

青藏高原地区1985~2010年大气热源变化特征分析

张馨钰^{1,2}, 刘畅^{2*}

¹新疆信息工程学校, 新疆 乌鲁木齐

²中国气象局气象干部培训学院新疆分院, 新疆 乌鲁木齐

收稿日期: 2026年8月16日; 录用日期: 2026年9月15日; 发布日期: 2026年9月23日

摘要

基于1985~2010年青藏高原大气热源资料, 采用趋势分析、EOF分解和M-K突变检验, 系统分析了青藏高原大气热源强度的年际及季节变化特征。结果表明: 研究时段内青藏高原大气热源强度总体呈增强趋势, 但变化过程具有明显阶段性和波动性, 年代际上表现为“20世纪80年代末震荡明显、90年代波动减弱、21世纪初小幅增强”的演变特征。季节上, 夏季大气热源增强最为显著, 且年代际振幅最大; 春季整体呈波动减弱后增强的变化过程; 秋季和冬季则以热汇背景下的缓慢增强为主, 且秋季存在由热汇向热源转化的特征。EOF分析表明, 第一模态主要反映长期变化趋势, 第二模态则表征更强的年际波动与年代际调整, 不同季节模态特征差异明显。M-K检验结果显示, 年尺度及春夏季热源变化存在一定转折点, 但整体突变特征不显著, 说明青藏高原大气热源变化以渐进式调整为主。研究揭示了青藏高原大气热源的非线性演变规律及其显著季节差异, 可为进一步认识高原热力异常及其气候效应提供参考。

关键词

青藏高原, 大气热源, 年代际, 变化特征

Analysis of the Variation Characteristics of Atmospheric Heat Source over the Qinghai-Xizang Plateau from 1985 to 2010

Xinyu Zhang^{1,2}, Chang Liu^{2*}

¹Xinjiang Information Engineering School, Urumqi Xinjiang

²Xinjiang Branch of Meteorological Cadre Training College of China Meteorological Administration, Urumqi Xinjiang

Received: August 16, 2026; accepted: September 15, 2026; published: September 23, 2026

*通讯作者。

文章引用: 张馨钰, 刘畅. 青藏高原地区 1985~2010 年大气热源变化特征分析[J]. 气候变化研究快报, 2026, 15(5): 1082-1092. DOI: 10.12677/ccrl.2026.155115

Abstract

Based on data regarding the atmospheric heat source over the Qinghai-Xizang Plateau from 1985 to 2010, this study systematically analyzes the interannual and seasonal variation characteristics in the intensity of the atmospheric heat source using trend analysis, EOF decomposition, and the M-K abrupt change test. The results indicate that the intensity of the atmospheric heat source over the Qinghai-Xizang Plateau generally trended upward during the study period, though the process was characterized by distinct phases and fluctuations; interdecadal evolution was marked by significant oscillation in the late 1980s, dampened fluctuation in the 1990s, and a slight intensification in the early 21st century. Seasonally, the intensification of the atmospheric heat source was most pronounced in summer, which also exhibited the largest interdecadal amplitude. Spring showed a pattern of initial weakening followed by intensification, while autumn and winter were characterized by gradual intensification against a background of net heat sinking, with autumn displaying a transition from heat sink to heat source. EOF analysis revealed that the first mode primarily reflects long-term trends, whereas the second mode captures stronger interannual fluctuations and interdecadal adjustments, with distinct modal characteristics across seasons. M-K test results identified specific turning points in heat source variations on annual, spring, and summer scales, yet the overall abrupt change characteristics were not significant, suggesting that changes in the Qinghai-Xizang Plateau's atmospheric heat source are primarily driven by gradual adjustments. This study elucidates the nonlinear evolution and significant seasonal variations of the atmospheric heat source over the Qinghai-Xizang Plateau, providing a reference for further understanding the plateau's thermal anomalies and their climatic effects.

Keywords

Qinghai-Xizang Plateau, Atmospheric Heat Source, Interdecadal, Variation Characteristics

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

青藏高原地处中纬度内陆高海拔区域,地形复杂、下垫面异质性强,是亚洲大气环流的重要热力强迫区。高原地表通过感热、潜热及长短波辐射交换持续调节对流层能量分布,并对季风建立、环流调整、降水异常和极端天气气候事件产生深远影响[1][2]。因此,认识青藏高原大气热源的变化特征,不仅有助于揭示高原热力过程的内在演变,也有助于理解其对周边区域气候异常的作用机制。

大气热源是表征大气柱净加热状况的重要指标,能够综合反映地表与大气之间的能量、水汽和辐射收支关系。Yanai 等较早从热量和水汽预算出发,奠定了热源诊断的理论基础。对于青藏高原而言,大气热源的形成并非单一过程控制,而是受地表感热通量、凝结潜热释放、云辐射反馈以及大尺度环流背景共同作用,已有研究表明,高原大气热源/热汇具有明显的年际波动,并与环流异常存在紧密联系[3][4]。同时,热源强度变化还会影响高原低涡等中尺度系统的发展,并进一步作用于周边降水与天气过程[5]。从季节尺度看,青藏高原热源的作用更具阶段性。春季是高原热力由弱转强的关键时期,其变化不仅关系到夏季风的建立,还可能影响长江中下游高温事件的发生,夏季则是高原热源最强、对流活动最活跃的阶段,对东亚夏季风推进及区域水汽输送具有显著调节作用,秋季热源逐渐减弱,反映出由暖季向冷季过渡过程中的能量衰减与环流重组[6]-[8]。这些研究表明,高原热源在不同季节并不表现为简单同步变

化, 而是具有明显的时间尺度差异和区域气候意义。

对青藏高原大气热源的年际变化与季节差异进行统一比较分析, 仍有助于更清楚地识别其阶段性演变特征及主要变化模态, 基于这一认识本文基于 NCEP/NCAR 再分析资料, 利用正算法和倒算法对青藏高原 1985~2010 年大气热源进行计算, 并利用线性趋势法、经验正交分解等方法对大气热源时空特征进行分析, 分析其年际及春、夏、秋季变化特征, 重点讨论不同时间尺度上的变化趋势、波动幅度及其阶段性差异。研究结果可为进一步认识青藏高原热力异常的演变规律, 以及其对亚洲季风和周边气候系统的影响提供基础, 旨在对今后高原地区热源长期分布特征研究提供参考。

2. 资料与方法

1) 大气热源数据是基于 NCEP/NCAR 1985~2010 年每 6 小时一次的再分析资料计算而得, 包括温度场、水平风场、等压面垂直速度场、地面气压场。水平上的分辨率是 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$, 垂直方向上从 1000 hPa~100 hPa 共 12 层。

2) 大气热源的计算方法分为正算法[9]和倒算法[10], 文中所涉及的青藏高原水平范围统一界定为 $27.5^{\circ}\text{N} \sim 40^{\circ}\text{N}$, $77.5^{\circ}\text{E} \sim 102.5^{\circ}\text{E}$ 。

3. 结果分析

3.1. 青藏高原大气热源强度年代际变化特征

图 1 给出了 1985~2010 年青藏高原大气热源强度的变化趋势, 总体来看, 青藏高原大气热源强度的年变化呈增强趋势, 其倾向率约为 $4.1 (\text{W}/\text{m}^2)/10\text{a}$, 其中 2010 年热源强度最强, 值约为 $360 \text{ W}/\text{m}^2$, 2002 年强度最弱约为 $-95 \text{ W}/\text{m}^2$ 。从 1985 年开始到 1986 年, 青藏高原大气热源强度先减弱又迅速增强, 并在 1987 年左右达到一个小高峰; 随后又呈波动式减弱的变化趋势, 且在 1995 年基本处于热平衡状态; 之后在经历波动式的小幅上升后, 青藏高原大气热源强度减弱迅速, 且由大气热源强度变为热汇, 且在 2002 年左右达到弱; 而后开始快速上升, 且在 2005 年达到第二高点, 2005~2010 年大气热源强度维持波动式的小幅增强趋势。从年代际变化来看, 20 世纪 80 年代末, 青藏高原大气热源强度变化震荡较为明显; 90 年代总体呈波动式下降趋势, 但在 90 年代末出现了震荡增强随后又急剧减弱的变化; 21 世纪基本维持波动式的小幅增强的变化趋势。

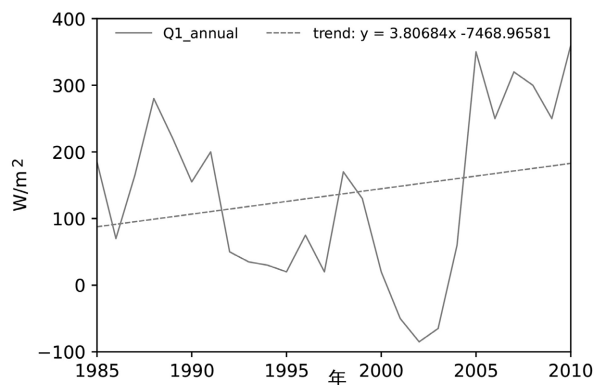


Figure 1. Interdecadal variation of atmospheric heat source intensity over the Qinghai-Xizang Plateau from 1985 to 2010 (unit: W/m^2)

图 1. 1985~2010 年青藏高原大气热源强度年代际变化(单位: W/m^2)

春季大气热源强度整体呈波动减弱态势(图 2(a)), 年际变化表现为多阶段特征: 1985~1990 年呈震荡

波动, 1990~1995 年持续下降并于 1995 年达到阶段最低值(约 5 W/m^2); 其后短暂回升, 至 2003 年出现次低点, 2003~2007 年快速增强并达到研究时段峰值(约 50 W/m^2), 2007~2010 年再度进入震荡波动阶段。从年代际尺度看, 20 世纪 80 年代末以高频震荡为主, 90 年代整体呈波动式减弱, 21 世纪初经历低位调整后转为波动增强, 尽管整体呈减弱趋势, 但相对其绝对值而言, 年代际变化幅度并不突出。夏季大气热源减弱趋势最为显著(图 2(b)), 年际演变呈现清晰的阶段性: 1985~1997 年整体震荡下降, 1988 年达到全时段最强(约 140 W/m^2); 1997 年后短暂快速上升, 随即持续下降并于 2004 年降至最弱(约 65 W/m^2); 2004 年后逐步回升, 2008 年达到次高点后再度减弱。年代际变化上, 80 年代末表现为先增强后减弱, 90 年代以波动减弱为主, 末期出现短期上升; 21 世纪初持续下降至次低点, 其后维持波动上升趋势, 夏季热源强度年代际变幅为四季之最。秋季大气热源以热汇为主(图 2(c)), 整体呈增强趋势, 年际变化剧烈且存在性质转换: 1985~1987 年快速先减后增, 1986 年达到最弱(约 -58 W/m^2); 其后波动减弱, 2001 年出现次低点, 2001~2005 年快速增强, 并于 2005 年转为热源且达到最强(约 10 W/m^2), 随后开始波动减弱。年代际尺度上, 80 年代末变幅较大, 表现为先减后增; 90 年代整体波动下降但区间较小; 21 世纪初先持续下降至次低点, 随后迅速上升至峰值, 之后转为波动减弱, 整体呈现“持续减弱-显著增强”的阶段特征, 并短暂由热汇转为热源。冬季大气热源始终为热汇(图 2(d)), 整体呈增强趋势, 变化形态与秋季相似但幅度更小: 1985~1993 年波动小幅减弱, 1993 年达到最弱(约 -88 W/m^2); 1993 年后持续波动增强, 2005 年达到最强(约 -38 W/m^2); 其后快速减弱, 再进入波动增强阶段。年代际变化表现为: 80 年代至 90 年代初震荡小幅减弱, 90 年代后以波动增强为主, 末期出现回落; 21 世纪初迅速上升至峰值后快速下降, 随后维持波动增强。

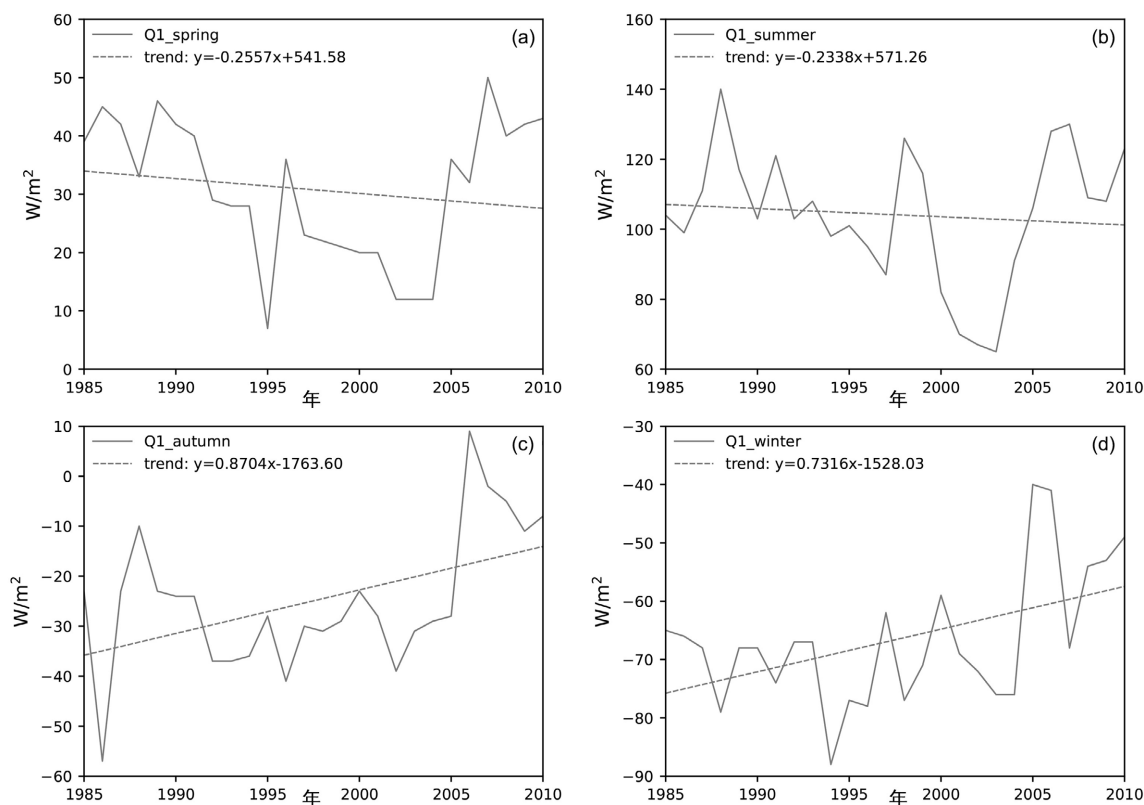


Figure 2. Seasonal variation of atmospheric heat source intensity over the Qinghai-Xizang Plateau from 1985 to 2010 (unit: W/m^2) (a) spring, (b) summer, (c) autumn, (d) winter

图 2. 1985~2010 年青藏高原大气热源强度季节变化(单位: W/m^2) (a) 春季、(b) 夏季、(c) 秋季、(d) 冬季

3.2. 青藏高原大气热源强度 EOF 时间分布特征

为了研究青藏高原逐年大气热源强度的时间变化特征, 将青藏高原逐年大气热源强度做自然经验正交展开(EOF), 分析青藏高原逐年大气热源强度 EOF 分解第一、第二模态时间系数序列, 可发现整体上第一模态的时间系数表现出非常明显的上升趋势, 以 1995 年左右为界限, 在 1995 年前第一模态的时间系数表现为波动中上升的趋势, 1995 年之后表现出下降的趋势(图 3(a))。第二模态的时间系数波动变化范围相对于第一模态较大, 有显著的年际波动, 且其绝对值呈现增加趋势(图 3(b))。

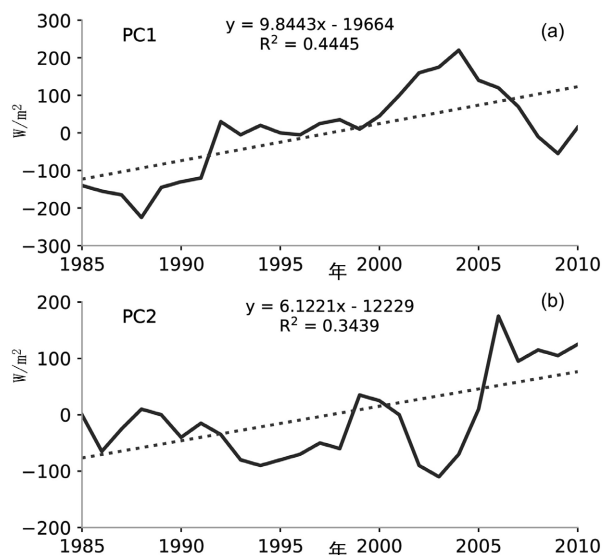


Figure 3. EOF time series of annual atmospheric heat source intensity over the Qinghai-Xizang Plateau from 1985 to 2010 (a) the first mode, (b) the second mode

图 3. 1985~2010 年青藏高原区域逐年大气热源强度 EOF 时间序列 (a) 第一模态、(b) 第二模态

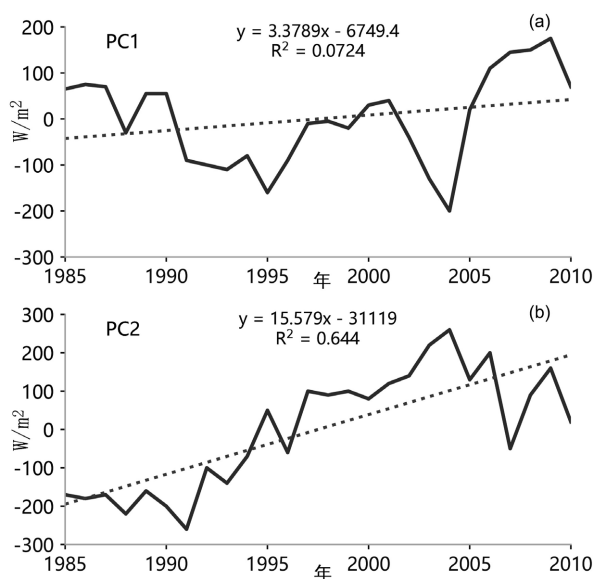


Figure 4. EOF time series of spring atmospheric heat source intensity over the Qinghai-Xizang Plateau from 1985 to 2010 (a) the first mode, (b) the second mode

图 4. 1985~2010 年青藏高原区域春季大气热源强度 EOF 时间序列 (a) 第一模态、(b) 第二模态

青藏高原春季大气热源强度 EOF 分解第一、第二模态时间系数序列图中可以发现, 整体上春季第一模态的时间系数表现出一定的上升趋势, 20 世纪 90 年代到 21 世纪初呈现出明显的波动, 在 1995 年和 2003 年出现 2 个谷值(图 4(a)); 第二模态的时间系数波动变化范围相对于第一模态较小, 有显著的年际波动, 上升趋势较第一模态更明显(图 4(b))。

图 5 为青藏高原夏季大气热源强度 EOF 分解第一、第二模态时间系数序列, 整体上, 夏季第一模态的时间系数表现出一定的上升趋势, 21 世纪之前变化波动振幅明显大于 21 世纪之后(图 5(a)); 第二模态的时间系数波动变化幅度相对于第一模态更大, 有显著的年际波动, 上升趋势与第一模态基本持平(图 5(b))。

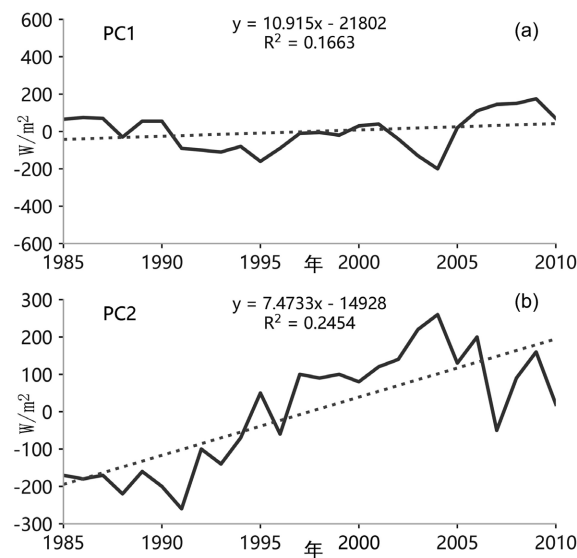


Figure 5. EOF time series of summer atmospheric heat source intensity over the Qinghai-Xizang Plateau from 1985 to 2010 (a) the first mode, (b) the second mode

图 5. 1985~2010 年青藏高原区域夏季大气热源强度 EOF 时间序列 (a) 第一模态、(b) 第二模态

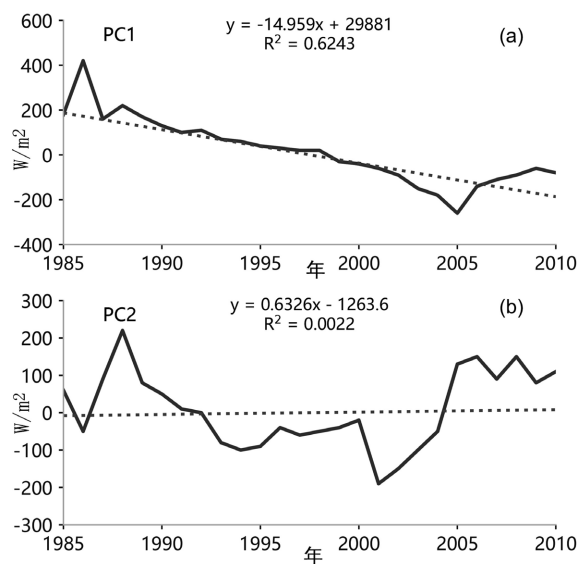


Figure 6. EOF time series of autumn atmospheric heat source intensity over the Qinghai-Xizang Plateau from 1985 to 2010 (a) the first mode, (b) the second mode

图 6. 1985~2010 年青藏高原区域秋季大气热源强度 EOF 时间序列 (a) 第一模态、(b) 第二模态

图 6 为青藏高原秋季大气热源强度 EOF 分解第一、第二模态时间系数序列图。可以看到, 整体上, 秋季第一模态的时间系数表现出明显的下降趋势(图 6(a)); 第二模态的时间系数波动变化幅度相对于第一模态更大, 有显著的年代际波动, 趋势表现不明显图(图 6(b))。

综上所述, 区域逐年及季节尺度的时间系数均存在较为清晰的年代际变化特征, 但不同模态和季节之间差异明显。年尺度上, 第一模态整体呈显著上升趋势, 并以 1995 年左右为分界, 前期表现为波动中缓慢上升, 后期转为下降; 第二模态则具有更强的年际波动特征, 变化幅度较第一模态更大, 且其绝对值总体呈增加趋势。春季第一模态同样表现出上升趋势, 但在 20 世纪 90 年代至 21 世纪初波动较为明显, 并在 1995 年和 2003 年出现低值; 第二模态年际波动更突出, 变化幅度较小但上升趋势更清楚。夏季第一模态亦以缓慢上升为主, 且 21 世纪前后的波动幅度差异明显, 2000 年前后变化更强; 第二模态则具有更大的波动范围, 年际起伏显著, 整体趋势与第一模态基本一致。秋季第一模态则呈现明显下降趋势, 而第二模态以较强的年代际波动为主, 长期趋势不显著。总体来看, 青藏高原大气热源强度在年际和季节尺度上均存在明显的模态差异与阶段性变化, 其中第一模态主要刻画长期趋势, 第二模态则反应更强的年际波动和年代际调整。

3.3. 青藏高原大气热源强度 MK 突变检验特征

由 M-K 突变检验 UF_k 曲线变化特征(图 7)可知, UF_k 分量始终为正值, 表明青藏高原大气热源强度始终保持增强趋势。1985~2000 年, UF_k 曲线保持增长态势; 2000~2005 年为 UF_k 曲线逐渐减小, 随后在经历小幅增大后又迅速减小至 0 点附近。 UF_k 和 UB_k 曲线在 2009 年前后相交于 0 点附近, 也可能是由于数据的时间尺度有限, 之后热源强度并没有通过显著性水平, 因此可以认为在本文研究中, 青藏高原大气热源强度无明显突变。从年代际变化来看, 20 世纪 80~90 年代, UF_k 曲线保持较为缓慢的增长趋势, 表明在此期间, 大气热源强度也维持增强趋势; 21 世纪开始的 5 年内, UF_k 曲线逐渐减小; 在随后的时间内, 曲线发生震荡变化, 且在 2009 年附近减小至 0 附近。

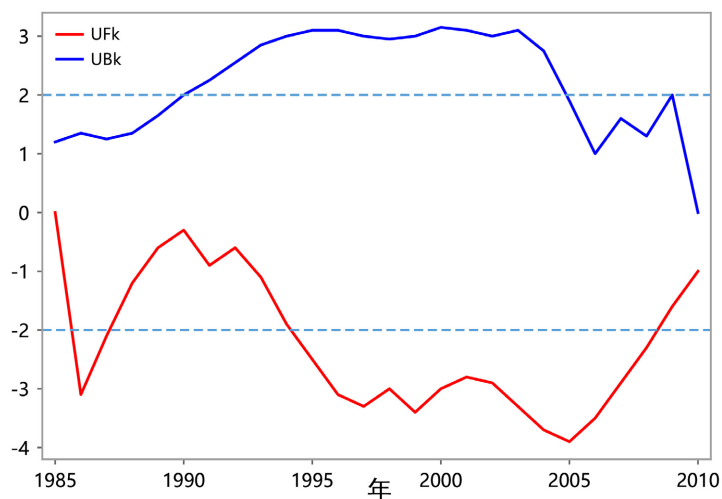


Figure 7. M-K mutation test of atmospheric heat source intensity over the Qinghai-Xizang Plateau from 1985 to 2010
图 7. 1985~2010 年青藏高原大气热源强度 M-K 突变检验

由 M-K 突变检验 UF_k 曲线变化特征(图 8)可知, 在经过 UF_k 和 UB_k 两条曲线的交叉点后 UF_k 分量基本均为正值, 表明青藏高原春季大气热源强度在该时间段内始终保持增强趋势。1985~2000 年左右, UF_k 曲线保持增长态势, 且在 1987 年左右 UF_k 分量由负值转为正值, 并在 1992 年左右超过了 0.05 的显

著性水平临界线, 这表明春季大气热源强度基本呈增强趋势, 且发生了突变, 由于两条曲线的交点位于 1986 年左右, 由此可知, 春季大气热源强度在 1986 年附近发生了突变; 2000~2005 年为 UFk 曲线逐渐减小, 随后在经历小幅增大后又迅速减小至 0 点附近。从年代际变化来看, 20 世纪 80~90 年代, UFk 曲线保持较为缓慢的增长趋势, 表明在此期间, 大气热源强度也维持增强趋势; 21 世纪开始的 5 年内, UFk 曲线逐渐减小; 在随后的时间内, 曲线发生震荡变化, 且在 2009 年附近减小至 0 附近, 且随后 UFk 与 UBk 曲线有第二次相交的趋势。

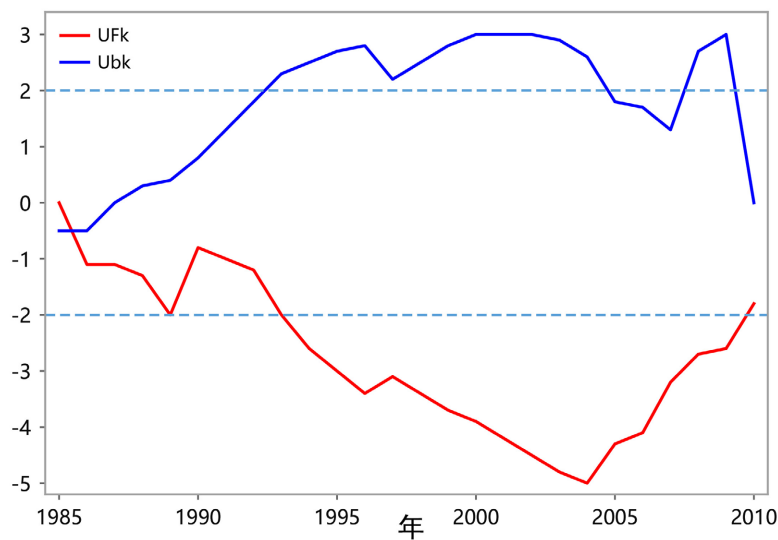


Figure 8. M-K mutation test of atmospheric heat source intensity in spring over Qinghai-Xizang Plateau from 1985 to 2010

图 8. 1985~2010 年青藏高原春季大气热源强度 M-K 突变检验

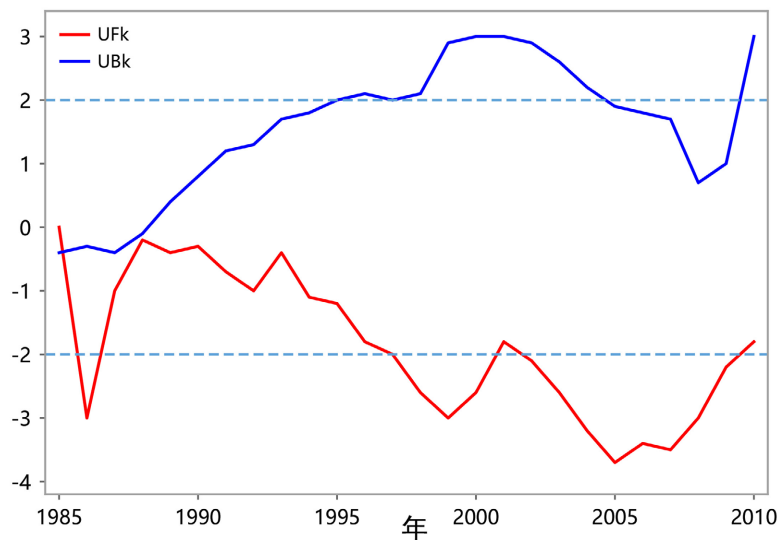


Figure 9. The M-K mutation test of summer atmospheric heat source intensity over the Qinghai-Xizang Plateau from 1985 to 2010

图 9. 1985~2010 年青藏高原夏季大气热源强度 M-K 突变检验

由 M-K 突变检验 UFk 曲线变化特征(图 9)可知, 在经过 UFk 和 UBk 两条曲线的交叉点(第一个交叉

点)后 UF_k 分量基本均为正值, 表明青藏高原大气热源强度在该时间段内保持增强趋势。1985~2000 年左右, UF_k 曲线保持增长态势, 且在 1988 年左右 UF_k 分量由负值转为正值, 并在 1996 年左右超过了 0.05 的显著性水平临界线, 这表明夏季大气热源强度基本呈增强趋势, 且发生了突变, 由于两条曲线的交点(第一个交叉点)位于 1985 年左右, 由此可知, 夏季大气热源强度在 1985 年附近发生了突变; 2000~2007 年为 UF_k 曲线逐渐减小, 随后在经历小幅增大后又迅速减小至 0 点附近。从年代际变化来看, 20 世纪 80~90 年代, UF_k 曲线保持较为缓慢的增长趋势, 且在 90 年代末增长幅度增大, 表明在此期间, 大气热源强度也维持较强的增强趋势; 21 世纪开始的 5~6 年内, UF_k 曲线逐渐减小; 在随后的时间内, 曲线发生震荡变化, 并在 2009 年附近减小至 0 附近, 且随后 UF_k 与 UB_k 曲线有进一步相交的趋势。

由 M-K 突变检验 UF_k 曲线变化特征(图 10)可知, 在经过 UF_k 和 UB_k 两条曲线的交叉点(第一个交叉点)后, UF_k 分量短暂小于 0, 随后均为正值, 表明青藏高原大气热源强度在该时间段内短暂减弱后保持增强趋势。1985~1992 年左右, UF_k 曲线保持增长态势, 且 UF_k 分量均大于 0; 随后至 2005 年左右, UF_k 曲线呈减小趋势, 且在 2004 年左右 UF_k 分量由正值转为负值, 随后在 2006 年左右又转为正值; 并在 2008 年左右超过了 0.05 的显著性水平临界线, 这表明秋季大气热源强度基本呈增强趋势, 且发生了突变, 由于两条曲线的交点(第一个交叉点)位于 2004 年左右, 由此可知, 秋季大气热源强度在 2004 年附近发生了突变。从年代际变化来看, 20 世纪 80~90 年代初, UF_k 曲线保持较为缓慢的增长趋势; 90 年代至 21 世纪开始的 5~6 年内, UF_k 曲线逐渐减小并在 2004 年左右由正值短暂转为负值后又转为正值; 在随后的时间内, 曲线发生震荡变化, 且在 2010 年附近减小至 0 附近。

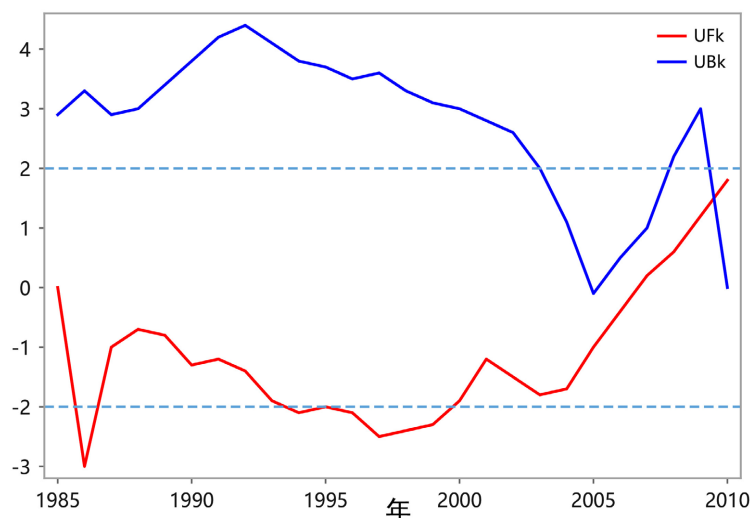


Figure 10. M-K mutation test of atmospheric heat source intensity over the Qinghai-Xizang Plateau in autumn from 1985 to 2010

图 10. 1985~2010 年青藏高原秋季大气热源强度 M-K 突变检验

由 M-K 突变检验 UF_k 曲线变化特征(图 11)可知, UF_k 分量始终为正值, 表明青藏高原冬季大气热源强度始终保持增强趋势。1985~1993 年左右, UF_k 曲线保持增长态势; 1993~2005 年 UF_k 曲线逐渐减小, 并在 2005 年左右减小至第二低点, 随后在经历小幅增大后又迅速减小至 0 点附近。 UF_k 和 UB_k 曲线在 2008 年前后出现交叉点, 也可能是由于数据的时间尺度有限, 之后热源强度并没有通过显著性水平, 由此可知在本文研究中青藏高原冬季大气热源强度无明显突变。从年代际变化来看, 20 世纪 80~90 年代初, UF_k 曲线保持较为缓慢的增长趋势, 表明在此期间, 大气热源强度也维持增强趋势; 90 年代~21 世

纪开始的 5 年内, UF_k 曲线持续减小; 在随后的时间内, UF_k 曲线发生的变化为先增大后减小, 且在 2010 年附近减小至 0 附近。

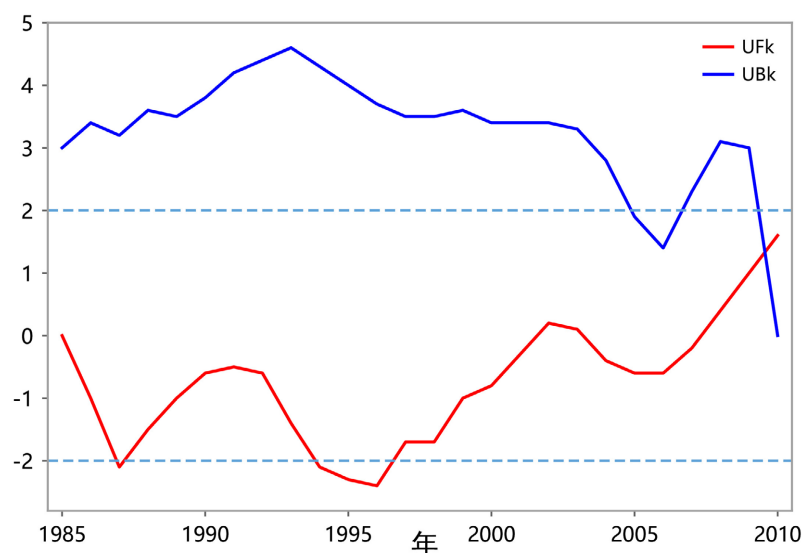


Figure 11. The M-K mutation test of winter atmospheric heat source intensity over the Qinghai-Xizang Plateau from 1985 to 2010

图 11. 1985~2010 年青藏高原冬季大气热源强度 M-K 突变检验

4. 结论

本文基于 NCEP/NCAR 再分析资料, 利用正算法和倒算法对青藏高原 1985~2010 年大气热源进行计算, 并利用线性趋势法、经验正交分解等方法对大气热源时空特征进行分析, 主要结论如下:

1) 1985~2010 年青藏高原大气热源强度整体表现为持续增强特征, 但其变化并非单调上升, 而是伴随显著的阶段性波动与年代际调整。年尺度上, 热源由 20 世纪 90 年代的波动下降逐步转向 21 世纪初的快速回升, 并在后期维持弱增强态势, 说明高原大气热力过程具有明显的非线性演变特征。春夏秋冬四季中, 夏季增强最显著、年代际振幅最大, 春季总体偏弱但存在明显转折, 秋季和冬季则呈现由热汇向热源或由弱热汇向增强热汇的过渡特征, 反映出高原热力变化的季节异质性十分突出。

2) 从 EOF 时间系数来看, 青藏高原大气热源的主导变化模态具有清晰的物理指示意义。第一模态主要刻画长期变化趋势, 反映出区域热源的持续调整及阶段性转折; 第二模态则更突出年际波动和年代际起伏, 说明高原热源变化受外部强迫和内部反馈共同影响。不同季节的 EOF 特征表明, 春夏季以增强型模态为主, 而秋季则更多表现为减弱-重组型模态, 提示高原热源的季节演变并非简单同步, 而是在不同季节受控于不同的热力与环流机制。

3) M-K 突变检验结果进一步表明, 青藏高原大气热源变化虽存在局地转折点, 但整体突变特征并不十分显著, 更多体现为缓慢累积和阶段性调整。年尺度及春夏季在 20 世纪末至 21 世纪初出现了较为关键的转折过程, 秋季则在 2004 年前后表现出较明显的结构变化。综合来看, 青藏高原大气热源在研究时段内呈现出总体增强、季节分异的基本特点, 其揭示了高原热力场的复杂性, 也为进一步探讨其对亚洲季风和区域气候异常的影响提供了重要依据。

4) 青藏高原大气热源的长期变化不仅体现为热力强度的增减, 更反映出高原地表能量收支与大气环流耦合关系的阶段性重构。尤其在夏季和春季, 热源增强更具连续性和主导性, 说明高原在暖季对大气

加热和水汽输送的调节作用更强；而秋冬季以弱热汇背景下的调整为主，表明冷季高原热力强迫相对减弱，但仍通过背景环流变化参与区域气候调控。由此可见，青藏高原大气热源的演变并非孤立的局地现象，而是高原下垫面、季节转换和大尺度环流共同作用的综合结果。

基金项目

中国气象局气象干部培训学院新疆分院教材建设项目(项目编号：2025JC01)。

参考文献

- [1] 张永生, 吴国雄. 关于亚洲夏季风爆发及北半球季节突变的物理机理的诊断分析: II青藏高原及邻近地区地表感热加热的作用[J]. 气象学报, 1999(1): 57-74.
- [2] Wu, G., He, B., Duan, A., Liu, Y. and Yu, W. (2017) Formation and Variation of the Atmospheric Heat Source over the Qinghai-Xizang and Its Climate Effects. *Advances in Atmospheric Sciences*, **34**, 1169-1184.
<https://doi.org/10.1007/s00376-017-7014-5>
- [3] Zhao, P. and Chen, L.X. (2001) Interannual Variability of Atmospheric Heat Source/Sink over the Qinghai-Xizang Plateau and Its Relation to Circulation. *Advances in Atmospheric Sciences*, **18**, 106-116.
<https://doi.org/10.1007/s00376-001-0007-3>
- [4] Duan, A.M. and Zhang, P. (2022) Interannual Variability of Atmospheric Heat Source over the Qinghai-Xizang and Its Driving Factors. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, **46**, 455-472. (In Chinese)
- [5] 周庶, 孙芳, 王美蓉, 等. 大气热源对高原低涡不同发展阶段的影响——2013 年 7 月个例分析[J]. 大气科学, 2023, 47(3): 907-919.
- [6] 罗连升, 段春锋, 毕云, 等. 春季青藏高原大气热源与长江中下游盛夏高温的关系[J]. 气象科学, 2016, 36(5): 614-621.
- [7] 谭子渊. 青藏高原对周边地区极端天气气候的影响[D]: [博士学位论文]. 兰州: 兰州大学, 2023.
- [8] 罗红羽, 于海鹏, 胡泽勇, 等. 青藏高原热源对我国旱区气候异常影响研究进展[J]. 高原气象, 2023, 42(2): 257-271.
- [9] 叶笃正, 高由禧, 周明煜, 等. 青藏高原气象学[M]. 北京: 科学出版社, 1979: 278.
- [10] Yanai, M., Esbensen, S. and Chu, J. (1973) Determination of Bulk Properties of Tropical Cloud Clusters from Large-Scale Heat and Moisture Budgets. *Journal of the Atmospheric Sciences*, **30**, 611-627.
[https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1973\)030<0611:dobpot>2.0.co;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1973)030<0611:dobpot>2.0.co;2)