# 1960-2016年秦岭一淮河地区热浪时空变化特征 及其影响因素

李双双1.2,延军平1.2,杨赛霓3,胡书山1.2,赵 怡1.2

(1. 陕西师范大学地理科学与旅游学院, 西安 710119; 2. 地理学国家级实验教学示范中心(陕西师范大学), 西安 710119; 3. 北京师范大学地表过程与资源生态国家重点实验室, 北京 100875)

摘要:基于134个气象站点1960-2016年逐日最高温和相对湿度数据,辅以趋势分析、空间分析和相关分析等方法,对秦岭一淮河地区热浪时空变化特征进行分析,探讨了赤道东太平洋海温异常与热浪变化的相关关系。结果表明:①近57年秦岭一淮河地区热浪呈现"非线性、非平稳和阶段性"的变化过程,年代变化可分为3个阶段:1960-1972年热浪呈现东西分异,分界线大致位于112°E,以东地区热浪异常偏多,以西地区则"高低交替"波动;1973-1993年热浪维持"低位波动",并在20世纪80年代中期呈现快速增加;1994-2016年,关中平原、秦巴山区、巫山山区和四川盆地热浪维持"高位波动",黄河下游、淮河平原和长江下游热浪则经历从"相对偏多"向"相对偏少"的转变;②在影响因素方面,最高温波动变化是秦岭一淮河地区热浪频次年代变化的主导因素,相对湿度变化的影响相对较弱;③近57年来关中平原热浪年代变化与赤道太平洋西部海温异常关系更为密切,长江流域与东部海温异常关系更为密切;对于黄河下游和秦巴山区的热浪变化与不同分区赤道太平洋海温异常关系均较弱。 关键词;高温热浪;时空分析;厄尔尼诺;秦岭一淮河地区

# 1 引言

世界气象组织发布《2016年全球气候公告》指出,2016年全球气温超过2015年,成为有气象记录以来最热的年份,并且2017年将持续或多发热浪、暴雨、洪涝等极端天气灾害(World Meteorological Organization, 2017)。全球变暖背景下,自然灾害呈现"极端事件频次增加、灾害连锁反应、多灾并发"的特征(吴绍洪等,2017)。作为变暖最直接的体现,高温热浪成为气候变化研究的热点问题(杨续超等,2015; Lehner et al, 2016; 祁新华等, 2016; Sun et al, 2017)。

在已有研究中,许多学者对中国高温时空变化

格局、环流影响因素、未来趋势进行了大量的探索 (叶殿秀等, 2013; 董思言等, 2014; Sun et al, 2014; 李琪等, 2016; Chen, Li, 2017; 王月华等, 2017),并 从城市居民健康、农作物生长、劳动生产能耗等角 度(杨绚等, 2013; 王怡等, 2017)分析了高温天气对 社会经济的影响。近年来,随着风险管理理念不断 深入,脆弱性、恢复力、风险评估成为高热浪研究的 关键词(谢盼等, 2015; 郑雪梅等, 2016; 同丽嘎等, 2017; 税伟等, 2017)。其中,谢盼等(2015)构建了 "高温胁迫—社会脆弱性—人口暴露"的高温灾害 人群健康风险评价框架; 黄大鹏等(2016)对未来情 景下中国高温的人口暴露度变化以及影响因素进 行了分析; 吴绍洪等(2017)构建中国综合气候变化

收稿日期: 2017-06-06;修订日期: 2017-09-30。

基金项目: 国家自然科学基金项目(41701592); 地表过程模型与模拟创新研究群体科学基金项目(41621061); 中央高校基本科研业务费专项资金项目(GK201703048) [Foundation: National Natural Science Foundation of China, No.41701592; The Creative Research Groups of the National Natural Science Foundation of China, No.41621061; Fundamental Research Funds for the Central Universities, No.GK201703048]。

作者简介: 李双双(1988-),男,陕西潼关人,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,主要研究方向为区域发展与自然灾害防治,E-mail: yanjp@snnu.edu.cn。

引用格式:李双双, 延军平, 杨赛霓, 等. 2018. 1960-2016 年秦岭—淮河地区热浪时空变化特征及其影响因素[J]. 地理科学进展, 37(4): 504-514. [Li S S, Yan J P, Yang S N, et al. 2018. Spatiotemporal variability of heat waves and influencing factors in the Qinling-Huaihe region, 1960-2016[J]. Progress in Geography, 37(4): 504-514.]. DOI: 10.18306/dlkxjz.2018.04.006

风险区划方案,评估了干旱、高温热浪以及洪涝灾 害的综合风险。综合已有研究结论发现,秦岭一淮 河地区是中国高温灾害风险的热点区,也是未来人 口暴露度的主导区。然而,前人研究尺度相对宏 观,对秦岭一淮河地区不同分区热浪变化规律精细 化研究相对较少;也有研究虽对长江流域、江浙沪 等地区高温热浪变化特征进行分析,但以中国南北 过渡带为整体的研究还相对较少;在研究方法上, 多数研究选择绝对阈值或相对阈值定义热浪事件, 综合考虑高温高湿和炎热持续效应的热浪变化研 究相对较少。

基于此,本文选取秦岭一淮河地区为研究区 域,利用1960-2016年逐日最高温和相对湿度数据, 辅以趋势分析、空间分析和相关分析等方法,分析 全球变暖背景下中国南北过渡带不同地理单元热 浪时空响应特征;在此基础上探讨赤道东太平洋海 温异常与区域热浪年代变化的关系,识别不同区域 热浪响应的关键海区,以期为区域可持续发展、增 强灾害适应能力提供理论依据。

2 研究区概况

秦岭一淮河地区位于中国东部季风区,是中国 重要的地理生态分界线。区域生态环境脆弱,是气 候变化的敏感区,也是南水北调中线水源和中国最 大连片贫困区。为对比不同地理单元热浪时空变 化特征的差异性,结合前期研究基础(李双双,杨赛 霓,刘宪锋,2015),参考中国气候区划(丁一汇等, 2013;郑景云等,2013),综合考虑地形、城市、社会 经济状况,将秦岭—淮河以北划分为2个子区域:关 中平原和黄河下游;将秦岭—淮河以南划分为5个 子区域:秦巴山区、四川盆地、巫山山区、淮河平原 和长江下游。其中,秦巴山地和淮河平原对气候响 应具有过渡性(图1)。

依据中国综合气候变化风险区划,秦岭一淮河 地区处于华北弱暖增雨敏感区、华东一华中强暖减 雨敏感区;在承载体综合风险区中,整个区域经济、 人口、生态、粮食多为中高风险水平(吴绍洪等, 2017)。从社会脆弱性和高温暴露性角度分析,秦 岭一淮河地区是高温胁迫一社会脆弱性综合主导 区,也是未来中国高温人口暴露增幅明显区。在未 来,受人口和气候变化相互作用,区域面临高温热 浪的风险逐渐增大(黄大鹏等, 2016)。

## 3 资料与方法

#### 3.1 资料来源

利用1960-2016年134个气象站点逐日最高温 和相对湿度数据,对秦岭一淮河地区热浪时空变化 特征进行分析。其中,最高温数据来自中国科学院



图1 秦岭—淮河地区气候分区及气象站点空间分布图(李双双,杨赛霓,刘宪锋, 2015) Fig.1 Climatic region and meteorological station distribution in the Qinling-Huaihe region(Li, Yang, Liu, 2015)

大气物理研究所提供的全国CHTM 3.0均一化数据 集;与最高温相比,相对湿度均一化存在不确定性, 本文采用原始数据;1960-2016年Niño 1+2区、Niño 3区、Niño 4区、Niño 3.4区和Niño Z区逐月海温数 据来自中国气象局国家气候中心百项气候系统指 数集。

#### 3.2 研究方法

#### 3.2.1 热浪指数

热浪被认为是持续性异常高温(或高温高湿)的 天气事件,许多学者利用最高温和最低温数据,从 昼夜变化、炎热强度、持续特征等角度,定义了不同 的热浪指数(Perkins et al, 2013)。其中,表征昼夜炎 热程度的指数有:暖昼、暖夜、夏季、热夜日数等;表 征热浪强度的相对阈值和绝对阈值指数有:平均温 高于气候态 95.0%、90.0%的阈值,最高温超过 35.0℃、33.0℃,或者最低温超过 26.7℃(Smith et al, 2013; You et al, 2017)。

在本文中,热浪指数计算方法参照《高温热浪 等级 GB/T29457-2012》国家标准,该指标综合考虑 炎热程度和过程累积效应,可有效地识别区域热浪 变化特征(黄卓等,2011;李双双,杨赛霓,张东海 等,2015)。热浪指数具体计算公式如下:

$$HI = 1.2 \times (TI - TI') + 0.35 \sum_{i=1}^{N-1} \frac{1}{nd_i} (TI_i - TI') + 0.15 \sum_{i=1}^{N-1} \frac{1}{nd_i} + 1$$
(1)

式中:HI为热浪指数;TI为当天炎热指数,代表人体 对气象环境的舒适感;TI为炎热临界值,高于临界 值表示为感觉炎热;TI,为当天之前第i日炎热指数; nd;为当天之前第i日距当天的日数;N为炎热天气 过程持续时间。

3.2.2 热浪变化敏感性分析

为定量分析秦岭一淮河地区热浪变化对气候 因子的响应,对热浪频次年代变化对气候因子(最 高温、相对湿度)的敏感性行分析,敏感系数计算公 式为:

$$S = \lim \left( \frac{\Delta HI/HI}{\Delta x/|x|} \right) = \frac{\partial HI}{\partial x} \times \frac{|x|}{HI}$$
(2)

式中:S为热浪频次HI对气候因子x的敏感系数; $\Delta x$ 为气候因子x的变化; $\Delta HI$ 为 $\Delta x$ 引起的HI的变化。 S>0,表示HI随气候因子x的增加而增加;S<0,表示HI随气候因子x的增加而减少;S值越大,表示该气候因子对HI的影响越大。 气候因子的变化趋势(C)采用线性趋势表示, 相对变化(RC)用研究时段变化量与该气候因子均 值绝对值(av)的百分比表示,计算公式如下:

$$RC = N \times C / |av| \times 100\% \tag{3}$$

式中:N为研究时段1960-2016年(取值为57年)。气候因子相对变化RC与敏感性S的乘积,表示该气候因子变化对HI变化的贡献量(李双双等,2016)。

## 4 结果分析

#### 4.1 秦岭—淮河地区热浪趋势变化特征

1960-2016年,秦岭一淮河地区热浪变化呈现 出"非线性、非平稳、阶段性"的变化特征(图2)。在 年代尺度上,变化过程大致可分为3个阶段:① 1960-1972年,关中平原和秦巴山区热浪频次先降 后升,在20世纪60年代末形成一个相对峰值期。 与上述2个区域相比,黄河下游和淮河平原热浪变 化则维持高位波动,处于热浪异常偏多期,四川盆 地热浪变化则呈"偏多一偏少一偏多"的交替变 化。巫山山区和长江下游热浪变化规律相对一致, 共同表现为波动下降,且巫山山区转为负距平时间 (1964年)早于长江下游(1972年); ②1973-1993年, 全区热浪整体处于相对偏少期。随着20世纪80年 代中期气温快速增加,区域热浪频次也在逐渐增 多,并在1993年后热浪频次转为正距平。③1994-2016年,秦岭-淮河地区热浪由"相对偏少"转为 "相对偏多",但不同区域响应存在差异。其中,关 中平原、秦巴山区、巫山山区和四川盆地4个子区域 热浪维持"高位波动",黄河下游、淮河平原和长江 下游热浪则经历"相对偏多"向"相对偏少"的转变。

IPCC第5次评估报告指出,1998-2012年全球 年均地表温度变化趋势有所"停滞",围绕变暖停滞 的争论还在持续(林霄沛等,2016)。在此阶段,秦岭 一淮河地区不同分区热浪变化呈现不同的响应特 征。其中,关中平原、秦巴山区、巫山山区3个子区 域热浪整体维持高位波动;黄河下游和淮河平原热 浪呈现波动下降,两者热浪"负距平"转变时间分别 在2002年和2008年,黄河下游转变时间节点早于 淮河平原;对于四川盆地而言,热浪在2001-2003年 和2010-2013年呈2次小幅下降,使得整个热浪变 化过程呈现"W"型分布;长江下游与其他区域热浪 变化均不相同,1995-2009年热浪频次呈现持续上 升,且2010年后呈现波动下降趋势。由此可以看



图 2 1960-2016 年秦岭—淮河地区热浪变化特征势 Fig.2 Variation of heat waves in the Qinling-Huaihe region, 1960-2016

出,全球变暖停滞背景下,以112°E为界,秦岭一淮 河以东地区,高温热浪变化呈现先上升后下降,且 由南向北热浪转入负距平的时间节点逐渐提前;以 西地区热浪频次表现为异常偏多。

### 4.2 秦岭—淮河地区热浪空间变化特征

1960-2016年,秦岭一淮河地区热浪空间上整 体呈现出"西增东减,南北分异"的变化特征(图3)。 具体表现为:①近57年秦岭—淮河地区58.0%站点 热浪呈现上升趋势,略高于下降趋势站点比重。在 空间上,呈现上升趋势的站点主要分布在112°E以 西地区,如关中平原、秦巴山区和四川盆地北部;② 以"米仓山—大巴山—大别山—淮河"为界,以北地 区热浪升降呈现"东西分异"。其中,关中平原、秦 巴山区热浪呈现一致上升,黄河下游和淮河平原热 浪呈现一致下降;③长江下游有71.4%的站点热浪 呈现上升趋势,从西向东依次呈现"轻微下降—中度 上升一轻微上升"的经向分布;四川盆地有85.7%的 站点热浪呈现上升趋势,从南向北呈现"轻微下降 一轻微上升一中度上升一大幅上升"的纬向分布; ④在离散程度上,关中平原、黄河下游、秦巴山区、 四川盆地、巫山山区变化趋势内部离散程度较大, 长江下游和淮河平原变化趋势相对集中,说明江淮 平原热浪变化区域同步性高于其他地区(图 3b)。

#### 4.3 秦岭—淮河地区热浪敏感性分析

通过分析热浪频次年代变化对最高温、相对湿 度的敏感性,且计算各气候因子的相对变化,得出 最高温和相对湿度对热浪变化的贡献率,进一步识 别秦岭—淮河地区不同分区热浪变化的主导因素 (表1)。结果表明:①最高温变化是秦岭—淮河地区 热浪年代变化的主导因素,相对湿度变化影响较 弱:②不同区域热浪变化主导因素存在差异。其 中,相对湿度对长江下游热浪变化的贡献率为 0.042,略低于最高温贡献率0.066,明显高于其他分 区相对湿度变化的敏感性,说明长江下游热浪变化 受到最高温和相对湿度共同影响,并且明显区别于 其他区域最高温单因素的影响:③在全球变暖停滞 背景下,2000-2015年秦岭一淮河地区不同分区热 浪频次变化相对于基准期(1960-1990年),均呈现增 加趋势。其中,关中平原和秦巴山地热浪增幅最为 明显,淮河平原和黄河下游热浪增幅相对较弱。由 此可见,秦岭-淮河地区近年来热浪风险增加区, 主要位于关中平原和秦巴山区, 且以最高温年代波 动上升为主导;黄河下游和淮河平原热浪增幅相对 较小,受最高温呈现波动下降影响较大,这与Chen、 Li(2017)分析中国3种热浪类型年代变化研究结论 具有一致性。

#### 4.4 ENSO 对秦岭—淮河地区热浪变化的影响

秦岭一淮河地区位于东亚季风区,东亚夏季风 异常往往给区域带来严重的气象灾害,如2006年夏 季重庆地区遭遇百年不遇高温、2013年长江流域高 温热浪、2016年中国夏季气温创历史新高等。东亚 夏季风异常,受大气内部变率和外源辐射共同作用



图 3 1960-2016 年秦岭-淮河地区热浪空间变化趋势和不同分区趋势分布箱图 Fig.3 Spatial pattern and boxplot of heat wave change in the Qinling-Huaihe region, 1960-2016

分区	10(0,001( 年 执 沪 庙 妆 / 妆	气候团	国子贡献率	<b>执</b> 沪海波亦化变/0/		
	1900-2010 平然很妙仍仅	最高温	相对湿度	—— 然很频伏受化平/%	土守凶系	
关中平原	70	0.091	0.019	16.4	最高温	
黄河下游	70	0.045	0.003	2.0	最高温	
秦巴山区	71	0.064	0.001	18.1	最高温	
淮河平原	70	0.042	0.015	0.4	最高温	
四川盆地	70	0.042	0.011	9.2	最高温	
巫山山区	71	0.043	0.001	8.3	最高温	
长江下游	71	0.066	0.042	6.5	最高温+相对湿度	

表1 秦岭-淮河地区不同分区南北热浪变化的主导因素分析 Tab.1 Dominant climatic factors of heat waves in the Qinling-Huaihe region

注:热浪频次变化率为2000-2016年与基准期(1960-1990)年不同分区热浪频次比较。

(王会军等, 2013)。在众多影响因素中, 厄尔尼诺一 南方涛动被认为是最为关键的因子(Huang et al, 1989; 徐同, 2007; Hu et al, 2013; Wang et al, 2014; Lu et al, 2016; 徐霈强等, 2016)。前期研究发现:中 国夏季气温对ENSO响应存在明显的地域差异,其中 东北、华北、长江流域和华南地区夏季气温与ENSO 的关系在20世纪70年代末、90年代初、21世纪初经 历了3次明显的突变,这与秦岭—淮河地区热浪变化 "非平稳、阶段性"的特征具有一致性(韩文韬, 2013)。此外,在相互作用机理上,孙旭光等(2005)利 用全球大气环流模式模拟发现,厄尔尼诺发展年的 夏季,西太平洋副热带高压偏东较弱,亚洲夏季风 明显加强;厄尔尼诺衰减年的夏季,西太副高西伸 偏强,亚洲夏季减弱。可见,东亚夏季风强弱变化 以及西太副高西伸异常,对秦岭一淮河地区降水和 气温年代异常具有重要影响。在此,选取赤道东太 平洋5个海区表征ENSO事件强度的指标(Niño1+2 区、Niño 3区、Niño 4区、Niño 3.4区和Niño Z区), 从宏观和站点2个尺度,识别不同分区厄尔尼诺变 化与秦岭—淮河地区热浪异常的关系(图4)。

#### 4.4.1 宏观尺度识别

在宏观尺度上,分析1960-2016年秦岭一淮河 地区7个子区域热浪变化与不同分区厄尔尼诺变化 的相关性,识别ENSO事件对区域高温热浪事件趋 势变化影响的差异(表2)。结果表明:①Niño 1+2 区、Niño 3 区、Niño 3.4 区和Niño Z 区与长江下游高 温热浪变化相关性最为密切,与Niño 4 区海温异常 相关性较差。说明长江下游高温热浪与赤道东太



图4 不同分区厄尔尼诺指数位置分布图 Fig.4 Location of oceanic Niño index in the Niño 1+2, Niño 3, Niño 3.4, and Niño 4 regions

表2 秦岭—淮河地区热浪变化与厄尔尼诺指数的相关关系 Tab.2 The relationship of heat waves and El Niño index in the Qinling-Huaihe region

带油穴区	不同分区厄尔尼诺指数相关性											
地理方位	Niño1+2	Niño 3	Niño 4	Niño 3.4	Niño Z							
关中平原	-0.04	0.06	$0.24^{*}$	0.14	0.11							
黄河下游	0.01	0.00	0.05	0.03	0.02							
秦巴山地	-0.07	-0.01	0.20	0.05	0.05							
淮河平原	-0.22*	-0.22*	-0.10	-0.15	-0.20							
四川盆地	-0.19	-0.17	0.03	-0.10	-0.12							
巫山山区	-0.25*	-0.25*	-0.14	-0.21	-0.23*							
长江下游	-0.34**	-0.30*	-0.18	-0.25**	-0.29**							
影响区域	长江下游	长江下游	关中平原	长江下游	长江下游							

注:\*\*为相关系数通过0.05显著性检验,\*为相关系数通过0.10显著性检验。

平洋海温异常关系更为密切;②Niňo4区与关中平 原高温热浪变化相关性远高于其他区域,说明关中 平原高温热浪异常与赤道太平洋西部海温异常关 系更为密切,与长江流域高温热浪异常影响关键区 域不同;③对于黄河下游和秦巴山区,热浪频次变 化与不同分区赤道太平洋海温异常关系较弱,相关 系数均未通过0.05的显著水平检验,说明影响黄河 下游和秦巴山区热浪年代变化的因素更为复杂。

对于 Niňo 4 区海温异常而言,与关中平原、秦 巴山区、黄河下游、四川盆地热浪变化维持弱正相 关,与淮河平原、巫山山区、长江下游热浪变化维持 弱负相关。尽管正负相关程度存在差异,但是可以 看出,随着赤道太平洋海温异常位置偏西,秦岭— 淮河以北地区高温热浪正相关响应逐渐增强,以南 地区高温热浪负相关响应则逐渐减弱。也就是说, 当赤道太平洋西部海温异常偏高时,关中平原、秦 巴山区热浪异常偏高,且海温异常位置越偏西,高 温热浪响应关系越明显。

ENSO事件年际变率存在年代变化。20世纪 20-50年代ENSO为强度偏弱期,空间型南北宽度 为近百年最窄,最大海温异常中心位置偏西;20世 纪70-90年代末,ENSO强度逐渐增强,空间型南北 宽度逐渐增加,对应海温异常位置逐渐偏西;2000 年后ENSO强度在波动中有所下降,但是最大海温 异常位置依然向西偏移(史珩瑜等,2017)。参照国 家气候中心ENSO事件综合量表,1960-2016年赤 道太平洋海温异常逐渐由东部向中西部偏移,可能 是秦岭一淮河地区热浪年代变化的主要原因。即 1994-2016年,关中平原、秦巴山区、巫山山区、四川 盆地4个子区域热浪维持"高位波动",受中部型海 温异常事件增多的影响;而长江下游热浪则经历 "相对偏多"向"相对偏少"的转变,受到Niño 1+2海 温异常事件频率降低的影响。

#### 4.4.2 站点尺度分析

在区域尺度上,秦岭一淮河地区7个子区域高 温热浪序列被平均,区域内热浪变化对ENSO事件 响应的差异会被忽略。因此,从站点尺度出发,绘 制不同分区Niño指数与秦岭一淮河地区热浪相关 性变化箱图,再次验证宏观尺度规律(图5)。

结果表明:①一致性。无论是相关系数,还是 显著性,站点尺度与宏观尺度规律呈现一致性。具 体表现为:由Niño 1+2到Niño 4(海温异常区域从赤 道太平洋东部到中西部),关中平原、秦巴山区热浪 相关性逐渐由负相关转为正相关,淮河平原、四川 盆地、长江下游相关性逐渐下降;长江下游、巫山山 区热浪与不同区域Niño指数均呈现负相关,黄河下 游则与之相反,热浪变化与不同区域Niño指数相关 性均较低;②新规律。从离散角度分析,除巫山山 区、长江下游之外,秦岭一淮河其他区域热浪与 ENSO响应关系差异性相对较大,存在"高显著与低 显著并存,正相关与负相关并存"的现象;从显著水 平分析,淮河平原、四川盆地、巫山山区、长江下游 热浪变化与ENSO负相关相对较高,显著水平高于 0.8的站点多数分布在上述4个子区域,说明秦岭— 淮河以南地区,是ENSO事件响应的热点区域。 4.4.3 不同热浪指标对相关性的影响

为了更好地识别ENSO与秦岭一淮河地区热 浪变化的遥相关关系,在此选取绝对指数(最高温 高于33℃的天数)、相对指数(暖昼日数,高于90%阈 值的天数),与综合热浪指数结果进行对比(图6)。

结果表明:①在相关性方面,高温日数、暖昼日 数和热浪指数与不同分区Niňo指数相关性结果具 有一致性。具体表现为:秦岭—淮河以北地区、秦 巴山区整体以正相关为主;秦岭—淮河以南地区、 淮河平原整体则以负相关为主;②在显著性方面, 秦岭—淮河以北的关中平原和秦巴山区,绝对指标 和相对指标与Niňo4区相关性明显提高;黄河下游 3个指标与不同分区厄尔尼诺指数均维持低相关; 秦岭—淮河以南的淮河平原,高温天数、暖昼日数 和综合热浪指数与Niňo1+2、Niňo3相关均较高; 四川盆地3个指标与不同分区Niňo指数关系维持 稳定,但是巫山山区在综合指标对ENSO响应关系 明显高于其他指标;长江下游地区3个指标与Niňo 1+2、Niňo3相关性均维持高度负相关,与前文结论



Fig.5 Correlation analysis between oceanic Niño index of different sub-regions and heat waves at site scale in the Qinling-Huaihe region

		4	绝对指标(33.0℃)			相对指标(90%阈值)				综合指标(热浪指数)					相关系数		
		B1	B2	B3	B4	В5	B1	B2	B3	B4	B5	B1	B2	B3	B4	В5	○ 正相关
秦岭—淮河 { 以北地区 {	关中平原		0	$\bigcirc$	0	0	a	0	$\bigcirc$	0	0	•	o	0	0	ο	● 负相关
	黄河下游	•	•	٥	٥	•	•	•	a	٥	•	a	٥	٥	٥	٥	○ r≥0.3
秦岭-淮河 { 过渡地区 {	秦巴山区	•	D	$\bigcirc$	0	o	•	D	$\bigcirc$	0	ø	•	•	0	0	a	$\bigcirc 0.2 \leq r \leq 0.30$
	淮河平原			•	•	lacksquare			•	•				•	٠	•	o 0.1≤ <i>r</i> <0.20
秦岭淮河 {	四川盆地	•	•	0	٠	•	•	•	0	•	•	•	•	0	•	•	• 0.0≤ <i>r</i> <0.10
	巫山山区	•	•	-	•	-		•		-	-			•	$\bullet$		□ 通过0 10 見茎
	长江下游			•					•					•			水平检验
注: B1为Niño1+2区,B2为Niño3区,B3为 Niño4区,B4为Niño3.4区,B5为Niño Z区																	

图6 不同分区厄尔尼诺指数与秦岭一淮河地区不同热浪指数的相关性分析

Fig.6 Correlation analysis between oceanic Niño index of different sub-regions and difference heat wave indices in the Qinling-Huaihe region, 1960-2016

具有一致性。由此可以看出,尽管不同热浪指数, 反映热浪特征存在差异,但是关中平原与Niño 4区 海温异常变化呈现正相关,长江下游与Niño 1+2、 Niño 3 区海温异常变化呈现负相关,不同热浪指数 反映的规律并未发生实质性改变。

# 5 结论与展望

## 5.1 结论

利用热浪指数模型,本文对1960-2016年秦岭 一淮河地区热浪时空变化特征进行分析,评估了热 浪年代变化对气候因子的敏感性,进而从宏观和站 点2个尺度,探讨了ENSO事件与不同分区热浪变 化的时空响应关系,主要结论如下:

(1) 在时间变化上,1960-2016年秦岭—淮河地 区热浪呈"非线性、非平稳、阶段性"的变化特征,年 代变化可分为3个阶段:①1960-1972年,区域热浪 呈现东西分异,分界线大致位于112°E,以东地区热 浪异常偏多,以西地区经历"高低交替"的波动变 化;②1973-1993年,全区热浪维持"低位波动",20 世纪80年代中期后呈现快速增加;③1994-2016年, 关中平原、秦巴山区、巫山山区、四川盆地热浪维持 "高位波动",黄河下游、淮河平原和长江下游热浪 则由"相对偏多"向"相对偏少"转变。

(2) 在空间变化上,1960-2016年秦岭—淮河地 区热浪呈现出"西增东减,南北分异"的变化格局。 其中,以"米仓山—大巴山—大别山—淮河"为界, 以北地区热浪升降呈"西增东减",整体变化具有均 一性;以南地区中,长江中下游地区从西向东热浪 变化趋势依次呈现"轻微下降—中度上升—轻微上 升"的经向分布;四川盆地有85.7%的站点热浪呈上 升趋势,从南向北呈现"轻微下降—轻微上升—中 度上升—大幅上升"的纬向分布。

(3) 在主导因素上,秦岭一淮河地区近期热浪 风险增加区,主要位于关中平原和秦巴山区,以最 高温逐年上升为主导因素。与此同时,相对湿度对 长江下游热浪频次年代变化贡献率为0.042,略低 于最高温贡献率0.066,但是远高于其他区域,说明 长江下游热浪变化受最高温和相对湿度共同作用, 且区别于其他区域最高温单因素的影响。

(4) 在影响因素上, Niño 1+2 区、Niño 3 区、 Niño 3.4 区和Niño Z 区与长江下游高温热浪变化相 关程度较高, 与 Niño 4 区海温异常相关性较差。关 中平原热浪变化与 Niño 4 区海温异常关系更为密 切, 与长江流域高温热浪异常影响关键区域相反; 对于黄河下游和秦巴山区, 热浪变化与不同分区赤 道太平洋海温异常关系均较弱。

#### 5.2 展望

关于秦岭一淮河地区热浪时空变化特征研究, 未来还有许多工作需要探索。

(1)干旱与热浪时空耦合规律。干旱一热浪是 典型的多灾种相互作用形式,两者共同放大致灾因 子强度,造成更严重的社会和经济损失(李双双等, 2017)。因此,关注秦岭一淮河地区干旱一热浪时 空耦合特征,识别综合风险管理关键区域,有针对 性地提出适应措施,是未来研究的重要方向之一。

(2) 多环流因素耦合影响分析。热浪异常形成 原因具有复杂性,是多种环流因子共同作用的结 果。本文分析了ENSO与秦岭一淮河地区热浪变 化的关系,未来还应关注印度洋、大西洋海温异常 触发海气相关,明晰多环流耦合影响机制,即北大 西洋涛动、印度洋偶极子、厄尔尼诺对中国南北过 渡带热浪变化的综合影响机制。

(3) 热浪自身特征归因分析。《高温热浪等级 GB/T29457-2012》国家标准中, 热浪指数定义由三 部分构成:"炎热强度变化+炎热程度累积+持续时 间累积"。也就是说, 区域热浪呈现下降趋势, 可能 受到以下3个方面因素影响:高温高湿天气减少, 热 浪炎热程度降低和热浪持续时间缩短。在未来研 究中, 需要构建有效方法对热浪年代变化进行敏感 性分析, 更准确地定量评价秦岭—淮河地区不同区 域热浪变化的主导因素。

#### 参考文献(References)

- 丁一汇, 王绍武, 郑景云, 等. 2013. 中国气候[M]. 北京: 科学 出版社. [Ding Y H, Wang S W, Zheng J Y, et al. 2013. Climate in China[M]. Beijing, China: Science Press.]
- 董思言, 徐影, 周波涛, 等. 2014. 基于 CMIP5 模式的中国地 区未来高温灾害风险预估[J]. 气候变化研究进展, 10(5): 365-369. [Dong S Y, Xu Y, Zhou B T, et al. 2014. Projected risk of extreme heat in China based on CMIP5 models [J]. Climate Change Research, 10(5): 365-369.]
- 韩文韬. 2013. 近 50年中国冬夏气温对 ENSO 响应的年代际 变化特征研究[D]. 南京: 南京信息工程大学. [Han W T. 2013. Research on the interdecadal variation in the response of winter and summer temperature in China to ENSO in recent fifty years[D]. Nanjing, China: Nanjing University of Information Sciences and Technology.]
- 黄大鹏,张蕾,高歌. 2016. 未来情景下中国高温的人口暴露 度变化及影响因素研究[J]. 地理学报, 71(7): 1189-1200. [Huang D P, Zhang L, Gao G. 2016. Changes in population exposure to high temperature under a future scenario in China and its influencing factors[J]. Acta Geographica Sinica, 71(7): 1189-1200.]
- 黄卓, 陈辉, 田华. 2011. 高温热浪指标研究[J]. 气象, 37(3): 345-351. [Huang Z, Chen H, Tian H. 2011. Research on the heat wave index[J]. Meteorological Monthly, 37(3): 345-351.]

李琪,苏欢,史雨涵,等.2016.1961-2010年江浙沪地区夏季

高温热浪时空变化特征[J]. 长江流域资源与环境, 25(3): 506-513. [Li Q, Su H, Shi Y H, et al. 2016. Temporal-spatial change characteristics of summer heatwaves in Jiangsu-Zhejiang-Shanghai region during 1961-2010[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 25(3): 506-513.]

- 李双双,杨赛霓,刘宪锋. 2015. 1960-2013 年秦岭—淮河南 北极端降水时空变化特征及其影响因素[J]. 地理科学进 展, 34(3): 354-363. [Li S S, Yang S N, Liu X F. 2015. Spatiotemporal variability of extreme precipitation in north and south of the Qinling-Huaihe region and influencing factors during 1960- 2013[J]. Progress in Geography, 34 (3): 354-363.]
- 李双双,杨赛霓,刘宪锋. 2017. 面向非过程的多灾种时空网 络建模: 以京津冀地区干旱热浪耦合为例[J]. 地理研究, 36(8): 1415-1427. [Li S S, Yang S N, Liu X F. 2017. Spatiotemporal network modeling in concurrent heat waves and droughts in the Beijing-Tianjin-Hebei metropolitan region, China[J]. Geography Research, 36(8): 1415-1427.]
- 李双双,杨赛霓,刘宪锋,等. 2016. 1960-2014年北京户外感 知温度变化特征及其敏感性分析[J]. 资源科学, 38(1): 175-184. [Li S S. Yang S N, Liu X F, et al. 2016. Changes in outdoor thermal sensation and sensitivity to climate factors in Beijing from 1960 to 2014[J]. Resources Science, 38(1): 175-184.]
- 李双双,杨赛霓,张东海,等. 2015. 近 54 年京津冀地区热浪 时空变化特征及影响因素[J]. 应用气象学报, 26(5): 545-554. [Li S S. Yang S N, Zhang D H, et al. 2015. Spatiotemporal variability of heat waves in Beijing-Tianjin-Hebei region and influencing factors in recent 54 years[J]. Journal of Applied Meteorological Science, 26(5): 545-554.]
- 林霄沛,许丽晓,李建平,等. 2016. 全球变暖"停滞"现象辨 识与机理研究[J]. 地球科学进展, 31(10): 995-1000. [Lin X P, Xu L X, Li J P, et al. 2016. Research on the global warming hiatus[J]. Advances in Earth Science, 31(10): 995-1000.]
- 祁新华, 程煜, 李达谋, 等. 2016. 西方高温热浪研究述评[J]. 生态学报, 36(9): 2773-2778. [Qi X H, Cheng Y, Li D M, et al. 2016. A review of the study on heatwaves in western countries[J]. Acta Ecologica Sinica, 36(9): 2773-2778.]
- 史珩瑜, 张祖强, 任宏利. 2017. 近百年来 ENSO 强度的变化 特征[J]. 气候变化研究进展, 13(1): 1-10. [Shi H Y, Zhang Z Q, Ren H L. 2017. Observed ENSO intensity changes during 1900-2015[J]. Climate Change Research, 13(1): 1-10.]
- 税伟, 陈志淳, 邓捷铭, 等. 2017. 耦合适应力的福州市高温 脆弱性评估[J]. 地理学报, 72(5): 830-849. [Shui W, Chen

Z C, Deng J M, et al. 2017. Evaluation of urban high temperature vulnerability of coupling adaptability in Fuzhou, China[J]. Acta Geographica Sinica, 72(5): 830-849.]

- 孙旭光,杨修群. 2005. El Nino 演变不同阶段东亚大气环流 年际异常型的数值模拟[J]. 地球物理学报, 2005, 48(3): 501-510. [Sun X G, Yang X Q. 2005. Numerical modeling of interannual anomalous atmospheric circulation patterns over East Asia during different stages of an El Nino event [J]. Chinese Journal of Geophysics, 48(3): 501-510.]
- 同丽嘎, 李雪铭, 斯琴, 等. 2017. 高温热浪暴露风险评价: 以 内蒙古包头市为例[J]. 干旱区地理, 40(2): 284-292. [Tong L G, Li X M, Si Q, et al. 2017. Risk assessment of population exposure to heat wave: A case of Baotou City, Inner Mongolia, China[J]. Arid Land Geography, 40(2): 284-292.]
- 王会军, 范可. 2013. 东亚季风近几十年来的主要变化特征 [J]. 大气科学, 37(2): 313-318. [Wang H J, Fan K. 2013. Recent changes in the East Asian monsoon[J]. Chinese Journal of Atmospheric Science, 37(2): 313-318.]
- 王怡, 刘冠秋, 齐熙, 等. 2017. 高温热浪支付意愿人群分异 及其影响因素: 以福州市为例[J]. 气候变化研究进展, 13 (2): 172-180. [Wang Y, Liu G Q, Qi X, et al. 2017. A study on the willingness to pay for heatwaves between different groups and its influence factors: A case of Fuzhou[J]. Advances in Climate Change Research, 13(2): 172-180.]
- 王月华, 李占玲, 赵韦. 2017. 黑河流域非一致性极端高温频 率特征分析[J]. 地理研究, 36(4): 755-764. [Wang Y H, Li Z L, Zhao W. 2017. Non-stationary frequency analysis of extreme high temperature in the Heihe River Basin[J]. Geographical Research, 36(4): 755-764.]
- 吴绍洪, 潘韬, 刘燕华, 等. 2017. 中国综合气候变化风险区 划[J]. 地理学报, 72(1): 3-17. [Wu S H, Pan T, Liu Y H, et al. 2017. Comprehensive climate change risk regionalization of China[J]. Acta Geographica Sinica, 72(1): 3-17.]
- 谢盼, 王仰麟, 刘炎序, 等. 2015. 基于社会脆弱性的中国高 温灾害人群健康风险评价[J]. 地理学报, 70(7): 1041-1051. [Xie P, Wang Y L, Liu Y X, et al. 2015. Incorporating social vulnerability to assess population health risk due to heat stress in China[J]. Acta Geographica Sinica, 70(7): 1041-1051.]
- 徐霈强, 冯娟, 陈文. 2016. ENSO 冷暖位相影响东亚冬季风 与东亚夏季风联系的非对称性[J]. 大气科学, 40(4): 831-840. [Xu P Q, Feng J, Chen W. 2016. Asymmetric role of ENSO in the link between the East Asian winter monsoon and the following summer monsoon[J]. Chinese Journal of Atmospheric Science, 40(4): 831-840.]

- 徐同. 2007. 中国气温的非线性特征及气温异常与热带太平 洋海温异常的关系[D]. 南京: 南京信息工程大学. [Xu T. 2007. The nonlinear characteristics of the surface air temperature over China and the relationships between SSTA over tropical Pacific and China SATA[D]. Nanjing, China: Nanjing University of Information Sciences and Technology.]
- 杨绚, 汤绪, 陈葆德, 等. 2013. 气候变暖背景下高温胁迫对 中国小麦产量的影响[J]. 地理科学进展, 32(12): 1771-1779. [Yang X, Tang X, Chen B D, et al. 2013. Impacts of heat stress on wheat yield due to climatic warming in China [J]. Progress in Geography, 32(12): 1771-1779.]
- 杨续超, 陈葆德, 胡可嘉. 2015. 城市化对极端高温事件影响 研究进展[J]. 地理科学进展, 34(10): 1219-1228. [Yang X C, Chen B D, Hu K J. 2015. A review of impacts of urbanization on extreme heat events[J]. Progress in Geography, 34(10): 1219-1228.]
- 叶殿秀, 尹继福, 陈正洪, 等. 2013. 1961—2010年我国夏季 高温热浪的时空变化特征[J]. 气候变化研究进展, 9(1):
  15-20. [Ye D X, Yin J F, Chen Z H, et al. 2013. Spatiotemporal change characteristics of summer heatwaves in China in 1961-2010[J]. Progressus Inquisitiones de Mutatione Climatis, 9(1): 15-20.]
- 郑景云, 卞娟娟, 葛全胜, 等. 2013. 1981-2010年中国气候区 划[J]. 科学通报, 58(30): 3088-3099. [Zheng J Y, Bian J J, Ge Q S, et al. 2013. The climate regionalization in China for 1981-2010[J]. Chinese Science Bulletin, 58(30): 3088-3099.]
- 郑雪梅, 王怡, 吴小影, 等. 2016. 近 20 年福建省沿海与内陆 城市高温热浪脆弱性比较[J]. 地理科学进展, 35(10): 1197-1205. [Zheng X M, Wang Y, Wu X Y, et al. 2016. Comparison of heat wave vulnerability between coastal and inland cities of Fujian Province in the past 20 years[J]. Progress in Geography, 35(10): 1197-1205.]
- Chen Y, Hu Q, Yang Y M, et al. 2017. Anomaly based analysis of extreme heat waves in Eastern China during 1981-2013[J]. International Journal of Climatology, 37(1): 509-523.
- Chen Y, Li Y. 2017. An inter-comparison of three heat wave types in China during 1961-2010: Observed basic features

and linear trends[J]. Scientific Reports, 7: 45619.

- Hu K M, Huang G, Wu R G. 2013. A strengthened influence of ENSO on august high temperature extremes over the southern Yangtze River valley since the late 1980s[J]. Journal of Climate, 26(7): 2205-2221.
- Huang R H, Wu Y F. 1989. The influence of ENSO on the summer climate change in China and its mechanism[J]. Advances in Atmospheric Sciences, 6(1): 21-32.
- Lehner F, Deser C, Sanderson B M. 2016. Future risk of record-breaking summer temperatures and its mitigation[J]. Climatic Change: 1-13, doi: 10.1007/s10584-016-1616-2.
- Lu R Y, Chen R D. 2016. A review of recent studies on extreme heat in China[J]. Atmospheric and Oceanic Science Letters, 9(2): 114-121.
- Perkins S E, Alexander L V. 2013. On the measurement of heat waves[J]. Journal of Climate, 26(13): 4500-4517.
- Smith T T, Zaitchik B F, Gohlke J M. 2013. Heat waves in the United States: Definitions, patterns and trends[J]. Climatic Change, 118(3-4): 811-825.
- Sun Q H, Miao C Y, AghaKouchak A, et al. 2017. Unraveling anthropogenic influence on the changing risk of heat waves in China[J]. Geophysical Research Letters, 44(10): 5078-5985.
- Sun Y, Zhang X B, Zwiers F W, et al. 2014, Rapid increase in the risk of extreme summer heat in Eastern China[J]. Nature Climate Change, 4(12): 1082-1085.
- Wang W W, Zhou W, Chen D L. 2014. Summer high temperature extremes in Southeast China: Bonding with the El Niño- Southern oscillation and East Asian summer monsoon coupled system[J]. Journal of Climate, 27(11): 4122-4138.
- 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.
- You Q L, Jiang Z H, Kong L, et al. 2017. A comparison of heat wave climatologies and trends in China based on multiple definitions[J]. Climate Dynamics, 48(11-12): 3975-3989.

# Spatiotemporal variability of heat waves and influencing factors in the Qinling–Huaihe region, 1960–2016

LI Shuangshuang<sup>1,2</sup>, YAN Junping<sup>1,2</sup>, YANG Saini<sup>3</sup>, HU Shushan<sup>1,2</sup>, ZHAO Yi<sup>1,2</sup>

(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. State Key Laboratory of Earth Surface Processes and Resource Ecology, Beijing Normal University, Beijing

100875, China)

Abstract: In the context of global warming, the likelihood of concurrent heat waves is expected to increase in most parts of China, which will have social and environmental impacts. However, heat wave characteristics are likely to vary regionally. Based on maximum daily temperature and relative humidity data from 134 meteorological stations for the 1960-2016 period, the spatiotemporal variation in heat waves was investigated for the Qinling-Huaihe region. We also analyzed the relationship between El Niño-Southern Oscillation (ENSO) and heat waves. We found that the heat waves in the past 57 years in the study region can be characterized as nonsmooth and non-linear. Three distinct phases of decadal change were identified. During the first phase (1960-1972), with 112°E as the dividing line, heat waves were highly variable with alternating highs and lows in the western part of the region, but occurred at high frequency in the eastern part. During the second phase (1973-1993), heat waves showed low-amplitude fluctuations across the entire region, and rapidly increased in the mid-1980s. The third phase (1994-2016) saw high-amplitude fluctuations in heat waves in the western part of the region, but heat waves decreased in the eastern part. Our results show that over the entire region, the extremes in heat have been more sensitive to daily maximum temperature than regional relative humidity changes. Thus, the cooling of daily maximum temperature along the Huai River led to a decreasing heat wave spatial extent. There was also a notable difference in the relationship between ENSO and heat waves in the Qinling-Huaihe region: a strong positive correlation in the north and a weak negative correlation in the south were observed. Particularly, heat waves on the Guanzhong Plain have been closely related to Niño 4, whereas the relationship has been weak along the lower reach of the Yangtze River. The Niño 1+2 and Niño 3 indices showed significant negative correlations with heat waves across the lower reach of the Yangtze River. In the lower reach of the Yellow River and Qinling-Daba Mountains, the variations in heat waves have been weakly correlated with equatorial Pacific sea surface temperature anomalies. In addition, there has been more close relationship between temperature anomalies of equatorial Western Pacific and decadal variation of heat waves on the Guanzhong Plain in recent decades, which has contributed to enhanced warming on the Guanzhong Plain and along the lower reach of the Yangtze River.

Key words: heat wave; spatiotemporal analysis; ENSO; Qinling-Huaihe region