

文章编号: 2096-1618(2024)02-0194-06

# 近几十年丝绸之路遥相关对中国夏季气温的影响

李泽权<sup>1</sup>, 华 维<sup>1,2,3</sup>

(1. 成都信息工程大学大气科学学院, 四川 成都 610225; 2. 高原大气与环境四川省重点实验室, 四川 成都 610225; 3. 四川省气象灾害预测预警工程实验室, 四川 成都 610225)

**摘要:**为分析近几十年丝绸之路遥相关对中国夏季气温的影响及可能机理,基于1961–2020年CN05.1高分辨格点气温资料和ERA5大气再分析资料,采用经验正交分解、回归分析和相关分析等统计诊断方法分析丝绸之路遥相关对中国夏季气温的影响及可能机理,结果表明:(1)丝绸之路遥相关主要沿亚洲急流自西向东传播,呈显著的“+--+”分布,其活动中心主要位于里海、巴尔喀什湖和中国北方地区,并存在明显的年际变化和年代际变化。中国夏季气温整体上呈一致的变化趋势,其中20世纪60–80年代由暖到冷,90年代后又明显升温。(2)除新疆西部和西藏西部、东北地区西部及江淮地区为负相关分布外,夏季丝绸之路遥相关与同期中国大部分地区气温之间为显著的正相关关系。(3)丝绸之路遥相关可通过影响北半球对流层中高层位势高度、垂直速度和涡度平流等环流因子导致中国夏季气温异常。具体表现为受丝绸之路遥相关影响产生的位势高度正异常有利于晴好天气的维持,同时对流层中高层受负涡度平流控制,以下沉运动为主,导致中国夏季气温异常升高。

**关键词:**气候变化;丝绸之路遥相关;夏季气温;时空特征;影响机理

**中图分类号:**P425

**文献标志码:**A

**doi:**10.16836/j.cnki.jcuit.2024.02.010

## 0 引言

伴随着全球持续增暖,中国气温也发生了显著变化,近百年中国平均升温率明显高于全球平均增暖速率,尤其近几十年来,随着温室气体浓度不断提高,气温上升了1.38℃,升温率达到0.23℃/10a,在20世纪80年代后尤为明显<sup>[1]</sup>。由此导致的极端天气气候事件急剧增加,对人类健康、生产生活和生态环境等产生了广泛而严重的影响<sup>[2]</sup>。因此,开展中国气温变化及影响机理研究有助于加深对东亚地区气候系统的理解和认识。

夏季是北半球气温最高的季节,亦是对经济社会发展和人民生活影响最大的季节。不少学者<sup>[3–9]</sup>已从海表温度<sup>[3–5]</sup>(sea surface temperature, SST)、极地雪盖<sup>[6]</sup>、海冰<sup>[7–8]</sup>以及青藏高原热力效应<sup>[9]</sup>等角度对影响中国夏季气温的因子及机理进行了探索,得到了诸多有意义的研究成果。在影响中国夏季气温的各类因子中,夏季北半球对流层高层中存在的大气遥相关波列丝绸之路遥相关(Silk Road Pattern, SRP)的作用不可忽视。SRP是稳定存在于欧亚大陆上空的大气遥相关型,并可通过改变大气环流对欧亚大陆气候产生显著影响。遥相关最早于1879年由Hiedbrandon提

出<sup>[10]</sup>,表示在两个距离较为遥远的区域之间,大气环流或气候异常存在较显著的相关性。SRP是Enomoto等<sup>[11]</sup>于21世纪初发现的存在于北半球对流层高层的沿着亚洲急流呈纬向波列状分布的遥相关现象,该遥相关型在环流场上主要表现为位势高度距平场(或相对涡度距平场)沿东欧、中亚、蒙古和远东地区呈“+--+”(或“+--+”)交替分布结构,由于其传播路径与古丝绸之路一致,因此被命名为丝绸之路遥相关。SRP对北半球夏季气候的影响十分显著。一方面,SRP的年代际变化可与大西洋多年代际振荡的位相变化形成协同效应,进而造成欧亚大陆产生非均匀增暖,即欧洲—西亚地区和亚洲东北部变暖增强,而中亚则有所减弱<sup>[12]</sup>;另一方面,SRP对东亚地区夏季气温也有重要影响<sup>[13]</sup>。李纵横等<sup>[14]</sup>发现中国江淮地区夏季极端高温日数对应的对流层高层经向风异常波列状结构与SRP分布形态十分类似。同时,日本夏季气温异常也与SRP存在显著的相关关系<sup>[11,15]</sup>,且该异常可能与SRP和东亚—太平洋型遥相关形成的相互作用有关<sup>[16]</sup>。SRP除可对同期夏季气候产生影响外,还可对东亚气候形成滞后效应。北太平洋SST可对7月SRP异常信号起到存储作用,并可将异常信号延续至次年1月,并通过在北太平洋激发出异常气旋性环流后由罗斯贝波的东传作用影响冬季东亚气温<sup>[17]</sup>。此外,也有研究指出SRP可被视为北半球夏季环球遥相关的重要组成部分<sup>[18]</sup>。

相关研究加深了对中国夏季气温异常机理的认

收稿日期:2023-02-27

基金项目:国家自然科学基金资助项目(42075019);第二次青藏高原综合科学考察研究资助项目(2019QZKK010203)

通信作者:华维. E-mail:huawei@cuit.edu.cn

识,然而相较于 SRP 对中纬度欧亚大陆气候的影响研究,SRP 对中国夏季气温的影响还有待进一步深入探索,二者之间的联系及可能机理尚不十分清楚。因此,采用 1961–2020 年 CN05.1 高分辨率气温格点资料和 ERA5 大气再分析资料,采用多种统计诊断方法对夏季 SRP 对中国同期气温的影响及可能机理进行分析。

1 资料和方法

1.1 资料

气温资料采用基于中国 2416 个气象台站气温观测数据通过距平逼近插值法得到 CN05.1 月平均格点气温数据<sup>[19]</sup>,该资料水平分辨率为 $0.25^{\circ}\times0.25^{\circ}$ 。大气环流场资料采用欧洲中期天气预报中心(European centre for medium-range weather forecasts, ECMWF)提供的 ERA5 逐月再分析资料,所用变量包括位势高度、经(纬)向风、垂直速度和相对涡度,其水平分辨率为 $0.25^{\circ}\times0.25^{\circ}$ ,垂直方向共 27 层。研究时段和资料长度为 1961–2020 年,夏季定义为 6–8 月。

1.2 方法

使用经验正交函数分解(empirical orthogonal function, EOF)方法对 1961–2020 年夏季 200 hPa 经向风距平场和中国夏季气温时空变化特征进行分析。采用相关分析和线性回归分析方法分析中国夏季气温与 SRP 之间的联系,显著性检验采用双尾学生氏  $t$  检验方法进行。为消除长期趋势的影响,所有物理量均进行去趋势处理。

2 丝绸之路遥相关和我国夏季气温的时空变化

2.1 丝绸之路遥相关的时空变化特征

与前人研究<sup>[20–22]</sup>类似,将欧亚大陆( $20^{\circ}\text{N}\sim60^{\circ}\text{N}$ ,  $20^{\circ}\text{E}\sim140^{\circ}\text{E}$ )夏季平均 200 hPa 经向风距平场 EOF 分解的第一模态主分量定义为 SRP 模态以分析其空间分布特征,并将其时间系数定义为 SRP 指数(SRP index, SRPI)研究其年际和年代际变化。表 1 给出了 EOF 分解前 3 个模态方差贡献和累计方差贡献结果。由表可知,夏季平均 200 hPa 经向风距平场 EOF 分解的前 3 个模态方差贡献率分别为 31.00%, 13.36% 和 10.17%, 前 3 个模态累积方程贡献达到 54.53%, 能够表征夏季对流层高层经向风场的主要变化特征。

表 1 欧亚大陆夏季 200 hPa 经向风距平场 EOF 分解前 3 个模态方差贡献率和累计方差贡献率

模态数	第一模态	第二模态	第三模态
方差贡献率	31.00	13.36	10.17
累计方差贡献率	31.00	44.36	54.53

图 1 进一步给出了夏季 200 hPa 经向风距平场 EOF 分解第一模态空间分布和时间系数。从空间分布(图 1a)来看,SRP 沿亚洲急流自西向东传播,并表现出“+–+”分布特征,其主要活动中心分别位于里海、巴尔喀什湖和中国北方等地,且各活动中心均位于  $40^{\circ}\text{N}$  附近。从 EOF 第一模态时间系数(图 1b)可以发现,SRP 既存在明显的年际变化,也表现出“+–”的年代际变化,即大致在 20 世纪 60–70 年代中期以负位相为主,20 世纪 70 年代中期至 90 年代中期主要为正位相,之后至 21 世纪又以负位相为主的年代际特征,这一结果与 Wang 等<sup>[22]</sup>的研究较为一致。

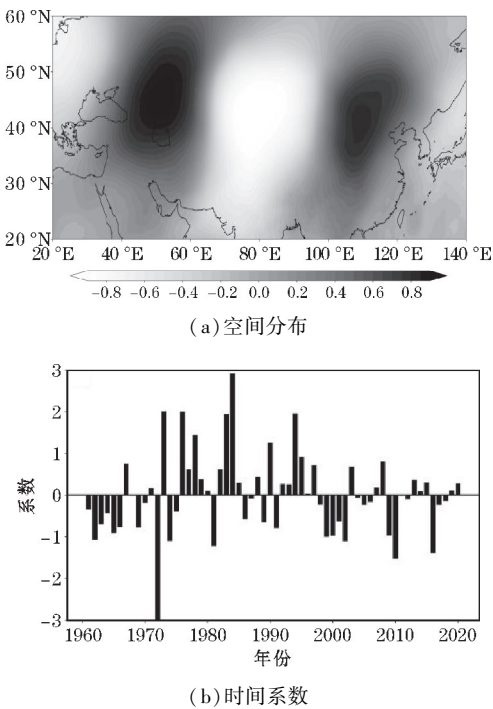


图 1 欧亚大陆夏季 200 hPa 经向风距平场 EOF 分解第一模态

2.2 中国夏季气温的时空变化特征

表 2 为中国夏季平均气温的 EOF 分解前 3 个模态方差贡献率和累积方程贡献结果,其方差贡献分别为 37.22%、16.53% 和 8.94%, 前 3 个模态累积方程贡献也达到 62.69%。

表 2 中国夏季 200 hPa 经向风距平场 EOF 分解前 3 个模态方差贡献率和累计方差贡献率

模态数	第一模态	第二模态	第三模态
方差贡献率	37.22	16.53	8.94
累计方差贡献率	37.22	53.75	62.69

对应的中国夏季气温第一模态空间分布(图2a)上,整体上呈较一致的正值分布,表明中国夏季气温变化的空间分布具有较好的一致性,即夏季气温呈一致升高(或降低)趋势,主要正异常值区位于中国西部和北方等地区,表明相关区域是中国夏季气温变化的敏感区。进一步从夏季气温第一模态时间系数(图2b)上可以看出,20世纪60年代至今中国夏季气温随时间呈现出“+ -”的年代际趋势,具体为20世纪60年代初至70年代中期以及20世纪90年代末至今主要为正值,而20世纪70年代末至90年代中期总体为负值。由此可知,中国夏季气温在20世纪60、80年代末经历了由暖到冷的过程,90年代后又呈明显的升温趋势。

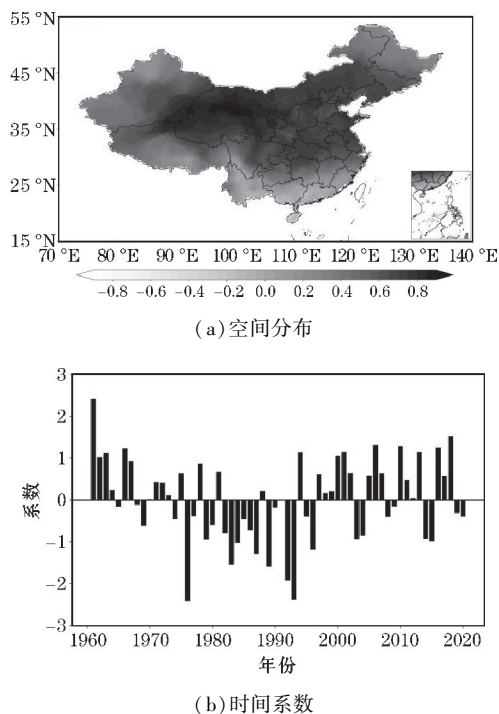


图2 中国夏季200 hPa 经向风距平场 EOF 分解第一模态

### 3 丝绸之路遥相关与中国夏季气温的联系

#### 3.1 丝绸之路遥相关与中国夏季气温的相关关系

图3给出了夏季SRPI与中国同期气温的相关系数空间分布。由图3可见,中国西北、西南、华北和东北地区西部是主要的正相关区,而新疆西部、东北东部和江淮地区则以负相关为主,表明夏季SRP越强,中国西北、西南、华北和东北西部气温越高,而新疆西部、东北东部及江淮地区夏季气温越低,反之亦然。

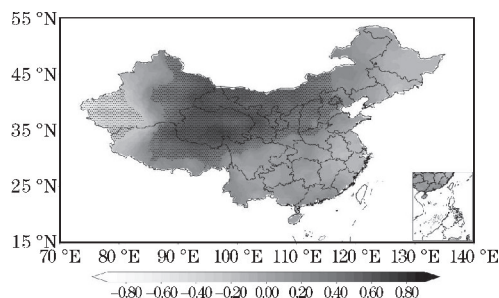


图3 夏季SRPI与中国同期气温的相关系数分布  
(打点区代表通过95%的显著性水平检验)

将1961–2020年中国夏季气温与SRP的显著正相关区气温的区域平均值进行标准化后的时间序列定义为夏季气温指数(summer temperature index, STI)以验证SRP对中国夏季气温的影响。图4给出了夏季SRPI与STI标准化时间序列。可见,夏季SRPI与同期STI呈显著的正相关关系,相关系数达到0.58,通过99%的显著性水平检验,表明二者具有显著的同相变化关系。

进一步将STI超过1个±标准差的年份定义为夏季平均气温极端高低年以研究中国夏季极端气温与SRP之间的联系。由图4可知,共计19年夏季出现极端气温,其中8年为极端高温年,11年为极端低温年,且19年中SRPI与STI同号率达到89%(其余41个正常年份同号率为73%)(图4),这表明夏季SRP可能对中国夏季平均气温和极端气温均存在较显著的影响,这与江淮地区出现极端高温时,200 hPa上存在与SRP类似波列的结论相吻合<sup>[14]</sup>。

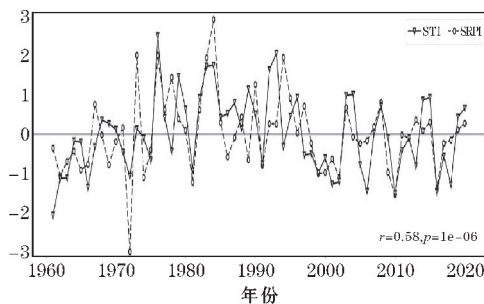


图4 夏季SRPI与STI标准化时间序列

#### 3.2 丝绸之路遥相关影响中国夏季气温的可能过程

进一步将标准化的SRPI和STI分别回归到北半球位势高度场、垂直速度场和风场上以研究SRP影响中国夏季气温的可能物理过程。已有研究指出,对流层中上层位势高度异常和低层温度平流是影响地表气温的两大因子<sup>[23]</sup>。因此,首先将SRPI和STI分别与对流层中高层位势高度进行回归(图5)。由SRPI与200 hPa位势高度回归结果(图5a)可知,欧亚大陆中纬度地区为典型的SRP波列结构分布,表明中国夏季气温与SRP间存在明显的相关关系。进一步由SRPI与500 hPa位势高度场回归结果(图5c)上可以发现,与200 hPa高度场类似,欧亚大陆中纬度地区500 hPa高度场同样存在类似的遥相关波列分布,表明中国夏季气温与500 hPa位势高度场显著相关,而位势高度的



异常, 尤其以贝加尔湖为中心直至北太平洋的位势高度显著正异常区有利于晴好天气的维持, 导致中国夏季气温升高。进一步对比夏季 SRPI (图 5a 和图 5c) 和 STI (图 5b 和图 5d) 分别与对流层中高层位势高度的回归

结果可知, 夏季 STI 与位势高度场的回归结果与 SRP 的结果类似, 均可在对流层高层 200 hPa 和中层 500 hPa 发现类似的遥相关波列结构, 表明 SRP 确可通过影响对流层中高层位势高度导致中国夏季气温异常。

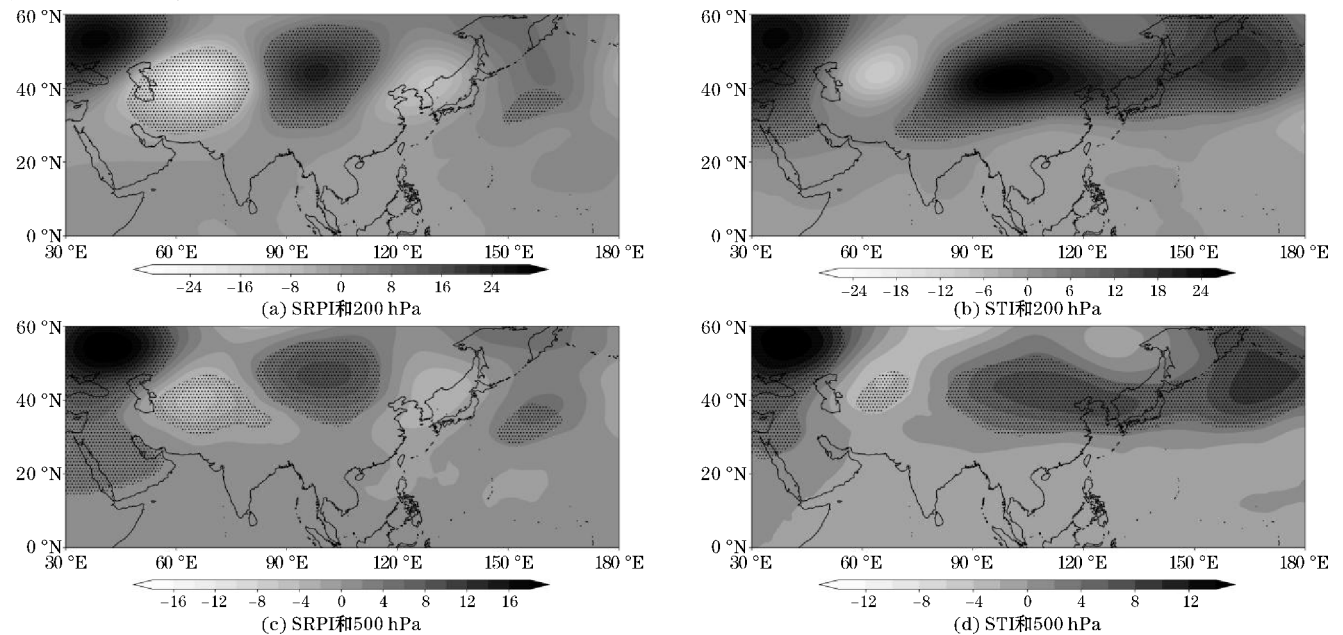


图 5 1961–2020 年 SRPI 和 STI 与对流层中高层位势高度场回归结果 (打点区代表通过 95% 的显著性水平检验)

垂直运动也是影响地面气温变化的重要因子之一。图 6 给出了夏季 SRPI 和 STI 与对流层中高层 500 ~ 200 hPa 平均的垂直速度和涡度平流回归结果。由图 6(a) 可以发现, 受 SRP 影响, 中国上空对流层中高层主要以下沉运动正异常为主, 尤其在北方地区更为明显, 这与北方出现的显著增暖相对应。同时, 由 STI 与垂直速度的回归结果 (图 6b) 也可发现, 其回归结果空间分布与 SRPI 的回归结果大致相同。根据 Omega 方程, 热成风造成的异常正 (负) 涡度平流与大气异常

上升 (下沉) 运动相对应, 其原因为若要保证位涡守恒, 异常的热成风正 (负) 涡度平流将会伴随着大气的冷却 (加热), 而在绝热假设下, 大气冷却 (加热) 将由大气垂直上升 (下沉) 完成。图 6(c) 和图 6(d) 分别为 SRPI 和 STI 回归的 500 ~ 200 hPa 平均的涡度平流场。从图 6 可以看出, 中国北方地区上空主要为显著的负涡度平流分布, 可见该地区下沉运动是由大尺度环流异常导致的异常涡度平流造成。

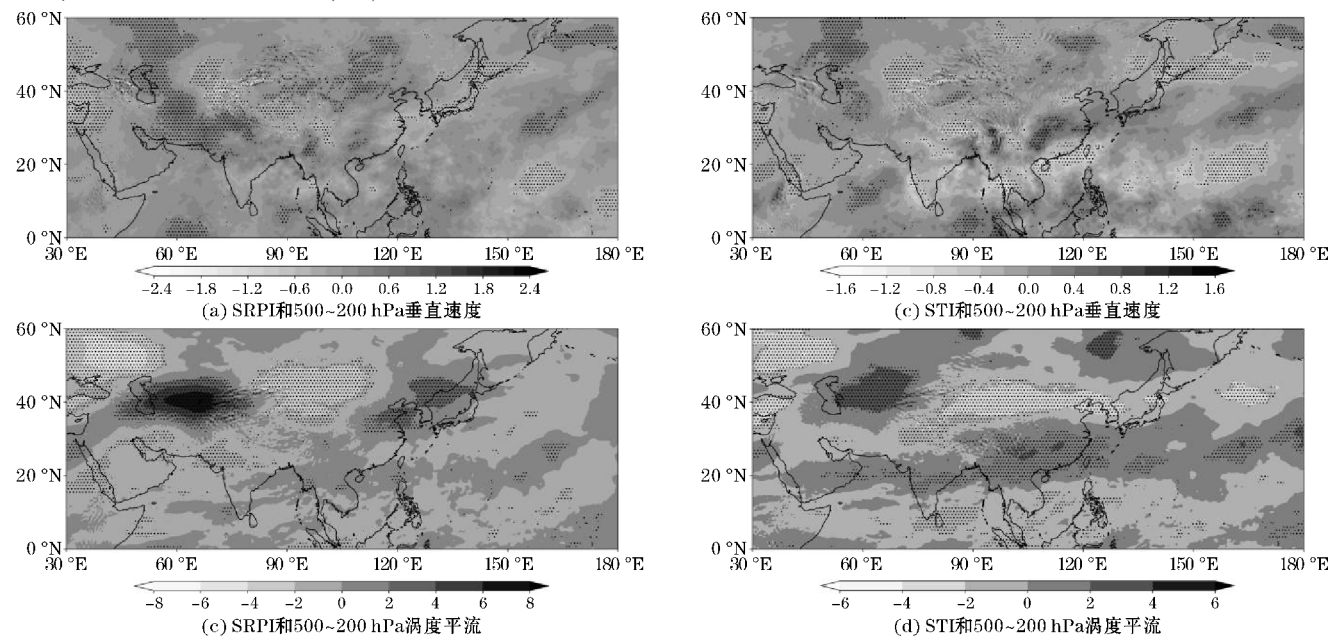


图 6 1961–2020 年 SRPI 和 STI 与 500 ~ 200 hPa 平均环流场回归结果 (打点区代表通过 95% 的显著性水平检验)

## 4 结论

基于 CN05.1 高分辨率格点气温资料和 ERA5 大气再分析资料,采用 EOF、相关分析和回归分析等统计诊断方法分析了 1961–2020 年夏季 SRP 对中国同期气温的影响及可能的机制,得到结论如下:

(1)SRP 在空间上主要表现为沿亚洲急流自西向东传播,并呈显著的“-+-”分布,主要活动中心分别位于里海、巴尔喀什湖和中国北方等地区,且存在明显的年际变化和年代际变化特征。中国夏季气温整体上为较一致的变化趋势,其中中国西部和北方地区是中国夏季气温变化的敏感区,并呈现 20 世纪 60、80 年代由暖到冷,90 年代后又明显升温的年代际趋势。

(2)SRP 总体与中国夏季气温为正相关关系,其中西北、西南、华北和东北西部地区是主要的显著正相关,而新疆西部、东北东部及江淮地区则存在一定的负相关区。此外,SRP 对中国夏季气温极端高低年也有明显影响。

(3)SRP 可以通过影响对流层中高层位势高度和垂直速度等导致中国夏季气温异常,具体为 SRP 可导致以贝加尔湖为中心形成位势高度显著正异常区,从而有利于晴好天气维持导致中国夏季气温升高。同时,受 SRP 影响,中国北方地区上空对流层中高层以下沉运动为主,这与中国北方显著增暖相对应。此外,在 SRP 的作用下,中国北方地区上空主要受显著的负涡度平流控制,同样有利于形成高温。

致谢:感谢成都信息工程大学科技创新能力提升计划项目(KYQN202202)对本文的资助

## 参考文献:

- [1] 黄建平,陈文,温之平,等. 新中国成立 70 年以来的中国大气科学研究:气候与气候变化篇[J]. 中国科学:地球科学,2019,49(10):1607–1640.
- [2] 朴世龙,张新平,陈安平,等. 极端气候事件对陆地生态系统碳循环的影响[J]. 中国科学:地球科学,2019,49(9):1321–1334.
- [3] 候伟芬,王谦谦,刘燕. 江南地区夏季气温异常与全球海温异常的相关关系[J]. 南京气象学院学报,2004,27(4):539–544.
- [4] 冯娟. 热带太平洋三极型和偶极型海温异常对中国夏季气候的影响及其机制研究[D]. 南京:南京信息工程大学,2008.
- [5] 吴磊. 东亚中纬度夏季陆面热力异常与北极海冰及太平洋海温异常的可能联系[D]. 南京:南京信息工程大学,2018.
- [6] 王光宇,曾群柱. 北半球雪盖与我国夏季气温的相关分析[J]. 冰川冻土,1994,16(1):49–52.
- [7] 陈寅生,陈隆勋. 北极冰盖对我国气温和降水的影响[J]. 南京气象学院学报,1994,17(1):51–57.
- [8] 陈明轩,管兆勇,徐海明. 冬春季格陵兰海冰变化与初夏中国气温、降水关系得到初步分析[J]. 高原气象,2003,22(1):7–13.
- [9] 许利,毕云,钱永甫. 青藏、伊朗高原春夏季高层热力异常与我国夏季气温的关系[J]. 高原气象,2004,23(3):323–329.
- [10] Wallace J M, Gutzler D S. Teleconnections in the Geopotential Height Field during the Northern Hemisphere Winter [J]. Monthly Weather Review, 1981, 109(4):784–812.
- [11] Enomoto T, Hoskins B J, Matsuda Y. The formation mechanism of the Bonin high in August[J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society of Japan. Ser. II, 2003, 129(587):157–178.
- [12] Hong X W, Lu R Y, Li S. Amplified summer warming in Europe-West Asia and Northeast Asia after the mid-1990s [J]. Environmental Research Letters, 2017, 12(9):094007.
- [13] Kosaka Y, Chowdary J S, Xie S P, Min Y M, et al. Limitations of seasonal predictability for summer climate over East Asia and the Northwestern Pacific [J]. Journal of Climate, 2012, 25(21):7574–7589.
- [14] 李纵横,李崇银,宋洁,等. 1960–2011 年江淮地区夏季极端高温日数的特征及成因分析[J]. 气候与环境研究, 2015, 20:511–522.
- [15] Wakabayashi S, Kawamura R. Extraction of major teleconnection patterns possibly associated with the anomalous summer climate in Japan [J]. Journal of the Meteorological Society of Japan. Ser. II, 2004, 82(6):1577–1588.
- [16] Ogasawara T, Kawamura R. Combined effects of teleconnection patterns on anomalous summer weather in Japan [J]. Journal of the Meteorological Society of Japan. Ser. II, 2007, 85(1):11–24.
- [17] He S, Liu Y, Wang H. Connection between the Silk Road Pattern in July and the following January temperature over East Asia [J]. Journal of Meteorological Research, 2017, 31(2):378–388.

- [18] Ding Q, Wang B. Circumglobal teleconnection in the Northern Hemisphere summer[J]. *Journal of Climate*, 2005, 18(17): 3483–3505.
- [19] 吴佳, 高学杰. 一套格点化的中国区域逐日观测资料及与其它资料的对比. *地球物理学报*, 2013, 56(4): 1102–1111.
- [20] Yasui S, Watanabe M. Forcing processes of the summertime circumglobal teleconnection pattern in a dry AGCM[J]. *Journal of Climate*, 2010, 23(8): 2093–2114.
- [21] Hong X W, Lu R Y. The meridional displacement of the summer Asian jet, Silk Road Pattern, and tropical SST anomalies[J]. *Journal of Climate*, 2016, 29(10): 3753–3766.
- [22] Wang L, Xu P, Chen W, et al. Interdecadal variations of the Silk Road pattern[J]. *Journal of Climate*, 2017, 30(24): 9915–9932.
- [23] Sun J Q, Wang H J, Yuan W. 2008. Decadal variations of the relationship between the summer North Atlantic Oscillation and middle East Asian air temperature[J]. *J. Geophys. Res.*, 113(D15).

## The Impact of Silk Road Pattern on Summer Temperature of China during Recent Decades

LI Zequan<sup>1</sup>, HUA Wei<sup>1,2,3</sup>

(1. College of Atmospheric Sciences, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225, China; 2. Plateau Atmosphere and Environment Key Laboratory of Sichuan Province, Chengdu 610225, China; 3. Meteorological Disaster Prediction and Warning Engineering Laboratory of Sichuan Province, Chengdu 610225, China)

**Abstract:** In order to analyze the influence and possible mechanism of the Silk Road Pattern on summer temperature in China in recent decades, this study used statistical diagnostic methods such as Empirical Orthogonal Function, regression analysis, and correlation analysis, based on the CN05.1 high-resolution grid point temperature data and ERA5 atmospheric reanalysis data from 1961–2020. The results show that: (1) The Silk Road Pattern primarily spreads from west to east along the Asian jet stream, with a significant distribution of “-+-”, and its activity centers are mainly located in the Caspian Sea, Lake Balkhash and the northern region of China, and exhibit apparent interannual and interdecadal variations. The summer temperature in China shows an overall consistent trend, which changes from warm to cold from the 1960s to the 1980s, and then rises obviously after the 1990s. (2) There is a significant positive correlation between the Silk Road Pattern and the temperature in most areas of China during the same period in summer, except for the negative correlation in western Xinjiang, western Tibet, western Northeast and the Jianghuai area. (3) The Silk Road Pattern can lead to summer temperature anomalies in China by influencing circulation factors such as the middle and upper troposphere geopotential height, vertical velocity and vorticity advection in the Northern Hemisphere. Specifically, the positive geopotential height anomalies generated by the influence of the Silk Road Pattern are conducive to the maintenance of sunny weather, while the middle and upper troposphere is controlled by negative vorticity advection and dominated by downward motion, leading to the anomalous rise of summer temperature in China.

**Keywords:** climate change; Silk Road pattern; summer temperature; temporal and spatial variation; influence mechanism