

1970-2015年秦岭南北气温时空变化及其气候分界意义

李双双^{1,2}, 芦佳玉^{1,2}, 延军平^{1,2}, 刘宪锋^{1,2}, 孔 锋³, 王 娟⁴

(1. 陕西师范大学地理科学与旅游学院, 西安 710119; 2. 陕西师范大学地理国家级实验教学示范中心, 西安 710119; 3. 中国气象局发展研究中心, 北京 100081; 4. 陕西省气象局, 西安 710014)

摘要: 基于秦岭南北70个气象站点观测资料, 辅以极点对称模态分解方法(ESMD), 对秦岭南北近期气温时空变化特征进行分析, 进而以日平均温 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 积温天数为主要指标, 以1月 0°C 等温线变化为辅助指标, 探讨秦岭山脉的气候分界意义。结果表明: ① 1970-2015年秦岭南北气温变化具有同步性, 呈现出“非平稳、非线性、阶梯状”的增暖过程, 变化阶段可分为: 1970-1993年为低位波动期、1994-2002年为快速上升期、2003-2015年为增温停滞期; ② ESMD信息分解结果表明, 秦岭南北气温变化以年际波动为主导, 并未呈现出明显的线性增暖趋势; ③ 在空间上, 秦岭南北气温趋势呈现“同步增温, 南北分异”的响应特征, 即秦岭以北地区空间增温具有一致性, 秦岭以南地区则呈现“西乡—安康盆地交界”、“商丹盆地”两个低值中心; ④ 在气候变暖背景下, 秦岭作为气候分界线的作用依然明显, 但是南北响应方式存在差异。其中, 秦岭以南, 北亚热带北界沿山地“垂直上升”, 汉江谷地热量资源逐年增加; 秦岭以北, 尽管以城市带为中心的增温区不断延展, 但是冷月气温偏低的格局并未改变。

关键词: 气温; 极点对称模态分解; 中国南北过渡带; 秦岭山地

DOI: 10.11821/dlxb201801002

1 引言

1951-2012年全球地表温度升温速率为 $0.12^{\circ}\text{C}/10\text{a}$, 中国地表升温速率为 $0.23^{\circ}\text{C}/10\text{a}$, 气候变暖导致中国温度带明显北移^[1-4]。其中, 亚热带北界在 112°E 以东地区变动明显(淮河沿线), 112°E 以西地区受到地形的影响(秦岭南北), 并没有发生明显北移^[5]。由于秦岭特殊的地理位置和生态意义, 许多学者对变暖背景下秦岭南北热量资源、生态适应、极端降水、气温变化、水文特征等做了细致的研究^[6-11]。在已有研究中, 多数学者选择分水岭作为秦岭南北地理要素差异性的分界依据, 以秦岭南麓1000 m等高线作为生态—气候分界的研究相对较少^[12]。刘胤汉先生主张以“略阳—黑河坝—马道—金水河—宁陕—柴家坪—山阳—竹林关—商南”连线, 划分陕西省内北亚热带和暖温带的自然地带分界, 既符合秦岭地区自然地域分异, 也不会阻断秦岭南坡垂直自然规律^[13]。从气候分析角度看, 选取秦岭南麓或分水岭作为分界方案, 导致秦岭南北相差数十个气象站点,

收稿日期: 2017-03-30; 修订日期: 2017-09-12

基金项目: 国家自然科学基金项目(41701592); 中央高校基本科研业务费专项资金(GK201703048); 国家社会科学基金重点项目(14AZD094) [Foundation: National Natural Science Foundation of China, No.41701592; Fundamental Research Funds for the Central Universities, No.GK201703048; National Social Science Foundation of China, No.14AZD094]

作者简介: 李双双(1988-), 男, 陕西潼关人, 博士, 讲师, 主要研究方向为全球变化与区域灾害防治。

E-mail: lss40609010@126.com

通讯作者: 延军平(1956-), 男, 陕西绥德人, 教授, 中国地理学会会员(S110000053M), 主要从事区域发展与自然灾害研究。E-mail: yanjp@snnu.edu.cn

势必会影响区域气候特征的认知^[14]。

近年来,全球气候变化和秦岭南北社会经济发展呈现4个新特征:①全球气温长期变暖毋庸置疑^[15]。2016年,大气CO₂浓度、北极海冰面积、全球气温和海平面高度均突破历史记录,并且2017年将持续或多发热浪、暴雨等极端天气灾害^[16];②全球增暖存在“停滞”现象。随着气候观测资料的延长,更加明确地证实增速减缓的实事,增温停滞机制成为气候变化研究的前沿问题^[17];③南水北调工程实施。2014年南水北调中线工程正式运行,以长江最大支流汉江中上游的丹江口水库为源,解决唐白河平原和黄淮海平原的水资源问题。秦岭南部生态环境保护问题,势必会提到新的高度;④区域经济快速发展。2014年国务院正式批复建立西咸新区,成为第7个国家级新区。随着城市化进程不断加快,大规模的人口聚集和快速经济发展叠加,使得秦岭南北城市带的气候风险日益增加。由于前期秦岭地区气温变化研究时段多集中于1960-2010年。因此,有必要结合最新气候资料,再认识秦岭南北气候变化特征,回答“秦岭南北是否出现变暖停滞”、“秦岭南北气温变化是否维持同步”、“北亚热带北界是否突破秦岭山脉”等科学问题。基于此,利用1970-2015年秦岭南北70个站点气温数据,辅以极点对称模态分解方法、空间统计分析等方法,对秦岭南北气温时空变化特征进行分析,探讨秦岭山地气候分界意义,以期认识自然生态、农业生产与气候变暖的响应关系提供理论依据。

2 资料来源与方法

2.1 资料来源

秦岭西起甘肃东南,东至河南伏牛山,是中国南北地理的主要分界线,也是生态脆弱区和气候敏感区^[12]。秦岭北坡陡峻,南坡平缓,南北跨越近200 km。本文以秦岭山脉、秦岭南麓1000 m等高线作为分界,将秦岭南北过渡带划分为3个子区域:秦岭以北、秦岭南坡和汉江谷地。其中,秦岭以北包括26个气象站,秦岭南坡有17个气象站,汉江谷地有27个气象站点(图1)。

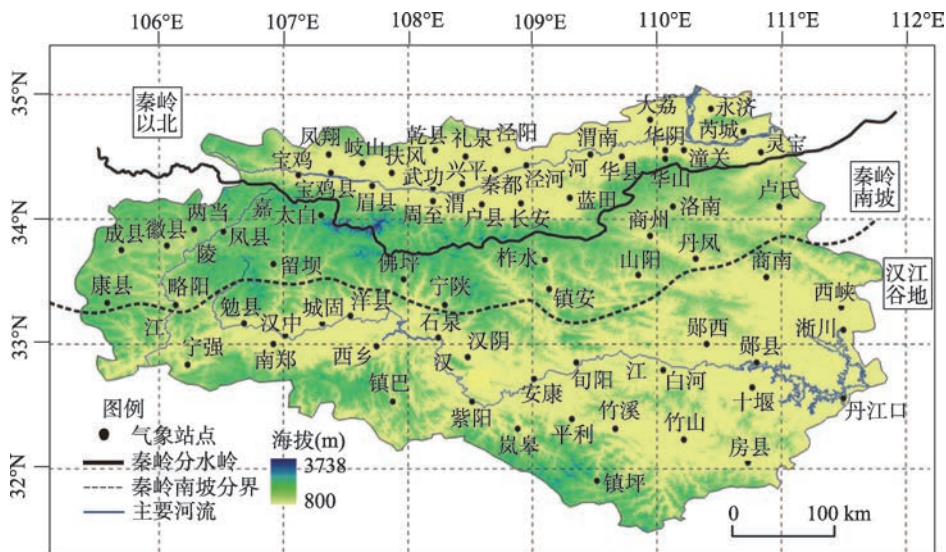


图1 秦岭南北研究范围及气象站点分布

Fig. 1 Geographic environment and meteorological stations in the south and north of Qinling Mountains

本文气象数据来源于中国气候数据共享网和陕西省气象局, 为了保证数据完整性和连续性, 将研究时段确定为 1970-2015 年。依据陕西省基层台站简史, 宝鸡县气象站建立于 1972 年 12 月, 2003 年撤县建区后为陈仓区, 宝鸡县气象站名留用, 本文宝鸡县数据时段为: 1973 年 10 月-2015 年 12 月; 城固气象站 1957 年 5 月建站, 1971 年迁址城固县谢家井村南, 由于迁站导致资料散失, 其数据时段为: 1971 年 1 月-2015 年 12 月。同理, 湖北十堰和山西永济两个气象站点起始时间分别为: 1971 年 1 月和 1972 年 1 月。

2.2 研究方法

2.2.1 极点对称模态分解方法 集合经验模态分解 (EEMD) 方法, 在目标数据序列中加入白噪音序列, 构建“增噪信号”时间序列集合, 将其分解为: 不同尺度的窄谱波动和长期变化趋势^[18]。与传统数据分析方法相比, EEMD 从数据自身出发, 有良好的自适性, 可用于非线性和非平稳的气候要素趋势分析。然而引入白噪音存在副作用, 会影响分解信息的物理意义解读。极点对称模态分解方法 (ESMD), 是经验模态分解方法 (EMD) 的最新发展, 可解决 EEMD 分解中的“模态叠加”问题, 已被应用于大气科学、海洋科学、信息科学等领域^[19]。在此, 本文对秦岭南北气温变化序列进行 ESMD 信息分解, 以分析气温序列的长期趋势和年代际特征。

2.2.2 趋势项分量方差贡献率 计算趋势项分量对原气温序列的方差贡献率, 可识别长期变暖趋势和多年代际震荡信息在气温变化过程中主导作用。具体方法为: ① 计算原始序列 T_i 均方差, 记为 S ; ② 原始序列 T_i 减去趋势项 R_i , 并计算不含气候趋势的温度序列 y_i 均方差, 记为 S_1 ; ③ 趋势项 (R_i) 对原序列的方差贡献率为: $SS_r = (S - S_1)/S \times 100\%$ 。

2.2.3 基于 DEM 的 1 月气温空间插值 秦岭山区地形复杂, 气温受垂直地带性影响明显。不考虑海拔因素, 会导致秦岭南北气温空间插值的不确定性^[20]。参考已有研究^[9], 利用海拔高度辅助空间插值, 提高北亚热带和暖温带空间分析的准确性。具体方法为: ① 气候海拔订正。利用秦岭南北气温垂直递减率, 将区域站点气温数据订正到海平面高度。其中, 秦岭 1 月份南坡气温垂直递减率为 0.432 °C/100 m, 北坡为 0.349 °C/100 m; ② 气温空间插值。利用 ArcGIS 空间插值模块中 S-Kriging 进行插值, 然后将矢量插值结果转为格网数据, 栅格分辨率为 30 m×30 m; 利用 DEM 数据, 分别对秦岭南北气温进行栅格计算, 形成 4 个不同年代气温分布栅格数据; ③ 提取 0 °C 等温线。对插值结果进行精度检验, 提取秦岭南北 1 月 0 °C 等温线; 进而以秦岭南坡 1000 m 等高线为参照, 对比不同年代等温线变化特征。

2.2.4 秦岭南北温度带指标 在中国东部季风区, 秦岭具有划分暖温带和北亚热带的地理意义^[7]。参考郑景云等《中国气候区域新方案》的区划原则^[21], 采用日平均气温稳定 ≥ 10 °C 的天数 (积温日数) 作为主要指标, 以 1 月平均气温作为辅助指标, 探讨全球变暖背景下, 北亚热带北界是否突破秦岭山脉, 以及 1 月份 0 °C 等温线时空响应特征 (表 1)。

表 1 秦岭南北温度带指标体系及其标准
Tab. 1 Criteria of temperature zones in the north and south of Qinling Mountains

温度带	主要指标	辅助指标	参考指标	
	日平均气温稳定 ≥ 10 °C 期间的日数(d)	1 月平均气温 (°C)	日平均气温稳定 ≥ 10 °C 期间的积温(°C)	年极端最低气温平均值(°C)
暖温带	170~220	-12~0	3200~4800	-25~-10
北亚热带	220~240	0~4	4500~5300	-14~-4
亚热带	240~285	4~10	3200~4800	-6~0

3 结果分析

3.1 秦岭南北气温时间变化特征

通过ESMD方法，滤除气温序列年际波动变化后，秦岭南北气温变化具有同步性，呈现出典型的“非线性、非平稳、阶梯状”的增温过程（图2）。具体变化过程可分为三个阶段：① 1970-1993年为第一阶梯，以1984年为转折点，前期波动下降，后期小幅波动上升，整体呈现低位平稳波动；② 1994-2002年为第一阶梯与第二阶梯的过渡时段，气温呈现快速上升；③ 2003-2015年为第二阶梯，气温维持高位波动，且在2005-2012年呈现6年波动下降，增幅速率有所减缓，与全球变暖“停滞”趋势相符合。从长期趋势变化对气温变化贡献率看，ESMD趋势项在秦岭南北气温变化贡献率整体不高，三个分区贡献率分别为：汉江谷地（27.5%）< 秦岭南坡（30.5%）< 秦岭以北（36.5%），说明秦岭南北气温变化以年际波动为主导，并未呈现明显的线性增暖趋势。

利用11年滑动相关方法，对秦岭南北三个分区气温变化同步性进行分析（图2d）。结果表明：① 秦岭南坡与秦岭以北气温相关系数变化范围为0.91~0.98，与汉江谷地气温相关系数变化范围为0.92~0.99，进一步说明秦岭南北地区气温变化具有同步性，三个分区在宏观趋势上差异性较小；② 秦岭南北三个分区气温相关性具有阶段性。其中，1970-1983年秦岭南坡与秦岭以北相关性高于汉江谷地；1984-2003年整个区域气温变化相关程度发生转折，相关系数呈现上升趋势且在1993年达到峰值，随后波动下降直到2002年跌至谷值，此阶段秦岭南坡与汉江谷地气温变化相关性高于秦岭以北地区；2004-2015

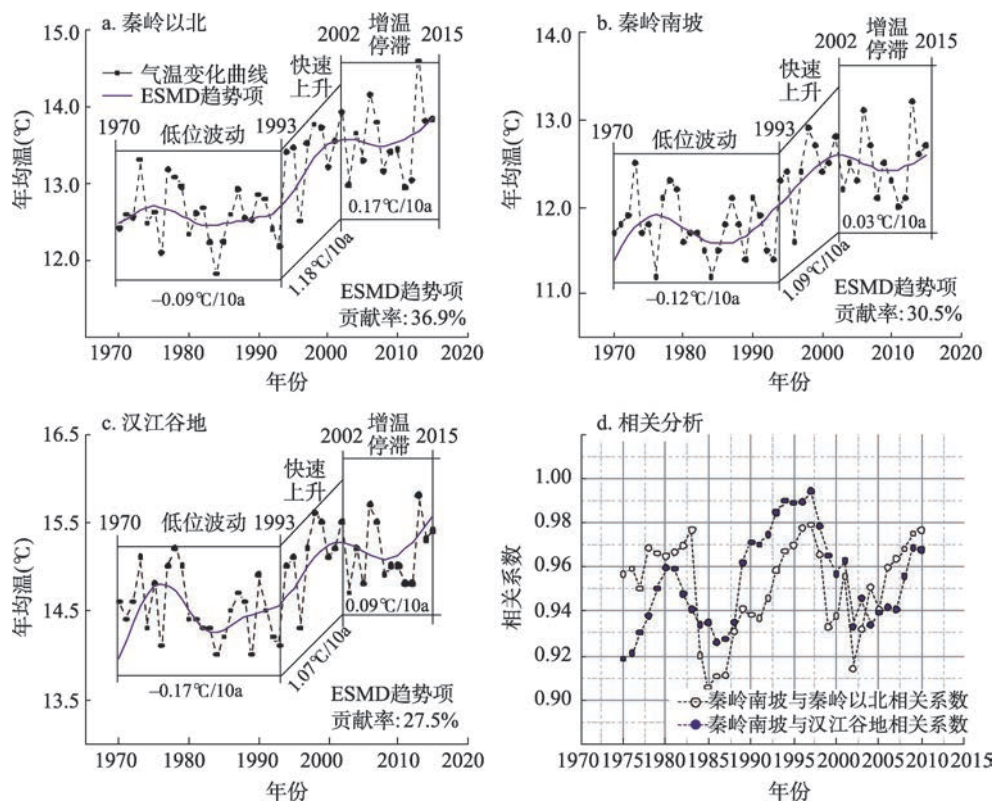


图2 1970-2015年秦岭南北气温变化特征

Fig. 2 Variations of temperature in the north and south of Qinling Mountains during 1970-2015

年秦岭南北地区气温变化相关呈现增加趋势, 秦岭南坡与秦岭以北地区相关性再次高于汉江谷地。可以看出, 在快速增温期, 秦岭南坡与汉江谷地气温变化更为相似; 在低位波动期和增温停滞期则与之相反, 秦岭南坡与秦岭以北气温变化更为相似。

3.2 秦岭南北气温空间变化特征

1970-2015年秦岭南北气温变化趋势具有明显的空间分异(图3)。主要特征表现为: 整个研究区域气温整体呈现上升趋势, 秦岭以北增温明显高于秦岭以南; 东段以秦岭分水岭为分界, 西段以秦岭南麓1000 m等高线为分界, 气温趋势变化呈现“同步增温, 南北分异”的响应特征; 分界线以北地区气温变幅具有一致性, 增温速率中值与均值相同, 均为 $0.58\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$; 分界线以南地区气温增幅具有差异性, 秦岭南坡增温速率中值为 $0.43\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$, 均值为 $0.40\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$, 汉江谷地增温速率中值为 $0.36\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$, 均值为 $0.32\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$, 并且增温空间格局呈现出两个低值中心: “西乡—安康盆地交界”低值中心、“商丹盆地”低值中心, 两者相对其他区域, 气温增速相对较慢。

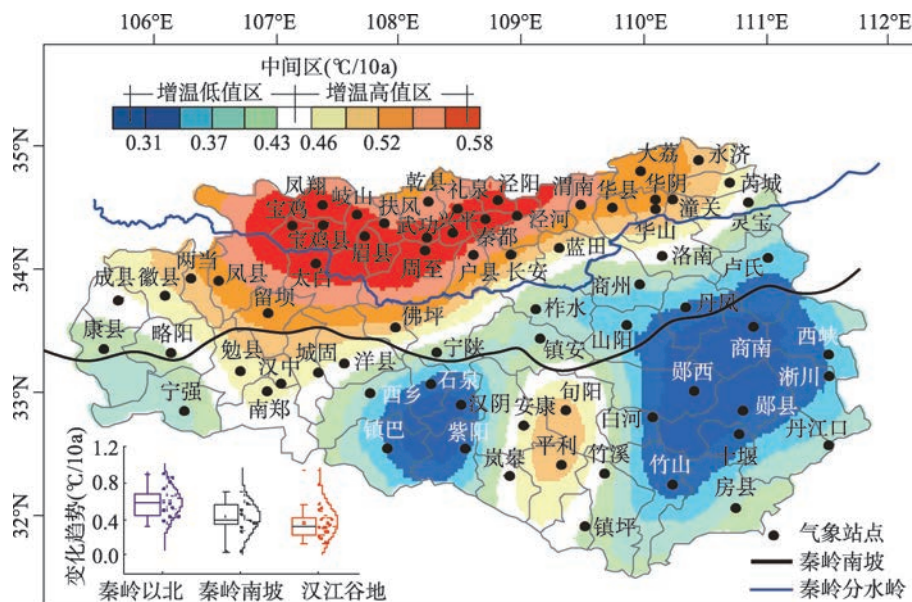


图3 1970-2015年秦岭南北气温空间变化趋势

Fig. 3 Spatial change of temperature tendency in the north and south of Qinling Mountains during 1970-2015

1970-2015年秦岭南北增温空间分异, 可能与东亚夏季对流层温度年代转折有关^[22]。20世纪90年代初, 东亚夏季对流层南北向温差发生年代际减弱, 表现为1992年之后中国 35°N 以南地区对流层温度年代际变冷, 中心位置位于长江流域; 35°N 以北地区对流层温度年代际变暖, 中心位于中国西北—蒙古地区。关中地区位于 35°N 过渡区, 陕南地区位于 35°N 以南地区。东亚夏季对流层平均温度年代际转折, 对陕南地区快速增温具有削弱作用, 对关中地区快速增温则具有放大作用。

3.3 秦岭山地气候分界线意义

3.3.1 秦岭南北1月 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 等温线变化 秦岭南北近期1月份 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 等温线空间变化呈现出明显的南北响应差异(图4)。主要特征表现如下:

① 20世纪70年代, 1月份 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 等温线位于秦岭南麓。以分水岭为界, 秦岭以南低于 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 区域面积比重为47.0%, 秦岭以北低于 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 区域面积比重为100%。

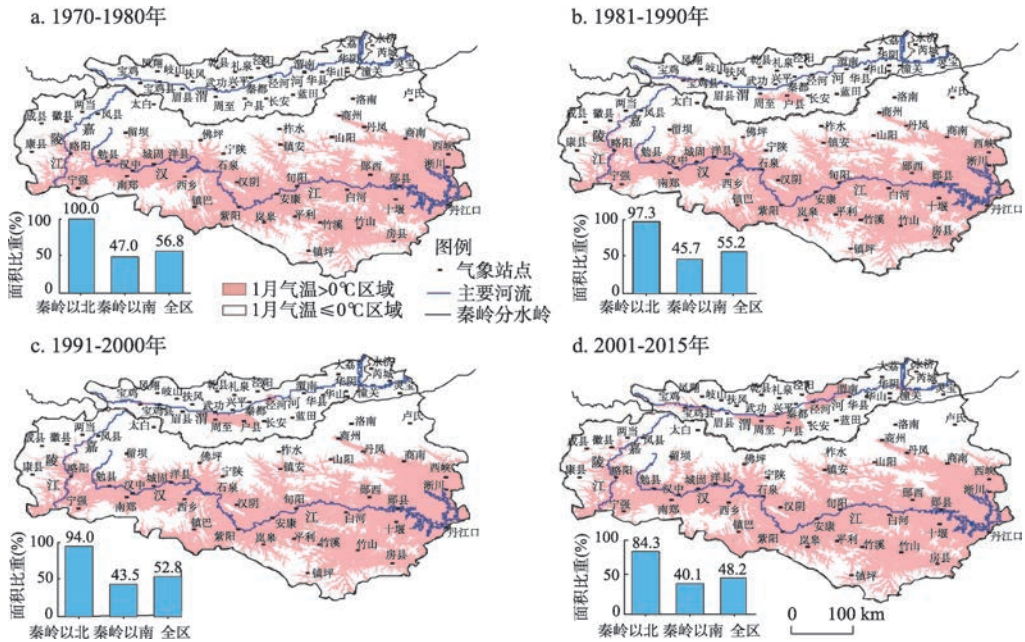


图4 秦岭1月份 $>0^{\circ}\text{C}$ 区域空间变化特征

Fig. 4 Spatial change of January average temperature above 0°C in the north and south of Qinling Mountains

② 20世纪80年代, 1月份 0°C 等温线较70年代出现北移, 但是北移幅度不明显。秦岭以南低于 0°C 区域面积比重下降为45.7%, 秦岭以北地区则减少到97.3%, “周至—户县”一带出现 0°C 等温线的“飞地”。

③ 20世纪90年代, 1月份 0°C 等温线位置持续北偏, 秦岭以北和秦岭以南低于 0°C 区域面积所占比重分别为94.0%和43.5%, “周至—户县”一带 0°C 等温线范围不断扩大。

④ 2001-2015年, 秦岭以北低于 0°C 区域面积比重减少至84.3%, 并且西安地区 0°C 等温线范围不断扩大, 且与宝鸡地区相连形成一个更大的“飞地”。与此同时, 秦岭以南地区低于 0°C 区域比重也持续下降为40.1%。

依据气温海拔递减规律, 以秦岭南麓1000 m等高线位置为参照, 对比20世纪70年代和2001-2015年秦岭南坡1月份 0°C 等温线位置变化(图略)。结果表明, ① 20世纪70年代和2001-2015年秦岭南坡1月份 0°C 等温线位置相对一致, 均分布于秦岭南麓1000 m等高线附近, 佐证了康慕谊等依据植物垂直带谱, 判断秦岭南坡大部分应属于暖温带, 北亚热带北界位于秦岭南麓海拔1000 m附近的结论^[12]; ② 以 107°E 和 109°E 两条经线, 将秦岭南坡1月 0°C 等温线划分为东、中、西三段, 对比等温线位置相对变化。20世纪70年代, 秦岭南坡1月 0°C 等温线东段位置在秦岭南坡1000 m之下, 西段和中段则略低于1000 m等高线, 其规律与1970-1993年秦岭南坡气温维持低位波动规律相符, 也符合刘胤汉先生实地考察“北亚热带北界位于秦岭南坡”的结论; 2001-2015年, 秦岭南坡气温增温有所减缓, 但是整体维持高位波动。秦岭南坡1月 0°C 等温线西段和中段位置超过1000 m等高线, 东段位置逐渐接近1000 m等高线。

由于空间插值存在不确定性, 以站点尺度为视角, 再次确认秦岭南北地区1月温度变化规律的可靠性(图5)。结果表明: ① 秦岭以北地区1月份气温整体位于 0°C 以下, 秦岭南坡属于过渡地带, 并存在明显的年代转折, 汉江谷地1月份气温整体位于 0°C 以

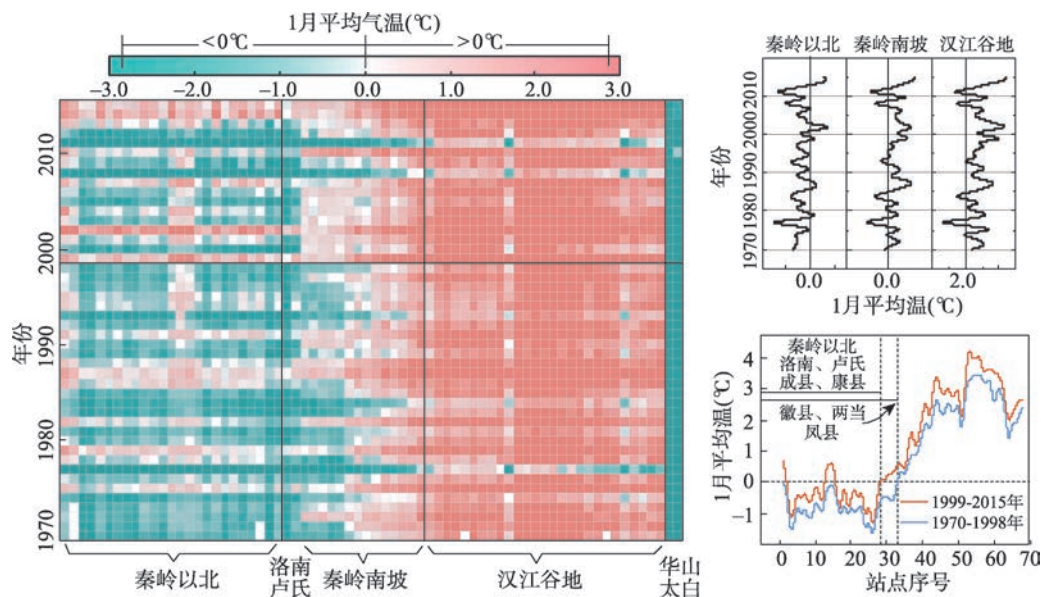


图5 1970-2015年秦岭南北1月气温变化特征

Fig. 5 Changes of January temperature in the north and south of Qinling Mountains during 1970-2015

上; ② 在年代变化上, 1993-2002年秦岭南北1月份气温呈现明显的上升趋势, 2003-2015年气温呈现出波动下降趋势, 年代性转折在秦岭南坡1月份气温变化曲线体现的尤为突出; ③ 在空间变化上, 对比1970-1998年和1999-2015年秦岭南北各站点1月气温变化, 以“秦岭以北—秦岭南坡—汉江谷地”顺序排列站点。可以清楚看到, 相比于1970-1998年, 1999-2015年秦岭南北1月气温明显上升。1998年之前, 秦岭以北多数站点, 包括秦岭南坡的洛南、卢氏、成县、康县、徽县、两当和凤县等7个站点, 1月气温低于 0°C 以下; 1998年之后, 秦岭南坡的徽县、两当、凤县, 包括秦岭以北的西安、宝鸡地区, 1月气温明显超过 0°C , 其他区域1月份气温仍处于 0°C 以下。

可以看出, 全球变暖背景下, 秦岭南北地区1月份 0°C 等温线呈现不同的响应规律。秦岭南坡1月份 0°C 等温线沿山地上升, 秦岭以北1月份 0°C 等温线将出现“飞地式”的延展, 形成汉江谷地冷月气温逐渐升高; 处于过渡带性质的秦岭南坡则由“偏冷”格局转为21世纪初的“偏暖”主导; 秦岭以北虽有部分城市, 部分年份冷月气温突破 0°C , 但是冷月气温整体偏低的格局并未改变。从冷月气温角度看, 秦岭气候分界意义依然明显。

3.3.2 秦岭南北 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 积温日数变化 日平均气温 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 的日数是划分温度带的主导指标, 不但可以反映气候水平地带性, 也可有效表现气候的垂直地带性^[21]。在此, 绘制秦岭南北各站点1970-2015年日平均气温 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 积温日数热图, 图中绿色表示积温天数 $\leq 220\text{ d}$, 指示暖温带变化特征; 白色表示积温天数范围在 $220\sim 240\text{ d}$, 指示北亚热带变化特征; 红色表示积温天数 $> 240\text{ d}$, 指示亚热带变化特征。由于气候是一种平均态的反映, 结合秦岭南北 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 积温天数年代变化规律, 对比1970-1984年、1985-1997年、1998-2015年三个时期各站点积温趋势变化特征(图6)。

结果表明: ① 1970-1997年, 秦岭以北和秦岭南坡 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 积温天数多在 220 d 以下, 汉江谷地西北部积温天数在 $220\sim 240\text{ d}$ 之间, 汉江谷地东南积温天数则在 240 d 之上, 说明秦岭以北和秦岭南坡处于暖温带, 汉江谷地大分部区域为北亚热带, 这与秦岭

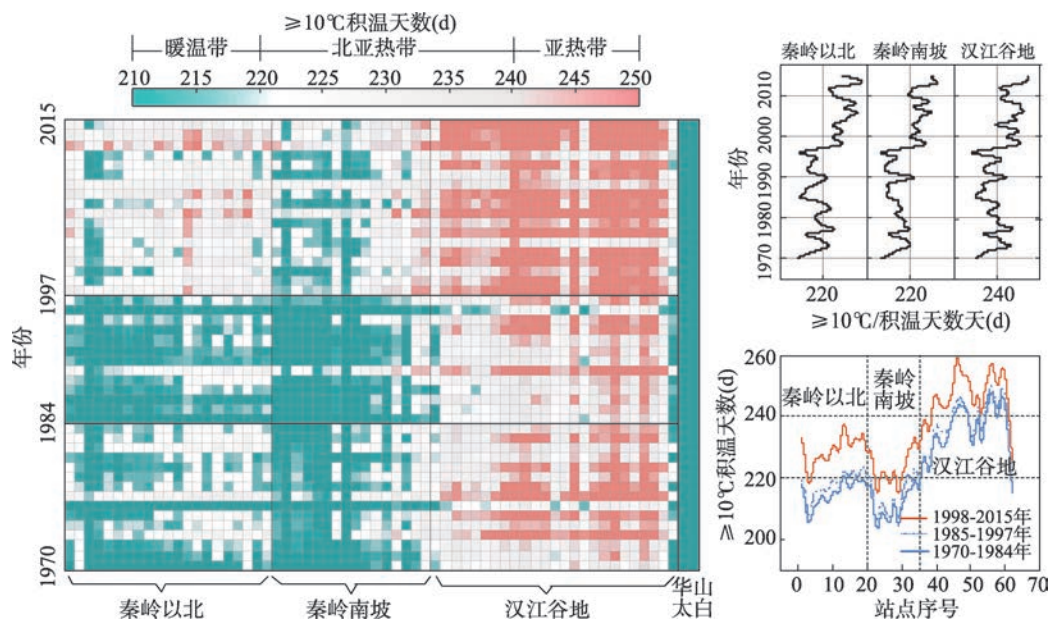


图6 1970-2015年秦岭南北 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 积温天数变化特征

Fig. 6 Changes of the cumulative departure of the number of days above 10°C in the north and south of Qinling Mountains during 1970-2015

南坡作为北亚热带北界结论具有一致性；② 对比1970-1984年和1985-1997年两个时期，发现秦岭南北积温天数变化并不明显，说明秦岭南坡作为北亚热带北界的作用，稳定且持续到20世纪90年代末；③ 1998-2015年，秦岭南北3个区域 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 积温天数均发生明显的变化。其中，秦岭以北积温天数在220 d以上，但是低于240 d；秦岭南坡积温天数也超过220 d，并且这些站点主要分布于秦岭南坡的中段；对于汉江谷地而言，积温天数则整体超过240 d，已纳入亚热带范围。

郑景云等对比1970-2000年和1981-2010年中国东部温度带变化，发现亚热带北界中段已经从洞庭湖平原北移至汉江平原的南部^[21]。通过本文分析发现，近年来亚热带北界中段仍在北移，汉江谷地已包含在亚热带范围之内；结合秦岭南北地区1月份 0°C 等温线响应规律，以 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 积温天数作为判断标准，近期秦岭南坡作为北亚热带北界作用逐渐减弱，但是并未完全消失；由于秦岭山地阻断效应，秦岭以北地区以“跨越式”进入北亚热带范围；以1月份 0°C 等温线作为判断标准，北亚热北界在秦岭南坡高度逐渐抬升，并维持在1000 m等高线附近，其分界作用依然明显。秦岭以北除城市地区气温相对较高外，大部分区域1月份气温仍维持在 0°C 以下，说明仍处于暖温带的范围。

4 结论与讨论

4.1 结论

基于秦岭南北70个气象站点气温数据，利用ESMD方法、空间分析法等统计分析方法，对1970-2015年秦岭南北气温时空变化特征进行分析，探讨全球变暖背景下秦岭山地的气候分界意义。得到结论如下：

(1) 在年代变化上，1970-2015年秦岭南北气温变化趋势具有同步性，共同呈现出

“非平稳、非线性、阶梯状”的增暖过程，年代变化可分为3个阶段：1970-1993年为平稳波动期，1994-2002年为快速上升期，2003-2015年为增速减缓期。ESMD 信息分解结果表明，秦岭南北气温变化以年际波动为主导，并未呈现出明显的线性增暖趋势。

(2) 在空间变化上，秦岭南北气温变化趋势呈现“同步增温，南北分异”。东段以分水岭为分界，西段以秦岭南麓 1000 m 等高线为分界，界线以北气温空间变化具有一致性，界线以南地区则呈现两个增温低值中心，即“西乡—安康盆地交界”低值中心、“商丹盆地”低值中心。秦岭南北增温“北强南弱”的空间分异，可能与 20 世纪 90 年代初东亚夏季对流层温度、中部型 ENSO 事件活跃、青藏高原冬季积雪年代转折有密切的关系。

(3) 在分界变化上，20 世纪 70 年代，北亚热带北界维持在秦岭南麓 1000 m 附近，与前期研究“秦岭南北分界线应在秦岭南麓 1000 m 附近”的结论一致；同时，在气候变暖背景下，秦岭山地作为气候分界线的作用依然明显，但是南北响应方式存在差异。其中，秦岭以南，北亚热带北界沿山地“垂直上升”，汉江谷地热量资源增加明显；秦岭以北，尽管以城市带为中心，增温区域呈现“飞地式”延展，但是冷月气温偏低的格局并未改变。

4.2 讨论

关于秦岭南北气温时空变化的驱动机制，以及深入认识中国南北过渡带自然地理系统对全球变化动态响应，未来还有许多工作需要探索。

(1) 在自然因素影响方面，全球气温变化驱动因素主要有 4 个方面，即人类活动、太阳辐射、大气溶胶及 ENSO^[23]。相关研究表明：20 世纪 90 年代初，ENSO 周期发生年代际转折，逐渐由 1979-1992 年 5~6 年周期占主导，转变为 1993-2004 年的 2~3 年周期占主导^[22]。受全球环流影响，1992 年后 ENSO 衰减年发生在夏季频次逐渐减少，ENSO 发展年对气温变化影响增加，可能是 20 世纪 90 年代初秦岭南北气温变化年代际转折的原因之一。

与此同时，20 世纪 90 年代初，青藏高原冬季积雪也发生明显的年代际转变，与中部型 ENSO 存在显著的负相关^[24]。当青藏高原冬季积雪偏多时，中部型 ENSO 多为冷相位；反之，冬季积雪为偏少时，中部型 ENSO 多为暖相位。1993-2012 年，青藏高原冬季积雪异常偏多年为 1998 年、1999 年、2000 年、2002 年和 2008 年，异常偏少年为 1994 年、2001 年、2006 年、2009 年和 2012 年^[24]。对比青藏高原积雪异常年，秦岭南北呈次年气温响应特征。结果表明：当青藏高原冬季积雪偏少时，无论秦岭以北、秦岭南坡，还是汉江谷地，次年气温明显偏高（表 2）。也就是说，青藏高原冬季积雪年代际跃变，导致春夏季热源异常，加之与 ENSO 事件配合，引起区域环流变化，可能也是 20 世纪 90 年代初

表 2 1993-2015 年青藏高原积雪异常与秦岭南北次年气温响应关系
Tab. 2 The relationship between Tibetan Plateau winter snow cover and next year temperature in the north and south of Qinling Mountains during 1993-2015

青藏高原积雪 偏多年	秦岭南北气温响应			青藏高原积雪 偏少年	秦岭南北气温响应		
	秦岭以北	秦岭南坡	汉江谷地		秦岭以北	秦岭南坡	汉江谷地
1998 年	13.7	12.7	15.5	1994 年	13.5	12.4	15.1
1999 年	13.2	12.4	15.1	2001 年	13.9	12.8	15.5
2000 年	13.6	12.5	15.2	2006 年	13.8	12.7	15.5
2002 年	13.0	12.2	14.7	2009 年	13.5	12.3	15.0
2008 年	13.4	12.5	15.0	2012 年	14.6	13.2	15.8
平均值	13.4	12.5	15.1	平均温	13.9	12.7	15.4

秦岭南北气温变化年代际转折的原因之一。因此,在未来研究中,需要结合 ENSO 和青藏高原积雪变化,深入分析两者对秦岭南北气温时空变化的影响机制。

(2) 在人类活动影响方面,城市热岛效应是城市气候的一个显著特征,会直接或间接地对区域小气候造成影响^[25]。通过秦岭南北 1 月份 0℃等温线空间格局分析发现,20 世纪 80 年代秦岭以北出现以城市为中心呈现增温“飞地”,证明了城市化在小尺度上对气候变化的作用。但是本文并未探讨城市化对秦岭南北气候变化影响,在今后研究中应该更加重视气候变化与人类活动相互作用,关注城市热岛效应对极端高温事件的放大作用。

(3) 秦岭南北分界线问题,需要结合植被生态、气候水文和山地遥感观测,进行持续跟进研究。全球变暖背景下,秦岭南坡 1 月份 0℃等温线沿山地上升,秦岭以北等温线出现“飞地式”变化,这与白红英等考虑地形因素,得出 1959-2009 年秦岭地区 1 月份 0℃等温线平均上升高度为 143.7 m 结论一致^[9]。由于前期研究资料限制,秦岭南北长期变暖,短期增温“停滞”现象并不突出。随着观测资料时间延长,2005-2012 年秦岭南北地区气温呈现连续 6 年波动下降,2013-2015 年气温有所回升,但是幅度不大。也就是说,2000 年起秦岭南北地区增温停滞维持 16 年,北亚热带北界附近地区,生态、水文特征对气候变化如何响应,未来变化趋势又是怎样?需要收集最新的气候、土壤、植被、水文调查数据,给出定性和定量评价。

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] Bian Juanjuan, Hao Zhixin, Zheng Jingyun, et al. The shift on boundary of climate regionalization in China from 1951 to 2010. *Geographical Research*, 2013, 32(7): 1179-1187. [卞娟娟, 郝志新, 郑景云, 等. 1951-2010 年中国主要气候区划界线的移动. *地理研究*, 2013, 32(7): 1179-1187.]
- [3] Dai Shengpei, Li Hailiang, Luo Hongxia, et al. The spatio-temporal change of active accumulated temperature $\geq 10^{\circ}\text{C}$ in Southern China from 1960 to 2011. *Acta Geographica Sinica*, 2014, 69(5): 650-660. [戴声佩, 李海亮, 罗红霞, 等. 1960-2011 年华南地区界限温度 10°C 积温时空变化分析. *地理学报*, 2014, 69(5): 650-660.]
- [4] Zheng Du, Wu Shaohong, Yin Yunhe, et al. Frontiers in terrestrial system research in China under global change. *Acta Geographica Sinica*, 2016, 71(9): 1475-1483. [郑度, 吴绍洪, 尹云鹤, 等. 全球变化背景下中国自然地域系统研究前沿. *地理学报*, 2016, 71(9): 1475-1483.]
- [5] Wu Shaohong, Liu Wenzheng, Pan Tao, et al. Amplitude and velocity of the shifts in the Chinese terrestrial surface regions from 1960 to 2011. *Chinese Science Bulletin*, 2016, 61(19): 2187-2197. [吴绍洪, 刘文政, 潘韬, 等. 1960-2011 年中国陆地表层区域变动幅度与速率. *科学通报*, 2016, 61(19): 2187-2197.]
- [6] Yan Junping, Zheng Yu. A comparative study on environmental change response over the northern and the southern regions of the Qinling Mountains. *Geographical Research*, 2001, 20(5): 576-582. [延军平, 郑宇. 秦岭南北地区环境变化响应比较研究. *地理研究*, 2001, 20(5): 576-582.]
- [7] Zhou Qi, Bian Juanjuan, Zheng Jingyun. Variation of air temperature and thermal resources in the northern and southern regions of the Qinling Mountains from 1951 to 2009. *Acta Geographica Sinica*, 2011, 66(9): 1211-1218. [周旗, 卞娟娟, 郑景云. 秦岭南北 1951-2009 年的气温与热量资源变化. *地理学报*, 2011, 66(9): 1211-1218.]
- [8] Ma Xinping, Bai Hongying, Feng Haipeng, et al. Runoff variation and its influencing factors compared between south and north of Qinling Mountains during 52 years. *Arid Land Geography*, 2013, 36(6): 1032-1040. [马新萍, 白红英, 冯海鹏, 等. 52 a 来秦岭南北径流变化对比及影响因素. *干旱区地理*, 2013, 36(6): 1032-1040.]
- [9] Bai Hongying, Ma Xinping, Gao Xiang, et al. Variations in January temperature and 0°C isothermal curve in Qinling mountains based on DEM. *Acta Geographica Sinica*, 2012, 67(11): 1443-1450. [白红英, 马新萍, 高翔, 等. 基于 DEM 的秦岭山地 1 月气温及 0°C 等温线变化. *地理学报*, 2012, 67(11): 1443-1450.]
- [10] Jiang Chong, Mu Xingmin, Wang Fei, et al. Analysis of extreme temperature events in the Qinling Mountains and surrounding area during 1960-2012. *Quaternary International*, 2016, 392: 155-167.

- [11] Wang Zhao, Luo Hui, Li Yali, et al. Effects of urbanization on temperatures over the Qinling Mountains in the past 50 years. *Journal of Applied Meteorological Science*, 2016, 27(1): 85-94. [王钊, 罗慧, 李亚丽, 等. 近 50 年秦岭南北不均匀增温及对城市化响应. *应用气象学报*, 2016, 27(1): 85-94.]
- [12] Kang Muyi, Zhu Yuan. Discussion and analysis on the geo-ecological boundary in Qinling Range. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(7): 2774-2784. [康慕谊, 朱源. 秦岭山地生态分界线的论证. *生态学报*, 2007, 27(7): 2774-2784.]
- [13] Liu Yansui, Wang Yanglin, Fu Bojie. Liu Yinhan geography thoughts and the academic contribution. *Acta Geographica Sinica*, 2007, 62(7): 776-781. [刘彦随, 王仰麟, 傅伯杰. 刘胤汉的地理学思想与学术贡献. *地理学报*, 2007, 62(7): 776-781.]
- [14] Li Shuangshuang, Yan Junping, Wan Jia. The characteristics of temperature change in Qinling mountains. *Scientia Geographica Sinica*, 2012, 32(7): 853-858. [李双双, 延军平, 万佳. 全球气候变化下秦岭南北气温变化特征. *地理科学*, 2012, 32(7): 853-858.]
- [15] IPCC. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution to Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, United Kingdom and New York, USA: Cambridge University Press, 2013.
- [16] World Meteorological Organization, 2017. WMO statement on the state of the global climate in 2016 [EB/OL]. 2017-01-18. [2017-05-14]. https://library.wmo.int/opac/doc_num.php?explnum_id=3414.
- [17] Lin Xiaopei, Xu Lixiao, Li Jianping, et al. Research on the global warming hiatus. *Advances in Earth Science*, 2016, 31(10): 995-1000. [林霄沛, 许丽晓, 李建平, 等. 全球变暖“停滞”现象辨识与机理研究. *地球科学进展*, 2016, 31(10): 995-1000.]
- [18] Wu Zhaohua, Huang N E. Ensemble empirical mode decomposition: A noise-assisted data analysis method. *Advances in Adaptive Data Analysis*, 2009, 1(1): 1-41.
- [19] Wang Jinliang, Li Zongjun. Extreme-point Symmetric Mode Decomposition: The New Way of Data Analysis and Scientific Exploration. Beijing: Higher Education Press, 2015. [王金良, 李宗军. 极点对称模态分解方法: 数据分析与科学探索的新途径. 北京: 高等教育出版社, 2015.]
- [20] Zhai Danping, Bai Hongying, Qin Jin, et al. Temporal and spatial variability of air temperature lapse rates in Mt. Taibai, Central Qinling Mountains. *Acta Geographica Sinica*, 2016, 71(9): 1587-1595. [翟丹平, 白红英, 秦进, 等. 秦岭太白山气温直减率时空差异性研究. *地理学报*, 2016, 71(9): 1587-1595.]
- [21] Zheng Jingyun, Bian Juanjuan, Ge Quansheng, et al. The climate regionalization in China for 1981-2010. *China Science Bulletin*, 2013, 58(30): 3088-3099. [郑景云, 卞娟娟, 葛全胜, 等. 1981-2010 年中国气候区划. *科学通报*, 2013, 58(30): 3088-3099.]
- [22] Zhang Lixia, Zhou Tianjun. Decadal variation around early 1990s, east Asian summer monsoon, change of ENSO period. *Science China Earth Sciences*, 2015, 45(9): 1394-1408. [张丽霞, 周天军. 20 世纪 90 年代初东亚夏季对流层温差的年代际转折及成因. *中国科学: 地球科学*, 2015, 45(9): 1394-1408.]
- [23] Su Jingzhi, Wen Min, Ding Yihu, et al. Hiatus of global warming: A review. *Chinses 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.]
- [24] Zhan Ruifen, Ding Yihui, Wu Liguang, et al. Role of ENSO in the interannual relationship between Tibetan Plateau winter snow cover and Northwest Pacific tropical cyclone genesis frequency. *Science China Earth Sciences*, 2016, 46(10): 1358-1370. [占瑞芬, 丁一汇, 吴立广, 等. ENSO 在青藏高原积雪与西北太平洋热带气旋生成频数关系中的作用. *中国科学: 地球科学*, 2016, 46(10): 1358-1370.]
- [25] Schulze H, Langenberg H. Climate science: Urban heat. *Nature Geoscience*, 2014, 7(8): 553-553.

Spatiotemporal variability of temperature in northern and southern Qinling Mountains and its influence on climatic boundary

LI Shuangshuang^{1,2}, LU Jiayu^{1,2}, YAN Junping^{1,2}, LIU Xianfeng^{1,2},
KONG Feng³, WANG Juan⁴

(1. School of Geography and Tourism, Shaanxi Normal University, Xi'an 710119, China; 2. National Demonstration Center for Experimental Geography Education, Shaanxi Normal University, Xi'an 710119, China; 3. Research Centre for Strategic Development, China Meteorological Administration, Beijing 100081, China; 4. Shaanxi Meteorological Administration, Xi'an 710119, China)

Abstract: A study on temperature variations in the northern and southern Qinling Mountains is performed using temperature series at 70 meteorological stations for the period 1970-2015. Temporal trends, spatial characteristics, 0 °C isotherm displacement and the number of days with active accumulated temperature above 10 °C are evaluated, using extreme-point symmetric mode decomposition (ESMD), spatial analysis and other climate diagnosis methods. The significance of climatic boundary line of the Qinling Mountains is explored in the context of global warming. Four new insights have been achieved: (1) The changing trends of temperature in the northern and southern Qinling Mountains over the past 46 years are synchronous, with the warming process shown as a 'non-smooth, nonlinear, and ladder-shaped' pattern. The evolution process can be divided into three periods: the low stationary fluctuation period in 1960-1993, followed by a rapid increase period in 1994-2002, and finally a warming stagnation period in 2003-2015. (2) The ESMD decomposition indicates that the changing trends of temperature over the northern and southern Qinling Mountains are dominated by interannual fluctuation, and have no obvious linear trend. (3) The spatial variation of temperature in the Qinling Mountains is characterized by 'synchronous warming, and differential north-south change'. In the north, the spatial variation of temperature is relatively consistent, while in the south low temperature centers are observed at Xixiang-Ankang basin and Shangdan basin. (4) The Qinling Mountains, as a climatic boundary line, still play a major/obvious role; however, there exists difference in the response of temperature variations to global warming over the north and south of the Qinling Mountains. The northern boundary of north subtropical zone extends upward along the southern Qinling Mountains; while warming zone extends by the form of enclave in the northern Qinling Mountains due to rapid urbanization and mountain blocking.

Keywords: temperature; extreme-point symmetric mode decomposition; north and south transitional zone of China; Qinling Mountains