

基线选择对热浪事件计算方法的影响

陈远¹, 范宏翔¹, 彭凯¹, 邓建明¹, 彭霖虹²

(1.中国科学院 南京地理与湖泊研究所, 南京 210008; 2.重庆亿森动力环境科技有限公司, 重庆 400000)

摘要:热浪已成为世界上危害性最大的自然灾害之一,近年来全球都经历了日益刷新纪录的热浪事件,然而学术界还没有统一热浪定义.基于对目前还存在争议的热浪基线选择(即参考气候背景)进行研究.通过统计 1951—2022 年我国 692 个气象站逐日平均气温数据,基于分位数法对比了固定基线、变化基线和滑动基线 3 种方法对于暴发频次、持续天数、最大强度和热浪间隔时间等 4 个关键热浪指数进行比较.结果显示,受全球变暖的影响,固定基线法(选择 1951—1980 年为气候背景计算相对阈值)倾向于提高当前热浪发生概率的估计,而变化基线法(以历史所有数据作为气候背景计算依据)和滑动基线法(以每年的前 30 a 数据作为基线计算依据)则能在一定程度上考虑温度平稳变化的影响;3 种基线计算方法得到的热浪指数仅在绝对值上存在显著差异,而对于热浪指数长期变化趋势、空间分布规律等具有高度的一致性.基于生物在长期进化中具有适应环境的特点,建议采用滑动基线法将一段时期的气候态背景作为热浪判断依据,重点关注热浪造成的生物的响应和生态影响.

关键词:极端事件;热浪定义;逐日气温;气候基线

中图分类号: P467

文献标志码: A

文章编号: 1000-2367(2025)01-0125-11

高温热浪已经成为近年来影响最为深远的自然灾害之一.2003 年热浪席卷欧洲,意大利 6 月份气温比常年同期偏高 6 °C 至 10 °C,瑞士气温创 200 a 内最高,法国高温为 150 a 来所未见;2006 年 7 月美国发生热浪;2010 年 7 月俄罗斯热浪;2013 年热浪席卷我国中部地区 9 个省份,35 °C 以上高温天气连续 31 d,受影响人口超过 5 亿;2018 年 7 月 14 日至 8 月 15 日,中国、美国、日本、瑞典等多国遭遇高温热浪;2019 年 6 月 28 日法国的气温高达 46 °C,打破了以往的记录;2021 年加拿大热浪发生期间不列颠哥伦比亚省出现了 49.5 °C 的极端高温;2022 年 6 月以后,亚洲、西欧、北美、非洲、南半球、两极等均出现了刷新历史纪录等热浪高温事件;2023 年 7 月以后,全球气温一直处于前所未有的水平,北美、亚洲部分地区以及整个北非和地中海地区本周连续多日气温超过 40 °C.与此同时,海洋中发生的热浪事件也在加剧,1925—2016 年间,全球每年的海洋热浪天数增加了 50% 以上,从 1982 年有卫星记录以来,近三分之二海洋出现了海洋热浪加剧^[1].

全球变暖背景下,热浪事件将变得更加频发、持久^[2].DING 等^[3]基于台站观测结果,认为西北太平洋副热带高压的增强导致中国东部热浪出现异常高频率.厄尔尼诺-南方涛动-季风耦合系统(包括东亚季风、副热带高压、东亚急流和南亚高压)对中国东南地区热浪的年际变化进行了调控^[4].最近的一项案例研究显示,东亚急流的极地位移与副热带高压的显著西延有关,是 2003 年和 2006 年夏季中国西南和东南部地区热浪事件的主要原因^[5].上述资料显示近 20 a 来热浪事件的强度和发生范围均在显著增加,世界气象组织也警告称随着人类活动对气候影响的加剧,热浪事件的频率、持续时间和强度都将增加.

收稿日期: 2023-08-31; **修回日期:** 2023-12-20.

基金项目:国家重点研发计划(2022YFC3202004);国家自然科学基金(42220104010).

作者简介:陈远(1988—),男,江苏泗洪人,中国科学院南京地理与湖泊研究所工程师,研究方向为信息学,E-mail:ychen@niglas.ac.cn.

通信作者:彭凯,E-mail:kpeng@niglas.ac.cn.

引用本文:陈远,范宏翔,彭凯,等.基线选择对热浪事件计算方法的影响[J].河南师范大学学报(自然科学版),2025,53(1):125-135.(Chen Yuan,Fan Hongxiang,Peng Kai,et al.Comparation among differences methods of heat wave events estimation[J].Journal of Henan Normal University(Natural Science Edition),2025,53(1):125-135. DOI:10.16366/j.cnki.1000-2367.2023.08.31.0002.)

通俗来说,热浪是指温度异常偏高,但是在国际上没有一个公认的定义,世界气象组织(WMO)将热浪定义为日最高气温超过 32 ℃ 且持续 3 d 以上的天气,因为流行病学证据发现,连续至少 3 d 的高温与死亡率的增加有关.在我国,中短期天气预报通常采用日最高气温大于等于 35 ℃ 作为热浪的绝对温度阈值^[6].由于不同纬度带温度差异显著,因此基于当地气温百分位而不是绝对阈值的热浪指数更有助于反映当地生态系统对区域热浪事件的适应程度,可以在全球范围内应用^[7],因此受到广泛的使用.与分位数提出相对阈值类似,也有学者基于概率统计以偏离均值超过一定倍数的方差来判定^[8],这种方法考虑了数据分布变异程度,也有相应的理论作为支撑^[9].

近日,Nature 期刊相继刊登了 3 篇文章对热浪的定义进行讨论,争论的主要焦点在于热浪温度对比的基线选择.AMAYA 等^[10]认为由于全球变暖的事实,平均温度将逐步上升,因此如果按照固定的基线进行判定,那么按照模式计算未来 100 a 后每天都将处于热浪之中,所以应该使用去趋势之后的数据进行基线对比;BURROWS^[11]则认为为了使研究具有可比性,不应该更改基线,而是统一选择固定的基线进行研究(例如 1980—2010 年的气候态作为判断的基准);LI 等^[12]认为应该根据对物种的影响程度进行基线的选择.我们认为 LI 等^[12]的基准比较复杂,而且研究结果会因关注的物种不同而差异显著,不利于学科、区域间开展对比研究.而 AMAYA 等^[10]和 BURROWS^[11]推荐的基线选择方案则均具有更广泛的用途.

但根据以往的温度观测记录,虽然全球温度具有显著增加的趋势,但其变化过程并非平稳增加,而是处于一种波动状态,例如 1998—2012 年间全球曾出现了长达 15 a 的增温停滞期^[13],因此采用简单的线性趋势来选择基线可能有利于评估未来的热浪变化对生态系统的影响,但对于历史时期的评估可能会带来误差.世界气象组织(WMO)考虑到现代气象观测时间大都在世纪尺度内,规定了气候态或气候标准态一般用 30 a 的天气或气候要素平均得到.为此,提出了一种新的热浪计算思路,即采用滑动的基线作为判断热浪的依据.该思路的出发点主要是基于生物在长期进化中具有适应环境的特点,将一段时期的气候背景作为热浪判断基线,重点关注热浪造成的生物响应和生态影响.BURROWS^[11]认为当前还不确定使用固定的基线和变化的基线是否会对热浪分析的结论产生影响,因此本文通过利用中国 1951—2022 年共 72 a 的逐日观测数据,从热浪频次、持续时间、强度、重现时长等角度比较了文献^[10—11]的固定基线和动态基线的评估结果,以及本文提出的滑动基线对于热浪计算结果之间的差异.

1 材料与方法

1.1 数据获取

1951—2022 年逐日平均气温数据由中国气象数据共享网提供.由于本研究基于逐日气温数据计算,因此剔除缺失值大于 5% 的点位,最终纳入计算的气象站点共 692 个.

1.2 热浪计算方法

对于热浪的计算采用以下 3 种方法.假设对于任意站点 k ,其温度序列记为 $_kT_{y,i}$,其中 k 为气象站点编号; y 为年份,取值范围 1951 至 2022; i 表示为 y 年中的第 i 天,取值范围 1 至 366(平年 365,闰年 366).以 1951—1980 年间相应第 i 天温度组成温度序列,选取 90 分位数作为固定基线法偏热的阈值.对于变化基线具体算法,作者在文中并没有给出详细的介绍^[10],事实上同时考虑季节变化与长期趋势,很难计算出一个稳定的斜率,因此本文从 1980 年开始,选取 1951 年至 y ($y > 1951$) 年所有年份对应第 i 天温度组成的序列 90 分位数作为变化基线法偏热的阈值,该方法纳入计算阈值的样本随着年份的增加,其纳入计算分位数的数据也逐渐增加,历史期间所有资料均能影响分位数的取值.本文提出的滑动基线法,从 1980 年开始选取 ($y - 29$) 至 y ($y > 1980$) 年(共 30 a)的第 i 天温度组成序列,取 90 分位数作为第 i 天偏热的阈值.

滑动基线法与变化基线法最大的区别在于:滑动基线法阈值只受到前 30 a 数据的影响,而变化基线法阈值受到分析年份前所有数据的影响.因为滑动基线法需要前 30 a 作为起始,本文对于极端事件的分析从 1980 年开始.根据上述 3 种方法得到的阈值,连续 3 d 及以上温度大于 90 分位数的偏热日记为一次热浪事件.热浪频次、强度和重现时间是常用的评估热浪的 3 个指标.本文热浪频次指一定时间内热浪发生的次数(如每月、每年等);热浪强度为热浪发生期间偏离基线的最大值;热浪重现时间为每两次热浪之间的天数,然

后求年内所有重现时间的平均值.

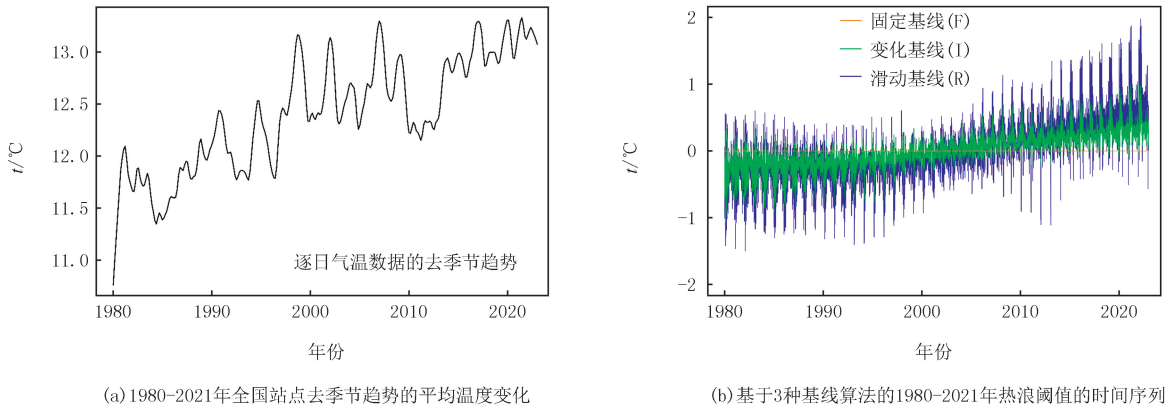
1.3 统计方法

本文采用 Sen's 斜率估计和 M-K 检验相结合的方式进趋势检验^[14],二者均是稳健的非参数趋势估计方法,该方法高效且对于测量误差和离群数据不敏感,常被用于长时间序列数据的趋势分析中;差异显著性检验采用 t 检验.热浪指数的空间分布采用反距离加权法(inverse distance weighting, IDW), IDW 是一种常见的空间插值方法,常用于将已知分散的样点数据插值为连续的地表或地下场景^[15].数据分析和绘图采用 R 4.3.1 进行^[16].

2 结 果

2.1 3 种方法得到的基线差异

根据去季节趋势的逐日温度数据,1980—2022 年间,我国平均温度呈现显著上升的趋势,其中增温大致可以分为以下几个阶段:1980—1985 年间有一段下降趋势,但后面迅速上升直到 1992 年左右,后面波动变化(图 1);1997—2012 年间大致有一段增温停滞期,这与全球纪录的增温停滞一致^[13],此后温度又进一步迅速上升.近 10 a 观测到的温度是自 1980 年以来最高的 10 a.



(a) 1980—2021 年全国站点去季节趋势的平均温度变化

(b) 基于 3 种基线算法的 1980—2021 年热浪阈值的时间序列

图1 气温长期变化趋势及 3 种基线算法的长期趋势

Fig.1 The long-term trend of temperature changes and three baseline algorithm trends

除了固定基线由于采用固定气候背景、基线距平值没有变化外,变化基线和滑动基线法得到的偏热日的温度阈值距平值在 1980—2022 年间存在较大的波动.变化基线由于将以往的所有观测数据均纳入考虑,所以其变化幅度较小;而滑动基线则只考虑近 30 a 的观测资料,所以 1980—2022 年间其基线波动很大.变化基线和滑动基线的变化趋势大致与气温的长期变化趋势一致(图 1),因此说明这 2 种方法均能在一定程度上规避全球变暖趋势对于极端热浪的影响.

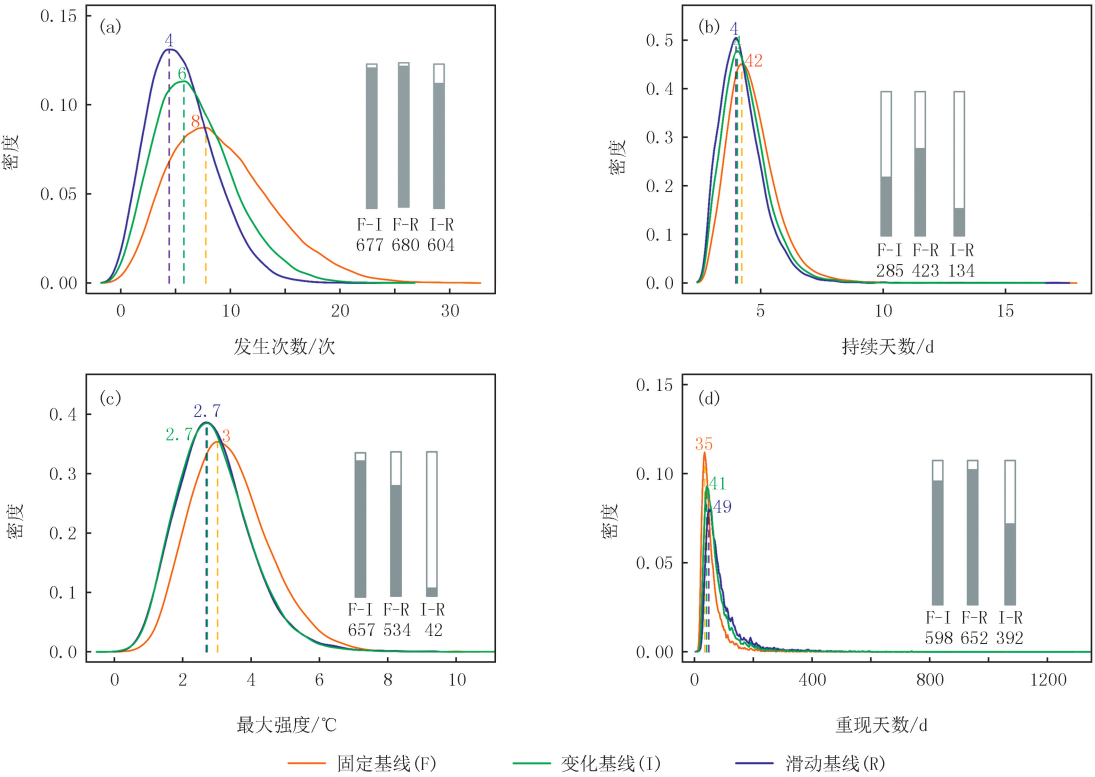
2.2 热浪事件各个指标整体分布

根据 3 种方法计算得到的热浪次数、持续天数、热浪强度和重现天数整体分布类似(图 2),但各个指数的绝对值存在差异.基于固定基线法热浪发生次数众数为 8 次,变化基线为 6 次、滑动基线法为 4 次,变化基线和滑动基线法存在显著差异的站点最少(604 个);固定基线方法得到的年平均持续天数众数为 4.2 d,变化基线和滑动基线计算结果接近,大约为 4 d,变化基线和滑动基线计算得到的持续天数存在显著差异的站点为 134 个;热浪最大强度变化基线和滑动基线得到的结果基本一致(2.7 °C),存在显著性差异的站点仅为 42 个(~6%),而且显著低于固定基线计算的最大强度(3.0 °C);重现天数固定基线法最短(35 d),其次为变化基线算法(41 d),最长的为滑动基线算法(49 d).从上述结果可以看出,在各个指数中,变动基线和滑动基线得到的结果最接近,而固定基线得到的结果普遍多于另外 2 种算法.

2.3 热浪事件长期趋势

基于全国各个站点年平均值,3 种基线法计算 1980—2022 年间热浪指数长期变化趋势基本一致(图 3).固定基线计算的热浪次数显著上升($\tau=0.67, p<0.01$),增加速率为 2.1 d/10 a (Sen's slope, $p<0.01$);变化

基线计算的热浪次数同样显著上升($\tau=0.52, p<0.01$),但上升速率要低于固定基线法(1.2 d/10 a);滑动基线计算得到的热浪次数虽然也呈上升趋势($\tau=0.29, p<0.05$),但主要集中在 1983—1999 年,整个研究期间上升速率也显著低于其他 2 种基线法(0.6 d/10 a).固定基线法计算的热浪持续天数总体呈上升趋势($\tau=0.53, p<0.01$),尤其是 1980—2002 年;基于变化基线和滑动基线法计算的趋势要低于固定基线法, τ 值分别为 0.39 和 0.23.固定基线法计算得到的热浪最大强度 1980—2022 年显著增加($\tau=0.52, p<0.01$),增加速率为 0.28 $^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$;基于变化基线法和滑动基线法计算的最大强度长期变化趋势基本一致,增加速率分别为 0.19 和 0.13 d/10 a.3 种方法计算的热浪重现天数在 1980—1983 年间由约 60 d 显著增加至大于 100 d,说明这段时期热浪出现概率下降;然后迅速下降直到 2002 年;2002—2022 年间,3 种方法计算的热浪重现天数变化不大.



注:图中灰色柱形图阴影部分表示两种基线算法存在显著差异的站点数.

(a) 发生次数; (b) 连续天数; (c) 最大强度; (d) 重现天数.

图2 3种基线算法得到热浪指数的总体分布

Fig.2 The overall distribution of heatwave index obtained by three baseline algorithms

通过对于 3 种基线计算结果可知,固定基线计算得到的指数变化趋势强于变化基线,滑动基线计算的结果是最缓和的方法.

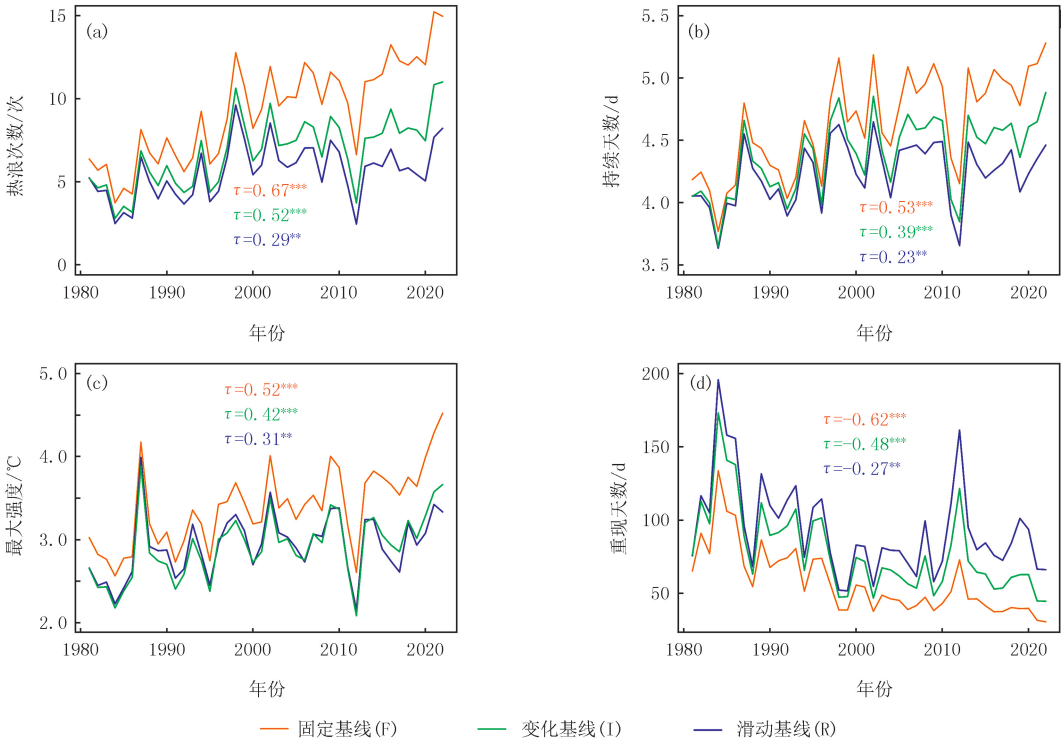
1980—2022 年间,全国各个站点热浪指数长期变化趋势基本一致,且趋势强度(τ)相对集中,但不同基线法计算得到的具体数值两两间存在显著差异(图 4).

2.4 热浪事件空间差异

在所有 692 个气象观测站点中,统计每个月最多同时出现热浪的总站点数,其中同时发生热浪站点数较多的月份为 1 月到 4 月(图 5),最近 20 a 站点数通常超过 300 个,这与近年来我国常发生大区域的暖冬和暖春的感觉是一致的;6 至 8 月的站点总数要少于其他月份,说明夏季不是我国热浪主要的发生季节(但对经济社会影响最大的通常发生在夏季).基于 3 种基线法得到的站点总数按照大小顺序依次为:固定基线法、变化基线法、滑动基线法.但 1980—2022 年间总体变化趋势和波动规律均非常相似,例如 2010 年以后普遍出现站点数显著的现象.

根据反距离加权法计算我国热浪发生强度的空间分布显示(图 6),东北地区要略高于其他地区,其他热浪指数的情况在全国范围内基本一致,没有明显的地区和空间差异.从热浪各个指数的多年平均值空间分布

来看,3 种基线法计算的热浪指数空间分布规律基本相同,绝对值大小的差异与全国平均值差异相似。



注:**代表 $P<0.01$;***代表 $P<0.001$,全文同。

(a) 热浪次数; (b) 持续天数; (c) 最大强度; (d) 重现天数。

图3 不同基线法计算热浪指数长期变化规律

Fig.3 The long-term variation patterns of heatwave index calculated by different baseline methods

1980—2022 年间,热浪指数长期变化趋势的空间差异要大于绝对值的空间分布(图 7)。我国东部地区的热浪次数上升趋势要高于东北、西南等区域;热浪持续天数东北地区的速率要低于我国东南部区域;东部沿海和中部地区热浪最大强度上升趋势要比其他地区显著;而且东部地区的热浪重现天数下降也比其他区域明显。不同基线法计算得到的热浪指数的长期变化趋势在空间上分布规律也相同,只是趋势的绝对值大小差异明显。

2.5 增温对于热浪事件的贡献

通过将热浪各个指数与气温、风速与降雨等气象要素长期变化趋势进行回归分析,发现与气温长期趋势显著相关(图 8)。固定基线计算的热浪次数、持续天数、最大程度长期趋势与气温趋势呈正相关,决定系数分别为 0.79,0.41 和 0.29($p<0.01$),重现天数长期趋势与气温趋势呈负相关,决定系数为 0.78($p<0.01$)。基于变化基线计算的热浪指数长期趋势与气温趋势的关系和基于固定基线的结果一致,只是决定系数要小于后者。基于滑动基线计算的结果与其他 2 种基线算法结果一致,但决定系数是 3 种基线方法中最小的。上述结果说明我国各个气象站点的热浪指数主要受到温度变化的影响。

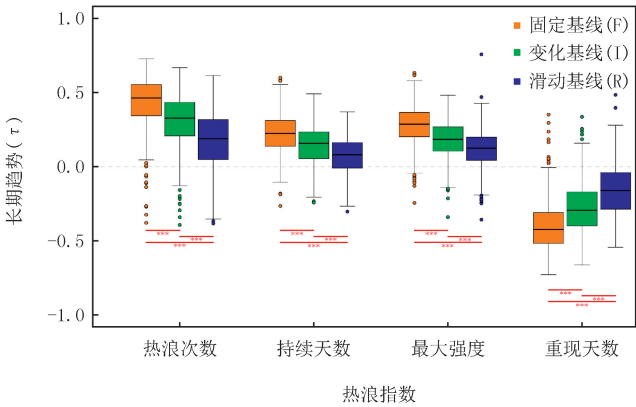


图4 全国692个气象观测站热浪次数的长期变化趋势强度分布

Fig.4 The long-term variation and intensity distribution of heatwave frequency across 692 national meteorological observing stations

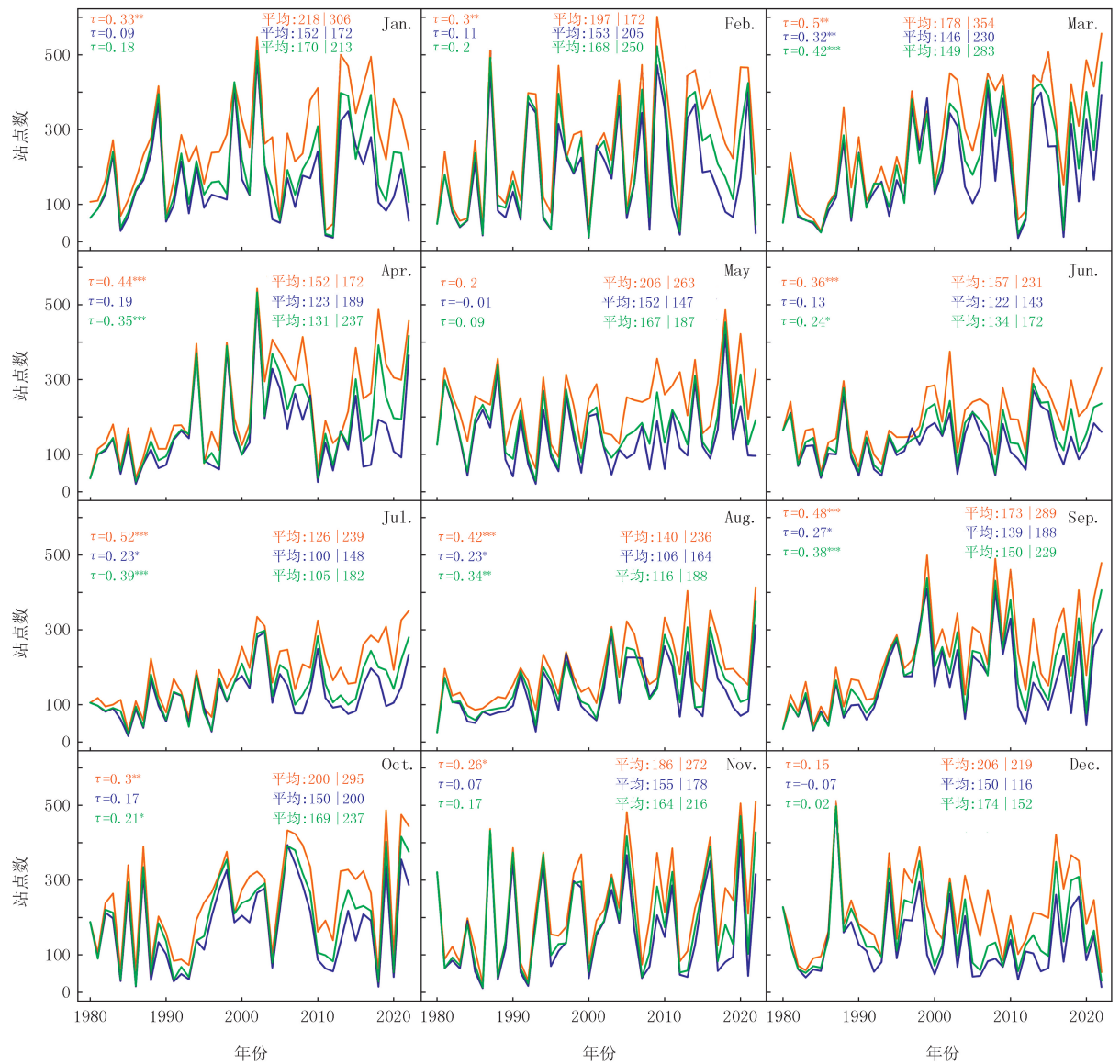


图5 不同基线方法计算全国同时发生热浪站点数逐月长期变化趋势比较

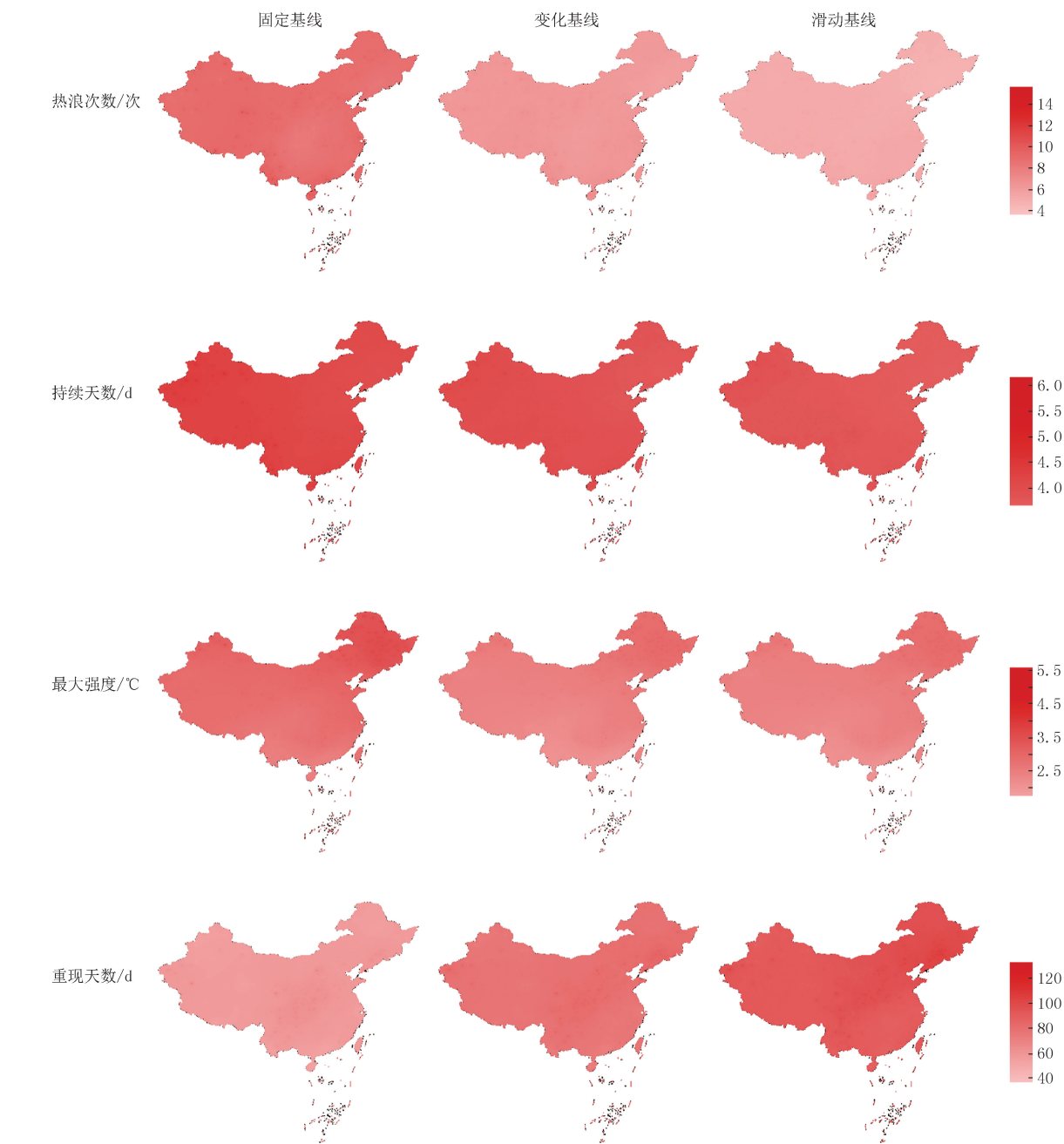
Fig.5 Comparison of long-term monthly trends in the number of nationwide concurrent heatwave occurrences calculated by different baseline methods

3 讨论

3.1 1980 年至 2022 年间我国热浪呈加剧趋势

基于全国 753 个站 1961—2010 年夏季逐日最高气温资料表明我国夏季高温热浪的频次、日数和强度总体呈增多、增强趋势,20 世纪 60 至 80 年代前期高温热浪频次和强度呈减少(弱)趋势,80 年代后期以来,高温热浪频次和强度呈增多(强)趋势^[17].与上述研究一致,本文通过比较固定基线、变化基线和滑动基线 3 种基线法均显示 1980—2022 年间我国热浪呈现加剧趋势,包括热浪次数和持续时间增加、强度增大、热浪重现的时间缩短等.在空间上,自 20 世纪 90 年代以来我国高温热浪的范围明显增大^[17],与图 6 结论一致.上述热浪的变化趋势也与日常生活体验一致.但值得注意的是,人们对于热浪的关注主要源自于热浪对人类身体健康产生了影响,甚至诱发死亡,因此这类热浪常发生在夏季.本文结果显示,3 种基线方法结果均显示冬春季的热浪事件加剧趋势更为明显(图 5).虽然这个时期发生的热浪通常不会对人体健康产生直接的负面影响,但根据历史观测显示,由于气候变化的短期记忆效应^[18],冬春季发生的热浪事件同样有可能影响随后的夏

季,加剧其他自然灾害.

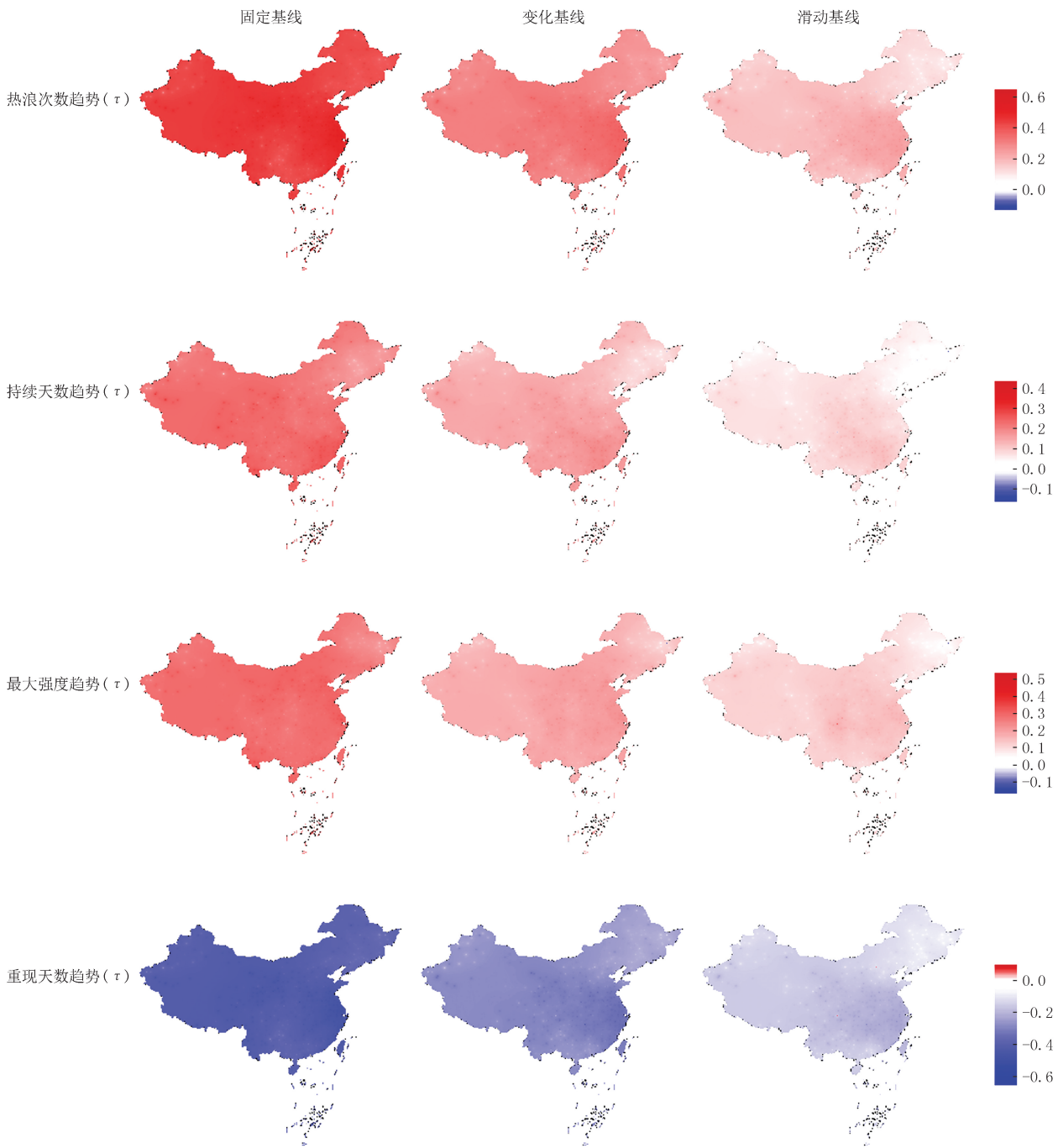


注:审图号为GS(2024)0650号(底图无修改).

图6 热浪指数多年平均值的空间分布

Fig.6 Spatial distribution of the multi-year average of heatwave index

世界天气归因组织(WWA)表示近年来热浪事件频发是全球变暖的直观反映,气候变化已经使亚洲部分地区极端热浪的发生概率增加了 30 倍^[19].在风速、降雨和气温等指标中,本文基于 3 种基线方法的结果也显示温度上升是造成热浪加剧的主要原因(图 8);基于华北及周边地区 169 个气象站 1960—2018 年逐日气象数据,2000 年之后黄淮海平原相对湿度降低,但热浪日数却有增多,表明 2000 年之后该区域热浪增多主要受最高气温升高的影响^[20].一项基于温度变化的标准差分布的研究表明,由于全球变暖,只要略微升高,气温的概率分布就会发生显著变化,迄今最极端和最危险的热浪已经增加了 50 倍,在过去极少发生的可怕热浪事件,如今已经变得稀松平常,出现的地区占全球范围的 10%^[21].基于数学模型推演的研究同样认为平均温度升高是极端事件频发的主要原因^[22].



注:审图号为GS(2024)0650号(底图无修改).

图7 热浪指数多年变化趋势的空间分布

Fig.7 Spatial distribution of the multi-year trend in heatwave index

3.2 3 种不同基线计算方法的比较

标准偏差法和分位数法均是选择相对阈值来判断热浪是否发生,二者的区别在于按照偏离标准差的方法,若温度分布比较集中,则偏离标准差法获得的离群值数量相对较少.而从本质上来说,分位数法则一定能选出固定比例离群值.通过文献调研,相比于偏离标准差法确定阈值,分位数法确定偏热阈值运用的更为广泛.虽然本文没有对比标准差法和分位数法的差异,但基于分位数得到的热浪变化趋势与我们现实体验基本一致,说明分位数法适用于当前评估热浪的研究.

在分位数法中,固定基线法是最为常用的热浪判断依据,也是国际气象组织推荐的热浪评估方法^[11],其特点是偏热日判断的阈值只与选择的分位数有关(例如 90 分位数、95 分位数等),而不会随着年份发生变化.

在实际使用过程中,一般会选择某 30 a 作为气候背景,目前推荐使用 1981—2010 年作为当代的气候背景.在实际使用过程中,也有学者选择所有年份作为固定基线计算依据^[23],例如 WANG 等^[24]在分析夏季热浪时选取了 1960—2012 年共 53 a 的夏季逐日数据进行热浪阈值计算.本研究中,基于固定基线法得到的结论是 3 种基线法中热浪变化趋势最为强烈的,说明在当前全球变暖大背景下,固定基线法会提高当前热浪发生概率的估计.

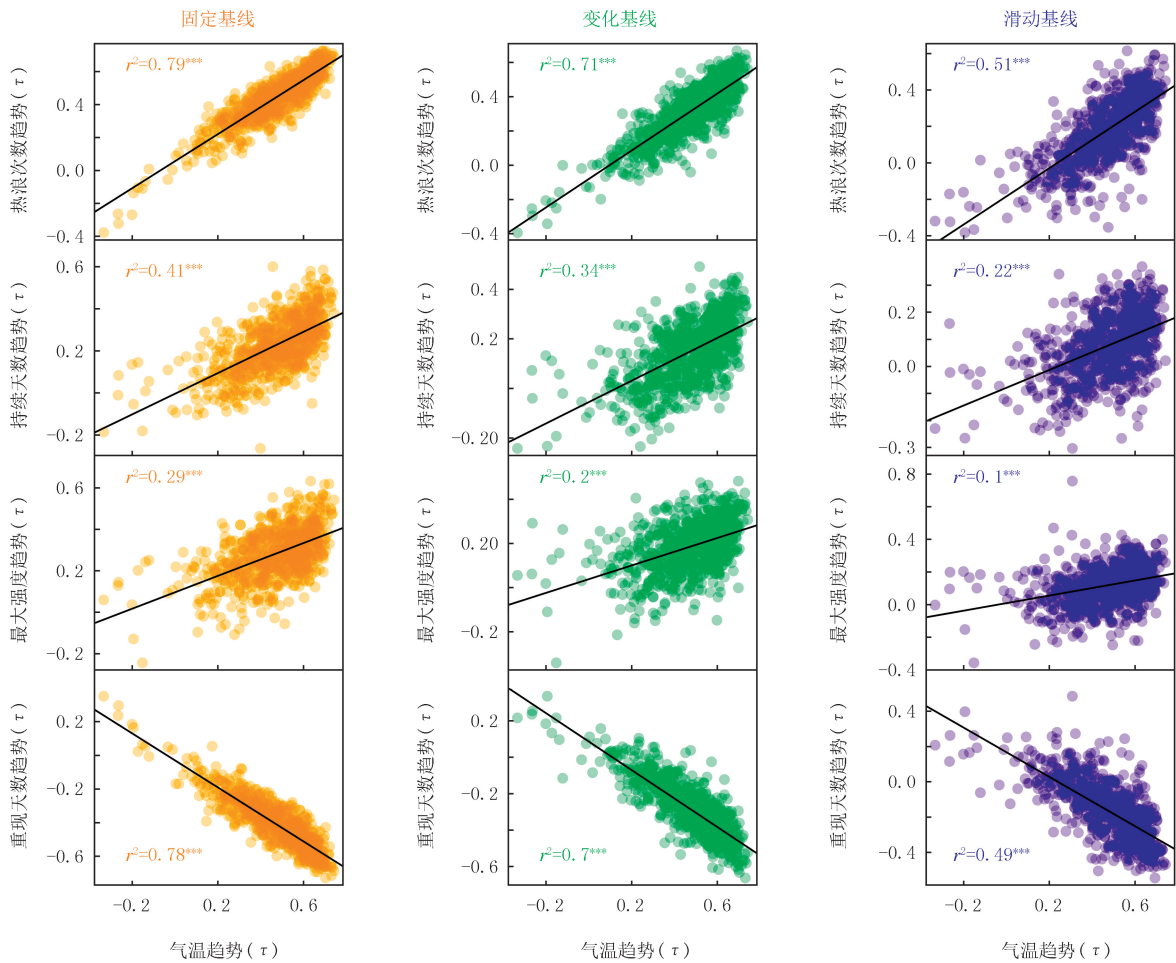


图8 气温上升对热浪指数变化的影响

Fig.8 Impact of temperature rise on the variation of heatwave index

变化基线的提出是因为越来越多的学者意识到,由于全球变暖,气候的基本状况也在发生变化,以往被认为热浪的情况有可能已经成为常态.基于排放情景预测,若按照固定基线法判定,未来 100 a 后有可能每天都处于热浪之中^[10],因此建议在评估热浪时首先要剔除气候变化的长期趋势,但目前在实际使用过程中如何剔除气候变化的长期趋势还没有很好的思路,而且近年来发生的全球变暖也是波动变化,并没有一个平稳的趋势.本文的结果显示变化基线法得到热浪发生频次、强度等的结论与固定基线法基本一致,只是指数的绝对值存在差异;而对于热浪长期变化趋势与固定基线法相比要缓和得多,主要是因为变化基线法逐年更新了基线计算的样本,在一定程度上考虑变暖的趋势.同时该方法有可能出现同样的温度在以前的年份被判定为热浪事件,而在后期由于样本变化使得不再被判定为热浪事件,滑动基线法也会存在类似的现象.

滑动基线法是基于生态系统会对环境变化具有一定的适应能力提出的热浪判定依据.通过对比 3 种方法得到的基线变化趋势,可知全球变暖是导致热浪事件发生的主要驱动因素.滑动基线法能考虑温度的长期变化趋势(图 1),剔除平均温度增加对热浪指数的影响,展示气候变化背景下随着温度的增加,热浪事件也随之增加.热浪事件与温度波动增加^[25]、极端温度增加^[26]等一起均为气候变暖的特征.本文基于滑动基线法得到热浪的规律与前面 2 种方法基本相似,只是在热浪长期变化趋势上要比其他 2 种方法都要缓和,这也符

合热浪造成危害程度大小的变化趋势.例如 GREEN 等^[27]关于 2 次极端热浪事件对于死亡率造成影响的研究,发现第 2 次热浪的影响要小于前 1 次;同样,ZHAN 等^[28]对海洋 2 次热浪的研究发现前后发生热浪事件的影响存在差异.这是因为对于同样强度的热浪事件,后期热浪产生的负面影响通常要小于前者^[29],因为生物、人类社会等都能在首次发生后做出适应性改变^[30].但是与另外 2 种方法相比,该方法也存在对于计算机算力要求高的不足,尤其是在进行长时间、大范围的热浪评估时需要耗费较长的时间才能算出结果,后期将从算法优化等角度提高计算效率.

总的来说,基于本文的研究,3 种不同基线方法得到热浪的结论不会产生本质差异,在热浪指数长期趋势等方面也具有较高的一致性,因此在做热浪趋势分析时研究人员可以根据需要选择自己的方法.但是,从生物适应性角度研究热浪的生态影响的,建议选用滑动基线法.

参 考 文 献

[1] VIGLIONE G.Fevers are plaguing the oceansand climate change is making them worse[J].Nature,2021,593:26-28.

[2] KWON M,JHUN J G,HA K J.Decadal change in east Asian summer monsoon circulation in the mid-1990s[J].Geophysical Research Letters,2007,34(21):L21706.

[3] DING T,QIAN W H,YAN Z W.Changes in hot days and heat waves in China during 1961-2007[J].International Journal of Climatology,2010,30(10):1452-1462.

[4] WANG W W,ZHOU W,CHEN D L.Summer high temperature extremes in Southeast China;bonding with the el Nino-southern oscillation and East Asian summer monsoon coupled system[J].Journal of Climate,2014,27(11):4122-4138.

[5] WANG W W,ZHOU W,LI X Z,et al.Synoptic-scale characteristics and atmospheric controls of summer heat waves in China[J].Climate Dynamics,2016,46(9):2923-2941.

[6] 刘绿柳,孙林海,廖要明,等.国家级极端高温短期气候预测系统的研制及应用[J].气象,2008,34(10):102-107.

LIU L L,SUN L H,LIAO Y M,et al.Development and application of national prediction system for extreme high temperature[J].Meteorological Monthly,2008,34(10):102-107.

[7] ANDERSON B G,BELL M L.Weather-related mortality:how heat,cold,and heat waves affect mortality in the United States[J].Epidemiology,2009,20(2):205-213.

[8] HANSEN J,SATO M,RUEDY R.Perception of climate change[J].Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America,2012,109(37):E2415-E2423.

[9] GAINES S D,DENNY M W.The largest,smallest,highest,lowest,longest,and shortest:extremes in ecology[J].Ecology,1993,74(6):1677-1692.

[10] AMAYA D J,JACOX M G,FEWINGS M R,et al.Marine heatwaves need clear definitions so coastal communities can adapt[J].Nature,2023,616(7955):29-32.

[11] BURROWS M.Marine heatwaves:definition duel heats up[J].Nature,2023,617(7961):465-465.

[12] LI T T,TONG S L,SHI X M.Marine heatwaves;base definitions on ecosystem damage[J].Nature,2023,618(7963):30.

[13] WINSLOW L A,LEACH T H,ROSE K C.Global lake response to the recent warming hiatus[J].Environmental Research Letters,2018,13(5):054005.

[14] CHEN Y,LIAO Z,SHI Y,et al.Detectable increases in sequential flood-heat wave events across China during 1961-2018[J].Geophysical Research Letters,2021,48(6):e2021GL092549

[15] 冯锦明,赵天保,张英娟.基于台站降水资料对不同空间内插方法的比较[J].气候与环境研究,2004,9(2):261-277.

FENG J M,ZHAO T B,ZHANG Y J.Intercomparison of spatial interpolation basedon observed precipitation data[J].Climatic and Environmental Research,2004,9(2):261-277.

[16] FOX J,LEANAGE A.R and the Journal of Statistical Software[J].Journal of Statistical Software,2016,73:1-13.

[17] 叶殿秀,尹继福,陈正洪,等.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,2013,9(1):15-20.

YE D X,YIN J F,CHEN Z H,et al.Spatiotemporal change characteristics of summer heatwaves in China in 1961—2010[J].Progressus Inquisitiones DE Mutatione Climatis,2013,9(1):15-20.

[18] DENG J M,ZHANG W,QIN B Q,et al.Winter climate shapes spring phytoplankton development in non-ice-covered lakes:subtropical Lake Taihu as an example[J].Water Resources Research,2020,56(9):e2019wr026680.

[19] COLEMAN J.Climate change made South Asian heatwave 30 times more likely[EB/OL].(2022-05-23)[2023-07-05].<https://www.nature.com/articles/d41586-022-01444-1>.

[20] 候启.华北温度异常引起的寒潮和热浪灾害特征及影响因子分析[D].兰州:西北师范大学,2020.

HOU Q.Characteristics and influencing factors of cold wave and heat wave disasters caused by abnormal temperature in North China[D].

Lanzhou:Northwest Normal University,2020.

[21] ROMM J.Climate change:What everyone needs to know[M].Oxford:Oxford University Press,2022.

[22] CHARPENTIER A.On the return period of the 2003 heat wave[J].Climatic Change,2011,109(3):245-260.

[23] FISCHER E M,SCHÄR C.Consistent geographical patterns of changes in high-impact European heatwaves[J].Nature Geoscience,2010,3(6):398-403.

[24] WANG J,CHEN Y,TETT S F B,et al.Anthropogenically-driven increases in the risks of summertime compound hot extremes[J].Nature Communications,2020,11(1):528.

[25] 彭凯,邓建明,张运林,等.1957—2015 年我国春季短期温度波动规律[J].气候与环境研究,2019,24(1):125-134.

PENG K,DENG J M,ZHANG Y L,et al.Short-term temperature fluctuation in the spring in China during 1957—2015[J].Climatic and Environmental Research,2019,24(1):125-134.

[26] 中国气象局气候变化中心,中国气候变化蓝皮书(2021)[M].北京:科学出版社,2021.

[27] GREEN H K,ANDREWS N,ARMSTRONG B,et al.Mortality during the 2013 heatwave in England how did it compare to previous heatwaves? A retrospective observational study[J].Environmental Research,2016,147:343-349.

[28] ZHAN W K,ZHANG Y,HE Q Y,et al.Shifting responses of phytoplankton to atmospheric and oceanic forcing in a prolonged marine heatwave[J].Limnology and Oceanography,2023,68(8):1821-1834.

[29] THOMPSON V,MITCHELL D,HEGERL G C,et al.The most at-risk regions in the world for high-impact heatwaves[J].Nature Communications,2023,14(1):2152.

[30] FISCHER E M,SIPPEL S,KNUTTI R.Increasing probability of record-shattering climate extremes[J].Nature Climate Change,2021,11:689-695.

Comparation among differences methods of heat wave events estimation

Chen Yuan¹, Fan Hongxiang¹, Peng Kai¹, Deng Jianming¹, Peng Jihong²

(1. Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 2. Chongqing Yisen Stone Environmental Technology Co., LTD, Chongqing 400000, China)

Abstract: Heat waves have become one of the most harmful natural disasters in the world, and in recent years, the world has suffered from increasingly record-breaking heat wave events. There is no unified definition of heat waves in the academic community, and this study discusses the controversial baseline selection of heat waves(referring to climate background). Based on the daily average temperature data of 692 meteorological stations in China from 1951 to 2022, three methods, fixed baseline, running baseline, and increasing baseline, were compared using the quantile method to compare the four key heat wave indices, including outbreak frequency, duration, maximum intensity, and recurrence days. The results showed that due to the impact of global warming, the fixed baseline method(selecting 1951 to 1980 as the relative threshold for climate background calculation) tends to improve the estimation of the probability of current heat wave occurrence, while the increasing baseline method(using all historical data as the basis for climate background calculation) and the running baseline method(using the forward thirty years of each year as the basis for baseline calculation)can consider the impact of stable temperature changes. The heat wave index obtained by the three baseline calculation methods only showed significant differences in absolute values, while there is a high degree of consistency in the long-term trend and spatial distribution of the heat wave indexes. Basing on the adaptation characteristics of organisms to the environment in long-term evolution, we suggest using the running baseline method to determine the climate background over a period of time as the base line for heat waves, with a focus on the response and ecological impact of organisms caused by heat waves.

Keywords: extremely events; heat waves; daily temperature; climatological baselines

[责任编辑 刘洋 赵晓华]