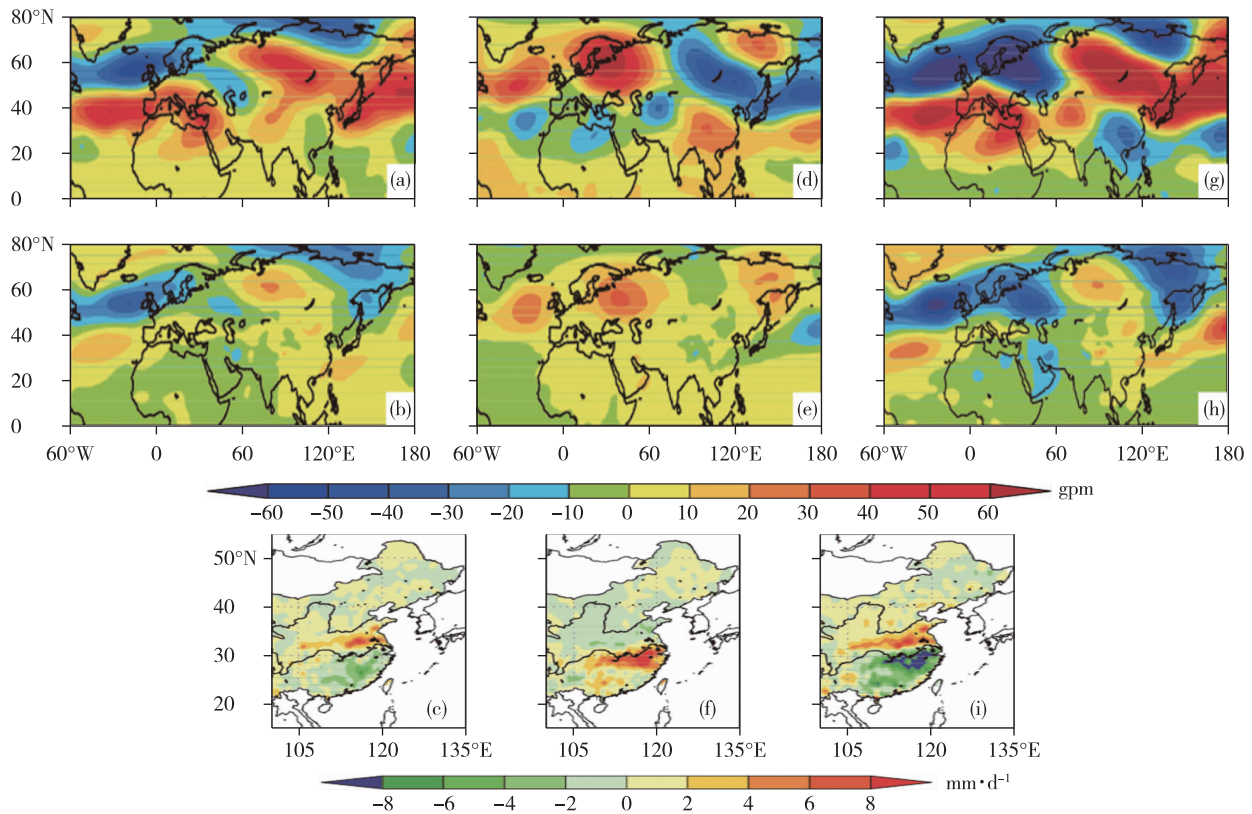


图4 6月合成200 hPa(a,d,g)和850 hPa(b,e,h)位势高度距平场(单位:gpm)及其对应的降水异常场(c,f,i,单位:mm·d⁻¹)^[31];
(a—c)淮河流域洪涝年;(d—f)长江流域洪涝年;(g—i)淮河流域洪涝年减去长江流域洪涝年

Fig.4 Composite geopotential height anomaly at 200 hPa (a,d,g), 850 hPa (b,e,h) (unit:gpm) and precipitation anomaly (c,f,i; unit:mm·d⁻¹) during June flooding period in (a—c) the Huaihe River valley, (d—f) Yangtze River valley, and (g—i) the differences between them

地气旋位于其南部,造成对流层低层西太平洋副热带高压偏北。这种春季三极型海洋热含量分布特征可作为季节预测的前期因子之一。

3 副热带高压的年际变化

3.1 夏季青藏高原—东亚季风加热年际变化对南亚高压的影响

年际尺度上,南亚高原强度异常表现为其西部或东部的位势高度(温度)异常,与高原东部到长江中下游一带的季风潜热释放异常关系密切^[33]。研究发现^[25]潜热加热影响南亚高压的机理在于潜热的垂直分布在对流层上层随高度递减,使东亚副热带地区上层出现反气旋性环流异常,南亚高压东部加强东伸,并激发西传 Rossby 波在中亚地区形成反气旋性异常,造成地中海东岸高层大气的南风暖平流和伊朗高原上空的下沉增温等绝热加热,进而出现局地降水负异常和近地面感热作用的非绝热加热,它们共同作用使南亚高压西部的位势高度升高。两者的关系还表现在季节内和年代际时间尺度上。

3.2 ENSO 对西北太平洋副热带高压异常的影响

ENSO 对副高影响的理论可概括为 3 种:(1)“两级热力适应”:ENSO 通过印度洋海温异常引发的局地对流活动导致冬季印度洋反气旋和春夏印度洋—西太平洋副热带高压加强从而影响亚洲气候^[34-37];(2)“局地海气正反馈”:ENSO 通过引起西北太平洋局地的海—气相互作用和对流层中上层西风异常影响副高^[38-39];(3)“印度洋电容器效应”:ENSO 通过影响印度洋洋盆海—气相互作用变异导致副高异常^[40]。此外,也有研究发现中太平洋冷海温^[41-42]和海洋性大陆暖海温^[43-44]均可增强副高。

近年来,Stuecker, et al^[45]提出了“联合模态”理论,认为西太平洋海温的年循环和 ENSO 之间的非线性相互作用是引起副高变异的关键因素。XIE, et al^[46]提出“印太海洋电容器”理论。随后,一系列研究进一步明晰了 ENSO 对副高影响的物理过程。如 WU, et al^[47]提出“风—湿焔平流强迫机制”,解释了副高变异的季节依赖性;HU, et al^[48]提出了西北太平洋背景场放大器效应,指出 ENSO 的异常信号在西北太平洋的背景气流下会得到放大,有利于副高

异常的发展。此外, El Niño 衰退快慢不同和 ENSO 强度的差异会导致 El Niño 衰退年春季副高变异的维持机制有明显差别^[49-50]。El Niño 衰退快年主要是中太平洋冷海温和海洋性大陆暖海温对副高变异起到维持作用, El Niño 衰退慢年副高变异主要受印度洋暖海温的影响。

3.3 印度洋偶极子型海温对秋季副热带高压和西南降水变异的影响

西南地区秋季降水量占年降水量的 20% 以上, 仅次于夏季。其年际变化涉及副热带高压、中高纬环流及热带海—气相互作用。西南地区东部和西部地区秋季降水的年际变化、显著周期、旱涝异常年份、相关的环流系统等都有明显差异^[51-52]。诊断分析和数值模拟研究均证实秋季副热带环流和西南地区东部降水主要与热带海温异常有关。当赤道东太平洋为暖海温异常, 热带印度洋为西正东负的偶极子型 (Indian Ocean Dipole, IOD) 海温异常时, 分别激发出西北太平洋反气旋和孟加拉反气旋异常, 加强对流层中下层副热带高压, 共同向西南地区东部输送水汽, 造成西南地区东部降水偏多; 滑动相关分析表明, 在 1950s 末到 2010s 末西南地区东部降水与 IOD 相关性较高, 稳定在 0.6 左右^[53]。西南地区西部降水在秋季 3 个月份与不同的环流形势对应, 11 月主要受中高纬波动影响, 与斯堪的纳维亚 (SCA) 遥相关存在显著负相关, 且具有非对称性。SCA 正位相时, 西南地区西部的东侧有暖异常, 而其西侧的印度半岛北部及伊朗高原地区为冷异常, 通过冷平流异常维持了我国西南地区西部对流层中下层的异常下沉运动, 导致降水偏少。

3.4 海—陆—气相互作用对青藏高原热力异常影响副热带高压变异的调控

DUAN, et al^[54] 和 SUN, et al^[55] 研究指出, 与 ENSO 事件相比, 青藏高原感热加热是调节西太平洋副热带高压异常的相对独立的因子。当春季高原感热较强, 随后的夏季西太平洋副热带高压向西延伸, 反之亦然。西太平洋副热带高压通过对西北太平洋的正压反气旋性响应及其南部的气旋性响应引起太平洋上空大尺度环流异常。由于春季和夏季的环流背景不同, 这种响应在春季减弱西太平洋副热带高压, 但在夏季增强。气旋性异常南侧的赤道低层西风通过表层暖平流在赤道中太平洋产生了正 SST 异常, 其所激发的大气 Rossby 波和海洋性锋共同诱发更活跃的瞬时涡旋活动, 为北太平洋异常反气旋的发展提供正反馈并增强了西太平洋上空的大气偶极子异常。因此, 海—气反馈作用往往会强化高原感热对西太平洋副热带高压异常的影响 (图 5)。HE, et al^[56] 指出印度洋海—气相互作用也对青藏—伊朗高原感热影响亚洲大气环流有调制作用。需要注意的是, 海气耦合模式对海温及副热带季风环流平均态模拟的偏差, 使得该调制作用具有一定的不确定性^[28]。

4 副热带高压年代际变化和未来预估

4.1 青藏高原热力强迫影响副高和亚洲气候年代际变化的机制

在年代际尺度上, 空间型类似 ENSO 的太平洋年代际振荡 (Interdecadal Pacific Oscillation, IPO) 和印度洋对 ENSO 的响应的增强通过激发出“太平

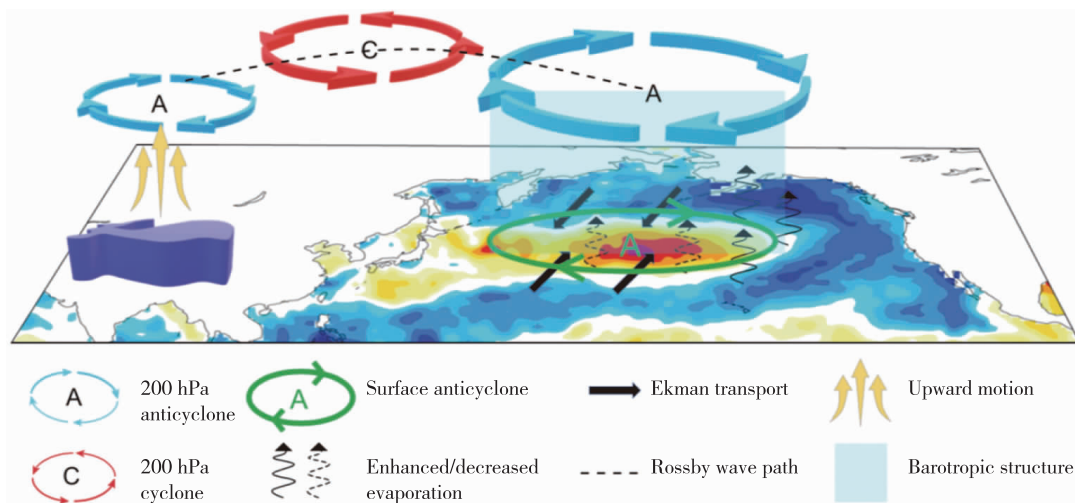


图 5 春季青藏高原加热调节北太平洋海温和环流示意^[28,55]

Fig.5 Schematic showing the role of spring Tibetan Plateau heating in alternating North Pacific sea surface temperature anomaly^[28,55]

洋—日本”遥相关型调制西太平洋副热带高压^[57-60]。在 1900s 后期,伴随着高空北风切变的增强和其西侧南亚高压和对流层上层暖中心的增强,夏季中国南部地区降水呈增加趋势。另一方面,青藏高原抬升的热力效应从 1980s 中期开始存在显著的年代际变化^[61],这主要是由地表风速的持续减弱所决定,与全球变暖进而导致的环流变化紧密联系^[62-63]。在确认近几十年青藏高原的热力强迫存在减弱趋势的基础上,LIU, et al^[63]基于数值模式验证了这些变化导致青藏高原近地面气旋环流和副热带西北太平洋反气旋环流减弱,从中国南海到中国北方占主导地位的南风减弱,导致其产生的正涡度与潜热释放产生的正涡度之间的 Sverdrup 平衡减弱。因此,水汽输送的辐合主限于华南地区,在季风降水中形成了独特的“南湿北干”异常型。青藏高原热源年代际减弱在秋季依然显著,诊断和数值模拟证实秋季东亚副热带环流存在类似的响应,即高原周边主要为反气旋式环流变化,孟加拉湾槽和西太平洋副热带高压减弱(图 6),导致秋季西南地区存在年代际干旱^[53]。因为青藏高原的热力强迫减弱年代际变化与全球变暖区域响应相联系,上述结果为全球变暖背景下亚洲区域气候的预估提供了有效的方法。

4.2 温室气体增加对北半球洋面副高强度变化的影响

基于再分析资料、CMIP3 结果和数值模拟,LI, et al^[64]研究了北半球洋面副高自工业革命前至 1990s 和 2000s 变化及其原因,发现副高强度增强与大气中温室气体增加有关,后者导致“四叶型”非绝热加热^[65]的非均匀性加强,海—陆热力对比也相应加强。近期使用 CMIP5 耦合模式的预估试验同样表明,全球变暖背景下,由于热带西北太平洋降水增多,西太平洋副热带高压强度会增强^[66]。另外,由于 ENSO 经向宽度的变化,ENSO 相关赤道中东太平洋降水增加,使其对副高的影响增强^[67]。但是对西太平洋副热带高压强度的预估受赤道太平洋海温模拟误差的影响^[68]。

5 结论

全型涡度方程和热力适应的理论的提出至今已有 20 a,副热带高压形成和不同时间尺度变化的机制也更加明晰。概括起来:夏季大陆上空的大气加热和海洋上空的大气冷却决定了副高在对流层下层出现在洋面上,而在对流层上层则出现在大陆

上;春季菲律宾群岛南部对流的加强发展在高空形成闭合反气旋环流,南亚高压建立;南亚高压和南亚暖中心不是局地对流形成的,而是大尺度动力学的结果,其中青藏—伊朗高原表面感热加热起着最基本的作用;副热带高压的变化受到青藏高原和太平洋、印度洋和大西洋热力强迫的共同影响。

本文主要回顾了副高季节—年际和年代际时间尺度的变化。在较短时间尺度如天气尺度的台风系统,两者相互制约^[69]。在季节内时间尺度,已有研究揭示了副高东西变化的机理^[70-72],并表明副高不同时间尺度上的变化及影响与基本气流和季节有关,动力强迫也对副高的变化有贡献;陆面过程与海洋和中高纬环流系统相互作用,其综合效应构成了副热带环流的各种时间和空间尺度的复杂变化。另外,如 2020 年超长强梅雨等极端气候事件的发生与副高变异的联系以及预测也是重大挑战。随着观测资料的丰富完善和数值模式能力的提高,进一步理解高原和海—气相互作用对副高的协同影响将有助于季风动力学的完善和气候预测水平的提高。

参 考 文 献

- [1] 陶诗言,徐淑英. 夏季江淮流域持久性旱涝现象的环流特征. 气象学报, 1962, 32(1): 1-10.
Dao S Y, Hsu S Y. Some aspects of the circulation during the periods of the persistent drought and flood in Yantze and Hwai-Ho valleys in summer. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 1962, 32(1): 1-10.
- [2] 陶诗言,徐淑英,郭其蕴. 夏季东亚热带和副热带地区经向和纬向环流型的特征. 气象学报, 1962, 32(1): 91-103.
Dao S Y, Hsu S Y, Kuo C Y. The characteristics of the zonal and meridional circulation over tropical and subtropical regions in eastern Asia in summer. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 1962, 32(1): 91-103.
- [3] 陶诗言. 中国夏季副热带天气系统若干问题的研究. 北京: 科学出版社, 1963.
TAO Shiyan. On the summer synoptic systems in the subtropics over China. Beijing: Science Press (in Chinese), 1963.
- [4] 黄士松,余志豪. 副热带高压结构及其同大气环流有关若干问题的研究. 气象学报, 1962, 31(4): 339-359.
Hwang S S, Yue T H. On the structure of the sub-tropical highs and some associated aspects of the general circulation of atmosphere. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 1962, 31(4): 339-359.
- [5] 黄士松. 副热带高压的东西向移动及其预报的研究. 气象学报, 1963, 33(3): 320-332.
Hwang S S. A study of the longitudinal movement and its forecasting of subtropical anticyclones. Acta Meteorologica Sinica

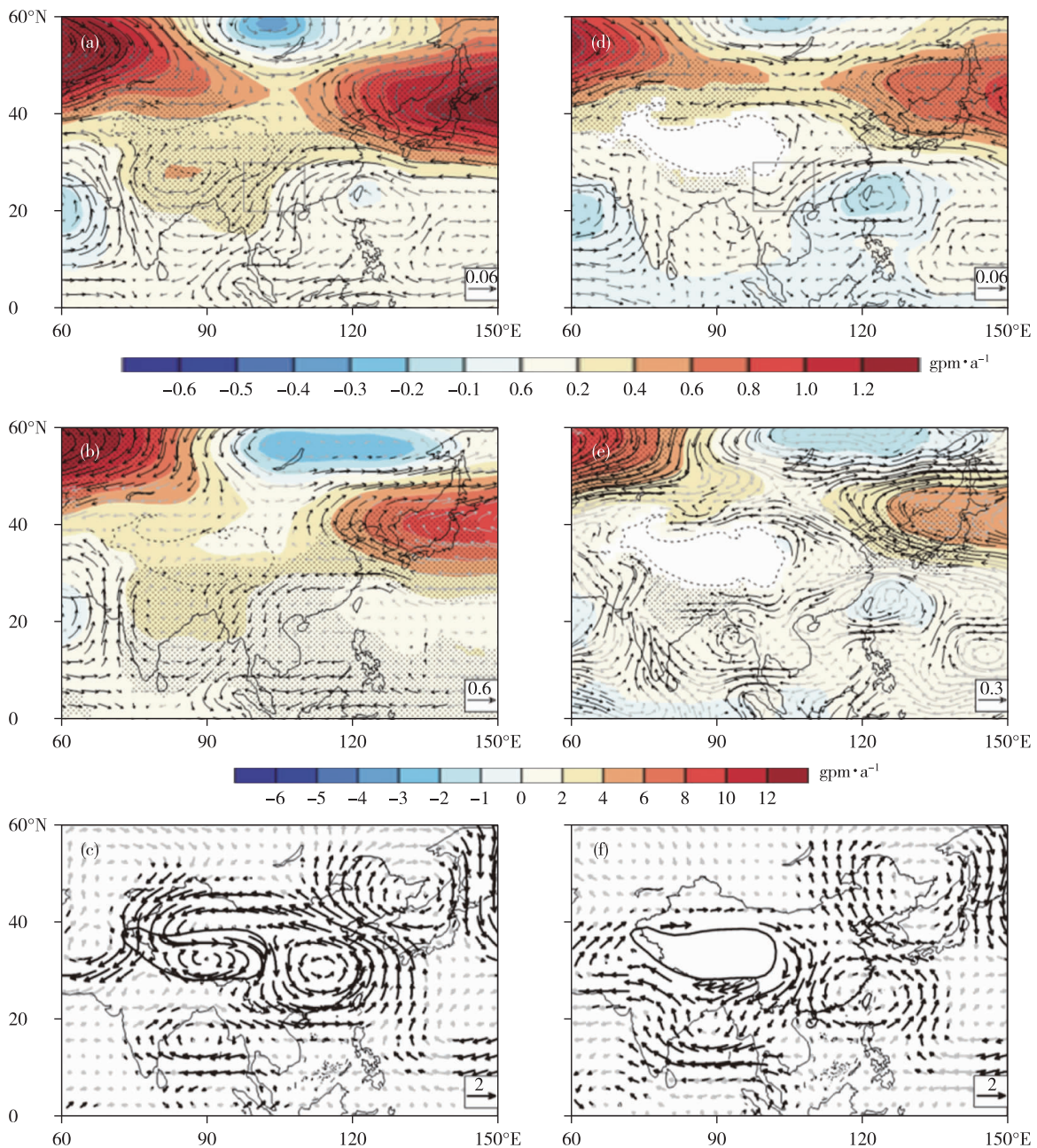


图6 秋季西南地区500 hPa(a,b)与700 hPa(d,e)位势高度(阴影,单位: $\text{gpm}\cdot\text{a}^{-1}$)和风场(矢量,单位: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$)在1980—2010年的变化趋势(a,d)和基于青藏高原感热与中国其他地区降水SVD分解第一模态的感热场时间系数回归场(b,e);大气模式SAMIL2中背景试验减3 000 m以上的青藏高原地表感热通量减半试验的(c)500 hPa和(f)700 hPa风场(打点和黑色矢量表示通过 $\alpha=0.1$ 的置信度检验)^[53]

Fig.6 The autumn geopotential height (shading, unit: $\text{gpm}\cdot\text{a}^{-1}$) and wind (sector, unit: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$) at (a, b) 500 hPa and (d, e) 700 hPa. the linear trend during 1980—2010 (a, d) and the regression on the first SVD mode of surface sensible heating over the Tibetan Plateau and precipitation over the other areas in China (b, e); the difference of wind simulation at (c) 500 hPa and (f) 700 hPa in SAMIL2 between full and half surface sensible heating over the Tibetan Plateau (dotted and black sector indicate passing 90% confidence level)^[53]

(in Chinese), 1963, 33(3):320-332.

[6] 陈云峰, 黄土松与副热带高压研究. 气象科技进展, 2013, 3(2): 79-80.

CHEN Yunfeng, HUANG Shisong and subtropical high. Advances in Meteorological Science and Technology (in Chinese), 2013, 3(2): 79-80.

[7] 杨修群, 黄土松. 马斯克林高压的强度变化对大气环流影响

的数值试验. 气象科学, 1989, 9(2): 125-138.

YANG Xiuqun, HUANG Shisong. The influence of intensity change of Mascarene high on the general circulation of atmosphere—a numerical experiment. Scientia Meteorologica Sinica (in Chinese), 1989, 9(2):125-138.

[8] LI Laifang, LI Wenhong, Kushnir Y. Variation of the North Atlantic subtropical high western ridge and its implication to

- southeastern US summer precipitation. *Climate Dyn.*, 2012, 39 (6): 1401-1412.
- [9] 刘屹岷, 吴国雄. 副热带高压研究回顾及对几个基本问题的再认识. *气象学报*, 2000, 58(4): 500-512.
LIU Yimin, WU Guoxiong. Reviews on the study of the subtropical anticyclone and new insights on some fundamental problems. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 2000, 58(4): 500-512.
- [10] Hoskins B J. On the existence and strength of the summer subtropical anticyclones. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 1996, 77: 1287-1292.
- [11] 吴国雄, 刘屹岷, 任荣彩, 等. 定常态副热带高压与垂直运动的关系. *气象学报*, 2004, 62(5): 587-597.
WU Guoxiong, LIU Yimin, REN Rongcai, et al. Relation between subtropical anticyclone and vertical motion in steady state. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 2004, 62(5): 587-597.
- [12] 钟中, 吴国雄, 沙文钰. 东北太平洋辐合异常对西太平洋副高异常影响的数值试验. *大气科学*, 1999, 23(6): 685-692.
ZHONG Zhong, WU Guoxiong, SHA Wenyu. Numerical simulations of effects of anomaly convergence flow on the subtropical high over the West Pacific Ocean. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 1999, 23(6): 685-692.
- [13] 吴国雄, 刘屹岷, 刘平. 空间非均匀加热对副热带高压带形成和变异的影响 I. 尺度分析. *气象学报*, 1999, 57(3): 257-263.
WU Guoxiong, LIU Yimin, LIU Ping. The effect of spatially nonuniform heating on the formation and variation of sub-tropical high I. scale analysis. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 1999, 57(3): 257-263.
- [14] LIU Y M, WU G X, LIU H, et al. Condensation heating of the Asian summer monsoon and the subtropical anticyclone in the eastern Hemisphere. *Climate Dyn.*, 2001, 17(4): 327-338.
- [15] 吴国雄, 丑纪范, 刘屹岷, 等. 副热带高压研究进展及展望. *大气科学*, 2003, 27(4): 503-517.
WU Guoxiong, CHOU Jifan, LIU Yimin, et al. Review and prospect of the study on the subtropical anticyclone. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 2003, 27(4): 503-517.
- [16] 吴国雄, 刘屹岷, 宇婧婧, 等. 海陆分布对海气相互作用的调控和副热带高压的形成. *大气科学*, 2008, 32(4): 720-740.
WU Guoxiong, LIU Yimin, YU Jingjing, et al. Modulation of land-sea distribution on air-sea interaction and formation of subtropical anticyclones. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 2008, 32(4): 720-740.
- [17] LIU Yimin, WU Guoxiong. Progress in the study on the formation of the summertime subtropical anticyclone. *Adv. Atmos. Sci.*, 2004, 21(3): 322-342.
- [18] LIU Yimin, HU Jun, HE Bian, et al. Seasonal evolution of subtropical anticyclones in the climate system model FGOALS-s2. *Adv. Atmos. Sci.*, 2013, 30(3): 593-606.
- [19] HE Jinhai, WEN Min, WANG Lijuan, et al. Characteristics of the onset of the Asian summer monsoon and the importance of Asian-Australian "Land Bridge". *Adv. Atmos. Sci.*, 2006, 23(6): 951-963.
- [20] LIU Boqi, WU Guoxiong, MAO Jiangyu, et al. Genesis of the South Asian high and its impact on the Asian summer monsoon onset. *J. Climate*, 2013, 26(9): 2976-2991.
- [21] 吴国雄, 刘屹岷. 热力适应、过流、频散和副高 I. 热力适应和过流. *大气科学*, 2000, 24(4): 433-446.
WU Guoxiong, LIU Yimin. Thermal adaptation, overshooting, dispersion, and subtropical anticyclone Part I: thermal adaptation and overshooting. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 2000, 24(4): 433-446.
- [22] 刘屹岷, 吴国雄, 宇如聪, 等. 热力适应、过流、频散和副高 II. 水平非均匀加热与能量频散. *大气科学*, 2001, 25(3): 317-328.
LIU Yimin, WU Guoxiong, YU Rucong, et al. Thermal adaptation, overshooting, dispersion, and subtropical anticyclone Part II: horizontal inhomogeneous heating and energy dispersion. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 2001, 25(3): 317-328.
- [23] Boos W R, KUANG Zhiming. Dominant control of the South Asian monsoon by orographic insulation versus plateau heating. *Nature*, 2010, 463(7278): 218-222.
- [24] WU Guoxiong, LIU Yimin, HE Bian, et al. Thermal controls on the Asian summer monsoon. *Sci. Rep.*, 2012, 2: 404.
- [25] WU Guoxiong, HE Bian, LIU Yimin, et al. Location and variation of the summertime upper-troposphere temperature maximum over South Asia. *Climate Dyn.*, 2015, 45(9): 2757-2774.
- [26] LIU Yimin, WANG Ziqian, ZHUO Haifeng, et al. Two types of summertime heating over Asian large-scale orography and excitation of potential-vorticity forcing II. sensible heating over Tibetan-Iranian Plateau. *Sci. China Earth Sci.*, 2017, 60(4): 733-744.
- [27] WU Guoxiong, ZHUO Haifeng, WANG Ziqian, et al. Two types of summertime heating over the Asian large-scale orography and excitation of potential-vorticity forcing I. over Tibetan Plateau. *Sci. China Earth Sci.*, 2016, 59(10): 1996-2008.
- [28] LIU Yimin, LU Mengmeng, YANG Haijun, et al. Land-atmosphere-ocean coupling associated with the Tibetan Plateau and its climate impacts. *Natl. Sci. Rev.*, 2020, 7(3): 534-552.
- [29] WU Guoxiong, GUAN Yue, WANG Tongmei, et al. Vortex genesis over the Bay of Bengal in spring and its role in the onset of the Asian summer monsoon. *Sci. China Earth Sci.*, 2011, 54(1): 1-9.
- [30] WU Guoxiong, GUAN Yue, LIU Yimin, et al. Air-sea interaction and formation of the Asian summer monsoon onset vortex over the Bay of Bengal. *Climate Dyn.*, 2012, 38(1-2): 261-279.
- [31] HONG Jieli, LIU Yimin. Contrasts of atmospheric circulation and associated tropical convection between Huaihe River valley and Yangtze River valley mei-yu flooding. *Adv. Atmos. Sci.*, 2012, 29(4): 755-768.
- [32] 刘屹岷, 洪洁莉, 刘超, 等. 淮河梅雨洪涝与西太平洋副热带高压季节推进异常. *大气科学*, 2013, 37(2): 439-450.
LIU Yimin, HONG Jieli, LIU Chao, et al. Mei-yu flooding of Huaihe River valley and anomaly of seasonal variation of subtropical anticyclone over the western Pacific. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 2013, 37(2): 439-450.
- [33] ZHANG Pengfei, LIU Yimin, HE Bian. Impact of East Asian

- summer monsoon heating on the interannual variation of the South Asian high. *J. Climate*, 2016, 29(1): 159-173.
- [34] 吴国雄, 刘平, 刘屹岷, 等. 印度洋海温异常对西太平洋副热带高压的影响——大气中的两级热力适应. *气象学报*, 2000, 58(5): 513-522.
- WU Guoxiong, LIU Ping, LIU Yimin, et al. Impacts of the sea surface temperature anomaly in the Indian ocean on the subtropical anticyclone over the western Pacific—two-stage thermal adaptation in the atmosphere. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 2000, 58(5): 513-522.
- [35] 胡雅君, 刘屹岷, 吴琼, 等. 影响江南春雨年际变化的前期海洋信号及可能机理. *大气科学*, 2017, 41(2): 395-408.
- HU Yajun, LIU Yimin, WU Qiong, et al. Preceding oceanic influences on the inter-annual variation of spring persistent rain in Jiangnan of China and the possible mechanism. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2017, 41(2): 395-408.
- [36] LIU Xiaolin, LIU Yimin, WANG Xiaocong, et al. Large-scale dynamics and moisture sources of the precipitation over the western Tibetan Plateau in boreal winter. *J. Geophys. Res.*, 2020, 125(9): e2019JD032133.
- [37] YU W, LIU Y M, WU G X, et al. Impact of North Atlantic SST and Tibetan Plateau forcing on seasonal transition of springtime South Asian monsoon circulation. *Climate Dyn.*, 2020.
- [38] 屈侠. 热带印度洋海温对南亚高压年际和年代际变化的影响及其数值模拟[博士学位论文]. 北京: 中国科学院大学, 2011.
- QU Xia. The influence of sea temperature over tropical Indian ocean on the interannual and interdecadal variations of the South Asian high and its numerical simulation[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences (in Chinese), 2011.
- [39] WANG Bin, WU Renguang, FU Xiouhua. Pacific—East Asian teleconnection: how does ENSO affect East Asian climate? *J. Climate*, 2000, 13(9): 1517-1536.
- [40] XIE Shangping, HU Kaiming, Hafner J, et al. Indian ocean capacitor effect on Indo-western Pacific climate during the summer following El Niño. *J. Climate*, 2009, 22(3): 730-747.
- [41] WANG Bin, XIANG Baoqiang, Lee J Y. Subtropical high predictability establishes a promising way for monsoon and tropical storm predictions. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 2013, 110(8): 2718-2722.
- [42] FAN Lei, Shin SI, LIU Qinyu, et al. Relative importance of tropical SST anomalies in forcing East Asian summer monsoon circulation. *Geophys. Res. Lett.*, 2013, 40(10): 2471-2477.
- [43] LU Riyu, LI Yin, DONG Buwen. External and internal summer atmospheric variability in the western North Pacific and East Asia. *J. Meteor. Soc. Jpn*, 2006, 84(3): 447-462.
- [44] Chung P H, SUI C H, LI T. Interannual relationships between the tropical sea surface temperature and summertime subtropical anticyclone over the western North Pacific. *J. Geophys. Res.*, 2011, 116(D13): D13111.
- [45] Stuecker M F, JIN Feifei, Timmermann A, et al. Combination mode dynamics of the anomalous Northwest Pacific anticyclone. *J. Climate*, 2015, 28(3): 1093-1111.
- [46] XIE Shangping, Kosaka Y, DU Yan, et al. Indo-western Pacific ocean capacitor and coherent climate anomalies in post-ENSO summer: a review. *Adv. Atmos. Sci.*, 2016, 33(4): 411-432.
- [47] WU Bo, ZHOU Tianjun, LI T. Atmospheric dynamic and thermodynamic processes driving the western North Pacific anomalous anticyclone during El Niño. Part II: formation processes. *J. Climate*, 2017, 30(23): 9637-9650.
- [48] HU Kaiming, HUANG Gang, XIE Shangping, et al. Effect of the mean flow on the anomalous anticyclone over the Indo-Northwest Pacific in post-El Niño summers. *Climate Dyn.*, 2019, 53(9): 5725-5741.
- [49] 刘屹岷, 刘伯奇, 任荣彩, 等. 当前重大厄尔尼诺事件对我国春夏气候的影响. *中国科学院院刊*, 2016, 31(2): 241-250.
- LIU Yimin, LIU Boqi, REN Rongcai, et al. Current super El Niño event and its impacts on climate in China in spring and summer. *Bulletin of the Chinese Academy of Sciences* (in Chinese), 2016, 31(2): 241-250.
- [50] JIANG Wenping, HUANG Gang, HUANG Ping, et al. Northwest Pacific anticyclonic anomalies during post-El Niño summers determined by the pace of El Niño decay. *J. Climate*, 2019, 32(12): 3487-3503.
- [51] 刘扬, 刘屹岷. 我国西南地区秋季降水年际变化的空间差异及其成因. *大气科学*, 2016, 40(6): 1215-1226.
- LIU Yang, LIU Yimin. Spatial pattern and causes of interannual variability of autumn rainfall in Southwest China. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2016, 40(6): 1215-1226.
- [52] 刘扬, 刘屹岷. 斯堪的纳维亚遥相关对我国西南西部深秋降水的影响. *气候与环境研究*, 2017, 22(1): 80-88.
- LIU Yang, LIU Yimin. The impact of the Scandinavian teleconnection pattern on late autumn rainfall in the western region of Southwest China. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 2017, 22(1): 80-88.
- [53] 刘扬. 中国西南秋季降水变化及其机理研究[博士学位论文]. 北京: 中国科学院大学, 2016.
- LIU Yang. Study of the autumn rainfall variability and its mechanism in Southwest China[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences (in Chinese), 2016.
- [54] DUAN Anmin, SUN Ruizao, HE Jinhai. Impact of surface sensible heating over the Tibetan Plateau on the western Pacific subtropical high: a land-air-sea interaction perspective. *Adv. Atmos. Sci.*, 2017, 34(2): 157-168.
- [55] SUN Ruizao, DUAN Anmin, CHEN Lilan, et al. Interannual variability of the North Pacific mixed layer associated with the spring Tibetan Plateau thermal forcing. *J. Climate*, 2019, 32(11): 3109-3130.
- [56] HE Bian, LIU Yimin, WU Guoxiong, et al. The role of air-sea interactions in regulating the thermal effect of the Tibetan—Iranian plateau on the Asian summer monsoon. *Climate Dyn.*, 2019, 52(7-8): 4227-4245.
- [57] HUANG Gang, HU Kaiming, XIE Shangping. Strengthening of tropical Indian ocean teleconnection to the Northwest Pacific since the mid-1970s: an atmospheric GCM Study. *J. Climate*, 2010, 23(19): 5294-5304.

- [58] FENG Juan, WANG Lin, CHEN Wen. How does the East Asian summer monsoon behave in the decaying phase of El Niño during different PDO phases? *J. Climate*, 2014, 27(7): 2682-2698.
- [59] SONG Fengfei, ZHOU Tianjun. The crucial role of internal variability in modulating the decadal variation of the East Asian summer monsoon—ENSO relationship during the twentieth century. *J. Climate*, 2015, 28(18): 7093-7107.
- [60] WU Bo, ZHOU Tianjun, LI T. Impacts of the Pacific—Japan and circumglobal teleconnection patterns on the interdecadal variability of the East Asian summer monsoon. *J. Climate*, 2016, 29(9): 3253-3271.
- [61] DUAN Anmin, WU Guoxiong. Weakening trend in the atmospheric heat source over the Tibetan Plateau during recent decades. Part I: observations. *J. Climate*, 2008, 21(13): 3149-3164.
- [62] DUAN Anmin, WU Guoxiong. Weakening trend in the atmospheric heat source over the Tibetan Plateau during recent decades. Part II: connection with climate warming. *J. Climate*, 2009, 22(15): 4197-4212.
- [63] LIU Yimin, WU Guoxiong, HONG Jieli, et al. Revisiting Asian monsoon formation and change associated with Tibetan plateau forcing: II. change. *Climate Dyn.*, 2012, 39(5): 1183-1195.
- [64] LI Wenhong, LI Laifang, TING Mingfang, et al. Intensification of Northern Hemisphere subtropical highs in a warming climate. *Nat. Geosci.*, 2012, 5(11): 830-834.
- [65] WU Guoxiong, LIU Yimin. Summertime quadruplet heating pattern in the subtropics and the associated atmospheric circulation. *Geophys. Res. Lett.*, 2003, 30(5): 1201.
- [66] HE Chao, WU Bo, ZOU Liwei, et al. Responses of the summertime subtropical anticyclones to global warming. *J. Climate*, 2017, 30(16): 6465-6479.
- [67] YAN Zixiang, WU Bo, LI T, et al. Eastward shift and extension of ENSO—induced tropical precipitation anomalies under global warming. *Sci. Adv.*, 2020, 6(2): eaax4177.
- [68] CHEN Xiaolong, ZHOU Tianjun, WU Peili, et al. Emergent constraints on future projections of the western North Pacific subtropical high. *Nat. Commun.*, 2020, 11: 2802.
- [69] REN Suling, LIU Yimin, WU Guoxiong. Interaction between typhoon and western Pacific subtropical anticyclone: data analyses and numerical experiments. *Acta Meteor. Sin.*, 2008, 22(3): 329-341.
- [70] GUAN Weina, HU Haibo, REN Xuejuan, et al. Subseasonal zonal variability of the western Pacific subtropical high in summer: climate impacts and underlying mechanisms. *Climate Dyn.*, 2019, 53(5): 3325-3344.
- [71] REN Xuejuan, YANG Xiuqun, SUN Xuguang. Zonal oscillation of western Pacific subtropical high and subseasonal SST variations during Yangtze persistent heavy rainfall events. *J. Climate*, 2013, 26(22): 8929-8946.
- [72] 李熠, 杨修群, 谢倩. 北太平洋副热带高压年际变异与 ENSO 循环之间的选择性相互作用. *地球物理学报*, 2010, 53(7): 1543-1553.
- LI Yi, YANG Xiuqun, XIE Qian. Selective interaction between interannual variability of North Pacific subtropical high and ENSO cycle. *Chinese Journal of Geophysics (in Chinese)*, 2010, 53(7): 1543-1553.