

从季内演变过程认识青藏高原夏季东部气温的 长期趋势特征

多吉次仁^{1, 2, 3, 4} 施宁^{1, 2*}

1 南京信息工程大学气候系统预测与变化应对全国重点实验室/气象灾害教育部重点实验室/气象灾害预报

5 预警与评估协同创新中心, 南京 210044

6 2 南京信息工程大学大气科学学院, 南京 210044

7 3 西藏自治区气象台, 拉萨 850000

8 4 墨脱国家气候观象台, 林芝 860000

10 **摘要:** 夏季青藏高原(简称“高原”)气温存在先升温后降温的季内变化特征。
11 因此研究季内气温的长期变化, 有助于深化高原气温长期变化的认识。本文基于
12 JRA55 和 ERA5 两套再分析资料, 从气温的季内演变角度分析了东部夏季气温长
13 期变暖趋势的成因及其大气内部热力学机理。结果表明, 高原东部夏季平均气温
14 的增温趋势主要与三个方面有关: (1) 升温速率($\partial T / \partial t > 0$)在 6 月中、下旬
15 显著变快; (2) 降温速率($\partial T / \partial t < 0$)在 8 月中旬显著减缓; (3) 升温阶段
16 时长显著延长。热力学诊断结果表明, 气候上起降温作用的经向温度平流呈现出
17 长期减弱趋势, 它可能是高原东部夏季气温出现增暖的重要原因。需指出的是,
18 两套再分析资料在描述高原气温演变上基本取得了一致的结果, 但在描述热力学
19 收支方程各项的趋势上却存在一定的差异, 其中 JRA55 资料似乎揭示出更为一
20 致的诊断结果。

21 **关键词** 高原东部 夏季增温 气温倾向 季内演变

22 **文章编号** 2024088B

23 doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2502.24088

收稿日期 2024-08-21; 网络预出版日期

作者简介 多吉次仁, 男, 1991 年出生, 硕士, 从事青藏高原气候变化研究。E-mail: 1104676008@qq.com

通讯作者 施宁, E-mail: shining@nuist.edu.cn

资助项目 国家自然科学基金项目(42088101)和江苏省青蓝工程、西藏自治区科技计划项目重大科技专项
(XZ202402ZD0006-04)

Funded by National Natural Science Foundation of China (Grant 42088101) and Jiangsu Qing Lan Project、Major
Science and Technology Projects of the Xizang Autonomous Region Science and Technology Plan
(XZ202402ZD0006-04)

24 An Intraseasonal Evolution Perspective on the Long-term Trend of

25 Summer Air Temperature over the Eastern Tibetan Plateau

Duoji Ciren^{1,2,3,4}, Shi Ning^{1,2*}

27 1 State Key Laboratory of Climate System Prediction and Risk Management/Key Laboratory of Meteorological Disaster, Ministry
28 of Education/Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters, Nanjing University of
29 Information Science and Technology, Nanjing 210044

30 2 School of Atmospheric Sciences, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044

31 3 Meteorological Observatory of Tibet Autonomous Region, Lhasa 850000

32 4 Mêdog National Climate Observatory, Linzhi 860000

33

Abstract In summer, the air temperature on the Tibetan Plateau (referred to as the "Plateau") has the intraseasonal variation characterized by initial warming followed by cooling. Therefore, studying the long-term changes in intraseasonal air temperature will help to deepen the understanding of the long-term air temperature change on the Plateau. Based on the JRA55 and ERA5 reanalysis datasets, this paper analyzes the long-term warming trend of summer air temperatures in the eastern Tibetan plateau from the perspective of intraseasonal evolution, as well as its atmospheric thermodynamic mechanisms. The results show that the warming trend of the summer temperature in the eastern Tibetan plateau is mainly related to three factors: (1) the significantly accelerated warming rate in mid- and late June; (2) the significantly decelerated cooling rate in mid-August; (3) the significantly prolonged duration of the warming period. Thermodynamic diagnostic results indicate that the meridional temperature advection, which climatologically acts as a cooling role, shows a long-term weakening trend, which may be an important cause of the warming of summer temperatures in the eastern Tibetan plateau. It should be noted that while both reanalysis datasets generally reveal the consistent evolution of air temperature over the eastern Tibetan plateau, there are certain differences in describing the

51 thermodynamic budget equation, with the JRA55 dataset seemingly revealing better
52 diagnostic results.

53 **Keywords** eastern Tibetan plateau, summer warming, temperature tendency,
54 intraseasonal evolution

55

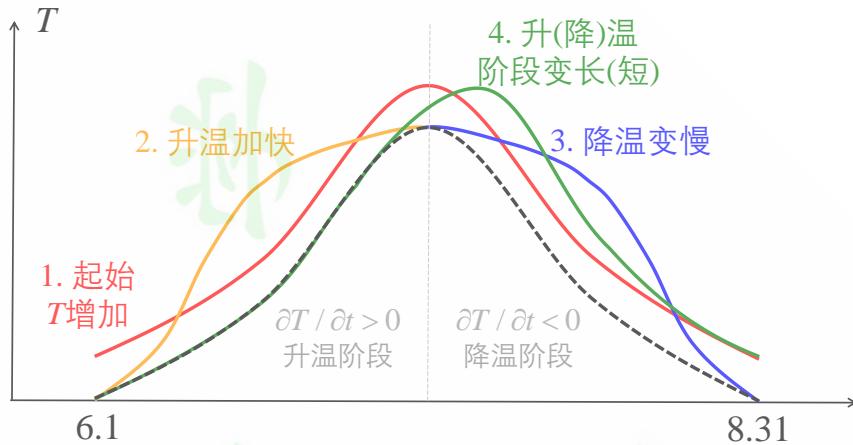
56 1 引言

57 近几十年来高原及其周边地区的气候变化已成为人们关注的焦点（如Jin et
58 al., 2009; Sun et al., 2020; Zhang et al., 2020; Luo et al., 2020; Wang et al., 2020; 杨
59 耀先等, 2022）。高原整体上表现出显著的长期增温趋势（Liu and Chen, 2000;
60 Frauenfeld et al., 2005; Yin et al., 2013; Zhang et al., 2013; Yan et al., 2020; 包文等,
61 2024），且其大小大约是全球平均气温增暖的2倍（Liu and Chen, 2000; Kang et al.,
62 2010; 陈德亮等, 2015; Duan and Xiao, 2015; Kuang and Jiao, 2016; Yan et al., 2020;
63 You et al., 2021）。通常认为非绝热加热的增强是增温的重要原因。具体而言，
64 人类活动造成的温室气体排放增加导致高原局地辐射强迫加强, 进而引起高原增
65 暖（Chen et al., 2003; Duan and Wu, 2006; 段安民等, 2006; Ma et al., 2017, 2019;
66 Jiang and Zhou, 2023; 包文等, 2024）；地表冰雪减少引起高原地表反照率减小，
67 造成更多的短波辐射被吸收，从而造成高原增暖（Ghatak et al., 2014; Pepin et al.,
68 2015; You et al., 2016; 吴玉婷等, 2022; 包文等, 2024），这可能是高原增暖不同
69 于其他地区的一个重要成因（吴玉婷等, 2022）；高原白天云量减少和夜间低云
70 量增加，分别导致了白天太阳短波辐射增强和夜间大气逆辐射增强，均有利于高
71 原增暖（Duan and Wu, 2006; Duan and Xiao, 2015; Yang and Ren, 2017）；高原上
72 空臭氧总量减少、气溶胶变化以及陆面植被返青期总体提前等原因都会导致高原
73 增暖（张人禾和周顺武, 2008; Guo and Wang, 2012; Cui et al., 2006; Jin et al., 2010;
74 Jiang et al., 2017; 黄清瀚等, 2018; 杨耀先等, 2022）。可以看出，尽管存在不同
75 的影响过程和机理，但上述研究均揭示出非绝热加热在高原增温中起着重要作用。
76 众所周知，气温的演变不仅与非绝热加热有关，也与绝热加热有关，比如水
77 平温度平流和垂直运动引起的膨胀压缩。但在高原增温的热力学机理研究中，讨
78 论绝热加热作用的较少。Li et al. (2020) 在研究高原低温的形成过程中发现，与

79 垂直运动有关的绝热过程作用大于非绝热作用，它主导着气温的变化过程。这启
80 发我们，在分析高原夏季增温的成因机理时，可能还要关注绝热加热的作用。

81 虽不如冬季气温的增暖趋势明显，高原夏季气温的增温趋势也十分显著(Liu
82 and Chen, 2000; 丁一汇和张莉, 2008; Guo and Wang, 2012; You et al., 2017)。考
83 考虑到高原夏季气温存在着明显的季节内演变特征，一个自然的问题是，高原夏季
84 平均地表气温的增暖趋势是否在不同的季节内时段中出现不同的趋势特征。值得
85 注意的是，来自下垫面的感热加热和潜热加热在春夏季中存在着显著的季节内演
86 变差异。其中，高原感热加热通常在5月达到最大后逐渐减小，而潜热加热则在7
87 月达到最大(叶笃正等, 1979; Yang et al., 2011; Shi and Liang, 2014; 韩熠哲等,
88 2018; 李宏毅和肖子牛, 2022)。此外，亚洲季风自6月中旬登上高原南部之后，
89 存在着随时间向东北推进的特征(Lau and Yang, 1997)。同时，基于位涡理论
90 构建的高原地表热动力指数SPV(He et al., 2022, 2023)也呈现出明显的季内变化
91 特征，它在夏初逐步增强，在7月达到最强后开始减弱。南亚高压作为高原上空
92 重要的环流系统，也呈现出明显的季节演变特征，它通常在3月以前位于西太平
93 洋上空，大约在5月向西北方向移到东南亚地区，最终在夏季移动到高原上空并
94 维持(刘伯奇, 2009; 薛旭和陈文, 2015)。由此可见，无论是地表的非绝热加热，
95 还是环流系统，均出现了显著的季内演变特征。

96 以往研究高原增暖特征，大多是从夏季平均气温异常的角度进行分析。实际
97 上从气温的季内演变($\partial T / \partial t$)角度来看，高原气温在夏季中通常存在着先上升
98 ($\partial T / \partial t > 0$)、后下降($\partial T / \partial t < 0$)的演变过程，即存在着升温和降温的两个
99 阶段。因此，夏季平均气温的增加可能与以下四个相对独立的方面有关(图1)：
100 (1) 6月初始温度增加，(2) 升温过程加快，(3) 降温过程减慢和(4) 升温
101 阶段变长和降温阶段变短。为此，本文将从气温季内演变的角度分析高原夏季平
102 均气温的趋势变化，并进一步分析其热力学成因。本文第2节介绍所用的资料和
103 方法。第3节为本文的主要结果，其中分析了高原东部夏季平均气温与季内气温
104 倾向的长期变化趋势及其大气内部热力学成因分析。第4节给出全文的结论和讨
105 论。



106
107 图1 夏季平均气温增暖的概念图。黑色虚线表示典型的夏季气温演变，其左半段为升温阶段，
108 右半段为降温阶段。红色实线、橙色实线、蓝色实线和绿色实线分别表示夏季平均气温
109 增暖所对应的气温季内演变的四种理想情形：（1）因6月初气温增加但气温倾向
110 $(\partial T / \partial t)$ 未发生改变，（2）升温加快，（3）降温变慢以及（4）升（降）温阶段变
111 长（短）

112 Fig 1. Schematic plot for summer warming. Black dashed line represents the typical evolution of
113 summer air temperature, with the left half being the warming phase and the right half being
114 the cooling phase. Red solid line, orange solid line, blue solid line and green solid line
115 represent four idealized scenarios corresponding to the warming of the summer mean
116 temperature: (1) increased temperatures in early June without a change in temperature
117 tendency ($\partial T / \partial t$), (2) accelerated warming, (3) slowed cooling, and (4) extended (shortened)
118 warming (cooling) phases
119

120 2 资料与方法

121 2.1 资料

122 本文使用日本气象厅提供的逐日再分析资料JRA55 (Kobayashi et al., 2015)，
123 研究时段为1958~2022年夏季（6月至8月）。资料的水平分辨率为 $1.25^\circ \times 1.25^\circ$ 。
124 气象要素包括2 m气温 (T_{2m})、地表气压以及等压面上的气温 (T)、风场
125 (u 、 v 、 ω) 和非绝热加热率 (Q)。实际上，本文也使用了ERA5 (the fifth
126 generation of European Centre for Medium-Range Weather Forecasts Reanalysis) 再
127 分析资料中的气温和风场，水平分辨率为 $2^\circ \times 2^\circ$ (Hersbach et al., 2020)。在高
128 原地区，上述两套再分析资料与地面观测站点资料有较好地一致性，尤其是
129 JRA55资料 (姚慧茹和李栋梁, 2016; 吴佳等, 2022)。两套再分析资料的非绝热
130 加热率均通过剩余法计算而来。

131 考虑到高原观测站点主要集中在中东部地区 (Liu and Chen, 2000; Guo and
132 Wang, 2012; You et al., 2017)，而这些台站资料通常也是同化系统生成再分析资
133 料的重要资料来源。为此，本文将选取高原东部地区 [27.5 °~40 °N, 90 °~105 °E] 作
134 为研究区域（图2a、b蓝色虚线）。后文将进一步对选择此区域的原因进行讨论。

135 2.2 方法

136 本文采用热力学方程对气温倾向进行诊断 (He and Black, 2016; 符诗怡等,
137 2023) :

$$\frac{\partial \bar{T}}{\partial t} = \underbrace{-u \frac{\partial \bar{T}}{\partial x} - v \frac{\partial \bar{T}}{\partial y}}_{H} + \underbrace{\bar{\omega} \frac{R \bar{T}}{pc_p} - \bar{\omega} \frac{\partial \bar{T}}{\partial p}}_{V} + \underbrace{(-\nabla \bullet \bar{V} \bar{T}')}_{HE} \\ + \underbrace{\left(-\frac{\partial}{\partial p} \bar{\omega}' T' + \frac{R}{pc_p} \bar{\omega}' T' \right)}_{VE} + \bar{Q} \quad (1)$$

138 式中的“—”和“’”分别表示旬平均和相对于旬平均的逐日异常， $R=287 \text{ J K}^{-1} \text{ kg}^{-1}$
139 为气体常数， $c_p=1004.6 \text{ J K}^{-1} \text{ kg}^{-1}$ 为定压比热容， T 为等压面上的气温场，其它
140 变量为常见变量。公式 (1) 左端的气温倾向采用中央差计算：

$$\frac{\partial \bar{T}}{\partial t} = \frac{\bar{T}(n+1) - \bar{T}(n-1)}{2\Delta t} \quad (2)$$

141 这里 $\bar{T}(n+1)$ 和 $\bar{T}(n-1)$ 分别表示后一旬和前一旬气温， Δt 取为 10 天。公式 (1)
142 右端前两项表示水平温度平流项 H ，它由纬向温度平流 (H_z) 和经向温度平流
143 (H_m) 构成；右端第三和第四项表示垂直运动引起的温度变化项 V (简称垂直运
144 动项)，它由压缩膨胀项 (V_c) 和垂直温度平流项 (V_a) 构成；右端第五项表
145 示涡动热通量水平辐合辐散项 HE (简称水平涡动项)，右端第六项表示涡动热
146 通量垂直辐合辐散项 VE (简称垂直涡动项)，右端第七项 Q 表示非绝热项。为表
147 示高原东部气温的整体变化状况，本文对公式 (1) 中的每一项均在高原东部地
148 区进行了区域平均。本文主要分析高原东部 500 hPa 等压面气温在夏季各旬中的
149 增温特征及其热力学机理。相较于使用地表气温资料，等压面气温资料更易进行
150 热力学诊断。

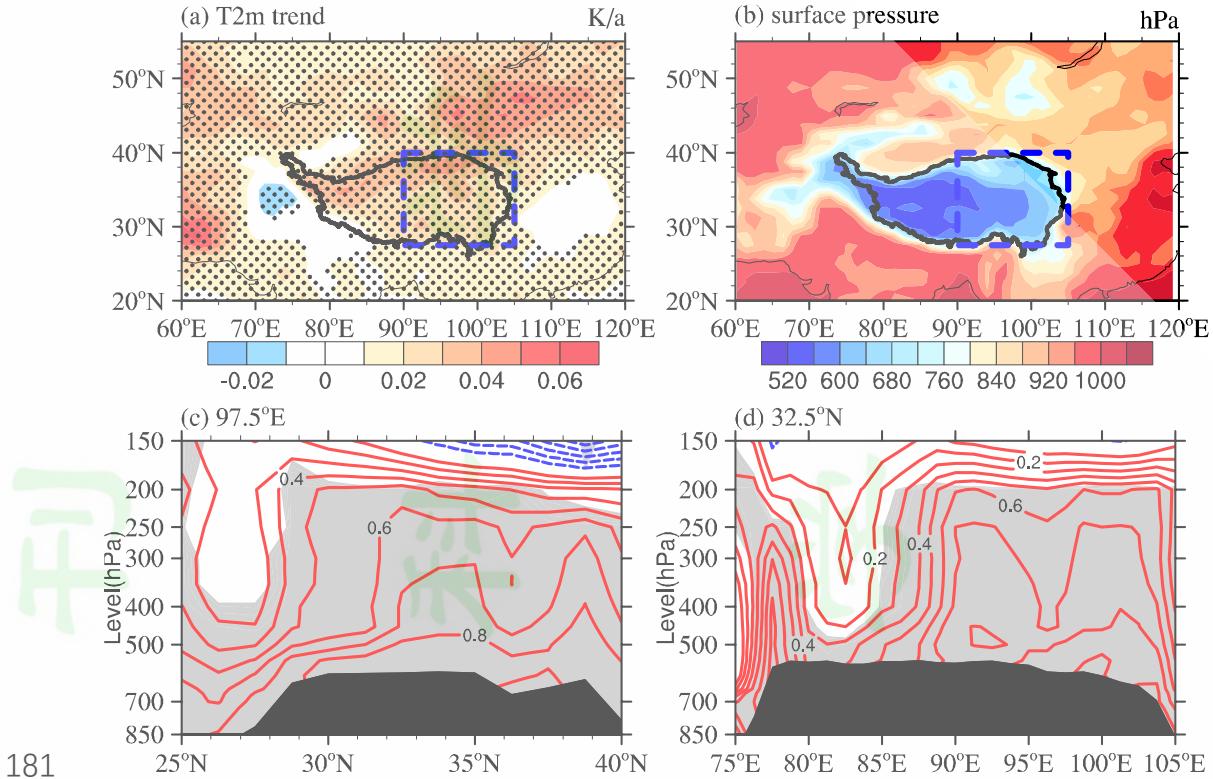
本文还将利用公式（1）对气温的长期趋势进行大气内部热力学诊断，即计算出公式（1）中每一项的长期趋势。通过对分析公式（1）左、右两端各项长期趋势的符号和大小，即可定性理解高原东部气温趋势变化的大气内部热力学成因。在分析公式（1）各项的长期趋势变化时，使用了Student's *t*进行了显著性检验。

3 主要结果

3.1 夏季气温趋势变化和环流特征

图2和图3首先给出高原及周边地区相关变量在1958~2022年中的夏季平均及线性趋势等基本特征。因JRA55和ERA5两套再分析资料揭示出的环流场特征基本一致，为简便起见，这里仅给出基于JRA55资料得出的结果。

从图2a可以看出，近65年来高原及周边地区夏季 $T2m$ 呈现出显著上升趋势。其中，高原主体的增温趋势强度超过 0.2 K (10年)^{-1} ，增暖最明显的地区为高原北部至蒙古高原。这种高原北部地区增暖更为明显的特征可能与北部蒸发较少有关（Sheng et al., 2012）。图2b给出了65年气候平均的夏季地表气压。由图可见，地表气压呈现西低东高的特征，90°E以西的地表气压基本低于560 hPa，而以东的地表气压在640 hPa左右。整体上，高原地表气压接近于600 hPa。为进一步讨论等压面气温与 $T2m$ 之间的关系，图2c和d给出了夏季平均的 $T2m$ 与各等压面气温的相关系数。可见，在对流层中， $T2m$ 与气温呈显著正相关关系，整体数值达0.7以上，最大相关系数出现在贴近地表的500-600 hPa等压面上。值得注意的是，两者的相关系数在高原的西部和南部明显偏低（图2c和2d），尤其是在[27~28 °N]和[80~85 °E]地区，其500-600 hPa的数值仅为0.4左右。由此可见，相较于高原西部，在高原东部用500 hPa气温代表 $T2m$ 更为合适，这也是本文选取高原东部进行分析的主要原因。朱丽华等（2015）提出的上层气温出现了与 $T2m$ 相反的趋势变化特征。实际上，高原 $T2m$ 与150 hPa以上的平流层气温呈现显著的反相关关系（图略），这至少部分支持了朱丽华等（2015）的结论。实际上，本文也利用了1958~2018年的高原东部[27.5~40 °N, 90~105 °E]范围内78个台站地表气温资料，其与两套再分析资料相关系数的垂直剖面图与图2c和2d十分类似（图略）。可见，本文所用的高原东部再分析资料能够较好地代表台站资料。

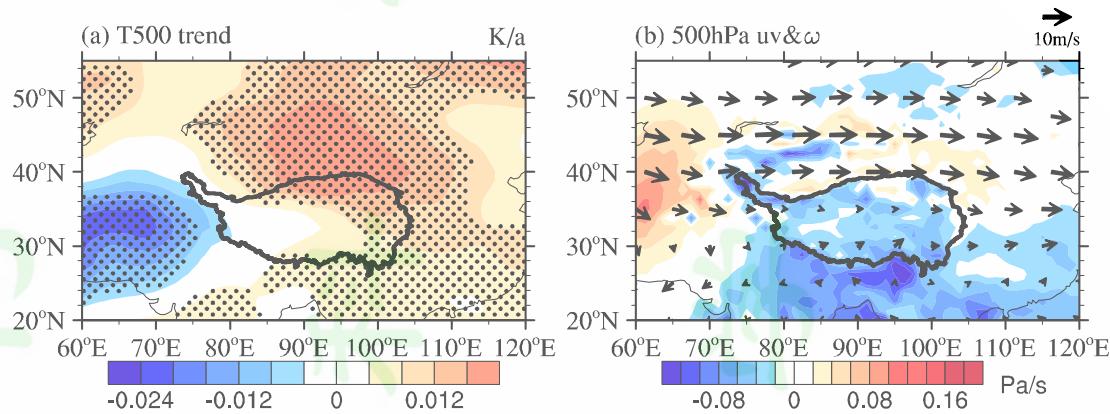


181
182 图2 1958~2022年高原及周边地区夏季的变量场。 (a) T_{2m} 线性趋势 (单位: K/年), (b)
183 气候平均地表气压 (单位: hPa), (c) 和 (d) 为 T_{2m} 和各等压面气温的相关系数在
184 97.5 °E和32.5 °N的垂直剖面图 (等值线间隔0.1)。 (a) 中黑色打点区域和 (c、d) 中
185 灰色阴影均表示通过0.05显著性检验, 黑色阴影为地形。 (a) 和 (b) 中蓝色虚线框为
186 研究区域[27.5 °~40 °N, 90 °~105 °E], 黑色粗实线为3000 m的地形等高线, 表示高原主体
187 部分

188 Fig. 2 Summer variables in the plateau and surrounding regions from 1958 to 2022. (a) Linear
189 trend of T_{2m} (units: K/year), (b) climatological mean surface pressure (units: hPa), (c) and
190 (d) correlation coefficients between T_{2m} and air temperature at various pressure levels in a
191 vertical cross-section at 97.5 °E and 32.5 °N (contour interval 0.1), respectively. Black dots in
192 (a) and (c、d) indicates regions passing the 0.05 significance test, and black shading
193 represents terrain. Blue dashed boxes in (a) and (b) outline the study region [27.5 °~40 °N,
194 90 °~105 °E]. The black thick solid line represents the 3000 m contour line, indicating the
195 main part of the plateau

196
197 图3a给出了500 hPa气温的长期趋势变化。与 T_{2m} 在高原东部存在高相关性
198 相一致的是, 高原东部的500 hPa气温趋势变化 (图3a) 与 T_{2m} 趋势变化 (图2a)
199 基本一致。在高原西部未出现显著的趋势变化。至于高原以东的我国东部地区出
200 现显著增温趋势以及高原以西的伊朗高原附近地区出现的显著降温趋势, 它们与
201 局地的 T_{2m} 趋势变化有较大的差异, 这应当与这些地区500 hPa等压面离地面较
202 远有关 (图2b), 本文暂不予讨论。为方便后文的诊断分析, 图3b给出了高原及

203 其周边地区夏季500 hPa环流场。可见，高原地区夏季盛行上升运动；高原及周
 204 边地区均由西风控制，但当西风经过高原时风速迅速减弱，这主要与高原地形对
 205 风场的摩擦作用有关。在经向风场上，高原南部和北部分别表现为南风和北风，
 206 其中南风分量的强度大于北风分量。整体上，高原上空呈现出气旋性环流特征。



207
 208 图3 1958~2022年高原及周边地区夏季500 hPa (a) 气温线性趋势 (单位: K/年) 和 (b) 环
 209 流场 (填色为垂直速度, 单位: Pa/s; 矢量为水平风场, 单位: 10m/s)。(a) 中黑色
 210 打点区域表示通过0.05显著性检验。黑色粗实线为3000 m的地形等高线, 表示高原主体
 211 部分

212 Fig. 3 Summer variables in the plateau and surrounding regions from 1958 to 2022. (a) linear
 213 trend of 500 hPa air temperature (units: K/year), and (b) climatological mean 500 hPa
 214 circulation field (shading represents vertical velocity, units: Pa/s; vectors represent horizontal
 215 wind field, units: 10m/s). Black dots in (a) indicate regions passing the 0.05 significance test.
 216 The black thick solid line represents the 3000 m contour line, indicating the main part of the
 217 plateau
 218

219 3.2 气温倾向的变化特征

220 图4a为两套再分析料揭示出的1958~2022年夏季气候平均高原东部500 hPa
 221 气温倾向 $\partial T / \partial t$ 的逐旬演变。由图可见，气温自6月上旬就存在着较明显的升温
 222 过程 ($\partial T / \partial t > 0$)。随后，升温过程逐步减弱，直至8月上旬气温倾向接近0值，
 223 这对应着高原东部气温在此时达到最高。由此可见，就高原东部地区而言，夏季
 224 气温最高值通常出现在8月上旬，而不是在整个夏季的中间时间——7月中旬。在
 225 8月上旬之后，气温开始逐步下降 ($\partial T / \partial t < 0$)，其降温速率随着季节推进而逐
 226 步增强。

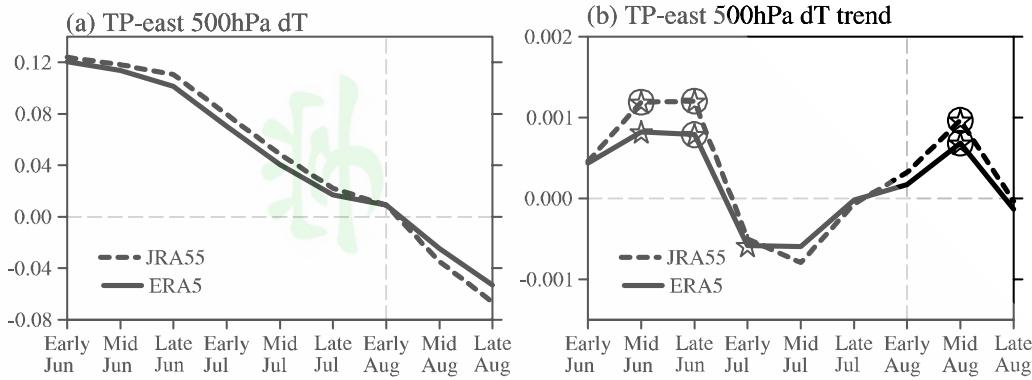
227

228 图4 1958~2022年高原东部500 hPa气温倾向的逐旬演变。 (a) 气候平均 (K/旬), (b) 线
 229 性趋势 (K/旬/年)。虚线和实线分别为JRA55和ERA5再分析资料, 坚虚线表示夏季中
 230 最高气温所在旬, 横虚线为0值参考线; (b) 中星号和圆圈分别表示通过0.1和0.05显著
 231 性检验

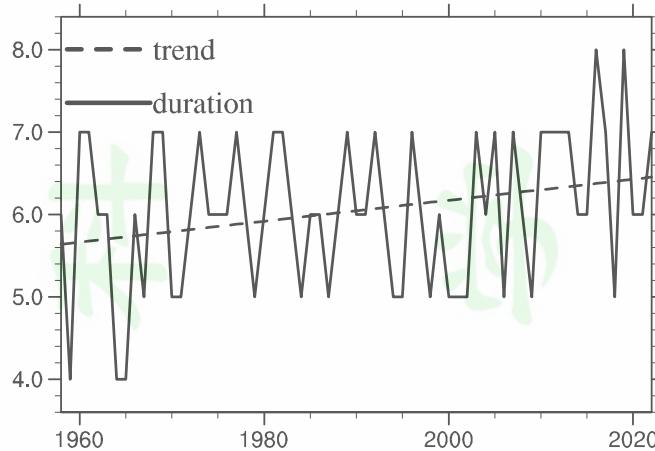
232 Fig. 4 Ten-day-period evolution of the 500 hPa temperature tendency over the eastern plateau
 233 from 1958 to 2022. (a) Climatological mean (K/ten-day period), (b) linear trend (K/ten-day
 234 period/year). Dashed and solid lines represent the JRA55 and ERA5 reanalysis datasets,
 235 respectively. Vertical dashed lines indicate the ten-day period of the highest temperature
 236 during summer, and horizontal dashed lines represent the zero value reference line; in (b),
 237 stars and circles indicate regions passing the 0.1 and 0.05 significance tests, respectively.
 238

239 图4b为夏季各旬高原东部500 hPa气温倾向在1958~2022年期间的长期变化
 240 趋势。可见, 两套再分析资料揭示出的结果基本一致, 即6月中、下旬以及8月中
 241 旬的气温倾向存在显著的趋势变化。相较而言, ERA5揭示出的气温倾向在6月中
 242 旬的正值趋势的显著性较弱, 仅通过0.1显著性检验。虽然上述显著的趋势变化
 243 均呈现为正值, 但它们表示的含义不同。这主要是因为在气候平均上, 气温倾向
 244 在6月中、下旬为正值, 而在8月中旬为负值(图4a), 因此图4b所揭示的显著正
 245 值趋势在6月中、下旬表明该时期的升温过程显著变快, 而8月中旬的显著正
 246 值趋势则表明该时期的降温过程显著变慢。两套再分析资料均揭示出气温倾向在7月
 247 出现了负值趋势, 但只有ERA5资料揭示出7月上旬的负值趋势可通过0.1显著性
 248 检验。若在整个夏季内对各旬气温倾向进行时间积分后可以发现, 高原夏季整体
 249 表现为净的正值气温倾向。换而言之, 高原东部夏季平均气温的增暖应当与图1
 250 示意图中的第二、三种情况对应, 即升温过程加快和降温过程变慢可导致高原东
 251 部夏季平均气温的增暖。

252 此外, 从图4b来看, 8月上旬的气温倾向尽管未通过显著性检验, 但其正值
 253 趋势表明夏季的升温阶段可能有所延长以及降温阶段有所缩短。为进一步研究此

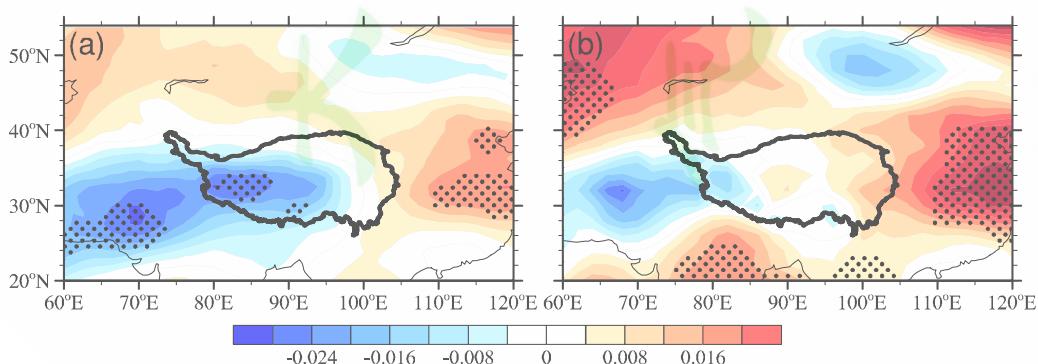


254 问题，本文计算了每年夏季的升温阶段时长（图5），即以每年以6月上旬为其开
255 始时间，最后一次气温倾向为正值的旬作为其结束时间。经计算，在1958~2022
256 年期间，升温阶段以大约0.1旬/10年的趋势速度增加，该数值通过了0.05显著性
257 检验。由此可见，高原东部夏季气温增暖也与升（降）温阶段的延长（缩短）有
258 关，即图1中的第四种情况。



259
260 图5 1958~2022年高原东部夏季升温阶段时长的逐年演变（单位：旬/年）
261 Fig.5 Duration of the warming period in the eastern Tibetan plateau in summer from 1958 to 2022

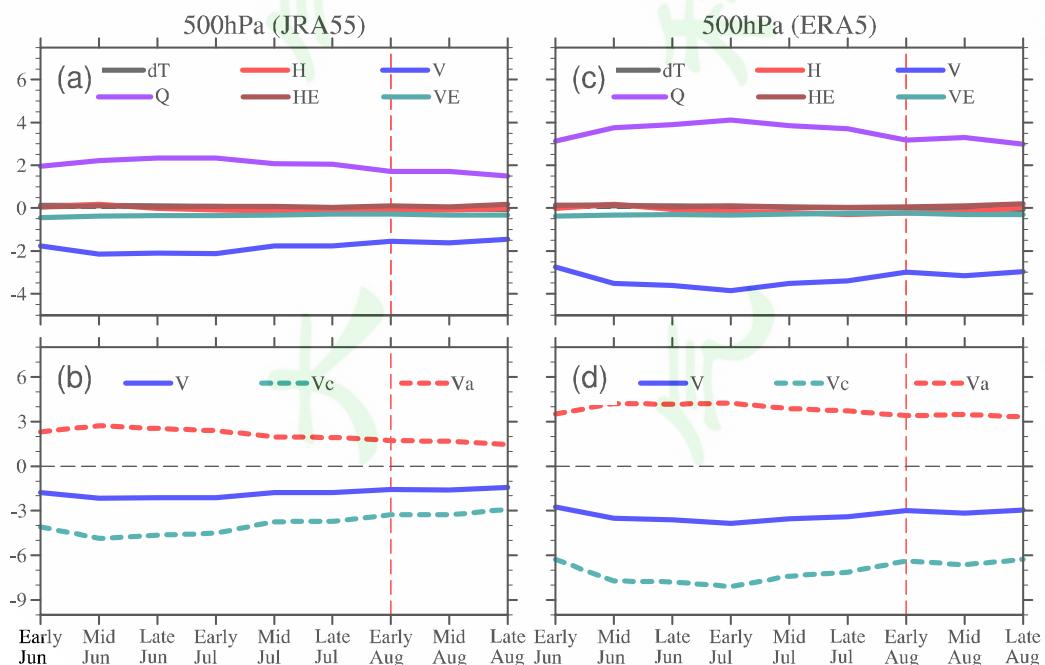
262 (ten-day period/year)
263
264 至于图1示意图中平均气温增加的第1种情形，即夏季平均气温的增暖可能与
265 6月初气温增暖有关，图6表明高原东部6月上旬的气温增暖并不显著。JRA55资
266 料甚至揭示出高原西南部存在着明显的降温趋势（图6a）。这基本排除了高原东
267 部夏季平均气温的增暖与6月初气温的增暖有关。



268
269 图6 1958~2022年高原及周边地区6月上旬500 hPa气温的线性趋势（单位：K/年）。(a) JRA55
270 资料，(b) ERA5资料。图中黑色圆点表示通过0.05显著性检验
271 Fig. 6 Linear trends of 500 hPa air temperatures in early June over the plateau and surrounding regions
272 from 1958 to 2022 (units: K/year). (a) JRA55 dataset, (b) ERA5 dataset. Black dots indicate
273 regions passing the 0.05 significance test.
274

275 3.3 热量收支特征

276 本节进一步分析高原东部夏季热量收支特征。图7a和c表明，两套再分析资
 277 料揭示出的500 hPa大气内部热力学特征基本一致，即以非绝热加热 Q 和垂直运动
 278 项 V 的冷却作用之间的准平衡为主要特征，这与钟珊瑚等（2009）计算的整个对
 279 流层中的热力学收支特征一致。两项在整个夏季中基本维持符号不变，均在7月
 280 上旬左右达到极值，这对应着高原季风降水达到最强，此后两者均有所减弱。其
 281 他项基本维持一个明显偏弱的数值。在将垂直运动项 V 分解成压缩膨胀项 V_c 和垂
 282 直温度平流项 V_a 后可发现（图7b、d），垂直运动项 V 的绝热冷却作用来自于压
 283 缩膨胀项 V_c 。在气候平均上（图3b），高原东部主要以上升运动为主，该上升运动
 284 一方面引起膨胀冷却，另一方面引起向上的暖平流。但由于干绝热温度递减率
 285 通常大于环境温度递减率，导致前者强度大于后者，最终导致上升运动形成净的
 286 降温作用。总而言之，高原东部气候平均的对流层低层的热力学特征为，大气受
 287 到非绝热加热后产生上升运动，而后者又由于膨胀冷却基本抵消了非绝热加热的
 288 作用。换而言之，就气候平均而言，上升运动所引起的冷却作用主要是由非绝热
 289 加热作用强迫而来，两者之间存在着紧密的联系。



290
 291 图7 1958~2022年高原东部夏季500 hPa (a、c) 气温倾向和各热力学项的气候平均逐旬演变
 292 (单位: K/旬)。dT为气温倾向, H 为水平平流项, V 为垂直运动项, Q 为非绝热加热
 293 项, HE 为水平涡动项, VE 为垂直涡动项; (b、d) 为同 (a、c), 但为垂直运动项及
 294 其两个分量项 V_c 和 V_a 。其中, (a-b) 和 (c-d) 分别为JRA55和ERA5再分析资料

295 Fig. 7 Ten-day-period evolution of the 500 hPa temperature tendency and climatological mean of
296 each thermodynamic term over the eastern part of the plateau during summer from 1958 to
297 2022 (units: K/ten-day period). dT is the temperature tendency, H is the horizontal advection
298 term, V is the vertical motion term, Q is the diabatic heating term, HE is the horizontal eddy
299 term, and VE is the vertical eddy term; (b, d) are the same as (a, c) but for the vertical motion
300 term and its two component terms V_c and V_a . (a-b) and (c-d) represent the JRA55 and ERA5
301 reanalysis datasets, respectively.

302

303 图8为热力学方程中各项在1958~2022年期间的线性趋势。考虑到气温倾向主
304 要在6月中、下旬和8月中旬出现显著趋势（图4b），这里也将重点讨论这三旬中
305 各项的趋势变化特征。两套再分析资料均表明，与气候平均类似（图7），非绝
306 热加热项和垂直运动项是线性趋势最为明显的两项（除ERA5中的6月下旬，图
307 8e），且这两项的趋势变化特征基本相反。相较而言，非绝热加热项 Q 的强度略
308 大于垂直运动项 V （图8），这暗示着前者驱动了后者。值得注意的是，考虑到
309 在气候平均上非绝热加热 Q 在整个夏季起着加热作用（图7），图8中非绝热加热
310 Q 的负值趋势表明非绝热加热作用有所减弱，这拓展了王美蓉等（2012）基于
311 1984-2007年观测资料得到的大气热源在减弱的结论。这种减弱的非绝热加热可
312 能与减弱的地表感热及其伴随的降水减少有关（Duan et al., 2011, 2018）。值得
313 注意的是，减弱的非绝热加热伴随着垂直运动项冷却作用的减弱，即垂直运动项
314 V 表现为正值趋势。可见，这两项的减弱趋势应当有利于气温倾向在升温阶段中
315 的减弱和降温阶段中增强，即两个阶段中的气温倾向趋势均为负值，但这与实际
316 情况恰恰相反。因此，上述三旬中气温倾向的正值趋势应当与其他项有关。

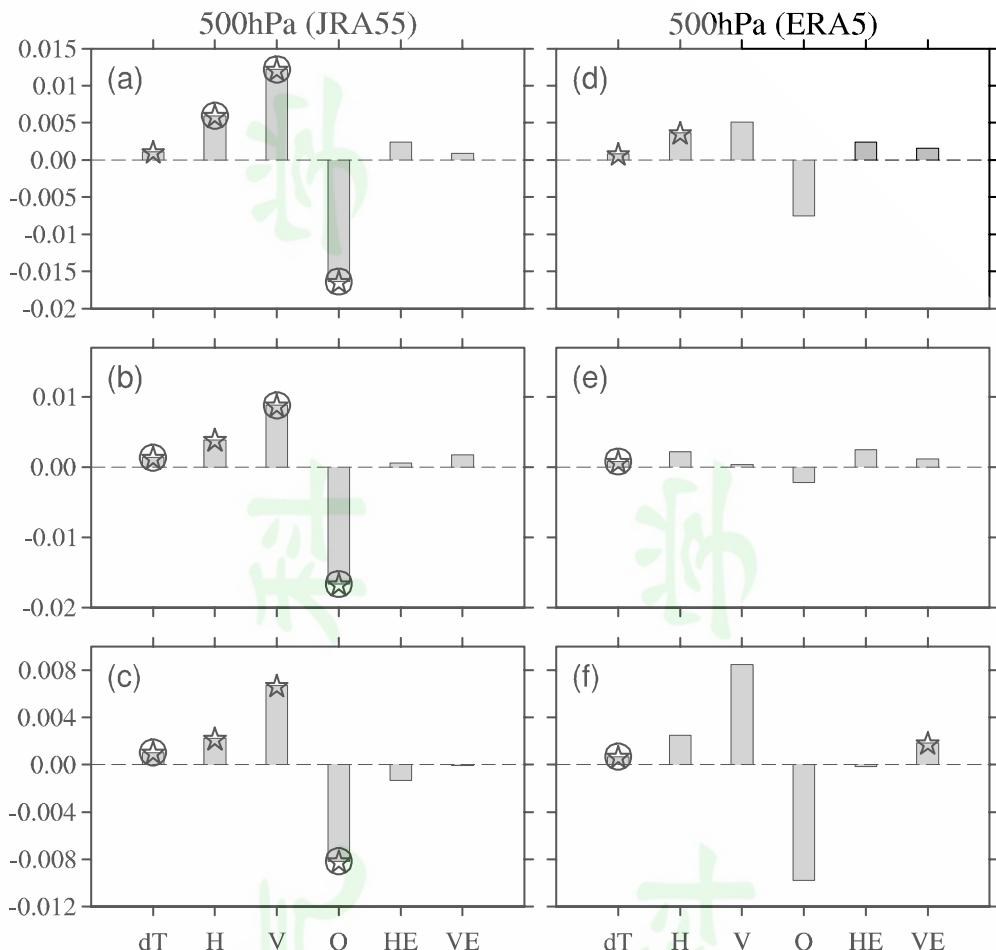
317

318 图8 1958~2022年高原东部500 hPa 6月中（a、d）、下旬（b、e）和8月中旬（c、f）的气温
 319 倾向和各热力学线性趋势（单位：K/旬/年）。(a-c) 和 (d-f) 分别为JRA55和ERA5
 320 再分析资料，星号和圆圈分别表示通过0.1和0.05显著性检验

321 Fig. 8 Long-term linear trends of the 500 hPa air temperature tendency and each thermodynamic
 322 term over the eastern plateau during (a, d) mid-June, (b, e) late June, and (c, f) mid-August
 323 from 1958 to 2022 (units: K/ten-day-period/year). (a-c) and (d-f) represent the JRA55 and
 324 ERA5 reanalysis datasets, respectively. Stars and circles indicate regions passing the 0.1 and
 325 0.05 significance levels, respectively

326

327 除非绝热加热项 Q 和垂直运动项 V 外，水平平流项 H 也表现出数值较大的正值
 328 趋势变化。尤其是在JRA55资料中，水平平流项 H 在三旬中均通过0.1显著性水平，
 329 甚至在6月中旬到达0.05显著性水平。从季节演变角度来看（图7），水平平流项
 330 H 基本独立于非绝热加热 Q 。据此我们推测，水平平流项 H 的加强可能是高原东
 331 部气温倾向显著变化的重要原因。通过对水平平流项 H 做进一步分解可知（表1），
 332 水水平流项 H 在三旬中的正值趋势主要来源于其经向分量 H_m ，而纬向分量 H_z 的



333 趋势较弱，甚至出现了负值。该项在气候平均上主要起着降温的作用（图略）。
334 由此可见，经向温度冷平流的减弱有利于高原气温增暖趋势的出现。

335 但需指出的是，ERA5资料揭示出水平平流项 H 仅在6月中旬出现显著趋势
336 （通过0.1显著性检验，图8d）；此外， VE 在8月中旬也通过了0.1的显著性检验
337 （图8f）。这表明两套再分析资料在高原上空还存在较大的差异。相较JRA55资
338 料，ERA5资料揭示的热力学收支方程各项的趋势特征较弱，且主要项基本不能
339 通过显著性检验，较难揭示出气温倾向显著趋势变化的成因机理。因此，至少在
340 高原东部的热力学分析上，ERA5资料可能还存在着一定局限，不过这还需更多
341 的工作加以验证。

342
343 表1 两套再分析资料揭示的高原东部500 hPa水平温度平流(H)及其纬向(H_z)和经向(H_m)
344 分量的线性趋势(单位：K/旬/10年)。*和**分别表示通过0.1和0.05显著性检验

345 Table 1 Long-term linear trends of horizontal advection of air temperature (H) and its zonal
346 component (H_z) and meridional component (H_m) at 500 hPa over the eastern Plateau as
347 revealed by the two reanalysis datasets. * and ** indicate the significant trend at the 0.1 and
348 0.05 confidence level, respectively.

	JRA55			ERA5		
	H	H_z	H_m	H	H_z	H_m
6月中旬	0.06**	-0.005	0.064*	0.036*	0.014	0.022
6月下旬	0.039*	-0.002	0.041	0.022	0.009	0.012
8月中旬	0.022*	-0.011	0.033*	0.025	-0.011	0.036**

349

350 4 结论与讨论

351 基于 JRA55 和 ERA5 再分析资料，本文从季内演变过程分析了高原东部夏季
352 增温趋势特征及其大气内部热力学机理。在 1958~2022 年期间，高原东部地区的
353 夏季平均气温呈现出显著上升趋势。从夏季气温演变过程的角度来看，上述增暖
354 趋势与三个方面因素有关。一是升温阶段中的 6 月中、下旬出现升温加快的趋势；
355 二是在降温阶段中的 8 月中旬出现了降温变缓的趋势；三是升温（降温）阶段的
356 时长出现了显著变长（变短）的现象。进一步利用热力学诊断分析表明，上述三
357 旬中气温倾向的趋势变化均与经向温度平流的正值趋势有关，即气候平均上起降
358 温作用的经向温度平流的减弱趋势有利于高原东部气温的增暖趋势。需指出的

359 是，虽然垂直运动项也呈现出正值趋势变化，但它基本被非绝热加热的减弱趋势
360 所抵消。考虑到垂直运动项与非绝热加热之间的紧密联系，垂直运动项的趋势变
361 化更多地是非绝热加热减弱趋势的一种被动响应。此外，两套再分析资料在描述
362 高原气温演变上基本取得了一致的结果，但在描述热力学收支方程各项的趋势上
363 却存在一定的差异，其中 JRA55 资料似乎揭示出更为一致的诊断结果。

364 本文还存在如下四个问题值得进一步分析和探讨。一是两套再分析资料的差
365 异性。正文已揭示出两套再分析资料在揭示高原东部气温倾向的长期趋势存在着
366 一定的差异，尤其是 6 月下旬（图 8b、e）。我们初步研究发现，两套再分析资
367 料有较为一致的气温趋势特征，但它们对风场趋势存在较大的偏差，这可能是其
368 差异的重要来源。二是夏季高原西部气温倾向演变特征。我们将本文分析方法用
369 于高原西部（90°E 以西区域）。结果表明，气候平均上高原西部也是在 8 月上
370 旬之前为升温阶段，之后为降温阶段，这与高原东部气温倾向的演变特征一致。
371 但在趋势变化上，高原西部气温呈现出与高原东部不一样的特征，且热力学诊断
372 结果也无显著趋势变化，这可能部分地与高原西部观测资料缺乏有关。三是年代
373 际变化特征。Duan et al. (2011) 和王美蓉等 (2012) 指出在 21 世纪初之前春
374 季高原感热存在着减弱的趋势，而王欢和李栋梁 (2020) 发现各个季节的高原感
375 热在 21 世纪初之后存在着增强的特征，这种来自下垫面热源的年代际变化特征
376 也暗示着高原上空的大气热源可能存在类似的变化特征。我们也注意到在 20
377 世纪 80 年代初期至今，高原东部增温趋势更加明显。但是在对该时段进行热力
378 学诊断分析后发现，两套再分析资料揭示的热力学收支方程中各项的趋势特征较
379 弱，且主要的大值项基本不能通过显著性检验。由此可见，本文提出的高原增暖
380 趋势的热力学成因应当仅存在于足够长的时间段内。四是上下游环流或外强迫的
381 影响。本文主要从局地的角度分析了高原东部气温的长期变化特征。实际上，很
382 多工作已指出上游地区的环流异常可影响到高原的动力或热力状况，比如来自大
383 西洋东部的扰动所激发的 Rossby 波波列可明显引起高原东部 7 至 20 天的季节内
384 振荡 (Hu et al., 2016) 或夏季北大西洋涛动通过波列的影响可引起高原降水的变
385 化 (Wang et al., 2018)，孟加拉湾夏季风爆发后会通过多尺度相互作用引起高原
386 上 10-20 天的季节内振荡 (Guo et al., 2024)，印度洋的海气相互作用也会影响

387 到高原的热力作用 (He et al., 2018)。这些远距离的影响是否发生了长期变化，
388 它们能否调节着高原气温的长期变化，这些也是仍值得进一步探讨。

389

390 参考文献 (References)

- 391 包文, 段安民, 游庆龙, 等. 2024. 青藏高原气候变化及其对水资源影响的研究进展[J]. 气候
392 变化研究进展, 20 (2): 158-169. Bao Wen, Duan Anmin, You Qinglong, et al. 2024.
393 Research progress on climate change and its impact on water resources over the Tibetan
394 Plateau [J]. Climate Change Research (in Chinese), 20 (2): 158-169.
395 doi:10.12006/j.issn.1673-1719.2023.247
- 396 Chen B, Chao W C, Liu X. 2003. Enhanced climatic warming in the Tibetan Plateau due to
397 doubling CO₂: a model study[J]. Climate Dynamics, 20: 401-413.
398 doi:10.1007/s00382-002-0282-4
- 399 陈德亮, 徐柏青, 姚檀栋, 等. 2015. 青藏高原环境变化科学评估: 过去, 现在与未来[J]. 科
400 学通报, 60(32): 3025-3035. Chen Deliang, Xu Baiqing, Yao Tandong, et al. 2015.
401 Assessment of past, present and future environmental changes on the Tibetan Plateau[J].
402 Chinese Science Bulletin (in Chinese), 60(32): 3025-3035. doi:10.1360/N972014-01370
- 403 Cui X F, Graf H F, Langmann B, et al. 2006. Climate impacts of anthropogenic land use changes
404 on the Tibetan Plateau[J]. Global and Planetary Change, 54(1-2): 33-56.
405 doi:10.1016/j.gloplacha.2005.07.006
- 406 丁一汇, 张莉. 2008. 青藏高原与中国其他地区气候突变时间的比较[J]. 大气科学, 32(4):
407 794-805. Ding Yihui, Zhang Li. 2008. Intercomparison of the time for climate abrupt change
408 between the Tibetan Plateau and other regions in China[J]. Chinese Journal of Atmospheric
409 Sciences (in Chinese), 32(4): 794-805. doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.2008.04.08
- 410 段安民, 吴国雄, 张琼, 等. 2006. 青藏高原气候变暖是温室气体排放加剧结果的新证据[J].
411 科学通报, 51(8): 989-992. Duan Anmin, Wu Guoxiong, Zhang Qiong, et al. 2006. New
412 proofs of the recent climate warming over the Tibetan Plateau as a result of the increasing
413 greenhouse gases emissions[J]. Chinese Science Bulletin (in Chinese), 51(8): 989-992.
414 doi:10.1360/csb2006-51-8-989

- 415 Duan A M, Wu G X. 2006. Change of cloud amount and the climate warming on the Tibetan
416 Plateau[J]. Geophysical Research Letters, 33(22), L22704. doi:10.1029/2006gl027946
- 417 Duan A M, Li F, Wang M R, et al. 2011. Persistent weakening trend in the spring sensible heat
418 source over the Tibetan Plateau and its impact on the Asian summer monsoon[J]. Journal of
419 Climate, 24(21): 5671-5682. doi:10.1175/JCLI-D-11-00052.1
- 420 Duan A M, Liu S F, Zhao Y, et al. 2018. Atmospheric heat source/sink dataset over the Tibetan
421 Plateau based on satellite and routine meteorological observations [J]. Big Earth Data, 2:
422 179-189. <https://doi.org/10.1080/20964471.2018.1514143>. [2025-2-24]
- 423 Duan A M, Xiao Z X. 2015. Does the climate warming hiatus exist over the Tibetan Plateau? [J].
424 Scientific Reports, 5(1): 13711. doi:10.1038/srep13711
- 425 Frauenfeld O W, Zhang T J, Serreze M C. 2005. Climate change and variability using European
426 Centre for Medium-Range Weather Forecasts reanalysis (ERA-40) temperatures on the
427 Tibetan Plateau[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 110, D02101,
428 doi:10.1029/2004JD005230
- 429 符诗怡, 施宁, 张东东, 等. 2023. 春夏季节转换前北亚平稳增温过程的热力学特征[J]. 大气
430 科学, 47(4): 1183-1195. Fu Shiyyi, Shi Ning, Zhang Dongdong, et al. 2023. Thermodynamic
431 Characteristics of the Steady Warming Process over North Asia Before the Summer Onset[J].
432 Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 47(4): 1183-1195.
433 doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2202.21238
- 434 Ghatak D, Sinsky E, Miller J. 2014. Role of snow-albedo feedback in higher elevation warming
435 over the Himalayas, Tibetan Plateau and Central Asia[J]. Environmental Research Letters,
436 9(11): 114008. doi:10.1088/1748-9326/9/11/114008
- 437 Guo D L, Wang H J. 2012. The significant climate warming in the northern Tibetan Plateau and
438 its possible causes[J]. International Journal of Climatology, 32(12): 1775-1781.
439 doi:10.1002/joc.2388
- 440 Guo D N, Liu Y M, Wu G X, et al. 2024. Generation of the quasi-biweekly oscillation in the
441 surface potential vorticity over the Tibetan Plateau during boreal summer: A case study of

- 442 2014[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 129, e2024JD041161.
443 <https://doi.org/10.1029/2024JD041161>. [2025-2-24]
- 444 韩熠哲, 马伟强, 马耀明, 等. 2018. 南亚夏季风爆发前后青藏高原地表热通量的长期变化特
445 征分析[J]. 气象学报, 76(6): 920-929. Han Yizhe, Ma Weiqiang, Ma Yaoming. et al. 2018.
446 Long-term variation characteristics of surface heat flux over the Tibetan Plateau before and
447 after the onset of the South Asian summer monsoon[J]. Acta Meteorologica Sinica (in
448 Chinese), 76(6): 920-929. doi:10.11676/qxxb2018.050
- 449 He B, Liu Y M, Wu G X, et al. 2018. The role of air-sea interactions in regulating the thermal
450 effect of the Tibetan-Iranian Plateau on the Asian summer monsoon[J]. Climate Dynamics,
451 52(7-8): 4227-4245. <https://doi.org/10.1007/s00382-018-4377-y>. [2024-09-29]
- 452 He B, Sheng C, Wu G X, et al. 2022. Quantification of Seasonal and Interannual Variations of the
453 Tibetan Plateau Surface Thermodynamic Forcing Based on the Potential Vorticity[J].
454 Geophysical Research Letters, 49(5): e2021GL097222.
455 <https://doi.org/10.1029/2021GL097222>. [2024-09-29]
- 456 He B, Liu Y M, Bao Q, et al. 2023. Model sensitivity of Tibetan Plateau surface potential vorticity
457 and the Asian summer monsoon system to Asian orographic perturbation in FGOALS-f2[J].
458 Fundamental Research. doi:10.1016/j.fmre.2023.08.013
- 459 He J, Black R X. 2016. Heat budget analysis of Northern Hemisphere high-latitude spring onset
460 events[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 121(17): 10,113-10,137.
461 doi:10.1002/2015JD024681
- 462 Hersbach H, Bell B, Berrisford P, et al. 2020. The ERA5 global reanalysis[J]. Quarterly Journal of
463 the Royal Meteorological Society, 146(730): 1999-2049. doi:10.1002/qj.3803
- 464 Hu W T, Duan A M, Li Y, et al. 2016. The Intraseasonal Oscillation of Eastern Tibetan Plateau
465 Precipitation in Response to the Summer Eurasian Wave Train[J]. Journal of Climate, 29(20):
466 7215-7230. doi:10.1175/JCLI-D-15-0620.1
- 467 黄清瀚, 陈海山, 华文剑. 2018. 近 30 年来中国干旱生态区增暖放大现象及其与植被覆盖
468 的联系 [J]. 气候与环境研究, 23 (1): 72–82. Huang Qinghan, Chen Haishan, Hua Wenjian.
469 2018. Stronger warming amplification over arid ecoregions and its relationship to vegetation
470 cover in China since 1982 [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 23 (1):
471 72–82. doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2016.16216

- 472 Jiang Y Q, Yang X Q, Liu X H, et al. 2017. Anthropogenic aerosol effects on East Asian winter
473 monsoon: The role of black carbon-induced Tibetan Plateau warming[J]. Journal of
474 Geophysical Research: Atmospheres, 122(11): 5883-5902. doi:10.1002/2016JD026237
- 475 Jiang J, Zhou T J. 2023. Observational constraint on the contributions of greenhouse gas emission
476 and anthropogenic aerosol removal to Tibetan Plateau future warming[J]. Geophysical
477 Research Letters, 50, e2023GL105427. <https://doi.org/10.1029/2023GL105427>. [2024-09-29]
- 478 Jin H J, He R X, Cheng G D, et al. 2009. Changes in frozen ground in the Source Area of the
479 Yellow River on the Qinghai-Tibet Plateau, China, and their eco-environmental impacts[J].
480 Environmental Research Letters, 4(4): 045206. doi:10.1088/1748-9326/4/4/045206
- 481 Jin J M, Lu S H, Li S S, et al. 2010. Impact of land use change on the local climate over the
482 Tibetan Plateau[J]. Advances in Meteorology, 2010(1): 837480. doi:10.1155/2010/837480
- 483 Kang S C, Xu Y W, You Q L, et al. 2010. Review of climate and cryospheric change in the
484 Tibetan Plateau[J]. Environmental Research Letters, 5(1):015101.
485 doi:10.1088/1748-9326/5/1/015101
- 486 Kobayashi S, Ota Y, Harada Y, et al. 2015. The JRA-55 reanalysis: General specifications and
487 basic characteristics[J]. Journal of the Meteorological Society of Japan. Ser. II, 93(1): 5-48.
488 doi:10.2151/jmsj.2015-001
- 489 Kuang X X, Jiao J J. 2016. Review on climate change on the Tibetan Plateau during the last half
490 century[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 121(8): 3979-4007.
491 doi:10.1002/2015JD024728
- 492 Lau K M, Yang S. 1997. Climatology and interannual variability of the Southeast Asian summer
493 monsoon[J]. Advances in Atmospheric Sciences, 14: 141-162.
494 doi:10.1007/s00376-997-0016-y
- 495 李宏毅, 肖子牛. 2022. 青藏高原不同地区湍流输送特征及其与气象因子的关系[J]. 气候与
496 环境研究, 27(4): 533-546. Li Hongyi, Xiao Ziniu. 2022. Characteristics of Turbulent
497 Transport in Different Areas of Qinghai-Tibet Plateau and Its Relationship with
498 Meteorological Factors[J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 27 (4):
499 533-546. doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2021.21106

- 500 Li W K, Qiu B, Guo W D, et al. 2020. Intraseasonal variability of Tibetan Plateau snow cover[J].
501 International Journal of Climatology, 40(7): 3451-3466.
502 <https://doi.org/10.1002/joc.6407>.[2024-09-29]
- 503 刘伯奇, 何金海, 王黎娟. 2009. 4~5月南亚高压在中南半岛上空建立过程特征及其可能机
504 制[J]. 大气科学, 33(6):1319-1332. Liu Boqi, He Jinhai, Wang Lijuan. 2009. Characteristics
505 of the South Asia high establishment processes above the Indo-China Peninsula from April to
506 May and their possible mechanism[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese),
507 33(6): 1319-1332. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2009.06.17
- 508 Liu X D, Chen B D. 2000. Climatic warming in the Tibetan Plateau during recent decades[J].
509 International Journal of Climatology: A Journal of the Royal Meteorological Society, 20(14):
510 1729-1742. doi:10.1002/1097-0088(20001130)20:14<1729: aid-joc556>3.0.co;2-y
- 511 Luo S Q, Wang J Y, Pomeroy J W, et al. 2020. Freeze-thaw changes of seasonally frozen ground
512 on the Tibetan Plateau from 1960 to 2014[J]. Journal of Climate, 33(21) :1-57.
513 doi:10.1175/JCLI-D-19-0923.1
- 514 Ma J R, Guan X D, Guo R X, et al. 2017. Mechanism of non-appearance of hiatus in Tibetan
515 Plateau[J]. Scientific Reports, 7(1): 4421. doi:10.1038/s41598-017-04615-7
- 516 Ma J R, Zhang T H, Guan X D, et al. 2019. The dominant role of snow/ice albedo feedback
517 strengthened by black carbon in the enhanced warming over the Himalayas[J]. Journal of
518 Climate, 32(18): 5883-5899. doi:10.1175/JCLI-D-18-0720.1
- 519 Pepin N, Bradley R S, Diaz H F, et al. 2015. Elevation-dependent warming in mountain regions of
520 the world[J]. Nature Climate Change, 5(5): 424-430. doi:10.1038/NCLIMATE2563
- 521 Shen M G, Piao S L, Jeong S J, et al. 2015. Evaporative cooling over the Tibetan Plateau induced
522 by vegetation growth [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 112 (30):
523 9299-9304. <https://doi.org/10.1073/pnas.1504418112>. [2025-2-24]
- 524 Sun J, Yang K, Guo W D, et al. 2020. Why has the Inner Tibetan Plateau become wetter since the
525 mid-1990s? [J]. Journal of Climate, 33(19): 8507-8522. doi:10.1175/JCLI-D-19-0471.1

- 526 Shi Q, Liang S. 2014. Surface-sensible and latent heat fluxes over the Tibetan Plateau from
527 ground measurements, reanalysis, and satellite data[J]. Atmospheric Chemistry and Physics,
528 14(11): 5659-5677. doi:10.5194/acp-14-5659-2014
- 529 Wang C H, Zhao W, Cui Y. 2020. Changes in the seasonally frozen ground over the eastern
530 Qinghai-Tibet Plateau in the past 60 years[J]. Frontiers in Earth Science, 8: 270.
531 doi:10.3389/feart.2020.00270
- 532 王欢, 李栋梁. 2020. 21世纪初青藏高原感热年代际增强对中国东部季风雨带关键区夏季降
533 水年代际转折的影响[J]. 地球物理学报, 63(2): 412-426. Wang Huan, Li Dongliang. 2020.
534 Impacts of decadal variability in sensible heat over the Tibetan Plateau on decadal transition
535 of summer precipitation over dominant regions of monsoon rainfall band in eastern China
536 since the early 2000s[J]. Chinese J. Geophys (in Chinese), 63(2): 412-426,
537 doi:10.6038/cjg2020M0397
- 538 王美蓉, 周顺武, 段安民. 2012. 近30年青藏高原中东部大气热源变化趋势: 观测与再分析
539 资料对比 [J]. 科学通报, 57(2): 178-188. Wang Meirong, Zhou Shunwu, Duan Anmin.
540 2012. Trend in the atmospheric heat source over the central and eastern Tibetan Plateau
541 during recent decades: Comparison of observations and reanalysis data[J]. Chin Sci Bull (in
542 Chinese), 57(5): 548-557. doi:10.1007/s11434-011-4838-8
- 543 Wang Z Q, Yang S, Lau N-C, et al. 2018. Teleconnection between Summer NAO and East China
544 Rainfall Variations: A Bridge Effect of the Tibetan Plateau[J]. Journal of Climate, 31(16):
545 6433-6444. doi:10.1175/JCLI-D-17-0413.1
- 546 吴佳, 吴婕, 闫宇平. 2022. 1961-2020年青藏高原地表风速变化及动力降尺度模拟评估[J].
547 高原气象, 41(4): 963-976. Wu Jia, Wu Jie, Yan Yuping. 2022. Changes of Surface Wind
548 Speed over Qinghai-Xizang Plateau from 1961 to 2020 and Evaluation of the Dynamical
549 Downscaling Simulations[J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 41(4): 963-976.
550 doi:10.7522/j.issn.10000534.2022.00065
- 551 吴玉婷, 杨崧, 胡晓明, 等. 2022. 青藏高原与周边地区近四十年区域夏季地表气温变化趋势
552 的异同及归因分析[J]. 大气科学, 46(5): 1253-1266. Wu Yuting, Yang Song, Hu Xiaoming,
553 et al. 2022. Difference/Similarity and Attribution of Changes in Regional Summer Surface

- 554 Air Temperatures over the Tibetan Plateau and Its Surrounding Regions in the Past 40 Years
555 [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 46(5): 1253–1266.
556 doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2205.21197
- 557 薛旭, 陈文. 2015. 南亚高压在中南半岛上空建立过程及其与亚洲南部夏季风建立的关系[J].
558 大气科学, 39(4): 705–721. Xue Xu, Chen Wen. 2015. Establishment process commencement
559 of the South Asian high over the Indo-China Peninsula and its relationship with the onset of
560 the Asian summer monsoon[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 39 (4):
561 705–721, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1410.14147
- 562 Yan Y P, You Q L, Wu F Y, et al. 2020. Surface mean temperature from the observational stations
563 and multiple reanalyses over the Tibetan Plateau[J]. Climate Dynamics, 55: 2405-2419.
564 <https://doi.org/10.1007/s00382-020-05386-0>. [2024-09-29]
- 565 杨耀先, 胡泽勇, 路富全, 等. 2022. 青藏高原近 60 年来气候变化及其环境影响研究进展[J].
566 高原气象, 41(1): 1-10. Yang Yaoxian, Hu Zeyong, Lu Fuquan, et al. 2022. Progress of
567 Recent 60 Years' Climate Change and Its Environmental Impacts on the Qinghai-Xizang
568 Plateau[J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 41(1): 1-10.
569 doi:10.7522/j.issn.1000-0534.2021.00117
- 570 Yang K, Guo X F, Wu B Y. 2011. Recent trends in surface sensible heat flux on the Tibetan
571 Plateau[J]. Science China Earth Sciences, 54:19-28. doi:10.1007/s11430-010-4036-6
- 572 Yang Y, Ren R C. 2017. On the contrasting decadal changes of diurnal surface temperature range
573 between the Tibetan Plateau and southeastern China during the 1980s–2000s[J]. Advances in
574 Atmospheric Sciences, 34(2): 181-198. doi:10.1007/s00376-016-6077-z
- 575 姚慧茹, 李栋梁. 2016. 1971-2012 年青藏高原春季风速的年际变化及对气候变暖的响应[J].
576 气象学报, 74(1): 60-75. Yao Huiru, Li Dongliang. 2016. The interannual variation of wind
577 speed in the Tibetan Plateau in spring and its response to global warming during
578 1971-2012[J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 74(1): 60-75.
579 doi:10.11676/qxxb2016.006

- 580 叶笃正, 高由禧, 周明煜, 等.1979. 青藏高原气象学[M]. 北京: 科学出版社, 278pp. Ye
581 Duzheng, Gao Youxi. 1979. Tibetan Plateau Meteorology (in Chinese) [M]. Beijing: Science
582 Press, 278pp.
- 583 Yin Y H, Wu S H, Zhao D S, et al. 2013. Modeled effects of climate change on actual
584 evapotranspiration in different eco-geographical regions in the Tibetan Plateau[J]. Journal of
585 Geographical Sciences, 23(2): 195-207. doi:10.1007/s11442-013-1003-0
- 586 You Q L, Min J Z, Kang S C. 2016. Rapid warming in the Tibetan Plateau from observations and
587 CMIP5 models in recent decades[J]. International Journal of Climatology, 36(6): 2660-2670.
588 doi:10.1002/joc.4520
- 589 You Q L, Jiang Z H, Moore G W K, et al. 2017. Revisiting the relationship between observed
590 warming and surface pressure in the Tibetan Plateau[J]. Journal of Climate, 30(5): 1721-1737.
591 doi:10.1175/JCLI-D-15-0834.1
- 592 You Q L, Cai Z Y, Pepin N, et al. 2021. Warming amplification over the Arctic Pole and Third
593 Pole: Trends, mechanisms and consequences[J]. Earth-Science Reviews, 217: 103625.
594 <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2021.103625>. [2024-09-29]
- 595 Zhang D L, Huang J P, Guan X D, et al. 2013. Long-term trends of precipitable water and
596 precipitation over the Tibetan Plateau derived from satellite and surface measurements[J].
597 Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, 122: 64-71.
598 <http://dx.doi.org/10.1016/j.jqsrt.2012.11.028>. [2024-09-29]
- 599 Zhang G Q, Yao T d, Xie H J, et al. 2020. Response of Tibetan Plateau lakes to climate change:
600 Trends, patterns, and mechanisms[J]. Earth-Science Reviews, 208: 103269.
601 <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2020.103269>. [2024-09-29]
- 602 张人禾, 周顺武. 2008. 青藏高原气温变化趋势与同纬度带其他地区的差异以及臭氧的可能
603 作用[J]. 气象学报, 66(6): 916-925. Zhang Renhe, Zhou Shunwu. 2008. The air temperature
604 change over the Tibetan Plateau during 1979-2002 and its possible link-age with ozone
605 depletion[J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 66(6): 916-925.
606 doi:10.11676/qxxb2008.083

607 钟珊珊, 何金海, 管兆勇, 等. 2009. 1961—2001 年青藏高原大气热源的气候特征[J]. 气象学
608 报, 67(3): 407-416. Zhong Shanshan, He Jinhai, Guan Zhaoyong, et al. 2009. Climatic
609 characteristics of the atmospheric heat source over the Tibetan Plateau during 1961-2001
610 [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 67(3): 407-416. doi:10.11676/qxxb2009.040
611 朱丽华, 范广州, 华维. 2015. 全球变暖背景下青藏高原夏季气温在对流层上下反相变化及
612 其与降水和环流的关系[J]. 大气科学, 39 (6): 1250-1262. Zhu Lihua, Fan Guangzhou, Hua
613 Wei. 2015. Reversed phase change of the temperature in the upper and lower troposphere
614 over the Tibetan Plateau in summer and its relationships to precipitation and atmospheric
615 circulation under the background of global warming[J]. Chinese Journal of Atmospheric
616 Sciences (in Chinese), 39(6): 1250-1262. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1503.14249

