

# 1960-2013年秦岭陕西段南北坡极端气温变化空间差异

张 扬<sup>1,2</sup>, 白红英<sup>1,2</sup>, 苏 凯<sup>1,2</sup>, 黄晓月<sup>1,2</sup>, 孟 清<sup>1,2</sup>, 郭少壮<sup>1,2</sup>

(1. 西北大学城市与环境学院, 西安 710127;

2. 西北大学陕西省地表系统与环境承载力重点实验室, 西安 710127)

**摘要:** 作为气候变化研究的重要内容, 极端气温研究对环境保护和灾害事件预警具有重要意义。根据1960-2013年秦岭32个气象站点的逐日气温资料, 采用RClimDex软件、克里格插值法、线性倾向估计法和相关性分析法, 研究秦岭山地陕西段(简称秦岭)气温的空间分布特点, 以及极端气温的空间变化特征。结果表明: ① 1960-2013年秦岭年平均气温、年最高气温和年最低气温分别为10.48℃、16.44℃和6.18℃; 秦岭北坡气温在低海拔区高于南坡, 在中、高海拔区低于南坡; 南北坡的气温差值在低海拔区域最小, 中海拔区域最大。② 秦岭极端气温的频率、强度和持续时间均表现为增加趋势, 极端气温变化的敏感区域位于南坡的镇安、柞水和北坡的周至、户县。③ 秦岭北坡极端气温频率的变化更明显, 秦岭南坡极端气温强度和持续时间的变化更明显; 且北坡的增温主要发生在夜间, 南坡的增温主要发生在白昼。④ 秦岭极端气温的变暖速率随海拔升高而增大, 高海拔区域极端气温频率和强度的变化最明显, 中海拔区域极端气温持续时间的变化最明显。

**关键词:** 秦岭陕西段; 气候变化; 极端气温; 空间差异

DOI: 10.11821/dlxb201807009

## 1 引言

近百年来, 全球气候变暖毋庸置疑, 20世纪50年代后的气温上升更是前所未有<sup>[1]</sup>。在气候变暖背景下, 冬季变得温和, 夏季更加炎热, 由此导致的干旱、高温等极端气候事件的频率和强度更高、影响范围更广<sup>[2-3]</sup>。极端气候事件的频发严重影响了生态环境和人类生活, 其中极端气温和极端气温事件对人类的影响更是不容忽视的, 成为国内外学者的重要研究方向。有研究表明全球大部分地区极端气温的变化在20世纪后50年表现出暖夜增多、冷夜减少的特点<sup>[4]</sup>; 区域尺度上的研究表明, 亚太地区<sup>[5]</sup>、欧洲<sup>[6]</sup>、俄罗斯<sup>[7]</sup>和美国<sup>[8]</sup>等地区极端气温的变化表现为极端高温日数增加和极端低温日数减少。与此同时, 针对中国极端气温变化的研究也卓有成效。例如, 周雅清等<sup>[9]</sup>对中国大陆极端气温变化分析后得到, 中国最高气温和最低气温整体呈上升趋势, 但是北方更为显著; 翟盘茂等<sup>[10]</sup>研究指出, 除华北南部外, 1951-2000年中国其他北方地区表现出明显的暖昼增多, 冷夜减少。除此之外, 针对中国不同地形<sup>[3, 11-13]</sup>和不同地区<sup>[14-17]</sup>的极端气温变化研究也有很多,

收稿日期: 2017-06-30; 修订日期: 2018-03-04

基金项目: 国家林业公益性行业科研专项(201304309) [Foundation: National Forestry Public Welfare Scientific Research Project, No.201304309]

作者简介: 张扬(1991-), 男, 陕西西安人, 硕士, 研究方向为极端气温变化与植被响应。E-mail: ZYang0724@126.com

通讯作者: 白红英(1962-), 女, 陕西凤翔人, 博士, 教授, 研究方向为全球变化生态学、自然地理学。

E-mail: hongyingbai@163.com

而且不同区域的极端气温变化格局存在一定差异<sup>[18]</sup>, 特别是高海拔地区更为复杂。极端气温的变化和极端气温事件的频发, 导致生态环境的脆弱性增加, 因此, 研究区域极端气温的变化对环境保护和防灾减灾具有重要意义。

研究区为秦岭山地陕西段(简称秦岭), 位于 $32^{\circ}40'N\sim34^{\circ}35'N$ ,  $105^{\circ}30'E\sim111^{\circ}3'E$ , 径流量丰富, 植被覆盖度高, 是中国南北重要的气候分界线。1959-2009年秦岭北坡气温以 $0.24\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ 的速度上升, 降水量以 $3.2\text{ mm}/10\text{ a}$ 的速度增加, 秦岭南坡的气温倾向率为 $0.15\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ , 降水量的下降速率为 $14.7\text{ mm}/10\text{ a}$ <sup>[19-20]</sup>, 秦岭南北坡的气温变化率均高于同时期全球的增温速率 $0.13\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ <sup>[21]</sup>。作为生态环境敏感区, 秦岭包含山地、盆地和平原等多种地形, 而且小气候特征明显<sup>[22]</sup>。近些年来该区域的气温变化研究多集中于气温均值的分析, 而针对极端气温的研究并不多见, 且前人关于秦岭极端气温的研究<sup>[23]</sup>侧重于分析趋势变化和南北坡昼夜指数的比较。本文在对比秦岭南北坡气温空间分布的基础上, 使用统一的极端气温指数研究秦岭极端气温的空间变化特征, 对比南北坡极端气温变化的空间差异及与海拔间的关系, 旨在为环境保护和灾害事件预警提供科学依据。

## 2 数据来源与研究方法

### 2.1 数据来源

气象数据来源为陕西省气象局和中国气象数据网(<http://data.cma.cn/>), 包括1960-2013年秦岭北坡和南坡共32个气象站点的气温日值资料, 并进行了极值检验、一致性检验和缺失数据插补等方面的质量控制。DEM的空间分辨率为 $25\text{ m}\times25\text{ m}$ , 来源于国家测绘局网站。图1为秦岭气象站点分布。

### 2.2 研究方法

国内外极端气温的研究中, 常使用第90个和第10个百分位值作为极端气温的阈值。日最高气温超过第90个百分位值即定义为极端高温, 日最低气温低于第10个百分位值即定义为极端低温<sup>[13, 24-25]</sup>, 极端高温和极端低温背景下的极端天气、气候事件统称为极端气温事件。在此基础上, 世界气象组织气候委员会确定了16个极端气温指数<sup>[26]</sup>, 用来评价极端气温频率、强度和持续时间3个方面的变化<sup>[17]</sup>, 并通过RCLIMDEX<sup>[4]</sup>软件计算得到, 各指数定义如表1所示。

使用ArcGIS 10.2中的克里格插值法对各站点的气温和极端气温指数进行插值, 分析秦岭气温的空间分布和极端气温的空间变化。具体为根据秦岭南北坡气温的垂直递减率<sup>[27]</sup>计算结果(北坡 $0.513\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ , 南坡 $0.499\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ ), 将站点气温修订到海平面, 使用克里格插值法对各站点的气温进行插值, 叠加DEM得到最终结果; 极端气温指数直接使用克里格插值法进行插值。

参考《陕西秦岭生态环境保护纲要》中依据生态系统基本特征对秦岭高、中、低海拔的划分, 将秦岭划分为 $<1500\text{ m}$ 、 $1500\sim2600\text{ m}$ 和 $>2600\text{ m}$ 3个海拔区域, 其中海拔高程 $<1500\text{ m}$ 的为低山丘陵水土保持区和水源涵养区, 海拔高程位于 $1500\sim2600\text{ m}$ 之间的为针阔叶混交林, 海拔高程 $>2600\text{ m}$ 的为针叶林、灌丛和草甸区。秦岭南北坡及不同

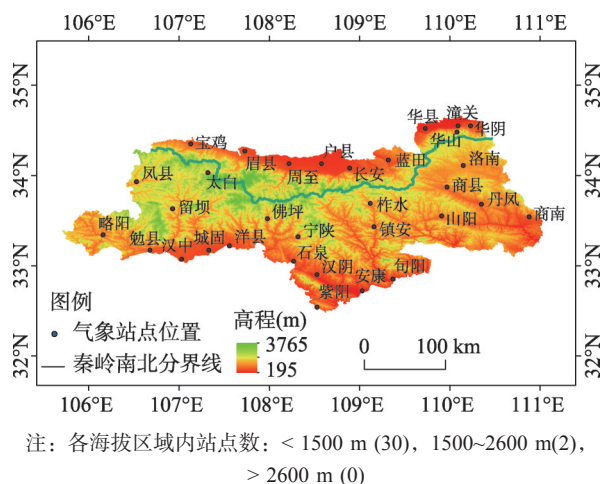


图1 秦岭气象站点分布图

表 1 极端气温指标定义  
Tab. 1 Definition of extreme temperature indices

名称(单位)	缩写	定义
夏季日数(d)	SU	日最高气温高于 25 ℃的天数
冰冻日数(d)	ID	日最高气温低于 0 ℃的天数
热夜日数(d)	TR	日最低气温高于 20 ℃的天数
霜冻日数(d)	FD	日最低气温低于 0 ℃的天数
日最高气温极大值(℃)	TXx	年内日最高气温最大值
日最高气温极小值(℃)	TXn	年内日最高气温最小值
日最低气温极大值(℃)	TNx	年内日最低气温最大值
日最低气温极小值(℃)	TNn	年内日最低气温最小值
冷昼日数(d)	TX10p	日最高气温低于 1960-2013 年第 10 个分位数的天数
冷夜日数(d)	TN10p	日最低气温低于 1960-2013 年第 10 个分位数的天数
暖昼日数(d)	TX90p	日最高气温高于 1960-2013 年第 90 个分位数的天数
暖夜日数(d)	TN90p	日最低气温高于 1960-2013 年第 90 个分位数的天数
暖持续日数(d)	WSDI	日最高气温高于 1960-2013 年第 90 个分位数连续 6 d 的天数
冷持续日数(d)	CSDI	日最低气温低于 1960-2013 年第 10 个分位数连续 6 d 的天数
生物生长季(d)	GSL	平均气温连续 6 d 大于 5 ℃的日数
气温日较差(℃)	DTR	日最高气温与最低气温的差值

海拔的气温和极端气温指数通过 ArcGIS 10.2 中掩膜提取和重分类实现；采用一元线性回归法计算各极端气温指数的变化率，并对各站点指数的变化进行显著性检验<sup>[28]</sup>；极端气温指数与其他空间要素的相关性分析通过 SPSS 分析得到。

3 结果与分析

3.1 秦岭气温的空间分布

基于 1960-2013 年秦岭 32 个气象站点的气温资料，插值获得 1960-2013 年秦岭年平均气温、年最高气温和年最低气温的空间分布（图 2）。由图 2 可知，秦岭气温（年平均气温、年最高气温和年最低气温）的空间分布与海拔的关系密切，秦岭年平均气温、年最高气温和年最低气温的范围分别为-3.2 ℃~15.91℃、2.65 ℃~21.57℃和-7.56 ℃~11.86 ℃。

表 2 为 1960-2013 年秦岭南北坡的气温均值。由表 2 可知，1960-2013 年秦岭年平均气温、年最高气温和年最低气温分别为 10.48 ℃、16.44 ℃和 6.18 ℃。秦岭南坡的年平均气温、年最高气温和年最低气温分别为 10.62 ℃、16.58 ℃和 6.33 ℃；秦岭北坡的年平均气温、年最高气温和年最低气温分别为 9.97 ℃、15.91 ℃和 5.6 ℃；秦岭南北坡气温表现出“南坡高于北坡”的特点，且南北坡年平均气温、年最高气温和年最低气温的差值均不超过 1 ℃。

表 3 为秦岭南北坡不同海拔区域的气温均值，其中秦岭北坡气温在低海拔区高于南坡，差值为 0.12 ℃，在中、高海拔区低于南坡，差值分别为 1.02 ℃和 0.93 ℃；秦岭南北坡气温的差值在低海拔区域最小，中海拔区域最大。

3.2 秦岭极端气温空间变化特征

3.2.1 频率变化特征 夏季日数、冰冻日数、热夜日数、霜冻日数、暖（冷）昼日数和暖

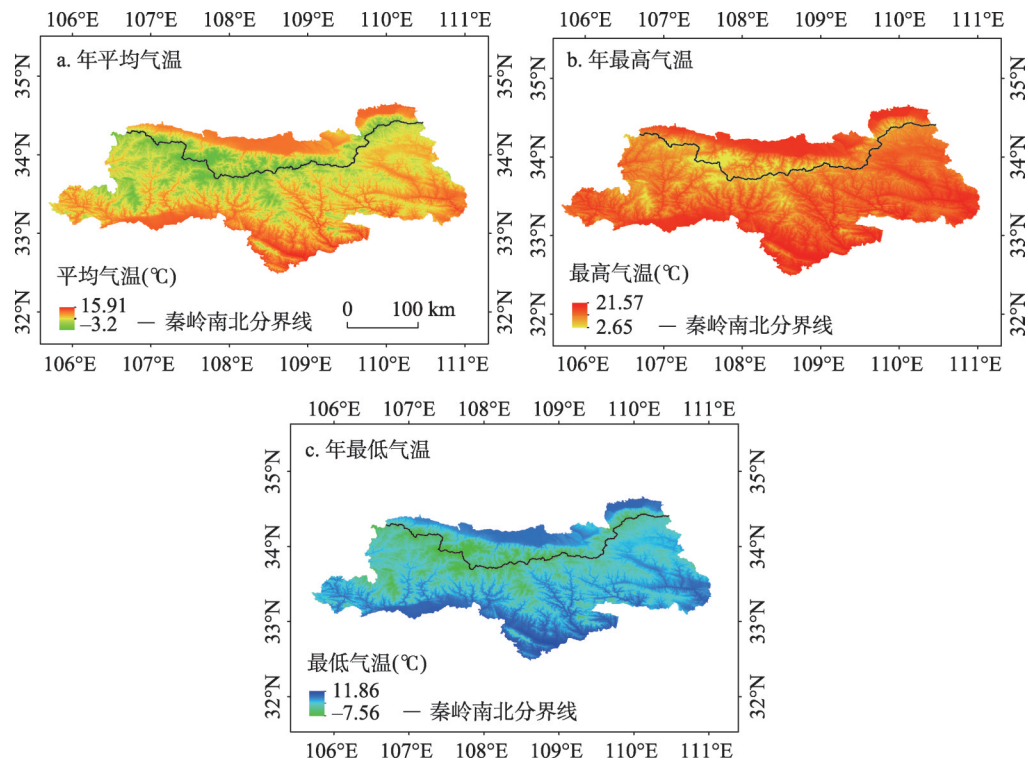


图2 1960-2013年秦岭气温空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of temperature in Qinling Mountains during 1960-2013

(冷) 夜日数等 8 个极端气温指数常用来反应极端气温频率的变化, 图 3 为 1960-2013 年秦岭极端气温频率指数变化的空间分布。其中夏季日数在研究区范围均呈现上升趋势, 变化范围为 1.64~10.32 d/10 a, 上升趋势最明显的区域位于镇安和柞水; 研究区范围内 97.66% 区域的热夜日数表现为上升趋势, 变化趋势最明显的区域位于周至和户县, 变化率最大值为 4.09 d/10 a; 暖昼日数和暖夜日数的空间变化具有相同特点, 即研究区范围内均呈不同程度的上升趋势, 变化范围分别为 0.45~4.35 d/10 a 和 0.04~4.67 d/10 a, 暖昼日数变化率的高值区位于镇安, 暖夜日数变化率的高值区位于户县、周至和佛坪。即秦岭极端气温暖指数整体上表现为上升趋势。

表 2 1960-2013 年秦岭南北坡气温均值

Tab. 2 Mean temperature of the northern and southern slopes of Qinling Mountains during 1960-2013			
	年平均气温(℃)	年最高气温(℃)	年最低气温(℃)
秦岭	10.48	16.44	6.18
秦岭北坡	9.97	15.91	5.6
秦岭南坡	10.62	16.58	6.33

表 3 1960-2013 年秦岭南北坡不同海拔的气温均值

Tab. 3 Mean temperature of different elevations on the northern and southern slopes of Qinling Mountains during 1960-2013									
海拔区域 (m)	年平均气温(℃)			年最高气温(℃)			年最低气温(℃)		
	北坡	南坡	南北坡差值	北坡	南坡	南北坡差值	北坡	南坡	南北坡差值
< 1500	11.77	11.61	0.16	17.71	17.56	0.15	7.39	7.33	0.06
1500~2600	6.40	7.37	-0.97	12.34	13.40	-1.06	2.04	3.06	-1.02
> 2600	1.04	1.93	-0.89	6.92	7.88	-0.96	-3.32	-2.39	-0.93



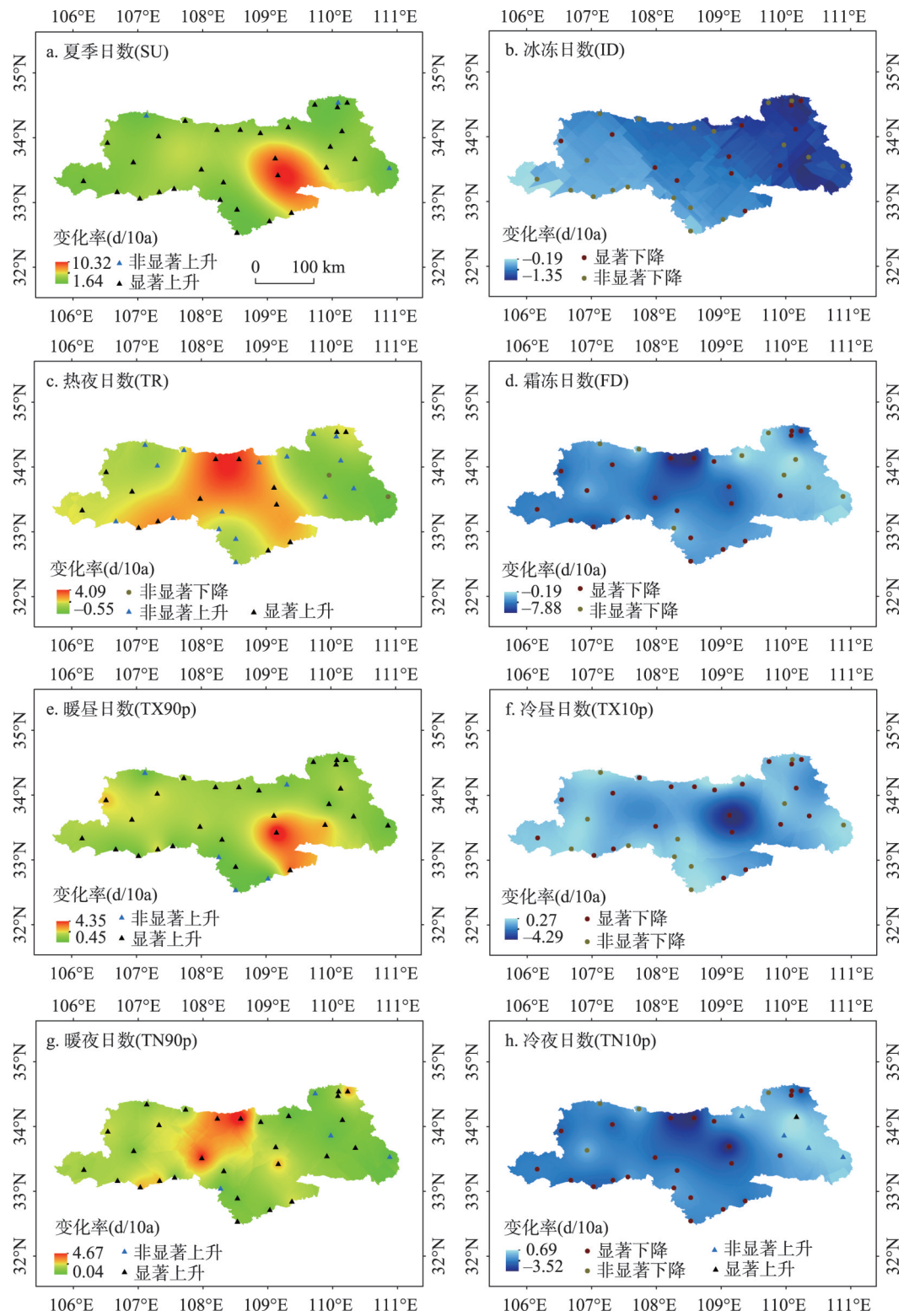


图3 1960-2013年秦岭极端气温频率指数的空间变化

Fig. 3 Spatial variation of extreme temperature frequency indices in Qinling Mountains during 1960-2013

冰冻日数和霜冻日数在研究区范围内均表现出不同程度的下降趋势, 其中冰冻日数的变化范围为 $-1.35 \sim -0.19$  d/10 a, 下降趋势最明显的区域为华山, 霜冻日数的变化范围为 $-7.88 \sim -0.19$  d/10 a, 下降趋势最明显的区域是户县和周至; 研究区范围内冷昼日数和冷夜日数呈下降趋势的区域比例分别达到99.88%和90.52%, 其中冷昼日数下降最明显的区域位于柞水和镇安, 下降速率达到 $-4.29$  d/10 a, 冷夜日数下降最明显的区域位于柞水、户县和周至, 下降速率达到 $-3.52$  d/10 a。即秦岭极端气温冷指数整体上表现为下降趋势。以上结果表明, 1960-2013 年秦岭极端气温的频率呈增加趋势。

**3.2.2 强度变化特征** 日最高气温极大(小)值、日最低气温极大(小)值和气温日较差等5个极端气温指数常用来反应极端气温强度的变化, 图4为1960-2013年秦岭极端气温强度指数变化的空间分布。秦岭日最高气温极大(小)值、日最低气温极大(小)值和气温日较差表现为上升趋势的区域比例分别为92.34% (99.99%)、68.37% (72.20%) 和

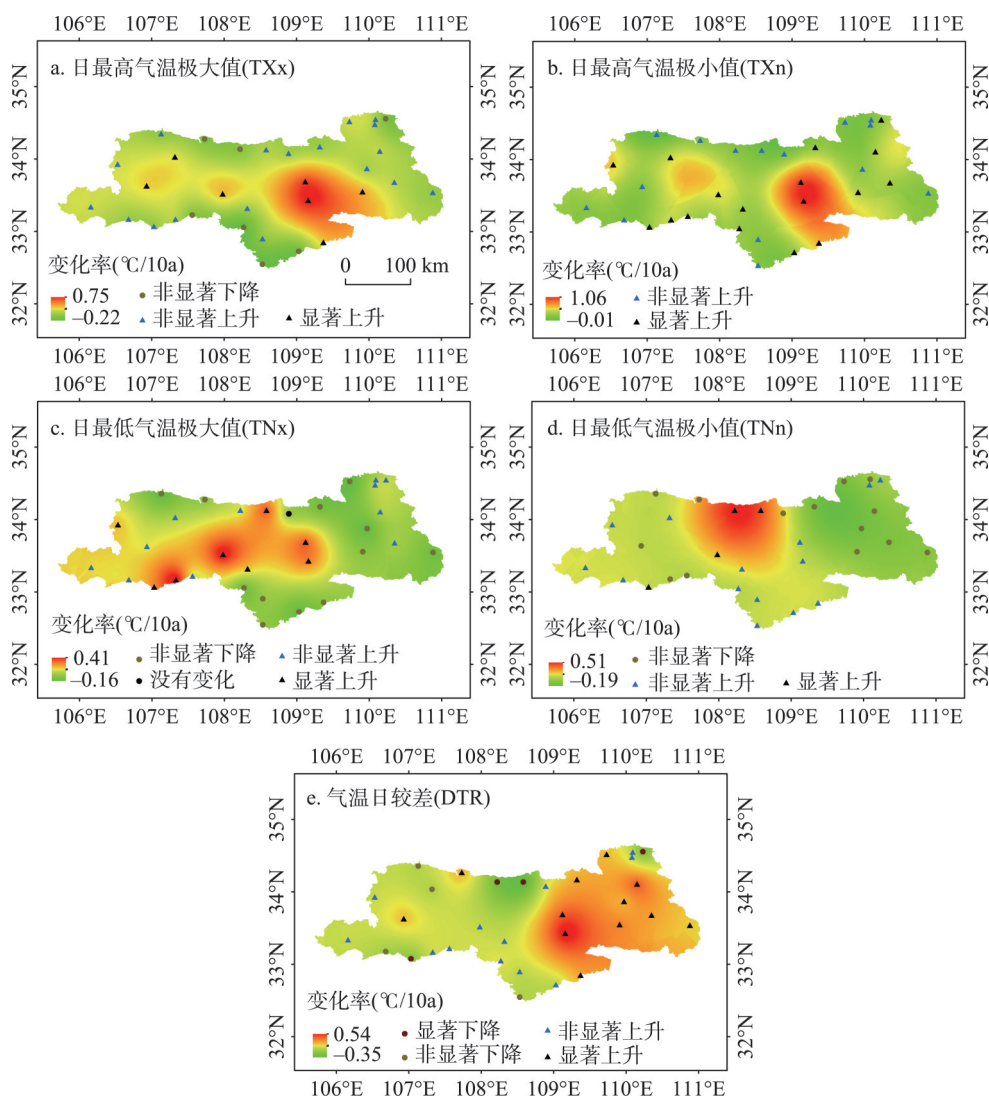


图4 1960-2013年秦岭极端气温强度指数的空间变化

Fig. 4 Spatial variation of extreme temperature strength indices in Qinling Mountains during 1960-2013

84.02%，其中日最高气温极大（小）值的变化率最大值为0.75℃/10a（1.06℃/10a），日最低气温极大（小）值的变化率最大值为0.41℃/10a（0.51℃/10a），气温日较差的变化率最大值为0.54℃/10a。日最高气温极大值、日最高气温极小值和气温日较差的变化率高值中心均位于镇安和柞水；日最低气温极小值的变化率高值中心位于户县和周至；日最低气温极大值出现多个变化率高值中心，分别为佛坪、城固、户县等。以上结果表明，1960-2013年秦岭极端气温的强度呈增强趋势。

**3.2.3 持续时间变化特征** 暖持续日数、冷持续日数和生物生长季等3个极端气温指数常用来反应极端气温持续时间的变化，图5为1960-2013年秦岭极端气温持续性指数变化的空间分布。1960-2013年秦岭的暖持续日数和生物生长季均表现为不同速度的上升趋势，变化范围分别为0.91~3.27 d/10a和1.03~5.82 d/10a，暖持续日数变化率的高值中心位于旬阳和镇安，生物生长季上升最明显的区域位于镇安和柞水；研究区范围内的冷持续日数整体上呈下降趋势，表现为下降趋势的区域比例为93.93%，下降速率最大值为-7.63 d/10a，柞水为冷持续日数下降的极值中心。以上结果表明，1960-2013年秦岭极端气温的持续时间呈增加趋势。

综上所述，1960-2013年秦岭极端气温无论是频率、强度，还是持续时间，均表现为增加趋势。秦岭各极端气温指数变化的空间差异性明显，其中夏季日数、暖昼日数、冷昼日数、日最高气温极大（小）值、暖持续日数、冷持续日数、生物生长季和气温日较差变化最明显的区域位于秦岭南坡的镇安和柞水；热夜日数、暖夜日数、霜冻日数、冷夜日数和日最低气温极大（小）值变化最明显的区域位于秦岭北坡的周至和户县。因此，秦岭极端气温变化的敏感区域主要位于南坡的镇安、柞水和北坡的周至、户县，除此之外，佛坪、城固、旬阳和华山也是较为敏感的区域。

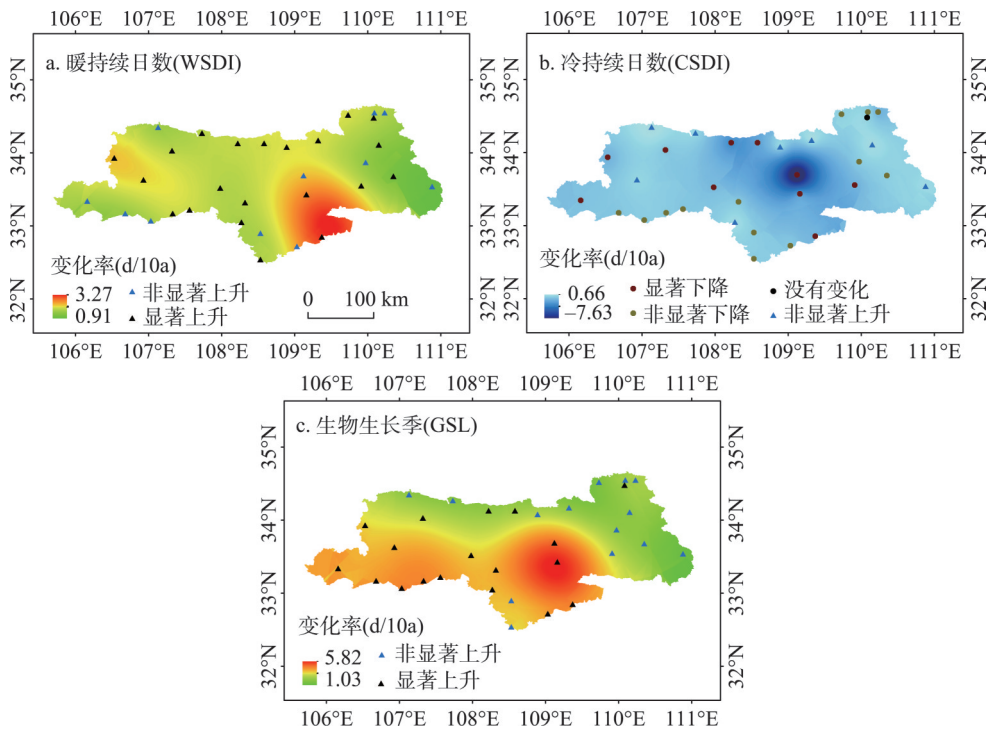


图5 1960-2013年秦岭极端气温持续性指数的空间变化

Fig. 5 Spatial variation of extreme temperature persistent indices in Qinling Mountains during 1960-2013

3.3 秦岭极端气温变化的空间差异性

3.3.1 秦岭南北坡极端气温的变化差异 表4为1960-2013年秦岭南北坡极端气温指数的变化率,可以发现同种极端气温指数在秦岭南北坡的变化趋势具有一致性,整体表现为暖指数上升和冷指数下降,但是同种指数在秦岭北坡和南坡的变化率存在差异,其中夏季日数、日最高气温极大(小)值、日最低气温极大值、暖(冷)昼日数、暖持续日数、生物生长季和气温日较差的变化率表现出南坡高于北坡的特点,而其他指数呈相反的特点。结果表明,1960-2013年秦岭南北坡极端气温频率指数呈北坡快于南坡的特点,极端气温强度指数和持续性指数呈南坡快于北坡的特点。秦岭南北坡气温日较差的变化差异最为明显,南坡气温日较差的变化率为北坡的7倍;除此之外,秦岭南北坡的昼夜指数呈相反的变化特征,其中南坡昼快夜慢,北坡昼慢夜快,说明秦岭北坡的增温主要发生在夜间,南坡的增温主要发生在白昼。综上所述,1960-2013年秦岭北坡极端气温频率的变化更明显,秦岭南坡极端气温强度和持续时间的变化更明显,且北坡以夜间增温为主,南坡以日间增温为主。

表4 1960-2013年秦岭南北坡极端气温指数的变化率  
Tab. 4 Variation tendency of extreme temperature indices on the northern and southern slopes of Qinling Mountains during 1960-2013

	SU (d/10a)	ID (d/10a)	TR (d/10a)	FD (d/10a)	TXx (℃/10a)	TXn (℃/10a)	TNx (℃/10a)	TNn (℃/10a)
秦岭北坡	3.76**	-0.91*	2.24**	-3.39**	0.13	0.33	0.06	0.18
秦岭南坡	4.44**	-0.72**	1.64**	-2.90**	0.24	0.46**	0.08	0.08
	TX10p (d/10a)	TX90p (d/10a)	TN10p (d/10a)	TN90p (d/10a)	WSDI (d/10a)	CSDI (d/10a)	DTR (℃/10a)	GSL (d/10a)
秦岭北坡	-1.16**	1.54**	-1.39**	1.87**	1.88**	-0.74	0.02	2.64
秦岭南坡	-1.22**	1.83**	-1.04**	1.41**	1.93**	-0.70**	0.14	3.73**

注: \*\*、\*分别表示通过0.01和0.05水平上的显著性检验。

3.3.2 秦岭南北坡极端气温变化与海拔的关系 1960-2013年秦岭极端气温指数变化率和海拔高程的相关性分析如表5所示。其中,冰冻日数、热夜日数、冷昼日数与海拔高程呈显著负相关,日最高气温极大值、暖昼日数、生物生长季与海拔高程呈显著正相关,表明秦岭极端气温的变暖速率随海拔升高而增大。海拔高程每上升100 m,冰冻日数、热夜日数和冷昼日数的变化率分别减小0.17 d/10 a、0.14 d/10 a和0.04 d/10 a,日最高气温极大值、暖昼日数和生物生长季的变化率分别增加0.02 ℃/10 a、0.06 d/10 a和0.2 d/10 a。

表6为秦岭不同海拔区域的极端气温指数变化率。各指数的变化特点有所差别,其中冰冻日数和气温日较差的变化在低海拔区域(< 1500 m)最明显,日最高气温极大值、暖持续日数、冷持续日数和生物生长季的变化在中海拔区域(1500~2600 m)最明显。

表5 秦岭极端气温指数变化率与海拔高程的相关性  
Tab. 5 Correlation coefficients between elevations and linear trends of extreme temperature indices in Qinling Mountains

	SU	ID	TR	FD	TXx	TXn	TNx	TNn
海拔	-0.07	-0.71**	-0.38*	-0.04	0.37*	0.1	0.17	0.07
	TX10p	TX90p	TN10p	TN90p	WSDI	CSDI	DTR	GSL
海拔	-0.36*	0.45**	0.02	0.04	0.01	-0.03	0.1	0.55**

注: \*\*、\*分别表示通过0.01和0.05水平上的显著性检验。



表6 秦岭不同海拔区域的极端气温指数变化率

Tab. 6 Linear trends of extreme temperature indices of different elevations on the northern and southern slopes of Qinling Mountains

海拔区域 (m)	SU (d/10a)	ID (d/10a)	TR (d/10a)	FD (d/10a)	TXx (°C/10a)	TXn (°C/10a)	TNx (°C/10a)	TNn (°C/10a)
< 1500	4.31**	-0.78*	1.67**	-2.85**	0.2	0.43**	0.06	0.08
1500~2600	4.25*	-0.69*	2.05	-3.46**	0.25	0.45	0.12	0.16
> 2600	4.76**	-0.67**	2.07*	-3.49**	0.21	0.58*	0.13	0.24

海拔区域 (m)	TX10p (d/10a)	TX90p (d/10a)	TN10p (d/10a)	TN90p (d/10a)	WSDI (d/10a)	CSDI (d/10a)	DTR (°C/10a)	GSL (d/10a)
< 1500	-1.17**	1.75**	-1.01**	1.4**	1.91**	-0.68**	0.13	3.49**
1500~2600	-1.32**	1.82**	-1.41**	1.81**	1.96**	-0.8	0.06	3.56**
> 2600	-1.59**	1.85**	-1.46**	2.14**	1.86	-0.54*	0.02	3.17**

注：“\*”、“\*\*”分别表示通过0.01和0.05水平上的显著性检验。

显，其他指数的变化在高海拔区域(> 2600 m)最明显。结果表明，1960-2013年秦岭高海拔区域极端气温频率和强度的变化最敏感，中海拔区域极端气温持续时间的变化最明显。

4 讨论与结论

4.1 讨论

本文研究1960-2013年秦岭极端气温变化的空间差异时，发现秦岭南北坡的极端气温变化差异明显。首先，北坡的极端气温变化以夜间增温为主，南坡以日间增温为主，这一特点与已有的结论<sup>[23]</sup>一致。有研究表明，城市化对极端气温的变化存在影响，尤其对夜指数和低温存在显著的正相关<sup>[29-30]</sup>；而高温和昼指数的上升主要是气候变化本身所引起的<sup>[31]</sup>。人为影响主要表现在城市化、土地利用变化和温室气体排放等多个方面，对比可知，秦岭北坡受城市化影响大，南坡受人为影响程度相对较小<sup>[31]</sup>。因此，城市化导致秦岭北坡极端气温的变化表现为昼慢夜快，而南坡表现为昼快夜慢的原因是气候变化本身所致。其次，秦岭极端气温变化的敏感区域分别位于南坡的镇安、柞水和北坡的周至、户县。植被和水体对气温的变化具有一定的缓冲作用<sup>[20, 22]</sup>，镇安、柞水的植被覆盖度相对较低，且远离丹江、汉江等大型水域，这导致镇安、柞水成为南坡极端气温变化敏感区；户县、周至靠近以西安—咸阳为中心的大型城市群，城市化程度相对较高，这可能是周至、户县成为北坡极端气温变化敏感区的主要原因。除此之外，ENSO通过影响季风强度和气压带位置也可以对区域极端气温的变化产生影响<sup>[32]</sup>，植被覆盖变化、土地利用变化<sup>[33]</sup>、大气环流<sup>[34]</sup>、温室气体排放<sup>[35]</sup>等也均是影响极端气温变化的重要因素。分别分析东亚夏季风指数(EASMI)和南方涛动指数(SOI)对秦岭北坡和南坡极端气温指数的影响(表7)。其中EASMI与秦岭南坡的日最高气温极大值、冷持续日数呈显著正相关，与生物生长季呈显著负相关；SOI与秦岭南坡的热夜日数呈显著正相关，与冷夜日数、气温日较差呈显著负相关；秦岭北坡的极端气温指数中，仅气温日较差与SOI呈显著性负相关。结果表明，相比秦岭北坡，南坡受到EASMI和SOI的影响更大。

区域极端气温的变化是由多种因素共同影响的，而针对极端气温影响因素的研究多为单因素研究，在这种背景下，多种因素对极端气温的影响机制有待进一步深入研究。

本文选用的气象站点多位于低海拔地区 (< 1500 m), 少数位于中海拔地区 (1500~2600 m), 而高海拔地区 (> 2600 m) 的数据是经过克里格插值法得到的, 虽然经过验证, 但是该地区的结果仍存在一定的不确定性, 待补充高海拔站点的气象数据后进行分析。

4.2 结论

(1) 1960-2013 年间, 秦岭年平均气温、年最高气温和年最低气温分别为 10.48 ℃、16.44 ℃和 6.18 ℃。秦岭北坡气温在低海拔区高于南坡, 在中、高海拔区低于南坡; 秦岭南北坡气温的差值在低海拔区域最小, 中海拔区域最大。

(2) 1960-2013 年间, 秦岭极端气温变化整体呈现暖指数上升和冷指数下降的特征, 极端气温的频率、强度和持续时间均表现为增加趋势, 极端气温变化的敏感区域位于秦岭南坡的镇安、柞水和北坡的周至、户县。

(3) 秦岭南北坡极端气温的变化存在差异, 其中秦岭北坡极端气温频率的变化更明显, 秦岭南坡极端气温强度和持续时间的变化更明显; 且北坡的增温主要发生在夜间, 南坡的增温主要发生在白天。

(4) 1960-2013 年秦岭极端气温的变暖速率随海拔升高而增大, 高海拔区域极端气温频率和强度的变化最明显, 中海拔区域极端气温持续时间的变化最明显。

参考文献(References)

[1] Alexander L, Allen S, Bindoff N L. Climate Change 2013: The Physical Science Basis: Summary for Policymakers. Intergovernmental Panel on Climate Change, 2013: 1-26.

[2] Zhai Panmao, Liu Jing. Extreme weather/climate events and disaster prevention and mitigation under global warming background. Engineering Sciences, 2012, 14(9): 55-63. [翟盘茂, 刘静. 气候变暖背景下的极端天气气候事件与防灾减灾. 中国工程科学, 2012, 14(9): 55-63.]

[3] Wang Qiong, Zhang Mingjun, Wang Shengjie, et al. Extreme temperature events in Yangtze River Basin during 1962-2011. Acta Geographica Sinica, 2013, 68(5): 611-625. [王琼, 张明军, 王圣杰, 等. 1962-2011 年长江流域极端气温事件分析. 地理学报, 2013, 68(5): 611-625.]

[4] Alexander L V, Zhang X, Peterson T C, et al. Global observed changes in daily climate extremes of temperature and precipitation. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2006, 111(D5): 1042-1063.

[5] Choi G, Collins D, Ren G Y, et al. Changes in means and extreme events of temperature and precipitation in the Asia-Pacific Network Region, 1955-2007. International Journal of Climatology, 2009, 29(13): 1906-1925.

[6] Tank A, Konnen G P. Trends in indices of daily temperature and precipitation extremes in Europe, 1946-99. Journal of Climate, 2003, 16(22): 3665-3680.

[7] Gruza G, Rankova E, Razuvaev V, et al. Indicators of climate change for the Russian Federation. Climatic Change,

表 7 秦岭极端气温指数与 EASMI、SOI 的相关性				
Tab. 7 Correlation coefficients between extreme temperature indices in Qinling Mountains and EASMI, SOI				
	EASMI		SOI	
	秦岭北坡	秦岭南坡	秦岭北坡	秦岭南坡
SU	-0.06	-0.04	-0.17	-0.07
ID	-0.01	0.03	0.14	0.20
TR	0.08	0.02	0.20	0.27*
FD	0.03	-0.02	0.00	0.05
TXx	0.06	0.29*	-0.04	0.04
TXn	0.08	0.05	0.03	0.06
TNx	0.10	0.03	0.08	0.16
TNn	0.04	-0.15	0.20	0.08
TX10p	0.05	0.06	0.07	0.05
TX90p	-0.12	-0.15	-0.13	-0.07
TN10p	0.10	0.21	-0.15	-0.29*
TN90p	-0.05	-0.05	0.07	0.17
WSDI	-0.04	0.01	-0.18	0.12
CSDI	0.02	0.28*	0.04	0.10
DTR	-0.13	-0.11	-0.33*	-0.28*
GSL	-0.19	-0.30*	0.08	-0.03

注: \*表示通过 0.05 显著性检验。

- 1999, 42(1): 219-242.
- [8] Easterling D R, Meehl G A, Parmesan C, et al. Climate extremes: Observations, modeling, and impacts. *Science*, 2000, 289(5487): 2068-2074.
- [9] Zhou Yaqing, Ren Guoyu. Variation characteristics of extreme temperature indices in mainland China during 1956-2008. *Climatic and Environmental Research*, 2010, 15(4): 405-417. [周雅清, 任国玉. 中国大陆 1956-2008 年极端气温时间变化特征分析. *气候与环境研究*, 2010, 15(4): 405-417.]
- [10] Zhai Panmao, Pan Xiaohua. Change in extreme temperature and precipitation over northern China during the second half of the 20th century. *Acta Geographica Sinica*, 2003, 58(Suppl.): 1-9. [翟盘茂, 潘晓华. 中国北方近 50 年温度和降水极端事件变化. *地理学报*, 2003, 58(增刊): 1-9.]
- [11] Du Jun, Lu Hongya, Jian Jun. Variations of extreme air temperature events over Tibet from 1961 to 2010. *Acta Geographica Sinica*, 2013, 68(9): 1269-1280. [杜军, 路亚红, 建军. 1961-2010 年西藏极端气温事件的时空变化. *地理学报*, 2013, 68(9): 1269-1280.]
- [12] Zhao Peipei, Zhang Mingjun, Wang Shengjie, et al. Changes of extreme temperature events in the Chinese Tianshan Mountains during the period from 1960 to 2012. *Research of Soil and Water Conservation*, 2015, 22(6): 190-197. [赵培培, 张明军, 王圣杰, 等. 1960-2012 年中国天山山区极端气温的变化特征. *水土保持研究*, 2015, 22(6): 190-197.]
- [13] Zhao Anzhou, Liu Xianfeng, Zhu Xiufang, et al. Trend variations and spatial difference of extreme air temperature events in the Loess Plateau from 1965 to 2013. *Geographical Research*, 2016, 35(4): 639-652. [赵安周, 刘宪锋, 朱秀芳, 等. 1965-2013 年黄土高原地区极端气温趋势变化及空间差异. *地理研究*, 2016, 35(4): 639-652.]
- [14] Shen Hongyan, Ma Mingliang, Wang Ji, et al. Variation characteristics of extreme air temperature events in Qinghai Province. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2012, 34(6): 1371-1379. [申红艳, 马明亮, 王冀, 等. 青海省极端气温事件的气候变化特征研究. *冰川冻土*, 2012, 34(6): 1371-1379.]
- [15] Li Shuangshuang, Yang Saini. Changes of extreme temperature events in Beijing during 1960 to 2014. *Scientia Geographica Sinica*, 2015, 35(12): 1640-1647. [李双双, 杨赛霓. 1960-2014 年北京极端气温事件变化特征. *地理科学*, 2015, 35(12): 1640-1647.]
- [16] Bai Meilan, Hao Runquan, Li Xicang, et al. Variable characteristics of extreme climate events during 1961-2010 in Inner Mongolia. *Journal of Arid Meteorology*, 2014, 32(2): 189-193. [白美兰, 郝润全, 李喜仓, 等. 1961-2010 年内蒙古地区极端气候事件变化特征. *干旱气象*, 2014, 32(2): 189-193.]
- [17] Yang Xiaojing, Xu Zongxue, Zuo Depeng, et al. Spatiotemporal characteristics of extreme air temperature in Yunnan province during 1958-2013. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2016, 25(3): 523-536. [杨晓静, 徐宗学, 左德鹏, 等. 云南省 1958-2013 年极端气温时空变化特征分析. *长江流域资源与环境*, 2016, 25(3): 523-536.]
- [18] Liu Xianfeng, Pan Yaozhong, Zhu Xiufang, et al. Spatiotemporal variation of vegetation coverage in Qinling-Daba Mountains in relation to environmental factors. *Acta Geographica Sinica*, 2015, 70(5): 705-716. [刘宪锋, 潘耀忠, 朱秀芳, 等. 2000-2014 年秦巴山区植被覆盖时空变化特征及其归因. *地理学报*, 2015, 70(5): 705-716.]
- [19] Gao Xiang, Bai Hongying, Zhang Shanhong, et al. Climatic change tendency in Qinling Mountains from 1959 to 2009. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2012, 32(1): 207-211. [高翔, 白红英, 张善红, 等. 1959-2009 年秦岭山地气候变化趋势研究. *水土保持通报*, 2012, 32(1): 207-211.]
- [20] Gao Xiang. The research of climate trends and spatial distribution about Qin-Ba Mountain in 50a [D]. Xi'an: Northwest University, 2011: 15-32. [高翔. 五十年来秦巴山地气候变化趋势及空间分布研究[D]. 西安: 西北大学, 2011: 15-32.]
- [21] Qin Dahe, Chen Zhenlin, Luo Yong, et al. Updated understanding of climate change sciences. *Advance in Climate Change Research*, 2007, 3(2): 63-73. [秦大河, 陈振林, 罗勇, 等. 气候变化科学的最新认知. *气候变化研究进展*, 2007, 3(2): 63-73.]
- [22] Bai Hongying. The Response of Forest Vegetation to Environment Changes in Qin-Ba Mountain. Beijing: Science Press, 2014: 100-118. [白红英. 秦巴山区森林植被对环境变化的响应. 北京: 科学出版社, 2014: 100-118.]
- [23] Wang Zhao, Peng Yan, Wei Na. Variation trends of the extreme temperature and its relationship with regional warming in the south and north sides of the Qinling Mountain during 1961-2012. *Journal of Arid Meteorology*, 2016, 34(2): 269-275. [王钊, 彭艳, 魏娜. 近 52a 秦岭南北极端温度变化及其与区域增暖的关系. *干旱气象*, 2016, 34(2): 269-275.]
- [24] Zheng Jingyun, Hao Zhixin, Fang Xiuqi, et al. Changing characteristics of extreme climate events during past 2000 years in China. *Progress in Geography*, 2014, 33(1): 3-12. [郑景云, 郝志新, 方修琦, 等. 中国过去 2000 年极端气候事件变化的若干特征. *地理科学进展*, 2014, 33(1): 3-12.]
- [25] Zhou Xiaoyu, Zhao Chunyu, Wang Ying, et al. Variation characteristics of extreme temperature events in Liaoning

- Province, 1961-2012. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2015, 37(4): 876-887. [周晓宇, 赵春雨, 王颖, 等. 1961-2012 年辽宁省极端气温事件气候变化特征. *冰川冻土*, 2015, 37(4): 876-887.]
- [26] Peterson T C, Folland C, Gruza G, et al. Report on the activities of the working group on climate change detection and related rapporteurs 1998-2001. Geneva, Switzerland: World Meteorological Organisation Rep. 2001: 143.
- [27] 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.]
- [28] Liu Rongjuan. *Larix chinensis's NDVI variation and its response to climate change* [D]. Xi'an: Northwest University, 2016: 14-16. [刘荣娟. 气候变化背景下秦岭太白红杉的时空响应[D]. 西安: 西北大学, 2016: 14-16.]
- [29] Griffiths G M, Chambers L E, Haylock M R, et al. Change in mean temperature as a predictor of extreme temperature change in the Asia-Pacific region. *International Journal of Climatology*, 2010, 25(10): 1301-1330.
- [30] Zhou Yaqing, Ren Guoyu. Urbanization effect on long-term trends of extreme temperature events in North China. *Plateau Meteorology*, 2014, 33(6): 1589-1598. [周雅清, 任国玉. 城市化对华北地区极端气温事件频率的影响. *高原气象*, 2014, 33(6): 1589-1598.]
- [31] 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.]
- [32] Jia Yanqing, Zhang Bo, Zhang Yaozong, et al. Correlation analysis of variation of extreme temperature events and El Niño Southern Oscillation (ENSO) in Yangtze River Delta region during 1960-2014. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37(19): 6402-6414. [贾艳青, 张勃, 张耀宗, 等. 长江三角洲地区极端气温事件变化特征及其与 ENSO 的关系. *生态学报*, 2017, 37(19): 6402-6414.]
- [33] Wu LingYun, Zhang JingYong1, Dong WenJie, et al. Vegetation effects on mean daily maximum and minimum surface air temperatures over China. *Chinese Science Bulletin*, 2011, 56(9): 900-905.
- [34] You Q, Kang S, Aguilar E, et al. Changes in daily climate extremes in China and their connection to the large scale atmospheric circulation during 1961-2003. *Climate Dynamics*, 2011, 36(11): 2399-2417.
- [35] Zhao M, Pitman A J. The impact of land cover change and increasing carbon dioxide on the extreme and frequency of maximum temperature and convective precipitation. *Geophysical Research Letters*, 2002, 29(6): 1-4.



## Spatial variation of extreme temperature change on southern and northern slopes of Shaanxi section in Qinling Mountains during 1960-2013

ZHANG Yang<sup>1,2</sup>, BAI Hongying<sup>1,2</sup>, SU Kai<sup>1,2</sup>, HUANG Xiaoyue<sup>1,2</sup>,  
MENG Qing<sup>1,2</sup>, GUO Shaozhuang<sup>1,2</sup>

(1. College of Urban and Environmental Science, Northwest University, Xi'an 710127, China;

2. Key Laboratory of Earth Surface System and Environmental Carrying Capacity of Shaanxi Province,  
Northwest University, Xi'an 710127, China)

**Abstract:** Research on extreme temperature is of great significance to ecological and environmental protection and disaster warning in the context of climate change. Based on the daily temperature data observed from 32 meteorological stations from 1960 to 2013, we studied the spatial distributions of air temperature and extreme temperature in the Shaanxi section in Qinling Mountains by integrating the methods of Kriging interpolation, linearity estimation and correlation analysis and the RClimDex software. The results showed that: (1) The annual average temperature, maximum temperature and minimum temperature in the study area were 10.48°C, 16.44°C and 6.18°C during the last 54 years, respectively. The temperature on the southern slope of Qinling Mountains was higher than that on the northern slope in the middle-altitude area and high-altitude area, and lower than that in northern slope in the low-altitude area. The difference in air temperature between the northern and southern slopes was lower in the low-altitude area and greater in the middle-altitude area. (2) The frequency, intensity and duration of extreme temperature all tended to increase in the Qinling Mountains. The zones sensitive to extreme temperature change were Zhenan and Zhashui located on the southern slope as well as Zhouzhi and Huxian on the northern slope. (3) The variety of the extreme temperature change was more obvious in frequency on the northern slope while in intensity and duration on the southern slope. Moreover, warming occurred mainly in the night on the northern slope but in the daytime on the southern slope. (4) The warming rate of extreme temperature in the study area increased with the increase of altitude. The change of frequency and intensity of extreme temperature was more obvious in the high-altitude area, and the duration of extreme temperature more obvious in the middle-altitude area.

**Keywords:** Shaanxi section in Qinling Mountains; climate change; extreme temperature; spatial variation