

青藏高原 7 月地面感热准 2a 振荡及其形成机理¹

王春学¹, 周长艳^{*1}, 李娜², 齐冬梅¹, 任倩¹

1. 四川省气候中心/高原与盆地暴雨旱涝灾害四川省重点实验室, 四川 成都 610072

2. 成都信息工程大学大气科学学院, 四川 成都 610225

摘要 利用基于最大熵增模型 (MEP) 的青藏高原地面感热资料、NCEP/NCAR 再分析资料、气象台站观测资料, 采用多锥度一奇异值分解 (MTM-SVD) 方法, 研究了青藏高原 7 月地面感热准 2a 周期特征。结果表明: 1980-2018 年青藏高原 7 月地面感热存在显著的准 2a 周期, 表现为东西反向异常的交替循环。作为青藏高原地面感热的直接影响因子, 地面风和地气温差在准 2a 周期循环中均对感热为正贡献, 其中地气温差的贡献更大。大气环流和海温的协同分析表明, 在青藏高原 7 月地面感热准 2a 周期典型循环下, 第一年春末夏初赤道中东太平洋 La Niña 位相逐渐发展增强, 7 月西太平洋副热带高压偏北偏西, 东亚副热带西风急流偏北, 青藏高原中东部 (西部) 低层异常辐散 (辐合)、高层异常辐合 (辐散), 出现异常下沉 (上升) 运动。这种环流形式对青藏高原东部 (西部) 云的生成不利 (有利), 而云量的减少 (增加) 使地面获得更多 (少) 的太阳辐射, 从而引起地气温差的增加 (减小), 最终导致青藏高原东部 (西部) 地面感热增大 (减小)。综上所述, 在青藏高原 7 月感热准 2a 周期循环下, 第一年 La Niña 增强、西太平洋副热带高压偏北偏西、东亚副热带西风急流偏北, 青藏高原地面感热东强西弱, 第二年大气环流和海温异常情况与第一年相反, 青藏高原地面感热转变为东弱西强。

关键字: 青藏高原, 多锥度奇异值分解, 周期, 地面感热

文章编号

中图分类号 P461

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2507.24144

Quasi-2-year oscillation of Surface Sensible Heat over the Tibetan Plateau in July and its formation mechanism

WANG Chunxue¹, ZHOU Changyan^{*1}, LI Na², QI Dongmei¹, REN Qian¹

1. Sichuan Climate Center/Heavy Rain and Drought-Flood Disasters in Plateau and Basin Key Laboratory of Sichuan Province, Chengdu 610072

2. College of Atmospheric Science, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610025

Abstract: Using the surface sensible heat data over the Tibetan Plateau based the Maximum Entropy Production (MEP), NCEP/NCAR reanalysis data, and meteorological station observations, the quasi-2-year cycle characteristics of the sensible heat over the Tibetan Plateau in July were investigated using the multi-taper-singular value decomposition (MTM-SVD) method. The results show that there is a significant quasi-2-year cycle of July surface sensible heat on the Tibetan Plateau from 1980-2018, which is manifested as an alternating cycle of eastern and western reverse anomalies. As direct influences on sensible heat, surface winds, and ground-air

¹收稿日期 2024-12-26; 网络预出版日期

作者简介 王春学, 高级工程师, 主要从事气候监测诊断研究. E-mail: wangchunxue2009@163.com

通讯作者 周长艳, E-mail: zcy001124@163.com

基金项目 国家自然科学基金 联合基金项目 U2342209

Funded by National Natural Science Foundation of China Joint Fund Project U2342209

temperature difference contribute positively to sensible heat in the quasi-2-year cycle, with ground-air temperature difference contributing more. The synergistic analysis of atmospheric circulation and SST reveals that, under the typical cycle of the quasi-2-year cycle of surface sensible heat in July on the Tibetan Plateau, the La Niña phase appeared in the east-central equatorial Pacific Ocean in the first year of late spring/early summer and gradually developed and strengthened, and then the subtropical high pressure deviated to the north and west and the subtropical westerly rapids deviated to the north in July, which resulted in the anomalous divergence (convergence) of the low level and the anomalous convergence (divergence) of the high level in the east-central (western) Tibetan Plateau and an anomalous sinking (ascending) motion. This form of circulation is unfavorable (favorable) to the generation of clouds in the eastern (western) part of the Tibetan Plateau. The reduction of clouds in the eastern (western) part of the plateau makes the ground receive more (less) solar radiation, which causes an increase (decrease) of the ground-air temperature difference and ultimately leads to a greater (less) sensible heat. In summary, under the quasi-2-year cycle of July sensible heat on the Tibetan Plateau, in the first year, La Niña is strengthened, the subtropical high pressure in the western Pacific Ocean is to the north and west, and the subtropical westerly rapids in East Asia are to the north, so that the surface sensible heat on the Tibetan Plateau is strong in the east and weak in the west. The anomalies of the atmospheric circulation and the SST in the second year are opposite to those in the first year, so that the surface sensible heat on the Tibetan Plateau is transformed to be weak in the east and strong in the west.

Key words: Tibetan Plateau, MTM-SVD, Cycle, Surface sensible heat

1 引言

青藏高原及其热源效应对东亚以及全球的天气气候起着举足轻重的作用（姚秀萍等，2019）。在叶笃正等（1957）提出高原夏季为热源、冬季为冷源之后，有关青藏高原大气热源的研究受到了广泛关注（Yanai et al., 1992; Wu and Zhang, 1998; Yang et al., 2011）。青藏高原地面感热对高原及其周边的天气、气候以及地表能量平衡等均有重要影响（Xie et al., 2020; Wu et al., 2007; 王慧等, 2022）。研究表明青藏高原春季感热偏强时，华南地区盛夏降水普遍偏少，反之则偏多（Sun et al., 2023）；青藏高原夏季感热异常还可以诱发川渝地区降水量的变化（梁玲等, 2013）；而青藏高原 5 月感热偏弱时，异常偏强的南风携带更多暖湿气流到达新疆，导致北疆夏季降水偏多（赵勇等, 2013）；青藏高原感热增强并向东传播有利于长江流域降水的发生（Duan et al., 2012）。青藏高原感热与区域温度异常也有一定关联，当高原东部感热出现南弱北强异常型时，我国东北和华南地区的气温会异常偏低（任倩等, 2019）。还有研究指出高原感热异常可以影响西太平洋副热带高压的强弱和位置，冬春季青藏高原多雪可以引起地面感热的减弱，进而导致西太平洋副热带高压偏弱、位置偏南（张顺利和陶诗言, 2001）；并且与 ENSO 事件相比，高原感热可以作为调节副高异常的一个相对独立因素（Duan et al., 2017）。另外还有研究指出，高原感热异常与印度夏季风爆发早晚（张盈盈等, 2015）、高原低涡生成（李国平等, 2002）以及南亚大气环流强弱（Liu et al., 2021）均关系密切。

有关青藏高原感热时空变化特征方面也有大量研究，但是由于研究时段、站点选取和所用资料的差异，结果不尽相同。1980-1990 年代，青藏高原感热减弱趋势的结论较为一致（王慧等, 2022; 雷润芝等, 2023）。2000 年以来青藏高原感热的变化趋势差异较大，有些研究指出 2000 以来青藏高原感热呈逐渐增强的变化趋势（王慧等, 2022; 王树舟等, 2023），但也有研究发现青藏高原感热为减弱趋势（Han et al., 2017; Li et al., 2024），还有研究表明 2000 年以来青藏高原感热呈先增强后减弱的变化特征（雷润芝等, 2023）。

部分研究从地气温差、地面风速以及遥相关等方面分析了青藏高原感热异常的原因。王慧等（2022）认为，地面风速和地气温差是影响青藏高原感热的主要因子，地面风速的减小对高原四季地表感热的减弱趋势均有重要贡献；有研究表明，2001-2012 年青藏高原雅鲁藏布江流域由于地气温差的增加感热出现增强趋势（Han et al., 2017）。另外，Fan et al.（2022）指出，青藏高原夏季感热年际变化主要为东西反向模式，并且与北大西洋-东北亚模式密切相关。Han et al.（2024）指出，冬季欧亚大陆北部积雪深度过多会导致初夏融雪量增加，使对流层中上层的大气变冷，这种冷却增强了中纬度地区的西风急流，增强青藏高原上空的感热通量。

大量研究表明，青藏高原感热是影响东亚气候的重要信号，同时青藏高原感热本身也存在明显的年际和年代际波动，并且地面风速和地气温差是感热异常的直接因子。部分研究也指出青藏高原感热通量存在 2a、4a、8a 等显著周期信号（顾思南等, 2015; 张超等, 2018），但是有关其周期变化规律和形成机理的研究还很少，进一步分析其周期信号特征对科学理解青藏高原感热多尺度变化规律有重要的科学意义。本文将使用基于 MEP 模型的青藏高原感热资料，利用多锥度-奇异值分解（Multi Taper Method-Singular Value Decomposition, MTM-SVD）方法分析青藏高原感热的周期循环特征，并深入分析其可能形成机理，从而增强对青藏高原感热变化规律的科学认识，也可以为开展青藏高原气候预测提供相关技术支撑。

2 资料和方法

Wang et al.（2009）研究发现，利用 MEP 模型计算地表热通量较传统方法在复杂地形下的误差更小。本文使用的感热资料为 Li et al.（2019）基于 MEP 模型和多种再分析资料（ERA5、ERA-Interim、JRA-55 和 MERRA-2），通过剔除平均偏差融合计算得到的青藏高原感热通量资料，时间范围 1980-2018 年，时间分辨率为月，空间分辨率 $1.0^{\circ} \times 1.0^{\circ}$ 。还使用了同期青藏高原 157 个国家气象站地温、气温和地面风速观测资料；以及同期 NCEP/NCAR 月平均高度场、风场、垂直速度和总云量等再分析资料，分辨率为 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ 。

MTM-SVD 方法是由 Mann and Park（1994）提出的一种多变量频域分解技术。这是一种将谱分析的多锥度方法（Multi-Taper Method, MTM）和变量场的奇异值分解（Singular Value Decomposition, SVD）方法结合在一起的气候信号检测技术，具体计算过程如下：

（1）信号检测：假设有 M 个站点的变量场 $\varphi_m(t)$ ，首先对原始变量其进行标准化处理。然后对标准化变量场的每个序列执行单一变量 MTM 过程，将其转化为谱域。即通过时间序列与一族斯雷皮亚锥度相乘计算出 S 个独立特征谱 $Y_m^s(f)$ 。为特征谱 $Y_m^s(f)$ 的每个频率构造一个矩阵，给定频率 f_0 的矩阵 $Y(f_0)$ 如下：

$$Y(f_0) = \begin{bmatrix} Y_1^1(f_0) & Y_1^2(f_0) & \cdots & Y_1^S(f_0) \\ Y_2^1(f_0) & Y_2^2(f_0) & \cdots & Y_2^S(f_0) \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ Y_M^1(f_0) & Y_M^2(f_0) & \cdots & Y_M^S(f_0) \end{bmatrix} \quad (1)$$

对每个矩阵计算复数的奇异值分解得到矩阵 $U(f_0)$ ， $L(f_0)$ 和 $V^+(f_0)$ 。

$$Y(f_0) = U(f_0) * L(f_0) * V^+(f_0), \quad (2)$$

每个矩阵 $Y(f_0)$ 可以构造为:

$$Y_m^s(f_0) = \sum_{k=1}^K U_m^k(f_0) \gamma_k(f_0) V_s^k(f_0). \quad (3)$$

第一个模态奇异值解释的局部方差百分比 (Local Fractional Variance, LFV) 为:

$$(LFV) = \frac{\gamma_1^2(f)}{\sum_{k=1}^K \gamma_k^2(f)} \quad (4)$$

LFV 谱的峰值预示着在对应频率处有潜在周期信号, 利用蒙特卡洛方法对 LFV 进行显著性检验, 同时在频率接近 0 的区域也可以检测出长期变化趋势。

(2) 信号重建: LFV 谱在频率 f_0 处的显著峰值对应的第一模态空间 EOF 由复数向量 $U_m^1(f_0)$ 表示, 它不仅代表信号在频率 f_0 处的空间模态, 也包含变量场有关信号的位相和振幅信息。可以重新获得带有正确单位的第一模态信号空间模式:

$$E_m^1 = \delta(f_0) \sigma_m U_m^1(f_0). \quad (5)$$

信号的时间模式可以表示为频率上的主要振动, 如下:

$$A^1(t) = R\{\alpha(t) e^{-i2\pi f_0 t}\}, \quad (6)$$

(3) 耦合重建: 可以将 MTM-SVD 技术扩展到多个变量场的耦合重建, 提取不同变量场在某时刻的耦合关系, 从而分析特定周期下不同变量的协同演变关系 (Mann and Park, 1996)。

3 结果与分析

3.1 周期特征

首先使用 MTM-SVD 方法分别对 1980-2018 年青藏高原 1-12 月感热场进行周期分析(表 1), 结果显示 1 月、4 月、6 月和 8 月的感热无显著周期, 其他月份主要为 2-4a 的年际周期, 其中 3 月、7 月、9 月和 12 月均有显著的准 2a 周期, 并且只有 7 月的 2.2a 周期达到了 99% 置信度水平 (7 月 LFV 谱分析见图 1), 所以本文重点分析青藏高原 7 月感热的准 2a 周期变化特征。

表 1 青藏高原逐月感热周期

Tab1 Cycle of sensible heat on the Tibetan Plateau from January to December

月份	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月
												4.5a*
												2.7a*
周期	无	2.8a*	2.2a*	无	4.2a*	无	2.2a**	无	2.0a*	2.5a*	2.8a*	2.2a*

*95%置信度、**99%置信度

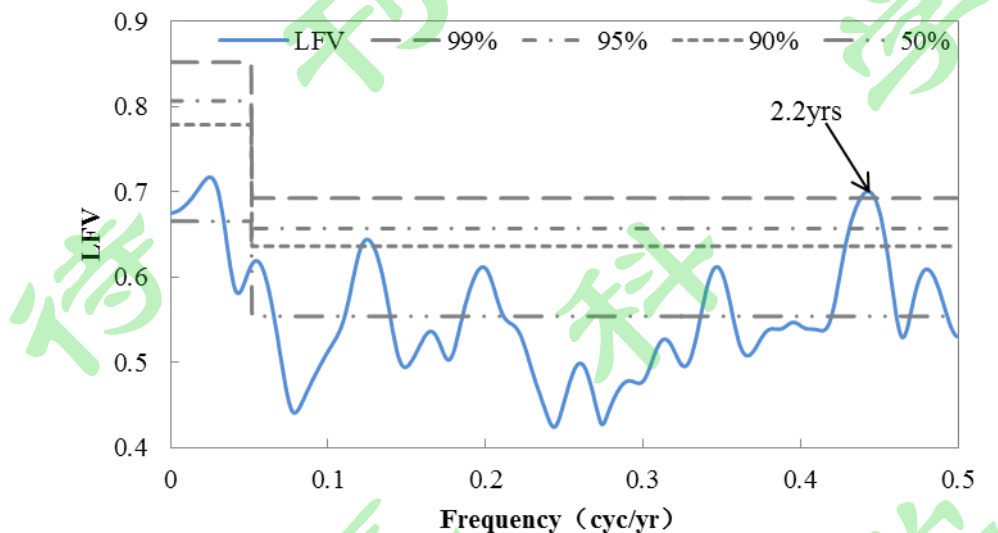


图 1 1980-2018 年青藏高原 7 月感热 LFM (Local Fractional Variance) 谱分析。虚线：蒙特卡洛置信水平

Fig. 1 The LFM (Local Fractional Variance) spectra of surface sensible heat in July on the Tibetan Plateau form 1980 to 2018. Dashed line: Monte Carlo confidence level

利用 MTM-SVD 方法对青藏高原 7 月地面感热的准 2a 周期进行空间典型循环重建，给出不同位相下感热距平值的空间分布。可以看到，第一年（0°位相）青藏高原西南部感热负异常，其余地区为正异常，其中西南部和东南部分别出现异常大值中心（图 2a）；第二年（180°位相）青藏高原感热异常分布与第一年相反（图 2b）；第三年（360°位相）开始下一个准 2a 典型循环，与第一年感热异常分布一致（图略）。

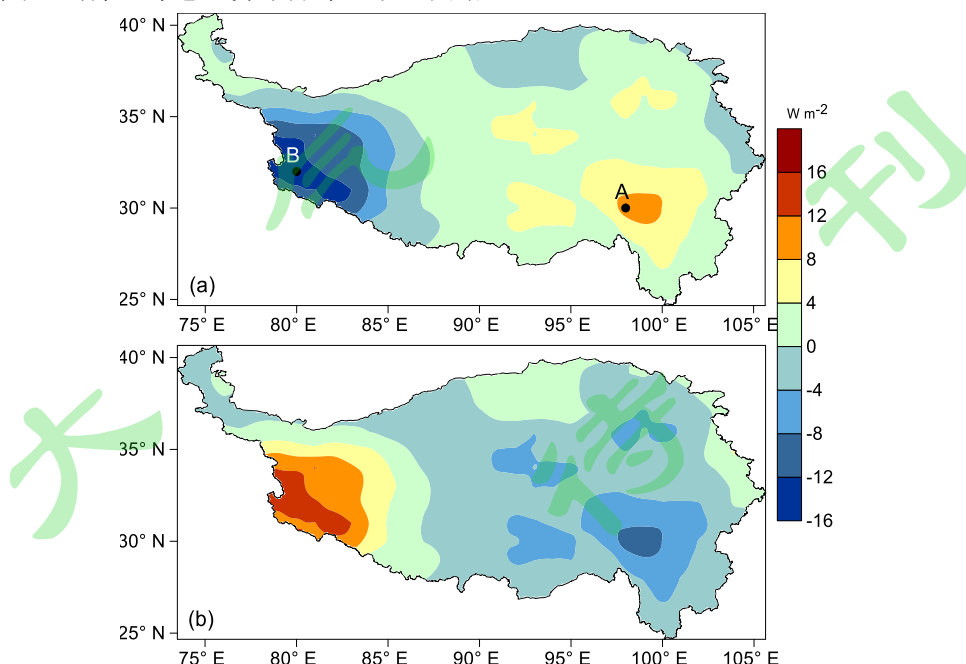


图 2 青藏高原 7 月感热准 2a 周期典型循环重建 (a: 0°位相, b: 180°位相)。等值线为感热距平 (单位: W m^{-2})。A、B 为异常大值中心点, A 位于金沙江中游, 海拔高度 2500m 左右, 邻近气象站为巴塘站; B 位于阿里地区戈壁滩, 海拔高度 4200m 左右, 邻近气象站为狮泉河站

Fig. 2 Spatial reconstruction of evolutions of the sensible heat in July on the Tibetan Plateau at the quasi-2-year (a: phase 0°, b: phase 180°). The contour value is sensible heat anomaly (unit: W m^{-2}).

A and B are the centers of anomalously large values. A is located in the middle reaches of the Jinsha River, with an altitude of about 2500m, and the neighboring meteorological station is the Batang station; B is located in the Gobi Beach of the Ali region, with an altitude of about 4200m, and the neighboring meteorological station is the Shiquanhe station.

上文分析指出, 青藏高原 7 月感热具有显著的准 2a 周期循环, 并且空间上表现为东西反向异常, 为了研究这种典型循环是否稳定存在, 分别选择东南部和西南部的感热异常大值中心位置为代表点(图 2 中 A 和 B), 在准 2a 周期上进行时间重建。可以看到(图 3), 1980-2018 年青藏高原 7 月感热的准 2a 周期信号一直存在, 但其强度存在波动变化, 其中 1985 年、1998 年、2005 年和 2011 年前后为周期信号调整阶段, 并且在调整前后典型循环位相出现反转, 其余阶段准 2a 周期信号均较强。

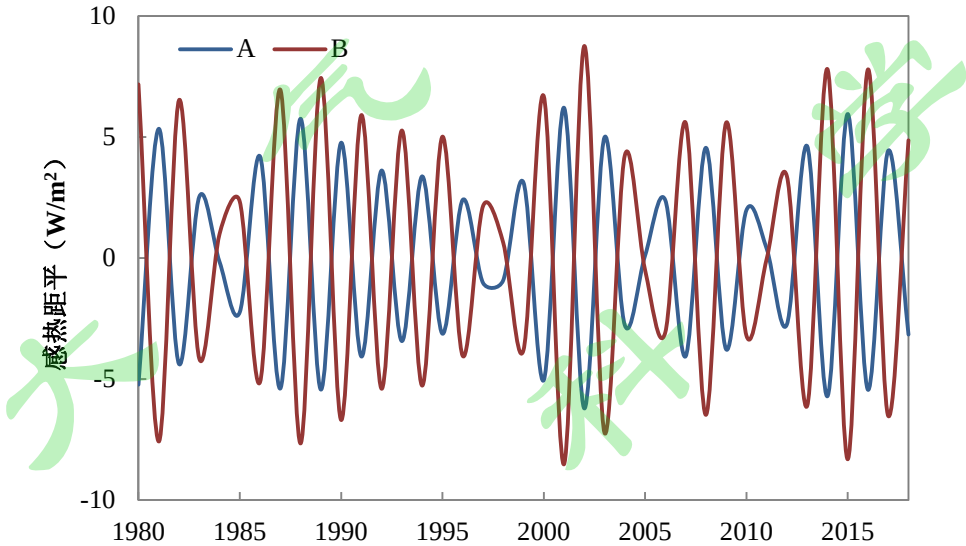


图 3 青藏高原代表点 A (32°N, 80°E) 和 B (30°N, 98°E) 7 月感热准 2a 周期典型循环时间重建

Fig. 3 Temporal reconstruction of the sensible heat in July of the representative point A (32°N, 80°E) and B (30°N, 98°E) at the quasi-2-year

3.2 影响因子分析

从物理定义来看, 感热通量主要表征地面与大气之间通过湍流交换的热量, 地气温差和地面风是核心驱动力, 分别反应了热力强迫和动力强迫作用 (Duan and Wu, 2008), 是地面感热异常的直接影响因子。利用 MTM-SVD 方法对青藏高原 7 月感热和地表风速耦合场在准 2a 周期上进行典型循环空间重建, 从而得到与感热典型循环所对应的地表风速协同变化。可以看到(图 4), 第一年(高原感热东强西弱), 青藏高原东部, 尤其东南部地表风速异常增强, 西部和北部地区地表风速减弱, 西部出现负异常大值中心。第二年(高原感热东弱西强), 地面风速异常型与第一年相反。与感热典型循环(图 2)对比可知, 西部感热异常大值中心与地表风速异常大值中心吻合度更高, 即在准 2a 循环中, 青藏高原西部地区感热对地表风的响应比东部敏感。

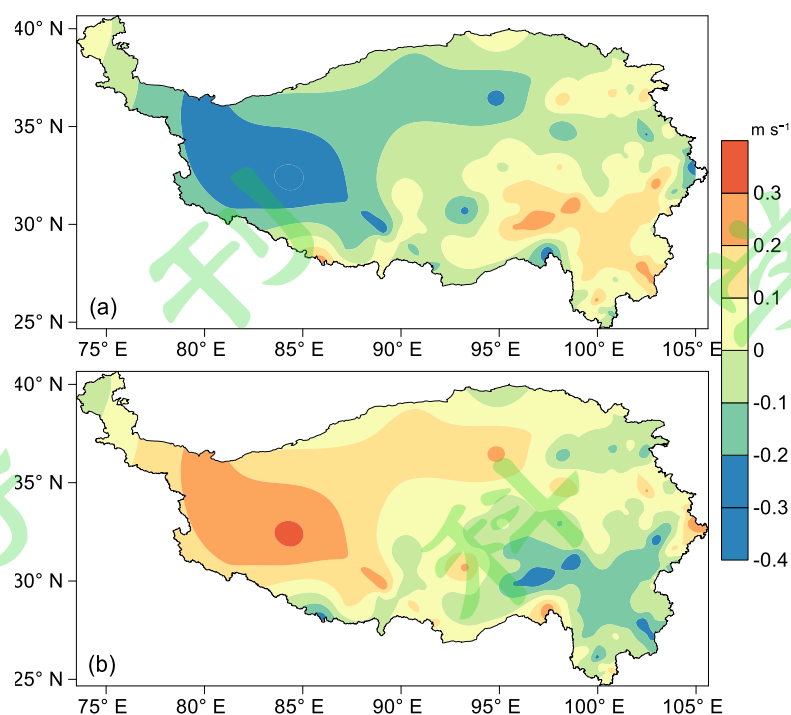


图 4 青藏高原 7 月感热与地表风速耦合场在准 2a 周期上的典型循环重建 (a: 0°位相, b: 180°位相)。等值线为地面风速距平 (单位: m/s)

Fig. 4 Spatial joint reconstruction of the sensible heat in July on the Tibetan Plateau and the surface wind speed at quasi-2-year cycle (a: phase 0°, b: phase 180°). The contour value is surface wind speed anomaly (unit: m/s)

用同样的方法,重建青藏高原 7 月感热和地气温差耦合场在准 2a 周期上的典型循环(图 5),第一年,青藏高原中东部地气温差明显增大,东南部出现正异常大值中心;西部地区地气温差减小,西南部出现负异常大值中心。第二年,地气温差异常型与第一年相反。与感热典型循环(图 2)对比可知,青藏高原东部和西部感热异常大值中心与地气温差异常大值中心吻合度均较高,即在准 2a 循环中,青藏高原感热对地气温差的响应比地面风更加敏感。

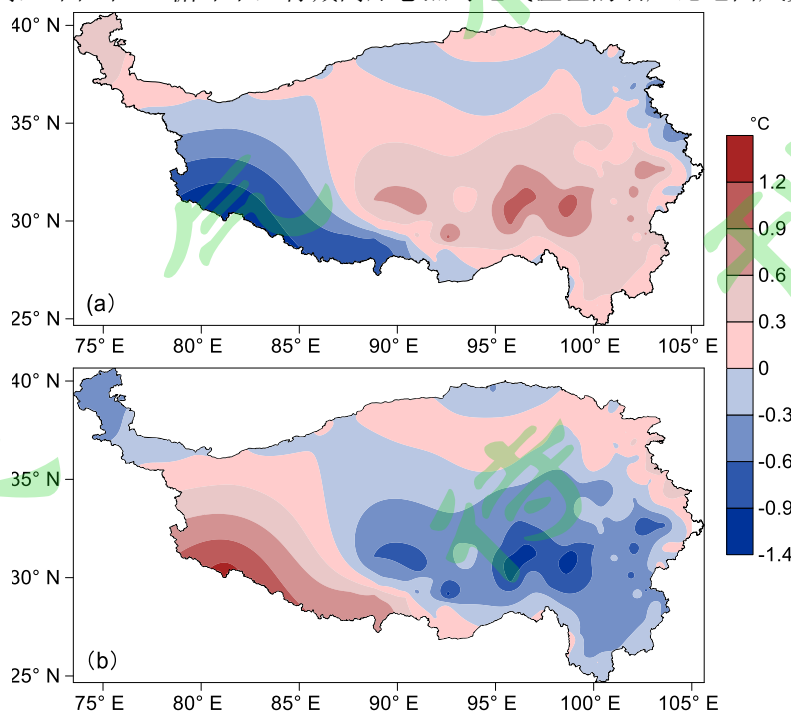


图 5 青藏高原 7 月感热与地气温差耦合场在准 2a 周期上的典型循环重建 (a: 0°位相, b: 180°位相)。等值线为地气温差距平 (单位: °C)

Fig. 5 Spatial joint reconstruction of the sensible heat in July on the Tibetan Plateau and the ground-air temperature difference at quasi-2-year cycle (a: phase 0°, b: phase 180°). The contour value is ground-air temperature difference anomaly (unit: °C)

3.3 环流背景分析

上文分析表明, 在青藏高原 7 月地面感热准 2a 循环中, 总体上地面风速大小、地气温差高低与地面感热的强弱呈对应关系。但是地面风速和地气温差的变化又受到大气环流的影响, 所以为了进一步寻找青藏高原感热准 2a 周期的形成原因, 还需要分析与之对应的大气环流背景。

西太平洋副热带高压是东亚大气环流中的重要系统, 研究指出西太平洋副热带高压也有准 2a 周期 (Zhou et al., 2005; Wu et al., 2008), 而且青藏高原感热东西反向异常型的年代际变化与西太平洋副热带高压密切相关 (严蜜等, 2011)。所以首先分析青藏高原 7 月感热和 500hPa 高度耦合场在准 2a 周期上的典型循环重建 (图 6), 第一年, 从青藏高原至日本海, 以及日本海以北地区高度正异常, 贝加尔湖西侧槽异常加深, 有利于来自西北方向的冷空气侵入我国, 同时东亚槽异常减弱, 有利于西太平洋副热带高压位置偏北偏西。第二年, 500hPa 高度场异常型与第一年相反。

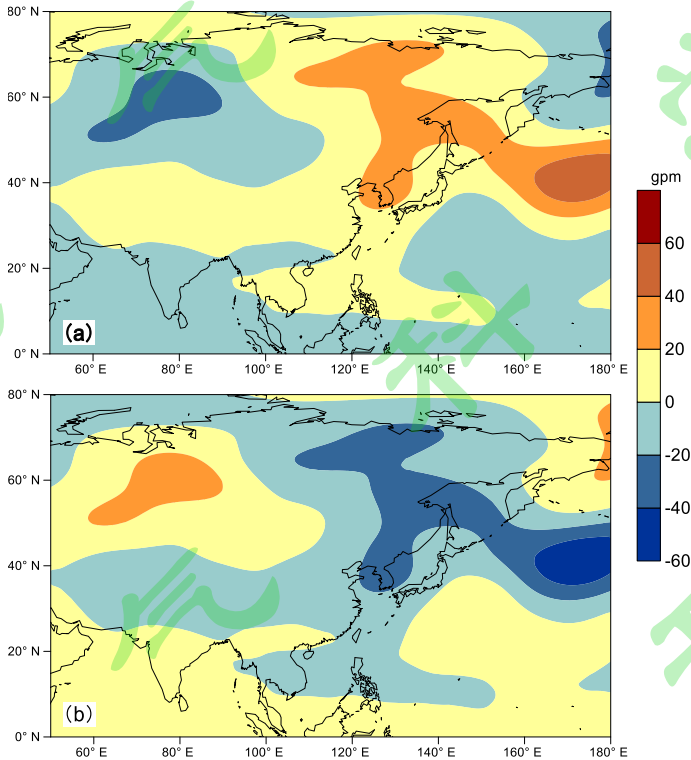


图 6 青藏高原 7 月感热与 500hPa 高度耦合场在准 2a 周期上的典型循环重建 (a: 0°位相, b: 180°位相)。等值线为高度场距平 (单位: gpm)

Fig. 6 Spatial joint reconstruction of the sensible heat in July on the Tibetan Plateau and the 500 hPa height at quasi-2-year cycle (a: phase 0°, b: phase 180°). The contour value is height anomaly (unit: gpm)

另外研究表明 (王慧等, 2022) 东亚副热带西风急流的强度和位置变化可以引起青藏高原风速的变化, 从而改变高原感热的演变趋势。在准 2a 周期典型循环下 (图 7), 第一年, 东亚地区 30°N-40°N 之间 200hPa 纬向风负异常, 40°N-50°N 之间正异常, 表明东亚副热带

西风急流偏强偏北。第二年，东亚副热带西风急流偏弱偏南。

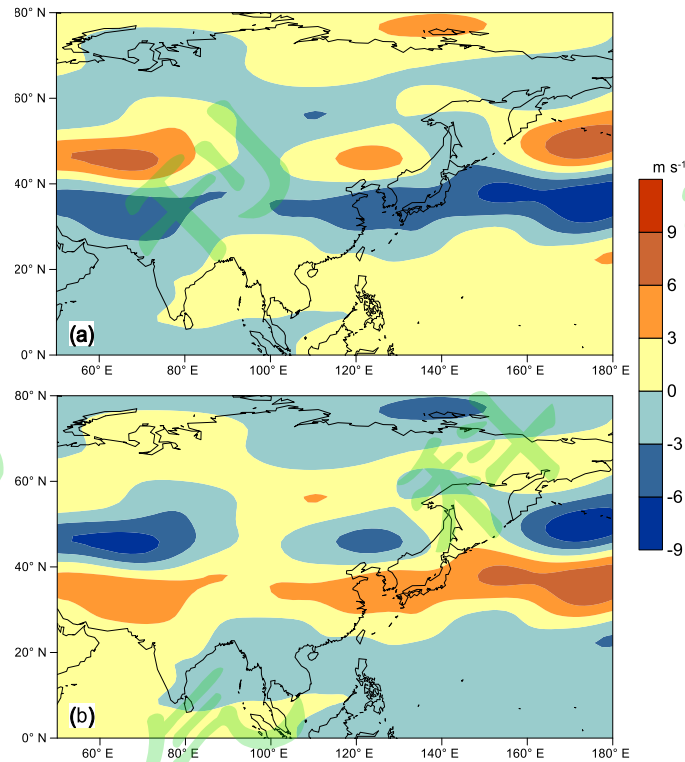


图 7 青藏高原 7 月感热与 200hPa 纬向风耦合场在准 2a 周期上的典型循环重建 (a: 0°位相, b: 180°位相)。等值线为纬向风距平 (单位: m s^{-1})

Fig. 7 Spatial joint reconstruction of the sensible heat in July on the Tibetan Plateau and the 200 hPa latitudinal wind at quasi-2-year cycle (a: phase 0°, b: phase 180°). The contour value is latitudinal wind anomaly (unit: m s^{-1})

在西太平洋副热带高压偏北偏西 (偏南偏东)、东亚副热带西风急流偏北 (偏南) 的环流系统配置下, 青藏高原中东部低层出现异常辐散 (辐合)、高空异常辐合 (辐散), 而西南部低层出现异常辐合 (辐散)、高空为异常辐散 (辐合) (图 8)。

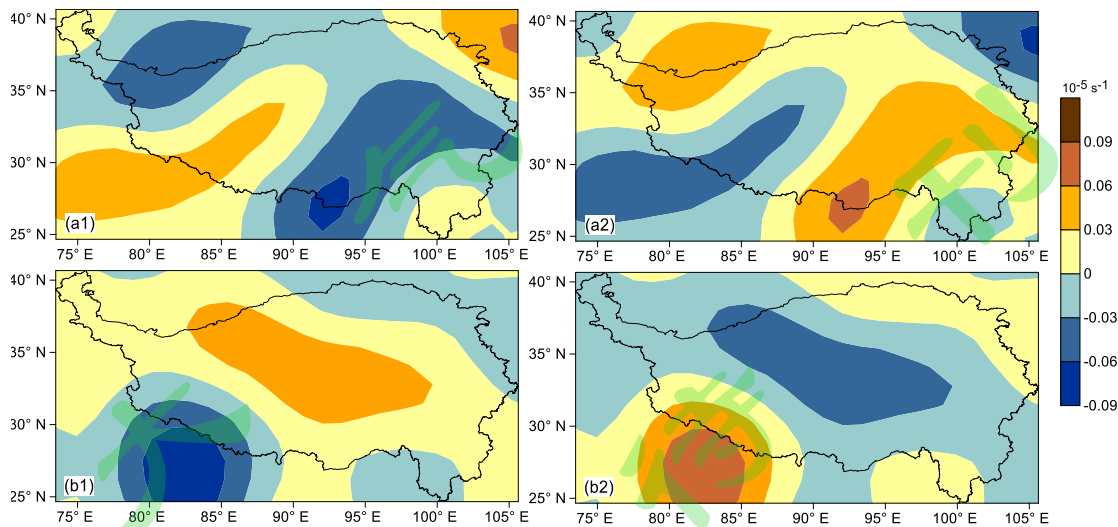


图 8 青藏高原 7 月感热分别与 300hPa (a)、600hPa (b) 散度耦合场在准 2a 周期上的典型循环重建 (a1-b1: 0°位相, a2-b2: 180°位相)。等值线为散度距平 (单位: 10^{-5} s^{-1})

Fig. 8 Spatial joint reconstruction of the sensible heat in July on the Tibetan Plateau and the

300hPa (a) and 600hPa (b) scattering at quasi-2-year cycle (a1-b1: phase 0° , a2- b2: phase 180°).

The contour value is scattering anomaly (unit: 10^{-5} s^{-1})

垂直运动与高低空散度场的异常相匹配（图 9），第一年，青藏高原 30°N 沿线垂直速度呈东弱西强， 60°E - 80°E 青藏高原上空（600-200hPa）出现异常上升运动大值中心， 90°E - 100°E 青藏高原上空（500hPa）出现异常下沉运动大值中心；第二年，垂直速度异常与第一年相反。

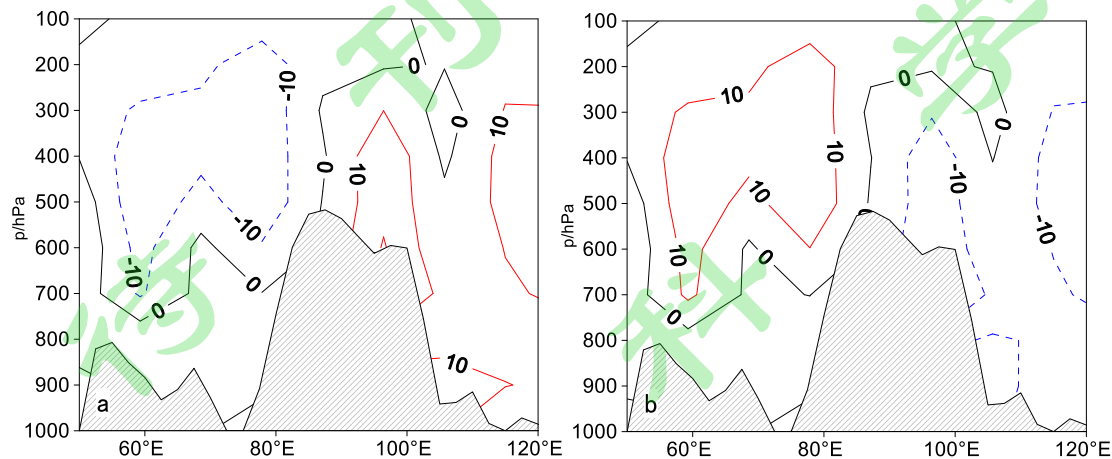


图 9 青藏高原 7 月感热与 30°N 垂直速度耦合场在准 2a 周期上的典型循环重建 (a: 0° 位相, b: 180° 位相)。等值线为垂直速度距平 (单位: 10^{-3} m s^{-1})

Fig. 9 Spatial joint reconstruction of the sensible heat in July on the Tibetan Plateau and the 30°N vertical velocity at quasi-2-year cycle (a: phase 0° , b: phase 180°). The contour value is vertical velocity anomaly (unit: 10^{-3} m s^{-1})

在与青藏高原感热准 2a 周期相匹配的高低空环流背景下，第一年青藏高原中东部总云量异常偏少，西南部总云量异常偏多；第二年则是西南部总云量异常偏少，中东部总云量异常偏多（图 10）。

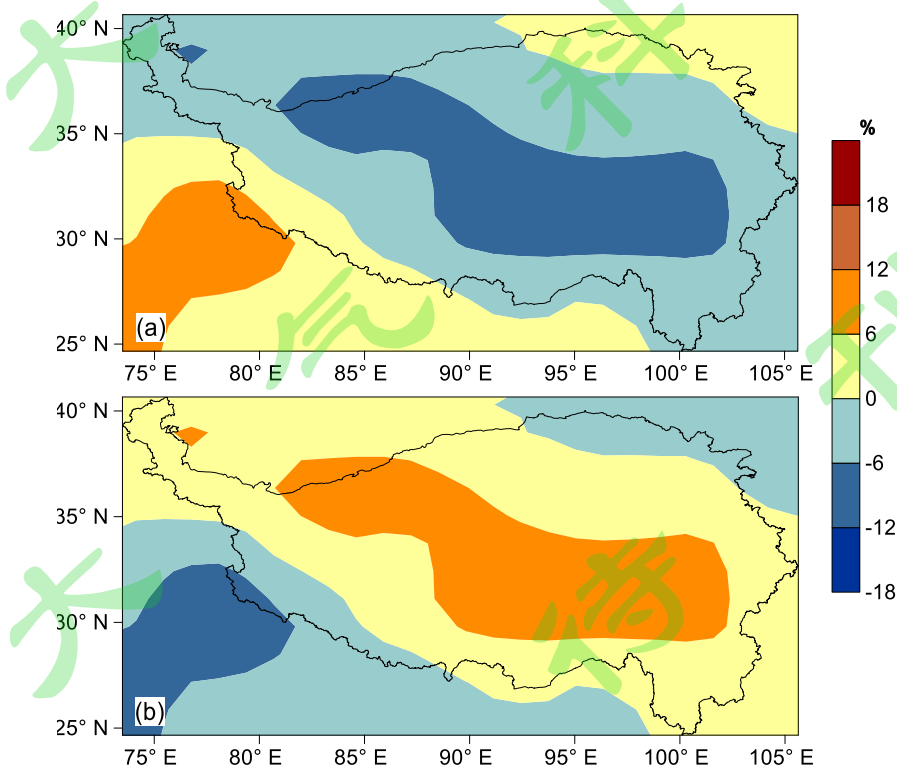


图 10 青藏高原 7 月感热与总云量耦合场在准 2a 周期上的典型循环重建 (a: 0° 位相, b: 180° 位相)

位相)。等值线为云量距平 (单位: %)

Fig. 10 Spatial joint reconstruction of the sensible heat in July on the Tibetan Plateau and the total cloudiness at quasi-2-year cycle (a: phase 0°, b: phase 180°). The contour value is total cloudiness anomaly (unit: %)

3.4 海温背景分析

海温是大气变化的重要强迫源,尤其热带海温具有较强的可预报性,是东亚季风预报信号的主要来源,有关海气相互作用的研究一直是大气科学研究的热点(黄荣辉等, 1994; 陈文等, 2024; Huang and Wu, 1989)。为了进一步探讨青藏高原 7 月感热准 2a 振荡的海温背景,用同样的方法,重建青藏高原 7 月感热与海温耦合场在准 2a 周期上的典型循环(图 11 a、b),第一年,赤道中东太平洋海温负异常,表现出 La Niña 位相;同时我国东海至北太平洋中北部海温异常偏高,有利于副热带高压西伸北进;赤道印度洋至西太平洋暖池一带海温也偏高,有利于哈德来环流的增强,进而导致副热带西风急流位置偏北。第二年,海温异常型与第一年相反,呈 El Niño 位相。部分研究也有类似的结论,李崇银等(1987)指出, El Niño 年夏季,由于遥相关机制,东亚及西太平洋中纬度地区出现海平面气压及 500hPa 高度场负距平,西太平洋副热带高压位置持续偏南。李笛和陈海山(2017)则认为,东亚副热带西风急流主模态表现为急流轴的南北移动,并且夏季出现 El Niño 位相时,西风急流偏南,反之则偏北。

进一步分别重建青藏高原 7 月感热与 6 月(图 11 c、d)、5 月(图 11 e、f)海温耦合场在准 2a 周期上的典型循环,可以看到,赤道印度洋和太平洋的海温异常信号从 5 月份就开始出现并且呈逐渐加强趋势,但是我国东海至北太平洋中北部的海温异常信号 5-6 月出现在北太平洋中部,7 月伴随着 La Niña (El Niño) 冷(暖)舌的北抬而突然出现。

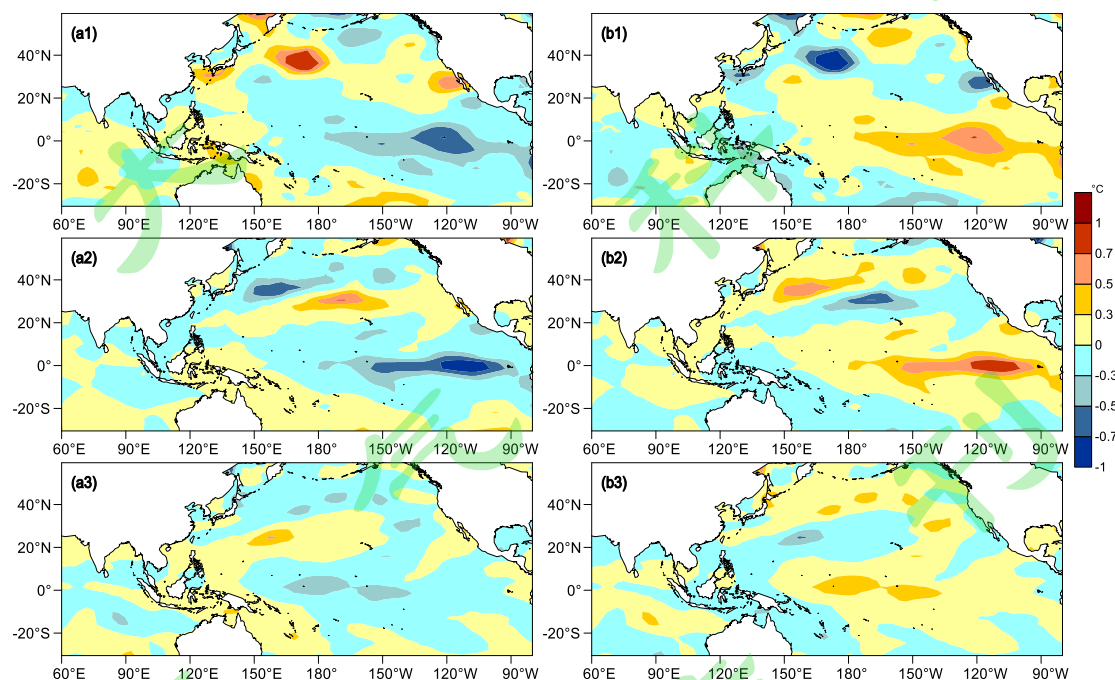


图 11 青藏高原 7 月感热分别与 7 月 (a, b)、6 月 (c, d)、5 月 (e, f) 海温耦合场在准 2a 周期上的典型循环重建 (a, c, e: 0°位相, b, d, f: 180°位相)。等值线为海温距平 (单位: °C)

Fig. 11 Spatial joint reconstruction of the sensible heat in July on the Tibetan Plateau and the SST at quasi-2-year cycle (a, c, e: phase 0°, b, d, f: phase 180°). Unit: The contour value is SST anomaly (unit: °C)

综上所述，建立了青藏高原 7 月感热准 2a 周期典型循环形成机理的概念模型（图 12），第一年，春末夏初赤道中东太平洋 La Niña 位相逐渐显现，7 月西太平洋副热带高压偏北偏西，东亚副热带西风急流偏北，青藏高原中东部（西部）低层异常辐散（辐合）、高空异常辐合（辐散），出现异常上升（下沉）运动。在这种海温和环流异常下，青藏高原总云量西多东少，导致青藏高原中东部（西部）地面太阳辐射增强（减弱）、地气温差增大（减小）、地面感热增强（减小）。第二年的情况与第一年相反。

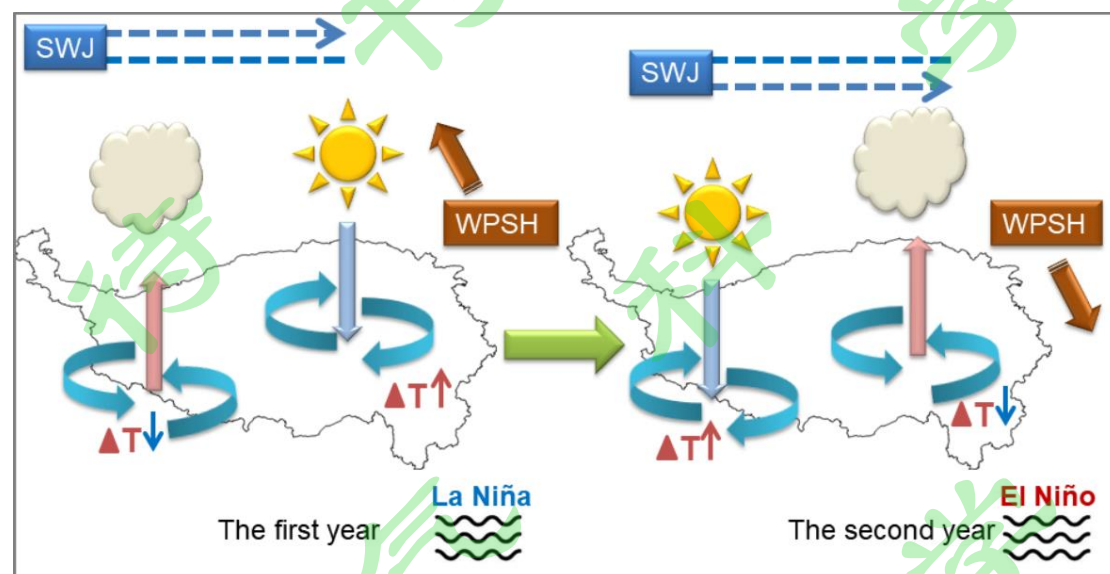


图 12 青藏高原 7 月感热准 2a 周期典型循环形成机理概念模型

Fig. 12 Conceptual model of the formation mechanism of the quasi-2-year cycle of the surface sensible heat in July on the Tibetan Plateau

4 结论与讨论

（1）1980-2018 年青藏高原 7 月感热准 2a 周期达到了 99%置信度水平。典型循环重建表明，第一年青藏高原西南部和东南部分别出现异常大值中心；第二年感热异常分布与第一年相反。1980-2018 年准 2a 周期信号一直存在，1985 年、1998 年、2005 年和 2011 年前后周期信号出现调整，并且在调整前后典型循环位相出现反转。

（2）直接影响因子的协同变化分析表明，第一年青藏高原东南部地表风速异常增强，西部和北部地区减弱，西部出现地表风速负异常大值中心；青藏高原中东部地气温差明显增大，东南部出现正异常大值中心，西部地区地气温差减小，西南部出现负异常大值中心。第二年地面风速和地气温差异异常型与第一年相反。

（3）大气环流的协同变化分析表明，第一年，从青藏高原至日本海，以及日本海以北地区 500hPa 高度正异常，贝加尔湖西侧槽异常加深，有利于冷空气侵入我国西部，同时东亚槽异常减弱，有利于西太平洋副热带高压偏北偏西。东亚地区 40°N 以南 200hPa 纬向风负异常，40°N 以北正异常，表明东亚副热带西风急流偏强偏北。青藏高原中东部（西南部）低层出现异常辐散（辐合）、高空出现异常辐合（辐散）。60°E-80°E 青藏高原上空出现异常上升运动大值中心，90°E-100°E 青藏高原上空出现异常下沉运动大值中心；第二年，大气环流异常型与第一年相反。

（4）海温背景分析表明，第一年赤道中东太平洋出现 La Niña 位相，同时我国东海至北太平洋中北部以及赤道印度洋至西太平洋暖池的海温异常偏高；第二年海温异常型与第一年相反。进一步分析发现赤道附近地区的海温异常信号从 5 月份就开始出现并且逐渐加强，但是我国东海至北太平洋中北部的海温异常信号在 5-6 月位置偏南，7 月伴随着赤道太平洋

冷/暖舌的北抬而突然出现。

参考文献 (Reference)

- 陈文, 于甜甜, 冯娟, 等. 2024. 东亚夏季风与热带海气相互作用研究进展[J]. 大气科学, 48(1): 160-187. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2309.23310
- Chen W, Yu T T, Feng J, et al. 2024. Progress in the study of the impacts of tropical Air-Sea interactions on the East Asian summer monsoon [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 48(1): 160-187. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2309.23310
- Duan A M, Wu G X. 2008. Weakening trend in the atmospheric heat source over the Tibetan Plateau during recent decades. Part I: Observations [J]. Journal of Climate, 21(13): 3149-3164. doi: 10.1175/2007JCLI1912.1
- Duan A M, Wu G X, Liu Y M, et al. 2012. Weather and climate effects of the Tibetan Plateau [J]. Advances in Atmospheric Sciences, 29(5): 978-992. doi:10.1007/s00376-012-1220-y
- Duan A M, Sun Ru Z, He J H. 2017. Impact of surface sensible heating over the Tibetan Plateau on the western Pacific subtropical high: A land-air-sea interaction perspective [J]. Advances in Atmospheric Sciences, 34, 157-168. doi:10.1007/s00376-016-6008-z
- Fan W W, Hu Z Y, Ma W Q, et al. 2022. Dominant modes of Tibetan Plateau summer surface sensible heating and associated atmospheric circulation anomalies [J]. Remote Sensing, 14(4): 956. doi:10.3390/rs14040956
- 顾思南, 房佳蓓, 刘建勇. 2015. 青藏高原感热通量的变化及与江淮流域降水异常的关系[J]. 气象科学, 2015, 35(3): 305-311. doi:10.3969/2014jms.0081
- Gu S N, Fang J B, Liu J Y. Variability of sensible heat flux in Tibetan Plateau and its relation with precipitation anomaly in Changjiang-Huaihe River valley [J]. Journal of the Meteorological Sciences (in Chinese), 35(3): 305-311. doi:10.3969/2014jms.0081
- Han C B, Ma Y M, Chen X L, et al. 2017. Trends of land surface heat fluxes on the Tibetan Plateau from 2001 to 2012 [J]. International Journal of Climatology, 37(14): 4757-4767. doi:10.1002/joc.5119
- Han Y Z, Jiang D B, Si D, et al. 2024. Influence of winter northern Eurasian snow depth on the early summer Tibetan Plateau heat source during 1950–2019 [J]. Climate Dynamics, 62, 4253–4266. doi:10.1007/s00382-024-07130-4
- Huang R H, Wu Y F. 1989. The influence of ENSO on the summer climate change in China and its mechanism [J]. Advances in Atmospheric Sciences, 6(1): 21-32. doi:10.1007/BF02656915
- 黄荣辉, 孙凤英. 1994. 热带西太平洋暖池上空对流活动对东亚夏季风季节内变化的影响[J]. 大气科学, 18(4): 456-465. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1994.04.10
- Huang R H, Sun F Y. 1994. Impact of the convective activities over the Western Tropical Pacific warm pool on the intraseasonal variability of the East Asian summer monsoon [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 18(4): 456-465. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1994.04.10
- 雷润芝, 余晔, 周国兵, 等. 2023. 1984-2020 年青藏高原感热通量长期变化趋势分析[J]. 高原气象, 42(4): 833-847. doi:10.7522/j.issn.1000-0534.2023.00032
- Lei R Z, Yu Y, Zhou G B, et al. 2023. Long-term variation of sensible heat flux over the Qinghai-Xizang Plateau from 1984 to 2020 [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 42(4): 833-847. doi:10.7522/j.issn.1000-0534.2023.00032
- 李崇银, 胡季. 1987. 东亚大气环流与厄尔尼若相互影响的一个分析研究[J]. 大气科学, 11(4): 359-363. doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.1987.04.03
- Li C Y, Hu J. 1987. A study on interaction between the East-Asia atmospheric circulation and E1 Nino [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 11(4): 359-364. doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.1987.04.03

- 李笛, 陈海山. 2017. 不同区域海温对亚洲夏季副热带西风急流变异主模态的影响[J]. 气象科学, 37(4): 425-435. doi:10.3969/2016jms.0041
- Li D, Chen H S. 2017. Impact of sea surface temperature anomalies in different regions on dominant modes of summer Asian subtropical westerly jet variability [J]. Journal of the Meteorological Science (in Chinese), 37(4): 425-435. doi:10.3969/2016jms.0041
- Li N, Zhao P, Wang J F, et al. 2019. Estimation of surface heat fluxes over the central Tibetan Plateau using the maximum entropy production model [J]. Journal of Geophysical Research-atmospheres, 124(13): 6827-6840. doi:10.1029/2018jd029959
- Li N, Zhao P, Zhou C Y. 2024. The spatiotemporal variation of land surface heat fluxes in Tibetan Plateau during 2001–2022 [J]. Atmospheric Research, 297:107081. doi: 10.1016/j.atmosres.2023.107081
- 李国平, 赵邦杰, 杨锦青. 2002. 地面感热对青藏高原低涡流场结构及发展的作用[J]. 大气科学, 26(4): 519-525. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2002.04.09
- Li G P, Zhao B J, Yang J Q. 2002. A dynamical study of the role of surface sensible heating in the structure and intensification of the Tibetan Plateau vortices [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 26(4): 519-525. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2002.04.09
- 梁玲, 李跃清, 胡豪然, 等. 2013. 青藏高原夏季感热异常与川渝地区降水关系的数值模拟[J]. 高原气象, 32(6): 1538-1545. doi:10.7522/j.issn.1000-0534.2013.00028
- Liang L, Li Y Q, Hu H R, et al. 2013. Numerical study of influence of sensible heat anomalies in summer over Qinghai-Xizang Plateau on rainfall in Sichuan-Chongqing regions [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 32(6): 1538-1545. doi:10.7522/j.issn.1000-0534.2013.00028
- Liu L, Zhang W J, Lu Q F, et al. 2021. Variations in the sensible heating of Tibetan Plateau and related effects on atmospheric circulation over South Asia [J]. Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences, 57, 499-510. doi:10.1007/s13143-020-00207-0
- Mann M E, Park J. 1994. Global-scale modes of surface temperature variability on interannual to century timescales [J]. Journal of Geophysical Research-Atmospheres, 99(D12): 25819-25833. doi:10.1029/94jd02396
- Mann M E, Park J. 1996. Joint spatiotemporal modes of surface temperature and sea level pressure variability in the Northern Hemisphere during the last century [J]. Journal of Climate, 9(9): 2137-2162. doi:10.1175/1520-0442(1996)009<2137:jmsmt>2.0.co;2
- 任倩, 周长艳, 夏阳, 等. 2019. 青藏高原东部春季感热通量与我国东部气温的年际关系[J]. 冰川冻土, 41(4): 783-792. doi:10.7522/j.issn.1000-0240.2019.0029.
- Ren Q, Zhou C Y, Xia Y, et al. 2019. Annual relationship between spring surface sensible heat flux over the East Qinghai-Tibet Plateau and air temperature in East China [J]. Journal of Glaciology and Geocryology (in Chinese), 41(4): 783-792. doi:10.7522/j.issn.1000-0240.2019.0029.
- Sun Y, Shan X, Zhou S W, et al. 2023. Impacts of Tibetan Plateau sensible heat and El Niño–Southern Oscillation on precipitation over South China under the background of the PDO [J]. Frontiers in Environmental Science, 11:1156206. doi: 10.3389/fenvs.2023.1156206
- Wang J F, Bras R L. 2009. A model of surface heat fluxes based on the theory of maximum entropy production [J]. Water Resources Research, 45(11): W11422. doi: 10.1029/2009WR007900
- 王树舟, 马耀明, 吴文玉. 2023. 基于 Noah-MP 陆面模式的青藏高原地表感热和潜热通量分布及变化特征. 高原气象, 42(1): 25-34. doi:10.7522/j.issn.1000-0534.2022.00036
- Wang S Z, Ma Y M, Wu W Y. 2023. Characteristics of distributions and changes of surface sensible and latent heat fluxes on the Qinghai-Xizang Plateau based on the Noah-MP land surface model. Plateau Meteorology (in Chinese), 42(1): 25-34. doi:10.7522/j.issn.1000-0534.2022.00036
- 王慧, 张璐, 石兴东, 等. 2022. 青藏高原中东部地表感热趋势转折特征的季节差异[J]. 大气科学, 46(1):

- 133–150. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2105.21026
- Wang H, Zhang L, Shi X D, et al. 2022. Seasonal differences in the trend turning characteristics of surface sensible heat over the Central and Eastern Tibetan Plateau [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 46(1): 133–150. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2105.21026
- Wu B, Zhou T J. 2008. Oceanic origin of the interannual and interdecadal variability of the summertime western Pacific subtropical high [J]. Geophysical Research Letters, 35(13): L13701. doi:10.1029/2008GL034584
- Wu G X, Zhang Y S. 1998. Tibetan Plateau forcing and timing of the monsoon onset south Asia and the south China sea [J]. Monthly Weather Review, 126(4): 913–927. doi:10.1175/1520-0493(1998)126<0.CO;2
- Wu G X, Liu Y M, Zhang Q G, et al. 2007. The influence of mechanical and thermal forcing by the Tibetan Plateau on Asian climate [J]. J Hydrometeorology, 8(4): 770–789. doi:10.1175/JHM609.1
- Xie X N, Duan A M, Shi Z G, et al. 2020. Modulation of springtime surface sensible heating over the Tibetan Plateau on the interannual variability of East Asian dust cycle [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 20, 11143–11159. doi:10.5194/acp-20-11143-2020
- 严蜜, 钱永甫, 刘健. 2011. 西太平洋副热带高压强度和东亚地表热通量的年代际变化特征及关系[J]. 气象学报, 69(4): 610–619. doi:10.11676/qxxb2011.053
- Yan M, Qian Y F, Liu J. 2011. Interdecadal variations of the western Pacific subtropical high and surface heat flux over East Asia and their relationship [J]. Acta Meteorologica Sinica, 69(4): 610–619. doi:10.11676/qxxb2011.053
- Yanai M, Li C F, Song Z S. 1992. Seasonal heating of the Tibetan Plateau and its effects on the evolution of the Asian summer monsoon [J]. Journal of the Meteorological Society of Japan, 70(1B): 319–351. doi:10.2151/jmsj1965.70.1B_319
- Yang K, Guo X F, He J, et al. 2011. On the climatology and trend of the atmospheric heat source over the Tibetan Plateau: An Experiments-Supported Revisit [J]. Journal of Climate, 24(5): 1525–1541. doi:10.1175/2010JCLI3848.1
- 姚秀萍, 张硕, 闫丽朱. 2019. 青藏高原大气热源及其影响的研究进展[J]. 大气科学学报, 42(5): 641–651. doi:10.13878/j.cnki.dqkxxb.20181227001
- Yao X P, Zhang S, Yan L Z. 2019. Research progress on the atmospheric heat source over the Tibetan Plateau and its influence [J]. Transactions of Atmospheric Sciences (in Chinese), 42(5): 641–651. doi:10.13878/j.cnki.dqkxxb.20181227001
- 叶笃正, 罗四维, 朱抱真. 1957. 青藏高原及其附近的流场结构和对流层大气的热量平衡[J]. 气象学报, 28(2): 108–121. doi:10.11676/qxxb1957.010
- Ye D Z, Luo S W, Zhu B Z. 1957. The wind structure and heat balance in the lower troposphere over Tibetan Plateau and its surrounding [J]. Acta Meteor Sinica (in Chinese), 28(2): 108–121. doi:10.11676/qxxb1957.010
- 张超, 田荣湘, 茆慧玲, 等. 2018. 青藏高原 4 月感热通量异常对长江以南夏季降水的影响[J]. 大气科学学报, 41(6): 775–785. doi:10.13878/j.cnki.dqkxxb.20170124003
- Zhang C, Tian R X, Mao H L, et al. 2018. Impact of the sensible heat flux anomaly over the Tibetan Plateau in April on summer precipitation in the south of the Yangtze River Region [J]. Transactions of Atmospheric Sciences (in Chinese), 41(6): 775–785. doi:10.13878/j.cnki.dqkxxb.20170124003
- 张盈盈, 李忠贤, 刘伯奇. 2015. 春季青藏高原表面感热加热的年际变化特征及其对印度夏季风爆发时间的影响[J]. 大气科学, 39(6): 1059–1072. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1410.14226
- Zhang Y Y, Li Z X, Liu B Q. 2015. Interannual variability of surface sensible heating over the Tibetan Plateau in boreal spring and its influence on the onset time of the Indian summer monsoon [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 39(6): 1059–1072. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1410.14226
- 张顺利, 陶诗言. 2001. 青藏高原积雪对亚洲夏季风影响的诊断及数值研究[J]. 大气科学, 25(3): 372–390.

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2001.03.07

Zhang S L, Tao S Y. 2001. Influences of snow cover over the Tibetan Plateau on Asian summer monsoon [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 25(3): 372-390. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2001.03.07

赵勇, 李如琦, 杨霞, 等. 2013. 5月青藏高原地区感热异常对北疆夏季降水的影响[J]. 高原气象, 32(5): 1215-1223. doi:10.7522/j.issn.1000-0534.2012.00117

Zhao Y, Li R Q, Yang X, et al. 2013. Impact of the anomaly of surface sensible heat in Qinghai-Xizang Plateau and its surrounding areas on summertime precipitation in Northern Xinjiang [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 32(5): 1215-1223. doi:10.7522/j.issn.1000-0534.2012.00117

Zhou T J, Yu R C. 2005. Atmospheric water vapor transport associated with typical anomalous summer rainfall patterns in China [J]. Journal of Geophysical Research, 110:D08104. doi:10.1029/2004JD005413