

1953—2017年黄河源区气温变化的多尺度特征

冯晓莉¹, 刘彩红¹, 林鹏飞^{2*}, 白文蓉¹, 余迪¹

(¹青海省气候中心, 西宁 810001; ²中国科学院大气物理研究所LASG, 北京 100029)

摘要: 基于黄河源区8个站点的年平均气温序列, 利用集合经验模态分解 (Ensemble Empirical Mode Decomposition, EEMD) 方法, 揭示了以玛多站为代表的黄河源区1953—2017年气温演变的多时间尺度特征, 探讨不同时间尺度上的周期振荡对气温变化总体特征的影响程度, 分析了黄河源区不同时间尺度的气温变化与海温指数, 尤其是与北大西洋多年代际振荡 (the Atlantic Multidecadal Oscillation, AMO) 间的关系。结果表明: (1) 1953年以来黄河源区玛多站年平均气温以 $0.31^{\circ}\text{C}/10\text{年}$ 的变化率表现为明显的增暖趋势, 20世纪80年代后期开始转暖, 尤其是进入90年代后期变暖更加明显。(2) 近65年来, 黄河源区年平均气温呈现3a、6a、11a、25a、64a及65a以上时间尺度的准周期变化, 其中以准3a和65a以上时间尺度的振荡最显著, 准3a的年际振荡在21世纪以前振幅较大, 而进入21世纪后年际振荡振幅减弱, 65a以上时间尺度的年代际振荡振幅明显加大。(3) 1998年气候显著变暖以前, 以准3a周期为代表的年际振荡在气温演变过程中占据主导地位, 1998年气候显著变暖以后, 65a以上时间尺度周期振荡的贡献率增加近5倍, 与准3a周期振荡的贡献相当。(4) 气温与Nino3.4指数和PDO指数的同期相关均不显著, 但当气温领先PDO指数22年时正相关最大且显著, 不同于PDO指数, 气温原始序列及其三个年代际尺度分量滞后AMO指数3~7年或二者同期时相关性最高, 这就意味着AMO对黄河源区气温具有显著影响。(5) AMO的正暖位相对应着包括中国的整个东亚地区偏暖, 黄河源区只是受影响区域的一部分, 20世纪60年代早期至90年代中后期AMO的负冷位相期、90年代早期至今AMO的正暖位相与黄河源区气温距平序列的负距平、正距平相对应, 气温在65a以上时间尺度的变化与AMO指数相关性更高, 可见, AMO是影响黄河源区气温变化的一个重要的气候振荡, 这种影响主要表现在年代际时间尺度上。

关键词: EEMD; 气候变暖; 多尺度; 黄河源区; AMO

文章编号: doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2019.19026 中图分类号 P458.1+24 文献标识码 A

Multi-timescale features for surface air temperature in the source region of the Yellow River during 1953–2017

FENG Xiaoli¹, LIU Caihong¹, LIN Pengfei^{2*}, BAI Wenrong¹, YU Di¹

(1. Qinghai Climate Centre, Xining 810001, China;¹

2. LASG, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029,

收稿日期 2019-03-01 ;收修定稿日期 2019-09-09

作者简介 冯晓莉, 女, 1985 出生, 主要从事气候变化研究。Email: fxl_lxf2008@163.com

通讯作者 林鹏飞, Email: linpf@mail.iap.ac.cn

资助项目 中国气象局气候变化专项“增暖背景下高原雨季变化特征及归因研究”

(CCSF201929); 青海省气象局科研项目“青海省极端气候事件的变化特征研究”以及国家自然科学基金项目 (41576026, 41976026)

Funded by Climate Change Special Fund of China Meteorological Administration "Study on Characteristics and Attribution of Rainy Season over Qinghai Plateau under Global Warming" (CCSF 201929); Scientific Research Project of Qinghai Meteorological Administration "Study on Changing Characteristics of Extreme Climate Events in Qinghai Province" and National Natural Science Foundation of China (Grants 41576026 and 41976026)

China)

Abstract: Based on the annual averaged surface air temperature data from eight meteorological stations in the source region of the Yellow River using the Ensemble Empirical Mode Decomposition (EEMD) approach, the multi-timescale temperature features of meteorological stations with Madoi as a representative during 1953-2017 and their contributions to the temperature variations are revealed. The correlations between different time-scale temperature oscillations with the SST indices are analyzed, particularly with the Atlantic Multidecadal Oscillation (AMO). The results demonstrated that: (1) a long-term temperature trend was $0.31^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ during 1953-2017 in the source region of the Yellow River, and the warming started in the late 1980s and accelerated in the late 1990s. (2) There were 3-year, 6-year, 11-year, 25-year, 64-year and 65-year quasi-cycle oscillations for the temperature during 1953-2017. Among them, the 3-year and 65-year quasi-cycle oscillations were significant. The amplitude of 3-year time-scale oscillation was large before the 21st century and decreased after the 21st century, while the amplitude of 65-year oscillation was enhanced after the 21st century. (3) The 3-year quasi-cycle oscillation occupied a dominant position during the period of 1953-1997, and the contribution of 65-year oscillation increased nearly five times which was equivalent to the contribution of the 3-year oscillation during the rapid warming period since 1998. (4) The correlations between temperature with Nino3.4 and PDO indices were not significant, but the maximum significant correlation was found when the temperature led PDO 22 years. Unlike PDO, the maximum significant correlation was found when AMO led the original temperature and its three inter-decadal components 0 and 3-7 years which supported that AMO had a significant impact on the temperature variation in the source region of the Yellow River. (5) The positive warm phase of AMO corresponded to the warming of the East Asia including China, and the source region of the Yellow River was only a part of that area. The negative cold phase of AMO from the early 1960s to the middle and late 1990s and the positive warm phase of AMO from the early 1990s to the present corresponded to the negative and positive phases of the temperature in the source region of the Yellow River. The AMO highly correlated with the 65-year oscillation. These results supported that AMO was an important climatic oscillation affecting the temperature variation especially on the inter-decadal time scales in the source region of the Yellow River.

Keywords: EEMD; climate warming; multi-scale; source region of the Yellow River; AMO

1 引言

近100年来,受人类活动以及强迫和非强迫的不同时间尺度自然变化分量的共同影响(林振山, 1990; Parker等, 2007; Xie等, 2010; Hansen等, 2011; Estrada等, 2013; Jian等, 2013; 钱维宏, 2013), 全球气候日趋变暖。IPCC第五次评估报告指出, 1880—2012年全球平均气温升高了约 0.85°C (Qin等, 2014)。由于地球表面的异质性、影响过程的复杂性和影响因素的多样性, 不同区域对全球气候变化的响应具有差异性和不确定性。青藏高原作为气候变化的敏感区, 增暖现象更为明显(丁一汇, 2007; 吕少宁, 2010)。位于青藏高原腹地的黄河源区被誉为“黄河水塔”, 是重要的水源涵养地。近几十年来, 黄河源区气温呈增加态势(樊萍等, 2004; 徐宗学等, 2006; 刘光生等, 2010; 罗栋梁和金会军, 2014), 受其影响, 流域内出现冰川退缩、冻土退化、草场和湿地萎缩以及水土流失等一系列的生态环境问题(杨建平等, 2003; 王根绪等, 2004; 金会军等, 2010; 康颖等, 2015)。作为气候变化的敏感区和生态环境的脆弱带, 深入研究黄河源区气候变化的过程和规律, 对指导当地生态建设、构筑黄河中下游生态安全屏障具有极其重要的现实意义和应用价值。

纵观该区域已有的气候变化相关研究(樊萍等, 2004; 徐宗学等, 2006; 刘光生等, 2010; 罗栋梁和金会军, 2014), 大多是使用线性回归的方法分析温度的变化趋势。而气候系统是

具有非线性和非平稳性的复杂系统,对气候序列进行线性拟合的趋势可能与实际不符。另外,气候系统还具有层次性,许多大小不同的时间尺度构成了多层次结构。长时间尺度温度变化数据序列中包含了多种变化周期,而利用线性回归、参数化或者非参数化方法获得的气候变化趋势包括了多种变化周期的影响,因此存在一定的不确定性。而且,目前关于不同尺度周期变化对气候演变特征的影响研究也较少。过去几十年来,黄河源区不同时间尺度上气候有何演变特征,不同时期不同时间尺度的振荡对整个气候变化贡献如何尚不清楚。

针对上述存在的问题,本文采用适用于非平稳、非线性信号的数据处理方法—集合经验模态分解(EEMD),对黄河源区1953—2017年气温演变的多时间尺度特征进行分析,探讨不同时间尺度上的周期振荡对气温变化总体特征的影响程度,最后分析了黄河源区不同时间尺度的气温变化与海温指数,尤其是与北大西洋多年代际振荡(the Atlantic Multidecadal Oscillation, AMO)间的关系。

2 资料和方法

2.1 数据来源

本研究选取黄河源区10个气象观测站点(32° — 36° N, 97° — 102° E, 海拔高度范围在2586—6253米之间)(图1)自建站以来的年平均气温资料,以拥有最长连续观测记录的黄河源头玛多站作为典型代表站,研究黄河源区气温变化的多时间尺度特征,时间段为1953—2017年。

图1 黄河源区气象站点的空间分布

Fig.1 Spatial distribution of meteorological stations in the source region of the Yellow River

气温格点资料来源于英国东英吉利大学气候研究中心(CRU)的逐月陆地表面气温(CRU_TS4.02)(Mitchell等, 2004; Mitchell和Jones, 2005),该资料时间范围为1850—2017年,空间分辨率为 $0.5^{\circ}\times 0.5^{\circ}$ 。

另外,本研究中使用了北大西洋多年代际振荡(the Atlantic Multidecadal Oscillation, AMO)指数、太平洋十年涛动(the Pacific Decadal Oscillation, PDO)指数以及Nino3.4指数。其中,AMO指数为 0° N— 60° N, 75° W— 7.5° W区域海表温度异常的年平均,在计算过程中,去掉了海温异常的线性趋势,目的是去掉全球增暖的影响,且作了九点滑动平均(Wang等, 2009); PDO指数为 20° N— 70° N, 110° E— 100° W区域平均海洋表面温度去除全球平均海洋表面温度后进行EOF分解的第一模态的时间系数(Mantua等, 1997); Nino3.4指数为 5° W— 5° E, 170° W— 120° W的区域平均海洋表面温度(Trenberth, 1997)。AMO、PDO、Nino3.4指数下载于以下网站: <http://www.esrl.noaa.gov/psd/data/climateindices/list/>。

2.2 方法介绍

本文采用2009年Wu和Huang等提出的集合经验模态分解(EEMD)方法(Wu等, 2009),该方法将时间序列划分为不同时间尺度上的变化(Wu等, 2007, 2009, 2011; 王兵等, 2014; Lin等, 2015, 2016; Qian, 2016)。主要步骤如下:首先通过噪声辅助处理,将一组白噪音添加到原始序列中来提供一个相对高频、均匀的极值分布;其次,对加入白噪音的时间序列进行经验模态分解(EMD)(Huang等, 1998),即根据时间序列的瞬时特征提取各本征模态函数(Intrinsic Mode Functions, IMF),对各IMF分量进行希尔伯特—黄变换(Hilbert-Huang Transform, HHT),得到解析信号;最后将各IMF分量多次进行集合平均以抵消加入白噪音对真实信号的影响。EEMD方法改进了EMD模态混淆的缺陷,将长期趋势和不同时间尺度的振荡从原始时间序列中分离出来,避免了长期趋势变化和大尺度周期震

荡混叠的问题，能够较好地反映出数据自适合的、内在的以及在整个时间轴上的变化程度。本文在对年平均气温距平序列进行EEMD分解时，将扰动白噪声与原始信号的信噪比定为0.01，集合样本数取1000次，最终得到5个固有模态函数IMF1-IMF5以及长期趋势分量RES。将IMF1-IMF5以及RES进行合成，可得到一个重构序列，该序列与原始气温距平序列吻合。

EEMD方法可进行显著性检验，得到各分量的信度。设第k个分量的能量谱密度为：

$$E_k = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N |I_k(j)|^2 \quad (1)$$

式中，N为各分量的长度； $I_k(j)$ 为第k个分量通过蒙特卡罗法对白噪声序列进行实验的结果。

白噪声的第k个分量的能量谱密度均值 $\overline{E_k}$ 和周期 $\overline{T_k}$ 的关系可近似表述为：

$$\ln \overline{E_k} + \ln \left\{ \overline{T_k} \right\}_\alpha = 0 \quad (2)$$

在以 $\ln \left\{ \overline{T_k} \right\}_\alpha$ 为x轴、 $\ln \overline{E_k}$ 为y轴的图中，两者关系将表现为斜率为-1的直线，对此给出白噪声能量谱分布的置信区间：

$$\ln \overline{E_k} = -\ln \left\{ \overline{T_k} \right\}_\alpha \pm \alpha \sqrt{2/N} e^{\ln(\left\{ \overline{T_k} \right\}_\alpha / 2)} \quad (3)$$

式中， α 为显著性水平。在给定显著性水平下，分解所得各分量能量相对于周期分布位于置信度曲线以上，表明通过检验，具有实际物理意义；反之则认为未通过显著性检验。

此外，通过计算各分量的方差对所有项方差和的贡献率来反映不同分量对原序列的影响程度。

最后，通过计算1953—2017年AMO、PDO、Nino3.4指数和黄河源区不同时间尺度气温序列的相关系数，揭示了气温变化与海洋相关的主要气候系统内部变率之间的联系。

3 结果分析

3.1 气温年际变化

对黄河源区10个气象观测站的年平均气温数据进行质量控制和均一性检验以确保各站点观测数据的准确和可靠，剔除发生台站迁移或观测环境变更的河南、同德两个台站，经过整理，确定8个台站的资料用以对比。从建站以来黄河源区8个站的年平均气温距平序列来看（图2），8站气温的长期变化具有较好的一致性，且均呈明显的上升趋势。经计算，黄河源头玛多站与其余7站的相关系数均在0.8以上，达到了0.01的置信度水平。而玛多站又是黄河源区具有最长连续气象记录的观测站，在研究气温长时间序列多尺度变化中具有较好的代表性。下面主要以黄河源头玛多站的分析结果为代表，给出黄河源区近65年来气温变化的多尺度特征。

图2 黄河源区各观测站点自建站以来年平均气温变化

Fig. 2 The Time series of the annual mean temperature at 8 stations in the source region of the Yellow River

从1953—2017年黄河源头玛多站年平均气温距平序列可以看出（图3a），气温变化总体表现为明显的增暖趋势，以 $0.31^\circ\text{C}/10$ 年的变化率上升。在气温的演变过程中，亦呈现出冷暖相间、波动上升的特点，20世纪50年代至80年代后期气温呈偏低态势，其中在1965、1977—1978、1983、1985—1986年出现较大负距平，在1958、1972、1981、1987—1988年出现正

距平；80年代后期开始气候转暖，进入90年代后期气温上升尤为明显。利用累积距平曲线把气温变化分为明显的2个阶段，在1998年气温由负距平转为正距平，在2016年达到历史最高值。

图3 1953—2017年黄河源区玛多站年平均气温距平历年变化（a）及AMO指数的时间序列（b）

Fig. 3 The annual mean temperature anomalies in the Madoi station (a) and the time series of the AMO index (b) during 1953-2017

3.2 气温变化的多尺度分析

对1953—2017年黄河源区玛多站年平均气温距平序列进行EEMD分解得到5个IMF分量和长期趋势项（RES），如图4所示，它们各自反映了原平均气温距平序列中固有的不同特征尺度的振荡。IMF1-5均呈现出多波动特征，其中IMF1分量在20世纪80年代中后期和20世纪90年代末出现较大振幅，从2000年开始表现出减小的趋势；IMF2分量在20世纪70年代前中期至80年代初的振幅明显大于其余时期；IMF3分量在1989年之前出现较大振幅，之后呈逐渐减小的态势；而IMF4分量从20世纪60年代中后期开始才呈现出具有明显振幅的波动特征，进入20世纪90年代末期后振幅进一步增大；IMF5分量在20世纪90年代初由负位相转为正位相，目前该分量处于正位相向负位相的过渡；由于资料长度的限制，趋势项应包含更长时间尺度的周期振荡，反映气温距平序列总体随时间变化的上升趋势。

图4 1953—2017年黄河源区玛多站年平均气温距平序列经EEMD分解的IMF分量及趋势项

Fig. 4 The IMFs and trend components of temperature by EEMD in the Madoi station during 1953-2017

图5为各分量的能量谱密度周期分布，纵轴为经EEMD分解的气温各分量所具有的能量谱密度的自然对数，越靠近上方表示分量具有的能量越高、振幅越大，越靠近左边，表示频率越高、周期越小。从图5可以看出，65a以上时间尺度的RES项落在90%的置信区间上，说明65a以上时间尺度的气温变化最为显著，其包含的具有实际物理意义的信息最多；IMF1分量基本落在90%的置信水平线上，其对应的准3年振荡周期为气温距平序列的主要振荡周期；IMF2-IMF5均在90%置信区间以下，表明6a（IMF2）、11a（IMF3）、25a（IMF4）、64a（IMF5）的周期性振荡不显著，这些尺度的周期在黄河源区气温变化过程中表现的能量微弱。

近65年来，黄河源区气温变化具有显著的准3a和65a以上时间尺度的周期振荡。进一步计算1998年气候显著变暖前后时期各分量对原气温距平序列的方差贡献率可知，1998年气候显著变暖以前，以准3a周期为代表的年际振荡在气温演变过程中占据主导地位（方差贡献率达61.5%），其与原气温距平序列的相关系数为0.8，并通过0.01置信度水平；1998年气候显著变暖以来，65a以上时间尺度的周期振荡与准3a周期振荡的贡献相当（两者方差贡献率之和为75%），与1998年以前相比，65a以上时间尺度的变化对原气温序列的贡献率增加近5倍。

图5 1953—2017年黄河源区玛多站年平均气温距平序列经EEMD分解的各分量信号的显著性检验

Fig. 5 The Significance test result of each components of temperature in the Madoi station during 1953-2017

3.3 气温与大西洋年代际振荡（AMO）的联系

近百年来，地球大气中的二氧化碳一直在单调增加，但是气温的变化并不是完全单调上升，而是表现出波动上升的特点（Trenberth和Fasullo，2014）。温度的这种变化一方面受外强迫的影响，另一方面受气候系统内部变率的控制（Wallace等，1995；Tung和Zhou，2013；Guan等，2015）。气候系统的内部变率包括厄尔尼诺-南方涛动（ENSO）、太平洋海温年

代际振荡 (PDO)、北大西洋多年代际振荡 (AMO) 等。众多研究表明, 气候系统的内部变率对全球或区域的气温均存在明显的影响 (Trenberth和Fasullo, 2013; Tung和Zhou, 2013; Watanabe等, 2013; Latif等, 2013; Wang等, 2013; Banholzer和Donner, 2014; Gao等, 2015; 李双林等, 2015; 童宣等, 2018)。

首先通过计算1953—2017年黄河源区年平均气温距平序列不同时间尺度的分量与Nino3.4、PDO、AMO指数的相关性, 来讨论不同时间尺度的气温变化与海温模态的联系 (表1), 可以看出, Nino3.4指数与各分量的同期相关性均不显著, PDO指数与气温的准25a周期分量呈显著负相关关系 (相关系数为-0.29并通过0.05置信度水平), AMO指数与气温年代际尺度的三个分量呈显著正相关, 尤其与最后两个分量的相关性更高, 相关系数在0.6以上。

表1 1953-2017年黄河源区气温距平序列及其各分量与Nino3.4、PDO、AMO指数的相关系数 (*、**、*** 分别表示相关系数通过0.1、0.05、0.01置信度水平)

Table 1 Correlation coefficients between the Nino3.4, PDO, AMO indices with the original and six components of temperature in the Madoi station during 1953-2017. *, **, *** indicate significance at the 0.1, 0.05, 0.01 level.

海温指数	气温距平序列及其不同时间尺度分量						
	Original	IMF1	IMF2	IMF3	IMF4	IMF5	RES
Nino3.4	0.11	0.05	-0.15	0.13	-0.18	0.16	0.18
PDO	0.10	0.08	-0.24*	0.18	-0.29**	0.13	0.18
AMO	0.60***	0.25**	0.07	-0.03	0.37***	0.64***	0.61***

图6分别给出了1953—2017年黄河源区年平均气温距平序列及其三个年代际尺度上的分量与PDO、AMO指数的超前-滞后相关, 可以看出, 气温原始序列与PDO指数的同期相关虽不显著, 但当气温领先PDO指数22年时正相关最大且显著 (图6a), 气温在三个年代际尺度上的分量分别超前PDO指数22年、16年、20年时存在最大正相关 (图6b-d)。不同于PDO指数, 气温原始序列及其三个年代际尺度分量滞后AMO指数3~7年或二者同期时相关性最高 (图6e-h)。从1953—2017年AMO指数的时间演变序列也可以看出 (图3b), 20世纪60年代早期至90年代中后期AMO的负冷位相期与90年代早期至今AMO的正暖位相期分别与黄河源区气温距平序列的负距平和正距平相对应, 二者同期相关达0.6, 以上分析均表明AMO对黄河源区气温具有显著影响。

图6 1953—2017年黄河源区玛多站年平均气温距平序列及其三个年代际尺度以上分量与PDO指数(a-d)、AMO指数(e-h)的超前-滞后相关 (横坐标为正值时表示气温超前, 虚线表示相关系数通过0.05置信度水平)
Fig. 6 The lead-lag correlations between the PDO and AMO indices with the original time series and the three components of temperature on the decadal scales in the Madoi station during 1953-2017 (x-axis values are positive indicating the temperature led PDO or AMO, dash lines indicate the significance at the 0.05 level)

为了解AMO对黄河源区气温的影响是否表现出与全国区域的一致性, 我们利用CRU气温格点资料分析了1953—2017年60°E—140°E, 0°—60°N范围内的气温变化与AMO指数的相关性。首先利用CRU气温格点资料对1953—2017年黄河源区逐年气温序列进行区域平均, 分析该序列与黄河源区8个气象观测站的年平均气温距平序列的相关性, 以了解格点资料的可靠性, 经计算, 黄河源区气温格点资料与气象观测资料的相关性较好, 相关系数在0.8以上, 达到了0.01的置信度水平。图7a为气温原始序列与AMO指数的相关系数分布图, 可以看出, 除中国东北边缘部分地区正相关不显著外, AMO的正暖位相对应着包括中国的整个东亚地区偏暖, 黄河源区只是受影响区域的一部分, 该区域温度演变与AMO指数的相关系数达0.3以上, 相关系数通过0.05置信度水平。图7b给出了气温在65a以上时间尺度的分量与AMO指数的相关分布图, 可以看出, 中国东北部以及蒙古国部分地区65a以上时间尺度上的

气温变化与AMO指数呈负相关关系，除此之外，其余大部地区包括黄河源区二者正相关显著，可见，AMO不仅是影响东亚地区气温变化的一个重要的海洋气候振荡，而且对黄河源区气温的影响非常重要，这种影响主要表现在65a以上时间尺度上。对AMO如何影响东亚气温方面，已有研究表明，大西洋海温异常增暖加热了北半球对流层中高层，从而使得欧亚大陆增温，加强了海陆之间的热力差异，最终影响季风，即当AMO处于暖位相时，东亚夏季风增强，东亚冬季风减弱，冷位相则相反（Lu等，2006；Wang等，2009；李双林等，2015）。

图7 1953—2017年AMO指数与60°E—140°E，0°—60°N范围内原始气温序列（a）和65年以上时间尺度分量的相关系数（b）（点状阴影区表示相关系数通过0.05置信度水平）

Fig. 7 The spatial distribution of correlation coefficients between the AMO index with the original temperature during 1953-2017 (a) and the last component on the 65a-longer time scale (b) (dotted shadows indicate the significance at 0.05 level)

4 结果与讨论

（1）1953年以来黄河源区玛多站年平均气温变化总体表现为明显的增暖趋势，以 $0.31^{\circ}\text{C}/10\text{年}$ 的变化率上升。20世纪50年代至80年代后期气温呈偏低态势，80年代后期开始气候转暖，进入90年代后期气温上升尤为明显，在2016年达到历史最高值。

（2）对1953—2017年黄河源区玛多站年平均气温距平序列进行EEMD分解得到气温在3a、6a、11a、25a、64a及65a以上时间尺度上的准周期变化。从年际尺度来看，气温的准3a周期振荡在20世纪80年代中后期和20世纪90年代末振幅较大，2000年开始减小；准6a的年际振荡振幅在20世纪70年代前期至80年代初较大；而以11a为主要周期的气温变化幅度在1989年由强转弱。25a、64a以及更长时间的年代际振荡振幅在20世纪90年代末期后明显增大。

（3）1953—2017年黄河源区气温变化具有显著的3a和65a以上时间尺度的振荡。1998年气候显著变暖以前，以准3a周期为代表的年际振荡在气温演变过程中占据主导地位，方差贡献率达61.5%；1998年气候显著变暖以后，65a以上时间尺度的周期振荡与准3a周期振荡的贡献相当，与1998年以前相比，65a以上时间尺度的变化对原气温序列的贡献率增加近5倍。

（4）1953—2017年黄河源区年平均气温距平序列不同时间尺度的分量与Nino3.4指数的同期相关均不显著，气温的准25a周期分量与PDO指数呈显著负相关关系，AMO指数与气温年代际尺度的三个分量呈显著正相关，尤其与65a以上时间尺度的气温变化相关性更高。气温原始序列与PDO指数的同期相关虽不显著，但当气温领先PDO指数22年时正相关最大且显著，气温在三个年代际尺度上的分量分别超前PDO指数22年、16年、20年时存在最大正相关。不同于PDO指数，气温原始序列及其三个年代际尺度分量滞后AMO指数3~7年或二者同期时相关性最高。

（5）AMO的正暖位相对应着包括中国的整个东亚地区偏暖，大西洋海温异常增暖加热了北半球对流层中高层，从而使得欧亚大陆增温，海陆热力差异加大，东亚夏季风增强，冬季风减弱，黄河源区只是受影响区域的一部分，20世纪60年代早期至90年代中后期AMO的负冷位相期与90年代早期至今AMO的正暖位相期分别与黄河源区气温距平序列的负距平和正距平相对应。气温在65a以上时间尺度的变化与AMO指数呈显著正相关。可见，AMO是影响黄河源区气温变化，尤其是气温年代际时间尺度变化的一个重要的海洋气候振荡。

最后，需要指出的是，目前黄河源区最长的气温观测资料序列只有65年，只能涵盖AMO的一个左右周期，如此短的序列不足以揭示自然气候系统中气温与AMO的真实联系。另外该时间段自然气候系统受人类活动温室气体等外强迫因素的干扰，使得气温与AMO的真实联系可能会被掩盖。这可能需要用更长的序列，更多的数据源，进行比较分析。

参考文献

- Banholzer S, Donner S. 2014. The influence of different El Niño types on global average temperature[J]. *Geophys Res Lett*, 41: 2093-2099.
- 丁一汇, 任国玉, 石广玉, 等. 2007. 气候变化国家评估报告(I): 中国气候变化的历史和未来趋势[J]. *气候变化研究进展*, 3(s1): 1-5. Ding Y H, Ren G Y, Shi G Y, et al. 2007. National Assessment Report of Climate Change (I): Climate change in China and its future trend [J]. *Advances in Climate Change Research*, 3(s1): 1-5.
- Estrada F, Perron P, Martínez-López B. 2013. Statistically derived contributions to diverse human influences to twentieth-century temperature change [J]. *Nature Geoscience*, 6(12): 1050-1055.
- 樊萍, 王得祥, 祁如英. 2004. 黄河源区气候特征及其变化分析[J]. *青海大学学报*, 22(1): 19-24. Fan P, Wang D X, Qi R Y. 2004. Analysis on climatic feature and its change in source region of the Yellow River [J]. *Journal of Qinghai University*, 22(1): 19-24.
- Gao L H, Yan Z W, Quan X W. 2015. Observed and SST-forced multidecadal variability in global land surface air temperature[J]. *Climate Dynamics*, 44(1-2): 359-369.
- Guan X, Huang J, Guo R, Lin P. 2015. The role of dynamically induced variability in the recent warming trend slowdown over the Northern Hemisphere[J]. *Scientific Reports*, 5: 12669.
- Huang N E, Shen Z, Long S R, et al. 1998. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for non-linear and nonstationary time series analysis [J]. *Climatic and Environmental Research*, 454 (19): 903-995.
- Hansen J, Sato M, Kharecha P, et al. 2011. Earth's Energy Imbalance and Implications [J]. *Atmospheric Chemistry & Physics Discussions*, 11(9): 27031-27105.
- 金会军, 王绍令, 吕兰芝, 等. 2010. 黄河源区冻土特征及退化趋势[J]. *冰川冻土*, 32(1): 10-17. Jin H J, Wang S L, LÜ L Z, et al. 2010. Features and Degradation of Frozen Ground in the Sources Area of the Yellow River [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 32(1): 10-17.
- Jian L, Bin W, Cane M A, et al. 2013. Divergent global precipitation changes induced by natural versus anthropogenic forcing [J]. *Operative Techniques in Orthopaedics*, 493(7434): 656-659.
- 康颖, 张磊磊, 张建云, 等. 2015. 近50a来黄河源区降水、气温及径流变化分析[J]. *人民黄河*, 37(7): 9-12. Tang Y, Zhang L L, Zhang J Y, et al. 2015. Analysis of Change of Precipitation, Temperature and Streamflow in Source Region of the Yellow River in Recent 50 Years [J]. *Yellow River*, 37(7): 9-12.
- 林振山. 1990. 气候层次理论及其应用[J]. *北京大学学报*, 26: 355-360. Lin Z S. 1990. Climatic Hierarchical Theory and Its Applications [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinesis*, 26: 355-360.
- Lu R, Dong B, Ding H. 2006. Impact of the Atlantic multi-decadal oscillation on the Asian summer monsoon[J]. *Geophysical Research Letters*, 33(24).
- 吕少宁, 李栋梁, 文军, 等. 2010. 全球变暖背景下青藏高原气温周期变化与突变分析[J]. *高原气象*, 29(6):1378-1385. LÜ S N, Li D L, Wen J, et al. 2010. Analysis on Periodic Variations and Abrupt Change of Air Temperature over Qinghai-Xizang Plateau under Global Warming [J]. *Plateau Meteorology*, 29(6):1378-1385.
- 刘光生, 王根绪, 胡宏昌, 等. 2010. 长江黄河源区近45年气候变化特征分析[J]. *资源科学*, 32(8): 1486-1492. Liu G S, Wang G X, Hu H C, et al. 2010. Climate Change Characteristics in the Source Regions of the Yangtze River and Yellow River over the Past 45 Years [J]. *Resources Science*, 32(8): 1486-1492.
- Latif M, Martin T, Park W. 2013. Southern ocean sector centennial climate variability and recent decadal trends [J]. *J Clim*, 26: 7767-7782.
- 罗栋梁, 金会军. 2014. 黄河源区玛多县1953~2012年气温和降水特征及突变分析[J]. *干旱区资源与环境*, 28(11): 185-192. Luo D L, Jin H J. 2014. Variations of air temperature and precipitation from 1953 to 2012 in the Madoi station in the sources areas of the Yellow River[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 28(11): 185-192.
- 李双林, 井元元, 罗菲菲. 2015. 工业革命前中国气温与大西洋年代际振荡(AMO)的可能联系[J]. *中国科学:地球科学*, 6: 864-878.

- Li S L, Jing Y Y, Luo F F. 2015. The potential connection between China surface air temperature and the Atlantic Multidecadal Oscillation (AMO) in the Pre-industrial Period[J]. *Science China: Earth Sciences*, 6: 864-878.
- Lin P F, Feng X L, Liu J J. 2015. Historical trends in surface air temperature estimated by ensemble empirical mode decomposition and least squares linear fitting[J]. *Atmospheric and Oceanic Science Letters*, 8(1): 10-16.
- Lin P F, Feng X L, Zhi H, et al. 2016. Long-term surface air temperature trend and the possible impact on historical warming in cmip5 models[J]. *Atmospheric and Oceanic Science Letters*, 9(3): 153-161.
- Mantua N J, Hare S R, Zhang Y, Wallace J M, Francis R C. 1997. A Pacific interdecadal climate oscillation with impacts on salmon production[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 78(6):1069-1079.
- Mitchell T D, Carter T R, Jones P D, et al. 2004. A comprehensive set of high-resolution grids of monthly climate for Europe and the globe: the observed record (1901–2000) and 16 scenarios (2001–2100)[J]. *Tyndall Cent Clim Change Res Work Paper*, 55: 25.
- Mitchell T D, Jones P D. 2005. An improved method of constructing a database of monthly climate observations and associated high-resolution grids[J]. *Int J Climatol*, 25: 693–712.
- Parker D, Folland C, Scaife A, et al. 2007. Decadal to multidecadal variability and the climate change background [J]. *J. Geophys. Res.*, 112, D18115, doi:10.1029/2007JD008411.
- Qin D, Plattner G K, Tignor M, et al. 2014. *Climate change 2013: The physical science basis* [M]. Cambridge, UK, and New York, USA: Cambridge University Press.
- 钱维宏. 2013. 多时间尺度气候变化[J]. *气象科技进展*, 02: 36-40. Qian W H. 2013. Climate Change of Multiple Timescales [J]. *Advances in Meteorological Science and Technology*, 02: 36-40.
- Qian C. 2016. On trend estimation and significance testing for non-gaussian and serially dependent data: quantifying the urbanization effect on trends in hot extremes in the megacity of shanghai[J]. *Climate Dynamics*, 47(1-2): 329-344.
- Qian C. 2016. Disentangling the urbanization effect, multi-decadal variability, and secular trend in temperature in eastern China during 1909–2010[J]. *Atmospheric Science Letters*, 17(2):177-182.
- Trenberth K E. 1997. The definition of El Nino[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 78(12):2771-2777.
- Trenberth K E, Fasullo J T. 2013. An apparent hiatus in global warming? [J]. *Earth's Future*, 1: 19-32.
- Trenberth K E, Fasullo J T, Branstator G, Phillips A S. 2014. Seasonal aspects of the recent pause in surface warming[J]. *Nature Climate Change*, 4(10): 911-916.
- Tung K K, Zhou J. 2013. Using data to attribute episodes of warming and cooling in instrumental records [J]. *Proc Natl Acad Sci USA*, 110: 2058-2063.
- 童宣, 严中伟, 李珍, 等. 2018. 近百年中国两次年代际气候变暖中的冷、暖平流背景[J]. *气象学报*, 76(4): 554-565. Tong X, Yan Z W, Li Z, et al. 2018. The background of cold/warm advection for two interdecadal warming processes during the last century in China[J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 76(4): 554-565.
- 王根绪, 丁永建, 王建, 等. 2004. 近15年来长江黄河源区的土地覆被变化[J]. *地理学报*, 59(2): 163-173. Wang G X, Ding Y J, Wang J, et al. 2004. Land Ecological Changes and Evolutional Patterns in the Source Regions of the Yangtze and Yellow Rivers in Recent 15 Years [J]. *Acta Geographica Sinica*, 59(2): 163-173.
- Wallace J M, Zhang Y, Renwick J A. 1995. Dynamic contribution to hemispheric mean temperature trends[J]. *Science*, 270(5237): 780-783.
- Wu Z, Huang N E, Long S R, et al. 2007. On the trend, detrending, and variability of nonlinear and nonstationary time series [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 104(38): 14889-14894.
- Wu Z H, Huang N E. 2009. Ensemble empirical mode decomposition: A noise-assisted data analysis method[J]. *Advances in Adaptive Data Analysis*, 1(1): 1-41.
- Wang Y, Li S, Luo D. 2009. Seasonal response of Asian monsoonal climate to the Atlantic Multidecadal Oscillation[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 114.
- Wu Z H, Norden E. H. 2011. Ensemble empirical mode decomposition: A noise-assisted data analysis method [J]. *Advances in Adaptive Data Analysis*, 1(01):1-41.

- Watanabe M, Kamae Y, Yoshimori M, et al. 2013. Strengthening of ocean heat uptake efficiency associated with the recent climate hiatus[J]. *Geophys Res Lett*, 40: 3175-3179.
- Wang J L, Yang B, Qin C, et al. 2013. Tree-ring inferred annual mean temperature variations on the southeastern Tibetan Plateau during the last millennium and their relationships with the Atlantic Multidecadal Oscillation [J]. *Clim Dyn*, 43: 627-640.
- 王兵, 胡娅敏, 杜尧东, 等. 2014. 小波分析和EEMD方法在广州气温及降水的多尺度分析中的差异分析[J]. *热带气象学报*, 30(4): 769-776. Wang B, Hu Y M, Du Y D, et al. 2014. Study on the Difference Between Wavelet Analysis and EEMD in Multi-scale Decomposition of Temperature and Precipitation of Guangzhou [J]. *Journal of Tropical Meteorology*, 30(4): 769-776.
- 徐宗学, 和宛琳. 2006. 近40年黄河源区气候要素分布特征及变化趋势分析[J]. *高原气象*, 25(5): 906-913. Xu Z X, He W L. 2006. Spatial and temporal Characteristics and Change Trend of Climate Elements in the Headwater Region of the Yellow River in Recent 40 Years [J]. *Plateau Meteorology*, 25(5): 906-913.
- Xie S P, Ma J, Deser C, et al. 2010. Global Warming Pattern Formation: Sea Surface Temperature and Rainfall [J]. *Journal of Climate*, 23(4): 966-986.
- 杨建平, 丁永建, 刘时银, 等. 2003. 长江黄河源区冰川变化及其对河川径流的影响[J]. *自然资源学报*, 18(5): 595-602. Yang J P, Ding Y J, Liu S Y, et al. 2003. Glacier change and its effect on surface runoff in the source regions of the Yangtze and Yellow rivers [J]. *Journal of Natural Resources*, 18(5):595-602.

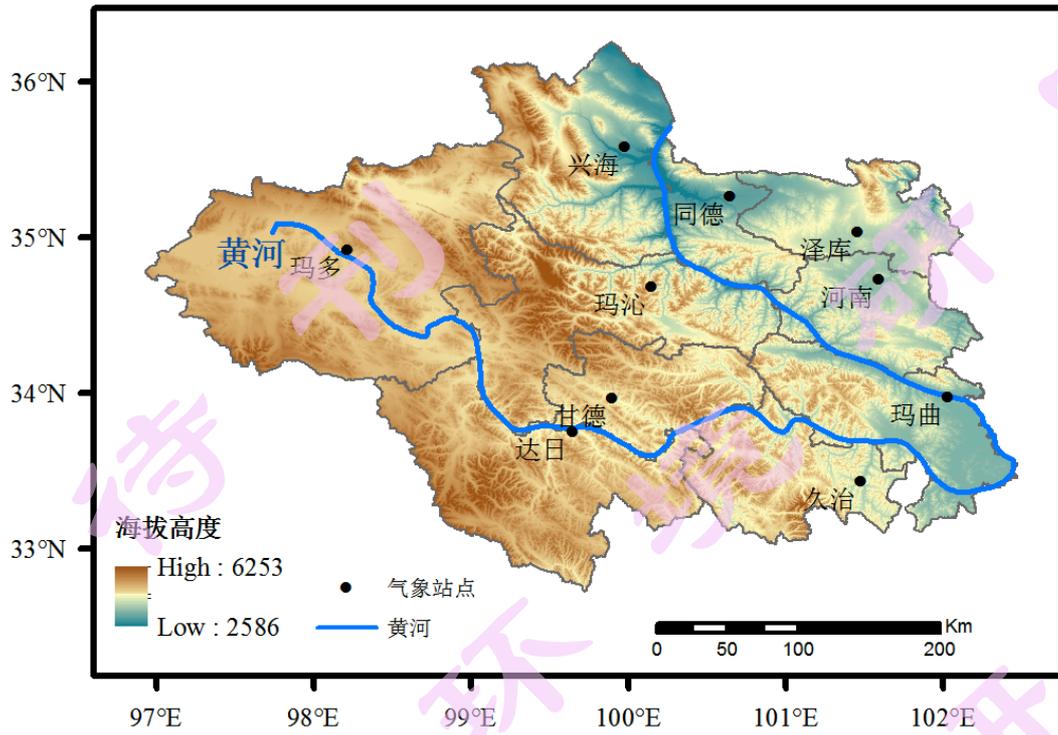


图1 黄河源区气象站点的空间分布

Fig.1 Spatial distribution of meteorological stations in the source region of the Yellow River

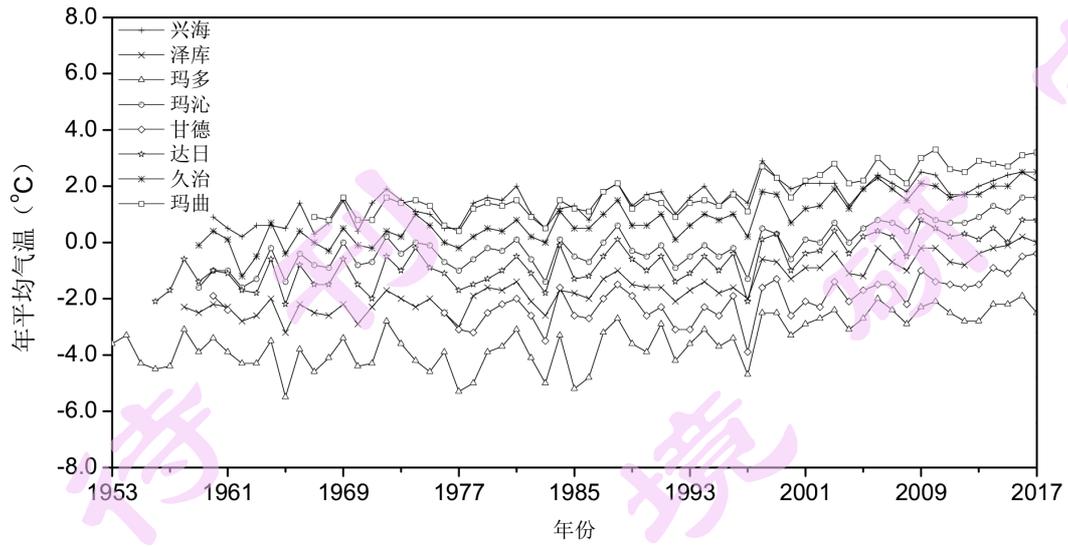


图2 黄河源区各观测站点自建站以来年平均气温变化

Fig. 2 The Time series of the annual mean temperature at 8 stations in the source region of the Yellow River

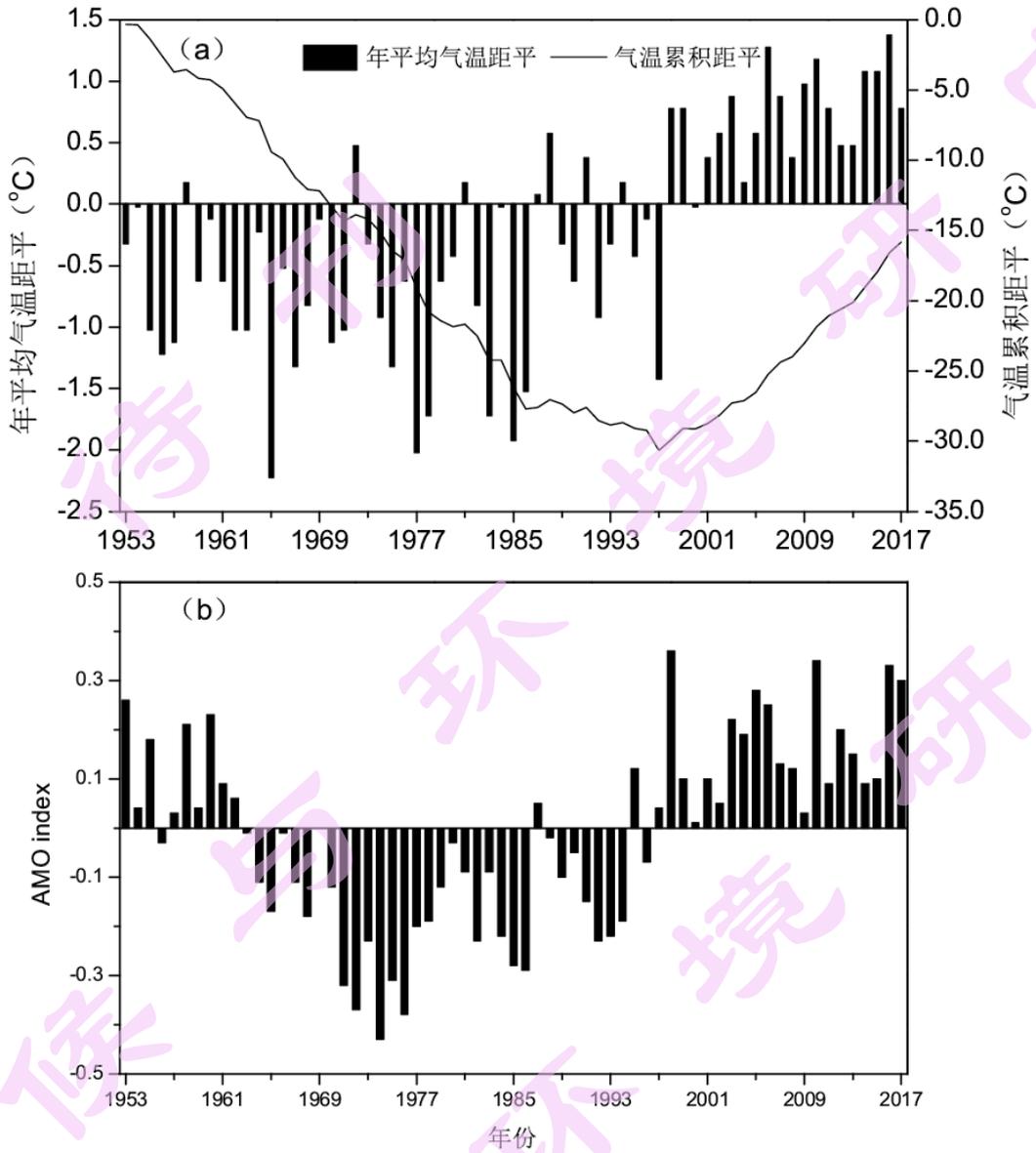


图3 1953—2017年黄河源区玛多站年平均气温距平历年变化 (a) 及AMO指数的时间序列 (b)

Fig. 3 The annual mean temperature anomalies in the Madoi station (a) and the time series of the AMO index (b) during 1953-2017

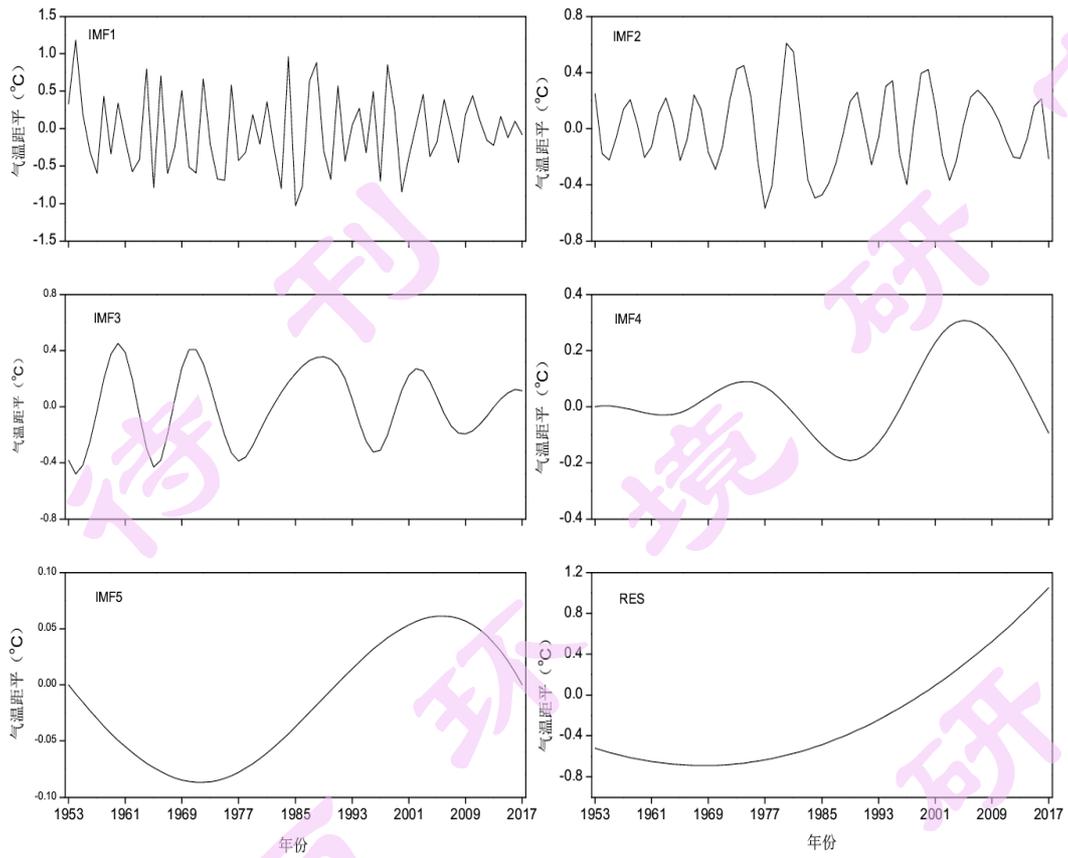


图4 1953—2017年黄河源区玛多站年平均气温距平序列经EEMD分解的IMF分量及趋势项

Fig. 4 The IMFs and trend components of temperature by EEMD in the Madoi station during 1953-2017

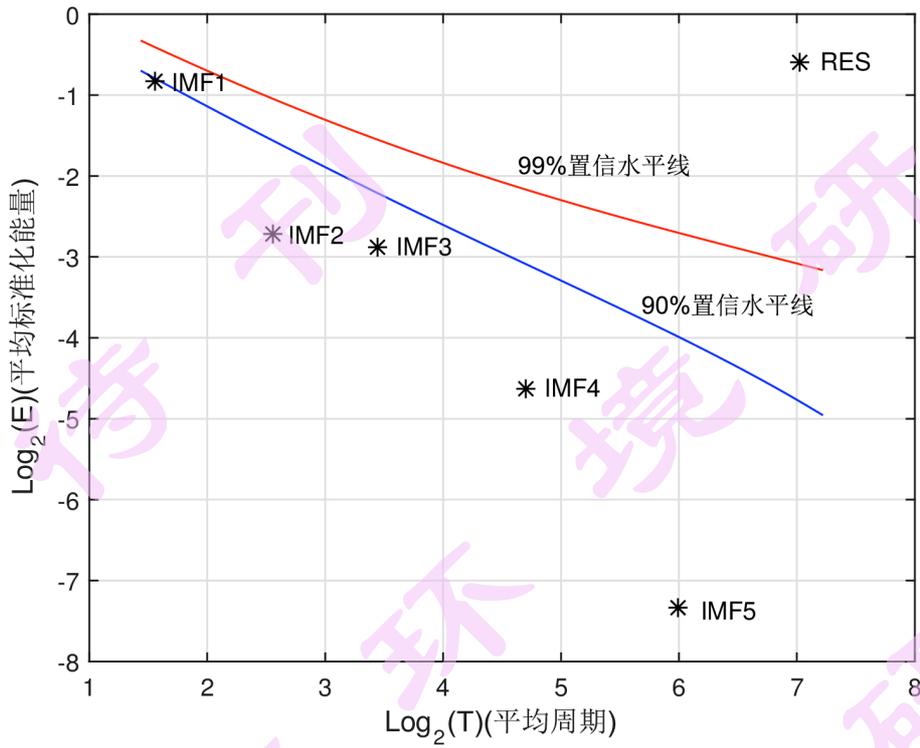


图5 1953—2017年黄河源区玛多站年平均气温距平序列经EEMD分解的各分量信号的显著性检验
 Fig. 5 The Significance test result of each components of temperature in the Madoi station during 1953-2017

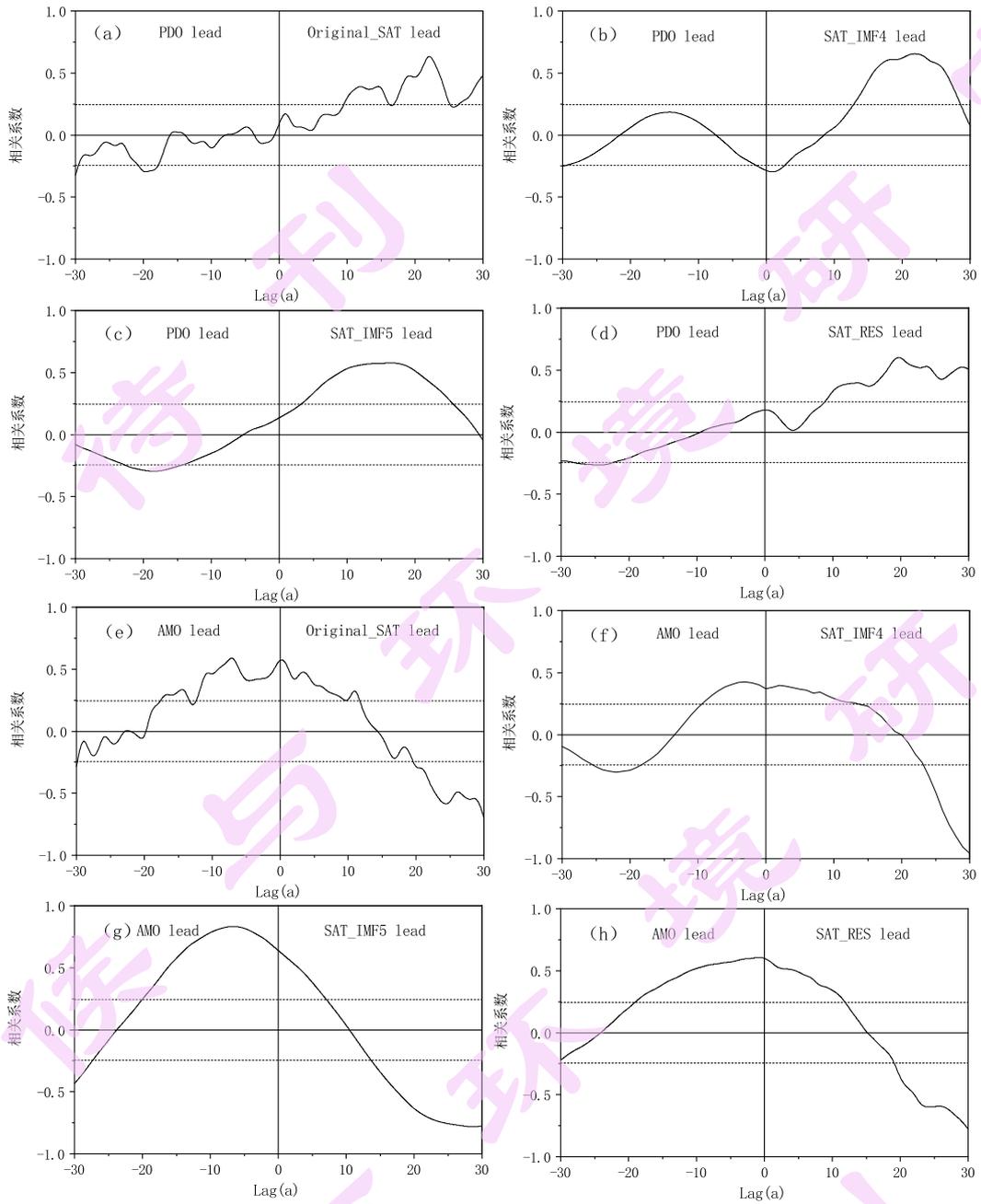


图6 1953—2017年黄河源区玛多站年平均气温距平序列及其三个年代际尺度以上分量与PDO指数(a-d)、AMO指数(e-h)的超前-滞后相关（横坐标为正值时表示气温超前，虚线表示相关系数通过0.05置信度水平）
 Fig. 6 The lead-lag correlations between the PDO and AMO indices with the original time series and the three components of temperature on the decadal scales in the Madoi station during 1953-2017 (x-axis values are positive indicating the temperature led PDO or AMO, dash lines indicate the significance at the 0.05 level)

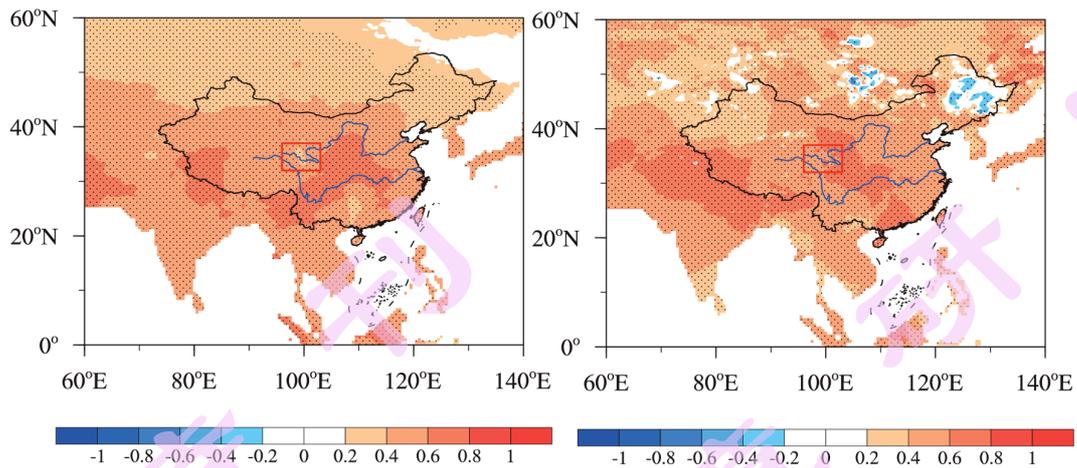


图7 1953—2017年AMO指数与60°E—140°E, 0°—60°N范围内原始气温序列 (a) 和65年以上时间尺度分量的相关系数 (b) (点状阴影区表示相关系数通过0.05置信度水平)

Fig. 7 The spatial distribution of correlation coefficients between the AMO index with the original temperature during 1953-2017 (a) and the last component on the 65a-longer time scale (b) (dotted shadows indicate the significance at 0.05 level)