

1960—2019年西北地区气候变化中的 Hiatus现象及特征

李哲^{1,2}, 丁永建³, 陈艾姣^{1,2}, 张智华^{1,2}, 张世强^{1,2}

(1. 西北大学陕西省地表系统与环境承载力重点实验室, 西安 710127; 2. 西北大学城市与环境学院, 西安 710127; 3. 中国科学院西北生态环境资源研究院 冰冻圈科学国家重点实验室, 兰州 730000)

摘要: 1998—2012年全球地表平均温度发生变暖停滞(Hiatus),然而Hiatus现象是否在全球各地均存在尚有争议,其在西北地区的表现及特征缺乏深入研究。本文基于1960—2019年气温地面观测数据,利用累积距平曲线、Mann-Kendall突变检验、滑动 t 检验及Yamamoto检验进行气候突变分析,结合线性倾向估计进行气候变化趋势分析,对西北地区气候变化中的Hiatus现象及其特征进行了探讨。结果表明:①西北地区年均气温在1986年、1996年和2012年分别突变,1996年突变升温后在1998—2012年间保持高位震荡;②1998—2012年间西北地区年均温变化率为 $-0.20\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$,呈现明显Hiatus现象,分季节看,冬季降温幅度最大,夏季仍保持升温,春季均温比秋、冬季提前1年开始和结束停滞期,从空间上看,西北地区东南部降温最显著,青藏高原不存在Hiatus;③2012年Hiatus结束后西北地区气温普遍快速升高,季节上以冬季升温最快,空间上以南疆升温最快。综合来看,1998—2012年的Hiatus现象在除青藏高原外的西北地区表现明显,停滞后的快速升温值得高度关注。

关键词: 气候变化;变暖停滞;突变检验;中国西北地区

DOI: 10.11821/dlxb202009003

1 引言

全球气候变化已成为制约人类社会发展的重大问题^[1]。IPCC第五次评估报告^[2]指出1951年以后的全球地表平均温度升高速率达到 $0.12\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$,1983—2012年是过去1400年来全球最热的30年,而1998—2012年间平均升温速率只有 $0.05\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$,说明1998年(超级厄尔尼诺年)以来全球变暖减缓,出现了变暖停滞(Global Warming Hiatus)现象。变暖停滞对整个气候系统产生了重要影响,如Delworth等^[3]指出Hiatus期间热带风异常导致北美西部地区干旱严重;Ueda等^[4]发现1999—2013年太平洋降温、印度洋升温对亚洲季风变化影响深刻,印太海温异常导致热带西太平洋降水增多,抑制了东亚中纬度地区降水;Zhao等^[5]指出Hiatus导致东亚沿海地区强热带风暴频发;Johnson等^[6]发现在Hiatus期间全球陆地夏季极端高温和冬季极端低温出现频率增加;Wang等^[7]发现Hiatus期间植被返青期不再提前、枯黄期不再推迟,春秋季物候保持稳定。同时,变暖停滞后的快速升温不容忽视。世界气象组织(WMO)发布的《2018年全球气候状况声明》^[8]明

收稿日期: 2019-09-06; 修订日期: 2020-06-30

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFC0404302); 国家自然科学基金项目(41730751) [Foundation: National Key R&D Program of China, No.2017YFC0404302; National Natural Science Foundation of China, No.41730751]

作者简介: 李哲(1996-),女,陕西汉中,硕士生,主要从事气候变化研究。E-mail: lizhe@stumail.nwu.edu.cn

通讯作者: 丁永建(1958-),男,甘肃天水人,研究员,主要从事气候变化及寒区水文与环境研究。E-mail: dyj@lzb.ac.cn

确指出, 2015—2018年是自有气温记录以来最热的4年。全球变暖导致水循环加强, 干旱和湿润地区的极端降水量都呈显著增长, 加剧干旱区洪水发生风险^[9]。

然而Hiatus现象是否在全球各地均存在尚有争议。有学者认为最近全球变暖停滞的特征是热带东太平洋出现类似拉尼娜式的降温, 而印度洋和热带大西洋升温^[4-5]; Garfinkel等^[10]发现平流层极地涡旋减弱导致欧亚大陆冬季发生Hiatus, 并指出即使温室气体浓度增加, 这样的停滞还会发生; Winslow等^[11]发现全球湖泊水温在Hiatus之前(1985—1998年)显著增加, 而在Hiatus期间没有显著变化, 证明了Hiatus的存在; 赵宗慈等^[12]指出1998—2014年的变暖趋缓确实存在, 但全球变暖总趋势没有改变; 苏京志等^[13]认为全球变暖是在冷暖波动中不断升温; Karl等^[14]基于更新的全球地表温度数据指出1998—2014年全球升温趋势高于IPCC-AR5的报道, 21世纪前15年的升温速率与20世纪后半叶的一样, 并没有减缓; Hausfather等^[15]在修订海面温度实测值系统偏差的基础上指出1997—2015年的海洋升温速率被低估; Huang等^[16]认为在考虑北极快速增暖的情况下全球平均温度并不存在Hiatus现象。另一方面对于变暖停滞的原因也多有争议, 一些研究者认为是自然外强迫引起, 另一些学者认为是气候系统内部变率的作用^[17-23]。就中国地区来看, Li等^[24]发现1998—2012年中国年均最高气温下降导致总体平均气温降低, 除西南地区外冬季最低温快速下降; 王岱等^[25]发现2000—2014年中国极端气温出现变暖减缓或变冷; 杜勤勤等^[26]发现1998—2012年间中国存在同全球变暖停滞类似的增温减缓现象, 其中东部季风区为中国最强降温区。

西北地区深居亚欧大陆腹地, 包括陕西、甘肃、宁夏、青海、新疆西北5省(自治区)及内蒙古西部(图1), 该地区包括青藏高原、蒙新高原和黄土高原交汇地域, 生态脆弱、自然环境复杂, 是对全球气候变化响应最敏感的区域之一^[27]。施雅风等^[28-29]提出1987年以来中国天山西部气候由暖干向暖湿转型; 陈亚宁等^[30]认为自1997年以来西北干旱区温度一直处于高位震荡状态, 升温趋势已不十分明显; 曲姝霖等^[31]发现1996—2015年西北地区极端高温事件出现频次呈弱递减趋势, 对全球变暖停滞现象存在响应; Zhang等^[32]发现2000年来祁连山疏勒河流域冰川退缩及物质流失加剧; 柴中华等^[33]发现中国绿洲严寒期缩短。以上研究表明, 西北地区是否存在与全球同步的变暖停滞现象尚有争议, 对于该停滞是否已经结束, 结束后的新的变化特征等问题的研究还不够深入。基于此, 本文依据观测资料, 对西北地区1960—2019年的气温时空变化特征进行分析, 对是否存在Hiatus及其是否已结束进行了探讨。

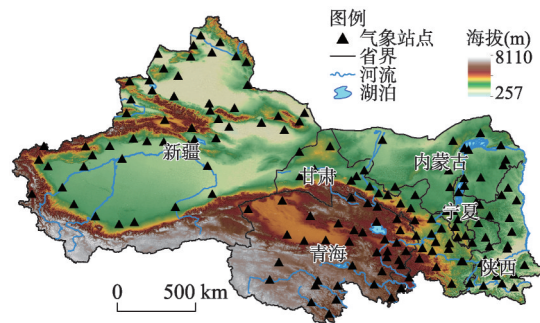


图1 中国西北地区范围及气象站点分布

Fig. 1 The location of Northwest China and the distribution of meteorological stations

2 数据来源与研究方法

2.1 数据来源

气温数据来自中国气象数据网 (<http://data.cma.cn>) 的中国地面气候资料日值数据集(V3.0)和中国地面气候资料月值数据集, 由于气象站点迁移、新建及撤销原因, 西北地区1960—2019年间有气温观测数据的气象站点数目变化如表1所示。为保证计算得到的

平均气温尽量接近真实值, 区域平均气温(年均温和季节均温)采用的站点为当年有气温观测数据的所有站点, 气温突变分析和气温年际变化都是在区域平均气温的基础上进行分析。该方法导致不同年份用于分析的站点数目可能存在差异, 但1979—2017年间的有效站点数目一直保持在166个左右, 因此该方法对于分析全球变暖停滞期(1998—2012年)Hiatus前后气温变化的特征影响较小。对于站点在个别月份数据缺失的情况, 采用该站前后两年该月份的均值代替。根据郑景云等^[34]提出的1980—2010年中国气候区划, 将西北地区划分为北疆(一区)、南疆(二区)、青藏高原(三区)、河西走廊及内蒙古西部(四区)、半干旱区(五区)和半湿润区(六区)6个气候分区(图2)。季节划分按照3—5月为春季、6—8月为夏季、9—11月为秋季、12月和1—2月为冬季。

表1 1960—2019年西北地区气象站点数目变化

Tab. 1 The number of meteorological stations in Northwest China from 1960 to 2019

年份	站点数目(个)	年份	站点数目(个)	年份	站点数目(个)
1960年	117	1966年	121	1979—1980年	165
1961年	118	1967年	122	1981—2017年	166
1962—1964年	119	1968—1970年	123	2018—2019年	124
1965年	120	1971—1978年	124		

2.2 研究方法

利用累积距平曲线法、Mann-Kendall突变检验法、滑动 t 检验法以及Yamamoto检验法进行气温突变分析, 通过对比分析来确定较为可靠的突变年份, 然后结合线性倾向估计对气温变化进行趋势分析。

2.2.1 累积距平曲线 累积距平是一种常用的、由曲线直观判断变化趋势的方法^[35]。对于序列 x , 其某一时刻 t 的累积距平表示为:

$$\hat{x}_t = \sum_{i=1}^t (x_i - \bar{x}) \quad (t=1, 2, \dots, n) \quad (1)$$

式中: \bar{x} 为序列 x 的均值。从累积距平曲线明显的上下起伏, 可以判断长期显著的演变趋势及持续性变化, 还可以诊断发生突变的大致时间。

2.2.2 Mann-Kendall突变检验 Mann-Kendall法是一种非参数统计检验方法, 具有人为影响少、定量化程度高的特点^[35-36], 已被广泛使用。对于具有 n 个样本量的时间序列 x , 构造一秩序列:

$$S_k = \sum_{i=1}^k r_i \quad (k=2, 3, \dots, n) \quad (2)$$

$$r_i = \begin{cases} 1 & x_i > x_j \\ 0 & x_i \leq x_j \end{cases} \quad (j=1, 2, \dots, i) \quad (3)$$

可见, 秩序列 S_k 是第 i 时刻数值大于 j 时刻数值个数的累计数。

在时间序列随机独立的假定下, 定义统计量:



图2 中国西北地区气候分区示意图
Fig. 2 The climate zones of Northwest China

$$UF_k = \frac{S_k - E(S_k)}{\sqrt{\text{Var}(S_k)}} \quad (k=1, 2, \dots, n) \quad (4)$$

式中: $UF_1 = 0$; $E(S_k)$ 和 $\text{Var}(S_k)$ 是 S_k 的均值和方差, 在 x_1, x_2, \dots, x_n 相互独立、且有相同连续分布时, 它们可由下式算出:

$$\begin{cases} E(S_k) = \frac{n(n+1)}{4} \\ \text{Var}(S_k) = \frac{n(n-1)(2n+5)}{72} \end{cases} \quad (5)$$

按时间序列 x 逆序 x_n, x_{n-1}, \dots, x_1 , 再重复上述过程, 同时使 $UB_k = -UF_k$ ($k=n, n-1, \dots, 1$), $UB_1 = 0$ 。若 UF_k 值大于 0, 则表明序列呈上升趋势, 小于 0 则表明呈下降趋势。当 UF_k 或 UB_k 曲线超过临界线时, 表明上升或下降趋势显著, 如果 UF_k 和 UB_k 两条曲线出现交点, 且交点在临界线之间, 则交点对应的时刻便是突变开始时间。

2.2.3 滑动 t 检验 滑动 t 检验是考察两组样本平均值的差异是否显著来检验突变^[35-36]。对于具有 n 个样本量的时间序列 x , 人为设置某一时刻为基准点, 基准点前后两段子序列 x_1 和 x_2 的样本分别为 n_1 和 n_2 , 两段子序列平均值为 \bar{x}_1 和 \bar{x}_2 , 方差为 s_1^2 和 s_2^2 , 定义统计量:

$$t_i = \frac{\bar{x}_1 - \bar{x}_2}{s \sqrt{\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}}} \quad (6)$$

$$s = \sqrt{\frac{(n_1-1)s_1^2 + (n_2-1)s_2^2}{n_1 + n_2 - 2}} \quad (7)$$

显然 $t_i \sim t(n_1 + n_2 - 2)$ 分布, 给定显著性水平 α , 得到临界值 t_α , 若 $|t_i| \geq t_\alpha$, 则认为基准点前后的 2 个子序列均值差异显著, 出现了突变。当 t_i 向上超出临界线表明出现减少突变, 向下超出临界线则表明出现增加突变。实际计算中通常取两段子序列长度相等, 即 $n_1 = n_2 = IH$ 。该方法的缺点是人为影响较大, 子序列长度的不同可能引起突变点漂移, 故在实际应用中需反复变动子序列长度 IH 进行实验比较, 以增进检查结果可靠性^[36]。

2.2.4 Yamamoto 检验 Yamamoto 法是从气候信息与气候噪声两方面讨论突变问题, 也是用检验两子序列均值的差异是否显著来判别突变^[35-36], 其原理同滑动 t 检验。定义信噪比为:

$$SNR = \frac{|\bar{x}_1 - \bar{x}_2|}{s_1 + s_2} \quad (8)$$

式中: s_1 和 s_2 分别为序列 x_1 和 x_2 的标准差。若 $SNR_i > 1$, 则认为在 i 时刻发生突变; 若 $SNR_i > 2$, 则认为发生强突变。Yamamoto 法也存在与滑动 t 检验相同的缺点, 需反复变动子序列长度进行比较^[36]。

3 结果分析

3.1 气温突变分析

从气温突变检验分析结果看 (表 2), 西北地区全区年均温在 1966 年出现了一次突变降低, 在 1986 年、1996 年和 2012 年都发生突变升高, 根据滑动 t 检验和 Yamamoto 检验结果, 1996 年的 t 值波峰及 S/N 值比 1986 年和 2012 年高, 说明 1996 年的突变升温更明显, M-K 法检验出来的突变年份 2001 年超出了 $\alpha = 0.05$ 的信度线, 结合其他方法发现该

表2 西北地区气温突变年份分析

Tab. 2 Analysis of abrupt change of air temperature in Northwest China

	累积距平曲线	M-K 检验	滑动 <i>t</i> 检验	Yamamoto 检验
全区 年均温	1996	2001**	<u>1966</u> *, 1986**, 1996**, 2012*	1966**, 1986**, 1996**, 2012*
春季	1996	2004**	<u>1974</u> *, 1996**	1974**, 1996**
夏季	1996	2000**	1996**	1996**
秋季	1997	1997**	<u>1965</u> *, 1987**, 1997**	1965**, 1987*
冬季	1986, 1997	1996**	1986**, 1997**	1986*, 1997**
一区	1996	1994**	1988**, 1996**	1988**, 1996*
二区	1996	1997**	1996**, 2014*	1996**, 2014*
三区	1997	1997**	1986**, 1997**	1986**, 1997**
四区	1996	1992**	<u>1966</u> *, 1986**, 1996**, 2012**	1966**, 1986*, 1996**, 2012**
五区	1996	1995**	1986**, 1996**, 2012*	1986*, 1996**, 2012**
六区	1996	1997**	1986**, 1996**, 2012**	1996*, 2012**

注: *, ** 分别表示通过 0.05、0.01 显著性检验; 带下划线的年份为突变降温年份, 不带下划线的为突变升温年份。

突变年份不可靠, 不是突变点。从各个季节均温突变检测结果看, 春季在 1974 年发生突变降温, 在 1996 年突变升温; 夏季气温在 1996 年出现显著突变上升; 秋季在 1965 年突变降温, 在 1987 年和 1997 年发生突变升温; 冬季气温在 1986 年和 1997 年突变升高, 1997 年升温更显著。对比各分区的年均温突变检测结果, 北疆 (一区) 气温在 1988 年和 1996 年发生突变上升; 南疆 (二区) 气温在 1996 年和 2014 年突变升高, 1996 年的突变更显著; 青藏高原地区 (三区) 发生突变升温的年份为 1986 年和 1997 年, 根据 *t* 值波峰及 S/N 值来看 1997 年突变更显著; 河西走廊及内蒙古西部 (四区) 在 1966 年出现突变降温, 在 1986 年、1996 年和 2012 年突变升温; 东南部半干旱区 (五区) 和半湿润区 (六区) 的气温突变年份一致, 都分别在 1986 年、1996 年和 2012 年发生突变升温, 半湿润区在 2012 年的突变更显著。

总体来看, 西北地区年均温在 1986 年、1996 年和 2012 年突变升高, 春、夏季气温在 1996 年突变升高, 秋、冬季气温在 1986 年左右和 1997 年突变上升; 各分区年均温基本上都在 1986 年和 1996 年发生突变升温, 青藏高原在 1997 年突变升温, 比其他区晚 1 年, 东部 3 个分区在 2012 年再次突变升温。李珍等^[37]对新疆气候突变分析发现新疆在 1980 年代中期进入增温多雨时期; 丁一汇等^[38]指出青藏高原地区年平均气温分别在 20 世纪 80 年代中期和 90 年代中期突变增暖, 90 年代中期的突变更显著; 贾文雄等^[39]发现祁连山区春夏季气温在 1997 年发生突变, 秋冬季在 1985 年左右发生突变; 孟秀敬等^[40]指出河西走廊在 1986 年发生增温突变; 高茂盛等^[41]发现陕西省平均气温在 20 世纪 90 年代中期发生显著突变。本文检测出的气温突变年份与先前的研究基本一致, 但由于先前其他学者的研究时间序列不够, 未能检测出 2012 年这一显著突变升温年份。

根据突变检验得到的突变年份, 结合气温距平变化图 (图 3), 发现西北地区年均气温在 1996 年显著升温突变后, 于 1998 年开始进入高位震荡, 1998—2012 年间没有升温趋势, 2012 年出现气温极低值, 之后再次快速升温; 秋、冬季平均气温在 1997 年突变上升于 1998 年之后趋于平稳状态并在 2012 年出现极低值; 春季平均气温在 1996 年突变升高后于 1997—2011 年间保持平稳状态, 并在 2011 年出现极低值; 夏季平均气温于 1996 年突变上升后继续保持升温态势, 在 1998 年和 2012 年左右没有出现极值。因此为探讨西北地区不同时段气温变化情况, 本文将研究时间序列划分为 1960—1998 年、1998—2012 年和 2012—2019 年, 其中春季以 1960—1997 年、1997—2011 年、2011—2019 年划分。

3.2 气温年际变化

1960—2019年西北地区年均气温整体上呈显著 ($\alpha = 0.01$) 上升趋势, 增温速率为 $0.26\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$, 与过去半个多世纪以来中国平均升温趋势 ($0.23\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$)^[2]基本一致, 是全球平均升温速率 ($0.12\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$)^[2]的2倍。其中1960—1998年呈不显著升温态势 ($0.08\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$), 1998—2012年间西北地区年均气温表现为降低趋势, 变化率为 $-0.20\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$, 低于IPCC-AR5给出的同期全球平均地表升温速率 ($0.05\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$)^[2], 表明1998—2012年西北地区年均气温出现了与全球陆地一致的变暖停滞 (Hiatus) 现象, 甚至表现出明显降温。2012年以后, 西北地区年均气温快速上升, 增温幅度高达 $1.04\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 。WMO发布的《2018年全球气候状况声明》^[8]指出2015—2018年是有记录以来4个最热年份, 全球变暖仍在加速。这说明无论在全球尺度还是西北地区均经历变暖停滞后的快速增温, 不容忽视。

从整个1960—2019年时间序列看, 西北地区各季节平均气温都显著 ($\alpha = 0.01$) 上升, 但不同时段不同季节气温变化特征有所差异 (表3、图4)。1960—1998年春、夏季均温变化趋势不明显, 气温变化率分别为 $-0.05\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 、 $0.03\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$, 秋、冬季升温幅度明显, 分别为 $0.13\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 和 $0.19\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 。1998—2012年春、秋、冬季平均气温都呈下降趋势, 冬季最为明显, 降幅达 $0.93\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$, 相较于1960—1998年冬季的升温速率下降了 $1.12\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$, 春、秋季气温下降速率分别为 $0.14\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 、 $0.13\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$; 夏季表现为升温趋势, 速率为 $0.16\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$, 该速率相较于1960—1998年夏季气温变化率有所提升。由此可见, 在1998—2012年间西北地区尤其是冬季表现出明显降温, 夏季仍然升温。其中, 春季均温是按1997—2011年计算, 表现为降温趋势, 可看出春季均温比秋、冬季均温及年均温提前1年开始和结束停滞期。从北半球尺度看, Kosaka等^[21]指出21世纪以来北半球冬季出现降温现象, 而夏季大部分地区仍保持升温趋势; Trenberth等^[42]发现北半球的冬季尤其是欧亚大陆出现最强烈的变暖停滞现象; 邢武成等^[43]认为夏季气温显著上升带来的消融是天山冰川退缩的主要原因。这表明西北地区季节气温变化趋势与北半球基本一致。2012年后各季节均温都迅速升高, 以冬季升温速率最快, 增幅达 $1.96\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$, 春、秋季分别为 $1.48\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 、 $1.00\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$, 夏季升温速率最慢, 为 $0.48\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 。

3.3 气温变化空间差异

1960—2019年间西北地区各分区年均温都显著 ($\alpha = 0.01$) 上升, 但在不同时段内不同分区的气温变化特征具有明显的区域差异 (表4、图5、图6)。1960—1998年西北地区年均温上升站点占比95.7% (159个), 其中显著 ($\alpha = 0.05$) 升温的站点占69.1% (110个), 河西走廊及内蒙古西部地区升温最快, 达到 $0.32\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ ($\alpha = 0.01$)。从不同季节看, 冬季升温最明显, 94.5% (157个) 的站点升温, 显著 ($\alpha = 0.05$) 升温站点有90个; 秋季升温站点占96.3% (160个), 但显著 ($\alpha = 0.05$) 升温的站点个数 (79个) 不及冬季; 春、夏季升温站点约占71% (118个), 夏季显著 ($\alpha = 0.05$) 升温站点个数 (43

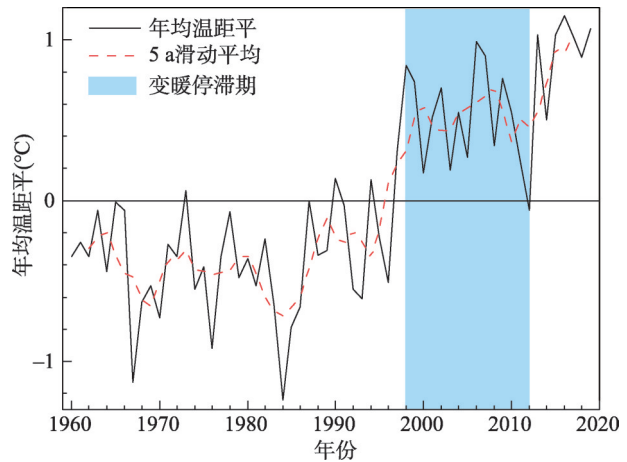


图3 1960—2019年西北地区年均气温距平变化

Fig. 3 Annual mean air temperature anomalies in Northwest China from 1960 to 2019

表3 不同时间序列西北地区全年和季节均温线性变化率(°C/10a)

Tab. 3 Trend of annual and seasonal average air temperature in Northwest China during different periods(°C/10a)

时间序列	1960—2019年	1960—1998年	1998—2012年	2012—2019年
年均温	0.26**	0.08	-0.20	1.04
春季均温	0.29**	-0.05	-0.14	1.48
夏季均温	0.24**	0.03	0.16	0.48
秋季均温	0.25**	0.13	-0.13	1.00
冬季均温	0.26**	0.19	-0.93	1.96

注: **表示通过0.01显著性检验。

个)比春季(14个)多,春、夏季在南疆和东南部半湿润半干旱地区约有48个站点呈降温趋势。

1998—2012年间,除青藏高原年均气温仍保持上升态势外,其余分区年均气温均呈现明显降低趋势(表4、图5、图7)。西北地区有72.8%(121个)的站点年均温呈现下降趋势,其中显著($\alpha = 0.05$)降温的站点有39个,主要集中在西北地区东部3个分区(半湿润区、半干旱区、河西走廊及内蒙古西部),其降温速率达到 $0.41\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 以上,超出西北地区平均降温速率的2倍,其中东南部半湿润区降温最为显著($\alpha = 0.05$),降幅为 $0.47\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$;南疆和北疆降温幅度略低于西北地区整体水平,平均降温速率为 $0.17\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 。青藏高原在1998—2012年间表现为升温趋势,升温速率为 $0.18\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$,其中青海有7个站点显著($\alpha = 0.05$)升温。由此可见,1998—2012年间西北地区除青藏高原外均表现出降温现象,东南部降温最显著,青藏高原仍保持升温。这与段安民等^[44]指出的在全球变暖趋缓期青藏高原仍迅速增温的结论一致。姚晓军等^[45]发现2000—2011年间可可西里地区湖冰冻结时间推迟、消融时间提前,认为气温上升是主要影响因素之一,也间接证明了高原在持续增温。分季节看,西北大部分地区冬季呈现快速降温,降温站点占比84.3%(140个),升温站点

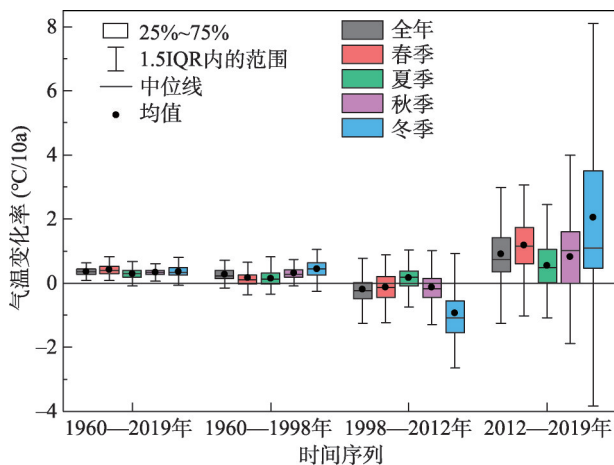


图4 不同时间序列西北地区各站点全年和季节均温线性变化率

Fig. 4 Trend of annual and seasonal average air temperature at each station in Northwest China in different periods

表4 不同时间序列西北地区各分区年均温线性变化率(°C/10a)

Tab. 4 Trend of annual average air temperature of each zone in Northwest China in different periods (°C/10a)

时间序列	1960—2019年	1960—1998年	1998—2012年	2012—2019年
全区	0.26**	0.08	-0.20	1.04
一区	0.28**	0.19	-0.18	1.00
二区	0.26**	0.10	-0.16	1.34
三区	0.35**	0.19**	0.18	0.63
四区	0.39**	0.32**	-0.41	0.32
五区	0.32**	0.21**	-0.42	0.60
六区	0.23**	0.10	-0.47*	0.63

注: *, **分别表示通过0.05、0.01显著性检验。

仅占15.7% (26个), 升温主要集中在青藏高原地区; 春、秋季降温站点约占66% (109个), 降温区与年均温相似, 其中北疆地区春季表现为降温、秋季为升温。夏季西北地区整体上仍表现为升温, 升温站点占66.2% (110个), 其中显著 ($\alpha = 0.05$) 升温有12个站点, 降温区主要分布在东南部半湿润区及北疆北部。总体来看, 冬季降温对年均温的下降贡献最大, 夏季整体升温, 青藏高原在各季节均表现为升温。

2012—2019年间, 西北地区气温再次快速增加, 年均温上升站点占89.7% (149个), 显著 ($\alpha = 0.05$) 升温的站点有11个, 降温站点仅有17个 (表4、图5、图8)。从空间上

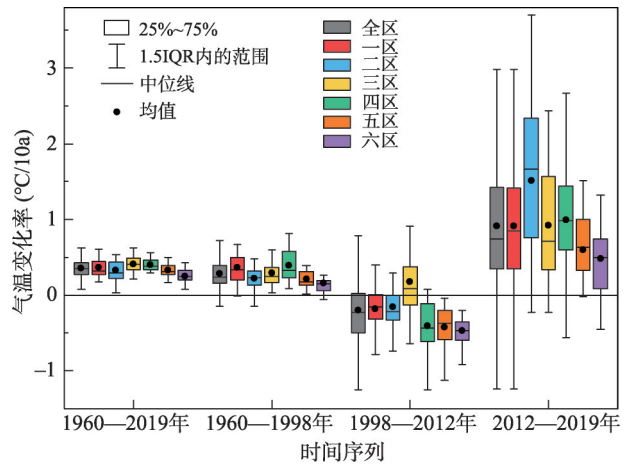


图5 不同时间序列西北地区各分区站点年均温线性变化率

Fig. 5 Trend of annual average air temperature at stations of each zone in Northwest China in different periods

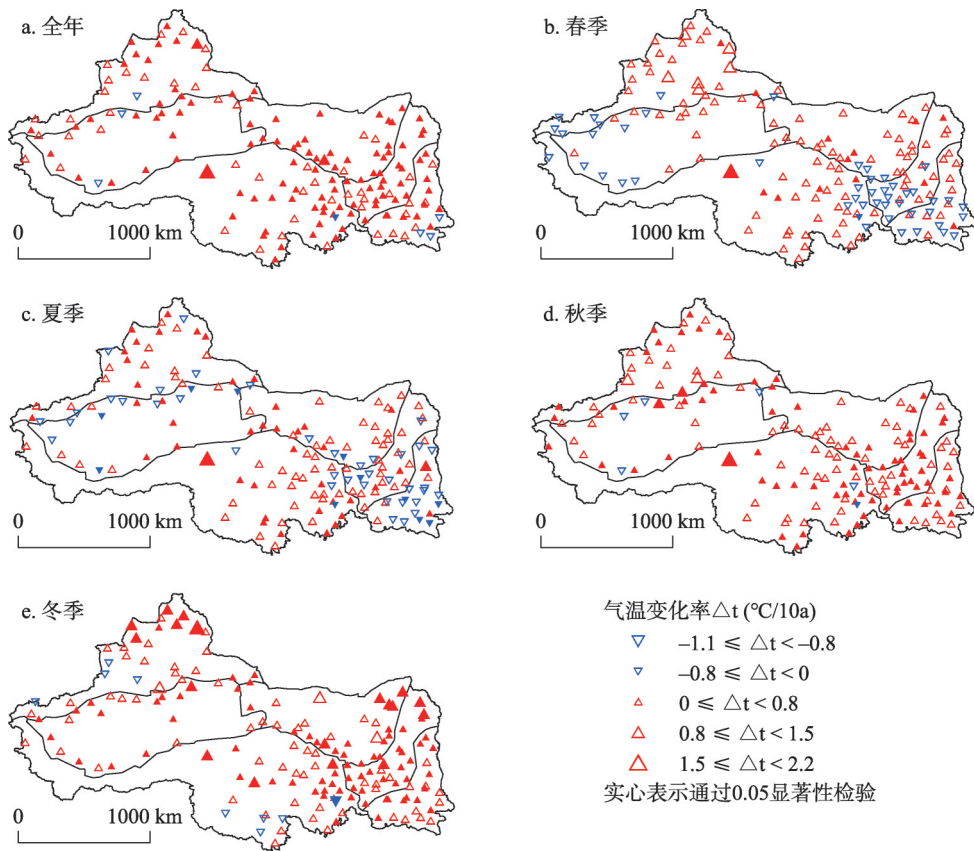


图6 1960—1998年西北地区全年和各季节平均气温变化率的空间变化趋势

Fig. 6 Spatial variation trend of annual and seasonal average air temperature in Northwest China during 1960-1998

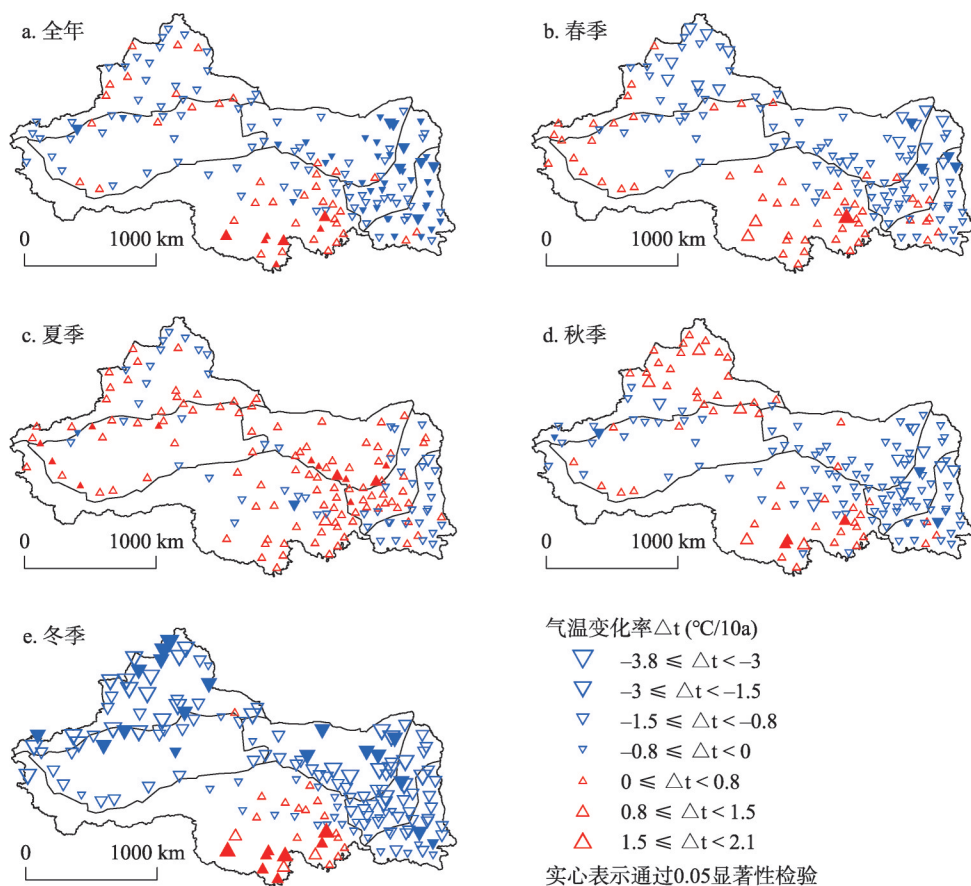


图7 1998—2012年西北地区全年和各季节平均气温变化率的空间变化趋势

Fig. 7 Spatial variation trend of annual and seasonal average air temperature in Northwest China during 1998-2012

看, 南疆升温最快, 升温速率达 $1.34\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$; 北疆地区紧随其后, 增温速率为 $1.00\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$; 其次为青藏高原和东南部半湿润区、半干旱区, 年均温线性变化率平均达到 $0.62\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$; 河西走廊及内蒙古西部升温相对较慢, 为 $0.32\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 。从各季节看, 冬季升温最为迅速, 有87.9% (146个) 的站点气温呈快速上升趋势, 其中有16个站点显著 ($\alpha = 0.05$) 升温, 主要集中在南疆和青藏高原; 春季升温站点占95.1% (158个), 但升温幅度和显著升温站点个数不及冬季; 夏、秋季升温站点约占75% (125个), 夏季在青藏高原地区有17个站点降温, 秋季在北疆和东南部半湿润区有30个站点降温。

4 结论与讨论

4.1 结论

(1) 西北地区全区年均温在1966年突变降低, 1986年、1996年和2012年分别突变升高; 春、夏季气温在1996年突变升高, 秋、冬季气温在1986年左右和1997年突变上升; 各分区年均温基本上都在1986年和1996年发生突变升温, 青藏高原在1997年突变升温, 比其他地区晚1年, 东部3个分区在2012年再次突变升温。西北地区平均气温在1996年左右突变升高后基本上在1998—2012年间保持高位震荡, 2012年后再次突变上升。

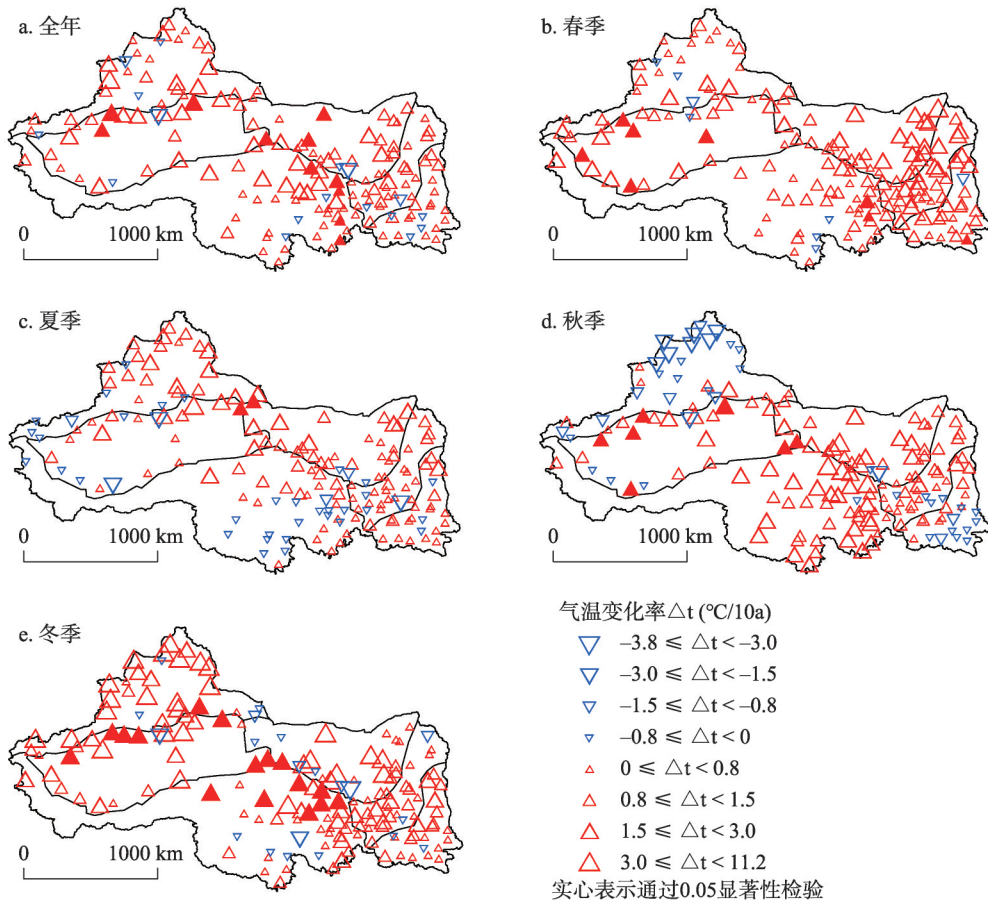


图8 2012—2019年西北地区全年和各季节平均气温的空间变化趋势

Fig. 8 Spatial variation trend of annual and seasonal average air temperature in Northwest China during 2012-2019

(2) 1998—2012年间西北地区年均气温变化率为 $-0.20\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ ，呈现出与全球陆地一致的变暖停滞 (Hiatus) 现象，甚至表现出降温。分季节看，冬季降温最明显，气温变化率为 $-0.93\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ ；夏季仍保持升温，升温速率为 $0.16\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ ；春季均温的变暖停滞时期为1997—2011年，气温变化率为 $-0.14\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ ，比秋、冬季均温及年均温提前1年开始和结束停滞期。1998—2012年间除青藏高原外的西北地区均表现出降温现象，东南部降温最显著，气温变化率为 $-0.47\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ ，青藏高原仍保持升温，升温速率为 $0.18\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 。

(3) 2012年Hiatus结束后到2019年间，西北地区年均温快速升高，气温变化率高达 $1.04\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ ，升温趋势不容忽视。从不同季节看，冬季升温最快、夏季最慢，分别为 $1.96\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 、 $0.48\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ ；从空间上看，南疆升温最快，升温速率达 $1.34\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ ，河西走廊及内蒙古西部升温相对较慢，气温变化率为 $0.32\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 。

4.2 讨论

在全球温室气体排放量剧增的背景下，仍有区域在1998—2012年出现了明显的变暖停滞现象，其驱动机制引发诸多国内外学者进行探索，目前将该机制主要分为2类：①辐射强迫下降，即太阳活动减弱、火山活动变化及平流层水汽减少。如Kaufmann等^[46]认为1998—2008年间太阳活动处于低值期，太阳辐射能量下降部分抵消了温室效应，导致全球变暖停滞；Santer等^[19]发现考虑火山爆发影响的气候模型能更好地模拟出1998—

2012年间的变暖停滞; Solomon等^[47]研究表明在1980—2000年间,平流层水汽增加导致全球地表变暖加速,而在2000年之后,平流层水汽减少约10%,导致2000—2009年地表变暖速率降低25%。②气候系统内部变率作用,主要是海洋中热量传输变化造成。科学家们^[48-50]普遍认为温室气体排放量剧增导致的多余的热量是进入了700 m以下的深海之中,而上层海洋热量并未明显增加,导致观测到的全球变暖停滞, Balmaseda等^[49]发现热量转移到热带太平洋和印度洋深处, Chen等^[50]认为热量增加区主要位于大西洋和南大洋深海。Kosaka等^[21]提出全球变暖停滞主要是因为赤道东太平洋变冷, Risbey等^[51]认为1997—1998年的强厄尔尼诺导致太平洋年代际震荡(PDO)呈负位相,造成赤道中东太平洋海温降低, England等^[52]认为是赤道信风增强导致Hadley环流和Walker环流增强,造成赤道中东太平洋变冷,未能向大气辐射多余热量,使得全球变暖停滞; Chen等^[50]指出大西洋经向翻转流(AMOC)增强将热带海水输送到北大西洋深海,导致北大西洋变暖,进而影响大气环流异常和赤道东太平洋降温。

目前,关于变暖停滞的区域和形成机制的讨论多集中在海洋,因为海洋是巨大的热量储存库,而对于陆地上不同地区出现变暖停滞现象的特征和机制研究还较为有限。Garfinkel等^[10]指出2000年以来平流层极地涡旋减弱导致欧亚大陆冬季降温; He等^[53]发现西伯利亚地区在全球变暖停滞期经历了显著降温,而常绿针叶林仍继续扩张; Xie等^[54]发现在1998—2013年中国年均气温出现明显的变冷趋势,以冷季降温为主,这与大气环流变化有关; 杜勤勤等^[26]指出1998—2012年中国东部季风区和西北干旱区对全球变暖停滞的响应显著,而青藏高寒区的响应并不显著; Huang等^[16]表明1998—2012年间北极地区气温加剧变暖,不存在变暖停滞。本文的研究结论证实了1998—2012年间中国西北地区存在变暖停滞现象,冬季降温最明显,夏季没有降温,青藏高原在此期间仍保持升温。已有研究^[10, 55-58]表明西伯利亚高压、极地涡旋、北极海冰、北半球环状模/北极涛动、太平洋年代际振荡、以及厄尔尼诺—南方涛动对中国冬季气温有很强的年代际影响,可以解释变暖停滞期冬季的剧烈降温及停滞结束后的快速升温现象。然而西北地区乃至全国的变暖停滞与太阳活动、火山爆发、平流层水汽增减等外部强迫影响因子之间有何关联?作为气候变化“放大器”的青藏高原在此期间却没有表现出同步变暖停滞现象,同样寒冷的北极地区也仍在加剧升温,两者之间有什么关系?其背后的形成机制又是什么?这些问题都需要在今后的研究中进一步探讨。

尽管1998—2012年间的变暖停滞确实存在,但许多科学家认为全球变暖仍在继续^[1, 12, 59-60],极端高温事件也频繁发生^[6]。对于未来是否还会出现类似的Hiatus现象, Nicola等^[61]指出如果21世纪末地球上化石燃料排放量保持在RCP 8.5情景下的高排放水平,那么像21世纪初10年左右的变暖停滞现象将不会再发生。本文发现在2012年变暖停滞结束后的西北地区再次出现加速升温,且变暖趋势不容忽视。因此,在今后的研究中一方面要加强对未来气候变化的预估,积极应对极端气候灾害的挑战,同时更需要国际间合作共同控制温室气体排放,实现人类可持续发展。

参考文献(References)

- [1] Qin Dahe. Climate change science and sustainable development. *Progress in Geography*, 2014, 33(7): 874-883. [秦大河. 气候变化科学与人类可持续发展. *地理科学进展*, 2014, 33(7): 874-883.]
- [2] IPCC. *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge, UK and New York, USA: Cambridge University Press, 2013.

- [3] Delworth T L, Zeng F, Rosati A, et al. A link between the Hiatus in global warming and North American drought. *Journal of Climate*, 2015, 28(9): 3834-3845.
- [4] Ueda H, Kamae Youichi, H M, et al. Combined effects of recent Pacific cooling and Indian Ocean warming on the Asian monsoon. *Nature Communications*, 2015, 6: 8854. Doi: 10.1038/ncomms9854.
- [5] Zhao Jiuwei, Zhan Ruifen, Wang Yuqing. Global warming hiatus contributed to the increased occurrence of intense tropical cyclones in the coastal regions along East Asia. *Scientific Reports*, 2018, 8: 6023. Doi: 10.1038/s41598-018-24402-2.
- [6] Johnson N C, Xie S P, Kosaka Y, et al. Increasing occurrence of cold and warm extremes during the recent global warming slowdown. *Nature Communications*, 2018, 9: 1724. Doi: 10.1038/s41467-018-04040-y.
- [7] Wang Xufeng, Xiao Jingfeng, Li Xin, et al. No trends in spring and autumn phenology during the global warming hiatus. *Nature Communications*, 2019, 10: 2389. Doi: 10.1038/s41467-019-10235-8.
- [8] World Meteorological Organization. Statement on the state of the global climate in 2018. Geneva, 2019.
- [9] Donat M G, Lowry A L, Alexander L V, et al. More extreme precipitation in the world's dry and wet regions. *Nature Climate Change*, 2017, 7(2): 154-158.
- [10] Garfinkel C I, Son S, Song K, et al. Stratospheric variability contributed to and sustained the recent hiatus in Eurasian winter warming. *Geophysical Research Letters*, 2017, 44(1): 374-382.
- [11] Winslow LA, Leach T H, Rose K C. Global lake response to the recent warming hiatus. *Environmental Research Letters*, 2018, 13(5). Doi: 10.1088/1748-9326/aab9d7.
- [12] Zhao Zongci, Luo Yong, Huang Jianbin. Debate on global warming 'Hiatus'. *Climate Change Research*, 2016, 12(6): 571-574. [赵宗慈, 罗勇, 黄建斌. 围绕全球变暖“停滞”的争论. *气候变化研究进展*, 2016, 12(6): 571-574.]
- [13] Su Jingzhi, Wen Min, Ding Yihui, et al. Hiatus of global warming: A review. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2016, 40(6): 1143-1153. [苏京志, 温敏, 丁一汇, 等. 全球变暖趋缓研究进展. *大气科学*, 2016, 40(6): 1143-1153.]
- [14] Karl T R, Arguez A, Huang B, et al. Possible artifacts of data biases in the recent global surface warming hiatus. *Science*, 2015, 348(6242): 1469-1472.
- [15] Hausfather Z, Cowtan K, Clarke D C, et al. Assessing recent warming using instrumentally homogeneous sea surface temperature records. *Science Advances*, 2017, 3: e1601207. Doi: 10.1126/sciadv.1601207.
- [16] Huang Jianbin, Zhang Xiangdong, Zhang Qiyi, et al. Recently amplified arctic warming has contributed to a continual global warming trend. *Nature Climate Change*, 2017, 7(12): 875-879.
- [17] Tollefson J. Climate change: The case of the missing heat. *Nature*, 2014, 505(7483): 276-278.
- [18] Trenberth K E. Has there been a hiatus? *Science*, 2015, 349(6249): 691-692.
- [19] Santer B D, Bonfils C, Painter J F, et al. Volcanic contribution to decadal changes in tropospheric temperature. *Nature Geoscience*, 2014, 7(3): 185-189.
- [20] Meehl G A, Hu A, Arblaster J M, et al. Externally forced and internally generated decadal climate variability associated with the Interdecadal Pacific Oscillation. *Journal of Climate*, 2013, 26(18): 7298-7310.
- [21] Kosaka Y, Xie S. Recent global-warming hiatus tied to equatorial Pacific surface cooling. *Nature*, 2013, 501(7467): 403-407.
- [22] Watanabe M, Shiogama H, Tatebe H, et al. Contribution of natural decadal variability to global warming acceleration and hiatus. *Nature Climate Change*, 2014, 4(10): 893-897.
- [23] Dong Lu, Zhou Tianjun, Dai Aiguo, et al. The footprint of the Inter-decadal Pacific Oscillation in Indian Ocean sea surface temperatures. *Scientific Reports*, 2016, 6: 21251. Doi: 10.1038/srep21251.
- [24] Li Qingxiang, Yang Su, Xu Wenhui, et al. China experiencing the recent warming hiatus. *Geophysical Research Letters*, 2015, 42(3): 889-898.
- [25] Wang Dai, You Qinglong, Jiang Zhihong, et al. Response of seasonal extreme temperatures in China to the global warming slow down. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2016, 38(1): 36-46. [王岱, 游庆龙, 江志红, 等. 中国极端气温季节变化对全球变暖减缓的响应分析. *冰川冻土*, 2016, 38(1): 36-46.]
- [26] Du Qinqin, Zhang Mingjun, Wang Shengjie, et al. Changes in air temperature of China in response to global warming hiatus. *Acta Geographica Sinica*, 2018, 73(9): 1748-1764. [杜勤勤, 张明军, 王圣杰, 等. 中国气温变化对全球变暖停滞的响应. *地理学报*, 2018, 73(9): 1748-1764.]
- [27] Chen Yaning, Yang Qing, Luo Yi, et al. Ponder on the issues of water resources in the arid region of northwest China. *Arid Land Geography*, 2012, 35(1): 1-9. [陈亚宁, 杨青, 罗毅, 等. 西北干旱区水资源问题研究思考. *干旱区地理*, 2012, 35(1): 1-9.]

- [28] Shi Yafeng, Shen Yongping, Hu Ruji. Preliminary study on signal, impact and foreground of climatic shift from warm-dry to warm-humid in Northwest China. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2002, 24(3): 219-226. [施雅风, 沈永平, 胡汝骥. 西北气候由暖干向暖湿转型的信号、影响和前景初步探讨. *冰川冻土*, 2002, 24(3): 219-226.]
- [29] Ma Xiaobo, Shi Yafeng, Shen Yongping, et al. An analysis of climate changing trend in Northwest China: Recent and historical periods. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2003, 25(6): 672-675. [马晓波, 施雅风, 沈永平, 等. 西北地区近代及历史时期气候变化趋势分析. *冰川冻土*, 2003, 25(6): 672-675.]
- [30] Chen Yaning, Li Zhi, Fan Yuting, et al. Research progress on the impact of climate change on water resources in the arid region of Northwest China. *Acta Geographica Sinica*, 2014, 69(9): 1295-1304. [陈亚宁, 李稚, 范煜婷, 等. 西北干旱区气候变化对水文水资源影响研究进展. *地理学报*, 2014, 69(9): 1295-1304.]
- [31] Qu Shulin, Tong Jilong, Tang Rui, et al. Changes in the extremely high temperature in Northwest China and its response to the stagnation of global warming. *Journal of Meteorology and Environment*, 2017, 33(4): 78-85. [曲殊霖, 仝纪龙, 唐睿, 等. 西北地区极端高温变化及其对气候变暖停滞的响应. *气象与环境学报*, 2017, 33(4): 78-85.]
- [32] Zhang Xiaowen, Li Haojie, Zhang Zhihua, et al. Recent glacier mass balance and area changes from DEMs and Landsat images in upper reach of Shule River Basin, northeastern edge of Tibetan Plateau during 2000 to 2015. *Water*, 2018, 10: 796. Doi: 10.3390/w10060796.
- [33] Chai Zhonghua, Liu Puxing. Spatial and temporal variations and their causes for the cold period in China's oases during 1960-2014. *Acta Geographica Sinica*, 2016, 71(5): 743-753. [柴中华, 刘普幸. 1960—2014年中国绿洲严寒期的时空变化特征与成因分析. *地理学报*, 2016, 71(5): 743-753.]
- [34] Zheng Jingyun, Bian Juanjuan, Ge Quansheng, et al. The climate regionalization in China for 1951-1980 and 1981-2010. *Geographical Research*, 2013, 32(6): 987-997. [郑景云, 卞娟娟, 葛全胜, 等. 中国1951—1980年及1981—2010年的气候区划. *地理研究*, 2013, 32(6): 987-997.]
- [35] Wei Fengying. *Modern Climatic Statistical Diagnosis and Prediction Technology* (2nd ed). Beijing: China Meteorological Press, 2007: 43-65. [魏凤英. *现代气候统计诊断与预测技术* (第2版). 北京: 气象出版社, 2007: 43-65.]
- [36] Fu Congbin, Wang Qiang. The definition and detection of the abrupt climate change. *Scientia Atmospherica Sinica*, 1992, 16(4): 482-493. [符淙斌, 王强. 气候突变的定义和检测方法. *大气科学*, 1992, 16(4): 482-493.]
- [37] Li Zhen, Jiang Fengqing. A study of abrupt climate change in Xinjiang region during 1961-2004. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2007, 29(3): 351-359. [李珍, 姜逢清. 1961—2004年新疆气候突变分析. *冰川冻土*, 2007, 29(3): 351-359.]
- [38] Ding Yihui, Zhang Li. Intercomparison of the time for climate abrupt change between the Tibetan Plateau and other regions in China. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2008, 32(4): 794-805. [丁一汇, 张莉. 青藏高原与中国其他地区气候突变时间的比较. *大气科学*, 2008, 32(4): 794-805.]
- [39] Jia Wenxiong, He Yuanqing, Li Zongxing, et al. The regional difference and catastrophe of climatic change in Qilian Mt. region. *Acta Geographica Sinica*, 2008, 63(3): 257-269. [贾文雄, 何元庆, 李宗省, 等. 祁连山区气候变化的区域差异特征及突变分析. *地理学报*, 2008, 63(3): 257-269.]
- [40] Meng Xiujing, Zhang Shifeng, Zhang Yongyong. The temporal and spatial change of temperature and precipitation in Hexi Corridor in recent 57 years. *Acta Geographica Sinica*, 2012, 67(11): 1482-1492. [孟秀敬, 张士锋, 张永勇. 河西走廊57年来气温和降水时空变化特征. *地理学报*, 2012, 67(11): 1482-1492.]
- [41] Gao Maosheng, Li Hongmei, Wang Weidong, et al. Climate resources trend and abrupt climate change in Shaanxi Province during 1961 to 2014. *Journal of China Agricultural University*, 2017, 22(11): 121-132. [高茂盛, 李红梅, 王卫东, 等. 1961—2014年陕西省气候资源变化趋势及突变分析. *中国农业大学学报*, 2017, 22(11): 121-132.]
- [42] Trenberth K E, Fasullo J T, Branstator G, et al. Seasonal aspects of the recent pause in surface warming. *Nature Climate Change*, 2014, 4(10): 911-916.
- [43] Xing Wucheng, Li Zhongqin, Zhang Hui, et al. Spatial-temporal variation of glacier resources in Chinese Tianshan Mountains since 1959. *Acta Geographica Sinica*, 2017, 72(9): 1594-1605. [邢武成, 李忠勤, 张慧, 等. 1959年来中国天山冰川资源时空变化. *地理学报*, 2017, 72(9): 1594-1605.]
- [44] Duan Anmin, Xiao Zhixiang, Wu Guoxiong. Characteristics of climate change over the Tibetan Plateau under the global warming during 1979-2014. *Climate Change Research*, 2016, 12(5): 374-381. [段安民, 肖志祥, 吴国雄. 1979—2014年全球变暖背景下青藏高原气候变化特征. *气候变化研究进展*, 2016, 12(5): 374-381.]
- [45] Yao Xiaojun, Li Long, Zhao Jun, et al. Spatial-temporal variations of lake ice in the Hoh Xil region from 2000 to 2011.

- Acta Geographica Sinica, 2015, 70(7): 1114-1124. [姚晓军, 李龙, 赵军, 等. 近10年来可可西里地区主要湖泊冰情时空变化. 地理学报, 2015, 70(7): 1114-1124.]
- [46] Kaufmann R K, Kauppi H, Mann M L, et al. Reconciling anthropogenic climate change with observed temperature 1998-2008. *Proceedings of the National Academy of Sciences of USA*, 2011, 108(29): 11790-11793.
- [47] Solomon S, Rosenlof K H, Portmann R W, et al. Contributions of stratospheric water vapor to decadal changes in the rate of global warming. *Science*, 2010, 327(5970): 1219-1223.
- [48] Meehl G A, Arblaster J M, Fasullo J T, et al. Model-based evidence of deep-ocean heat uptake during surface-temperature hiatus periods. *Nature Climate Change*, 2011, 1(7): 360-364.
- [49] Balmaseda M A, Trenberth K E, Källén E. Distinctive climate signals in reanalysis of global ocean heat content. *Geophysical Research Letters*, 2013, 40(9): 1754-1759.
- [50] Chen Xian Yao, Tung K K. Varying planetary heat sink led to global-warming slowdown and acceleration. *Science*, 2014, 345(6199): 897-903.
- [51] Risbey J S, Lewandowsky S, Langlais C, et al. Well-estimated global surface warming in climate projections selected for ENSO phase. *Nature Climate Change*, 2014, 4(9): 835-840.
- [52] England M H, McGregor S, Spence P, et al. Recent intensification of wind-driven circulation in the Pacific and the ongoing warming hiatus. *Nature Climate Change*, 2014, 4(3): 222-227.
- [53] He Yongli, Huang Jianping, Shugart H H, et al. Unexpected evergreen expansion in the Siberian forest under warming hiatus. *Journal of Climate*, 2017, 30(13): 5021-5039.
- [54] Xie Yongkun, Huang Jianping, Liu Yuzhi. From accelerated warming to warming hiatus in China. *International Journal of Climatology*, 2017, 37(4): 1758-1773.
- [55] Liang Sujie, Ding Yihui, Zhao Nan, et al. Analysis of the interdecadal changes of the wintertime surface air temperature over mainland China and regional atmospheric circulation characteristics during 1960-2013. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2014, 38(5): 974-992. [梁苏洁, 丁一汇, 赵南, 等. 近50年中国大陆冬季气温和区域环流的年代际变化研究. 大气科学, 2014, 38(5): 974-992.]
- [56] Gong Daoyi, Wang Shaowu. Influence of Arctic Oscillation on winter climate over China. *Acta Geographica Sinica*, 2003, 58(4): 559-568. [龚道溢, 王绍武. 近百年北极涛动对中国冬季气候的影响. 地理学报, 2003, 58(4): 559-568.]
- [57] Xiao Ying, Ren Yongjian, Du Liangmin. Effects of arctic sea ice on winter temperature in China under climate change. *Chinese Journal of Polar Research*, 2018, 30(1): 14-21. [肖莺, 任永建, 杜良敏. 气候变化背景下北极海冰对我国冬季气温的影响研究. 极地研究, 2018, 30(1): 14-21.]
- [58] Li Baofu, Chen Yaning, Shi Xun. Why does the temperature rise faster in the arid region of northwest China? *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2012, 117: D16115. Doi: 10.1029/2012jd017953.
- [59] Song Bin, Zhi Xiefei, Hu Yaoxing. A review of recent studies on global warming hiatus. *Transactions of Atmospheric Sciences*, 2015, 38(2): 145-154. [宋斌, 智协飞, 胡耀兴. 全球变暖停滞的形成机制研究进展. 大气科学学报, 2015, 38(2): 145-154.]
- [60] Wang Shaowu, Luo Yong, Zhao Zongci, et al. Pause for thought. *Climate Change Research*, 2014, 10(4): 303-306. [王绍武, 罗勇, 赵宗慈, 等. 对变暖停滞的思考. 气候变化研究进展, 2014, 10(4): 303-306.]
- [61] Maher N, Gupta A S, England M H. Drivers of decadal hiatus periods in the 20th and 21st centuries. *Geophysical Research Letters*, 2014, 41(16): 5978-5986.

Characteristics of warming hiatus of the climate change in Northwest China from 1960 to 2019

LI Zhe^{1,2}, DING Yongjian³, CHEN Aijiao^{1,2}, ZHANG Zhihua^{1,2}, ZHANG Shiqiang^{1,2}

(1. Shaanxi Key Laboratory of Earth System and Environmental Carrying Capacity, Northwest University, Xi'an 710127, China; 2. College of Urban and Environmental Sciences, Northwest University, Xi'an 710127, China;

3. State Key Laboratory of Cryospheric Science, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, CAS, Lanzhou 730000, China)

Abstract: The mean global surface air temperature data indicate that there might be a global warming hiatus during 1998-2012. However, whether it existed around the world is still controversial, and the characteristics of the hiatus in Northwest China remain unclear. Based on the in-situ observation data of air temperature from 1960 to 2019, we analyzed the characteristic of hiatus in Northwest China through the cumulative anomaly curve, the Mann-Kendall test, Move-t test, the Yamamoto test and the linear trend estimation. The results showed that the statistically significant change-point of the annual mean air temperature in Northwest China was in 1986, 1996, and 2012, respectively. The air temperature suddenly rose in 1996, and then kept stable from 1998 to 2012. The annual mean air temperature showed an obvious cooling trend by $-0.20\text{ }^{\circ}\text{C decade}^{-1}$ in Northwest China from 1998 to 2012. Meanwhile, the annual mean air temperature in winter had the largest decrease rate and that of summer increased. The east of Northwest China displayed the most significant cooling during 1998-2012, and the Tibetan Plateau was still heating up at the same time. The air temperature of Northwest China rose substantially after 2012, especially in winter, and southern Xinjiang experienced the strongest warming during 2012-2019. Generally speaking, the warming hiatus was evident in Northwest China during 1998-2012 except the Tibetan Plateau. Therefore, more attention should be paid to the marked upward trend in air temperature after the hiatus in Northwest China due to the crucial environment.

Keywords: climate change; warming hiatus; mutation test; Northwest China