

王倩云, 罗德海, 王佳妮. 2016. 欧洲地区夏季热浪的特征及其与阻塞环流的联系 [J]. 气候与环境研究, 21 (4): 367–379. Wang Qianyun, Luo Dehai, Wang Jiani. 2016. Characteristics of summer heatwaves over Europe and their link with European blocking circulations [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 21 (4): 367–379, doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2015.15022.

欧洲地区夏季热浪的特征及其与阻塞环流的联系

王倩云^{1,2} 罗德海³ 王佳妮⁴

¹ 中国海洋大学海洋环境学院, 青岛 266100

² 厦门市气象局, 厦门 361012

³ 中国科学院东亚区域气候—环境重点实验室, 北京 100029

⁴ 民航新疆阿克苏空管站, 新疆阿克苏 843001

摘 要 选取了一个热浪指数, 利用地面 2 m 气温场和 500 hPa 位势高度场的美国环境预报中心和国家大气研究中心 (NCEP/NCAR) 再分析资料, 通过聚类分析发现欧洲大陆容易产生 6 类热浪: 西欧型 (WE)、俄罗斯型 (RU)、东欧型 (EE)、斯堪的纳维亚半岛型 (SC)、北海型 (NS)、伊比利亚半岛型 (IB); 这些热浪事件都与欧洲大陆阻塞的位置有关。同时我们发现这 6 类热浪发生的频率出现明显的年代际变化, 特别在 20 世纪 80 年代以后欧洲大陆热浪发生频率明显的增多趋势可能与欧洲大陆增暖背景有关, 而欧洲大陆热浪发生频率的年代际变化可能是夏季北大西洋涛动 (NAO) 的年代际变化的结果。夏季 NAO 偶极子通过欧洲地区的阻塞异常对欧洲大陆气温有重要的调制作用。当夏季 NAO 指数处于正位相阶段时, 欧洲大陆容易产生高纬度热浪, 反之则容易产生低纬度热浪, 并且欧洲大陆增暖趋势并不影响 NAO 对欧洲气温的调制作用。同时还发现: 大西洋夏季 NAO 事件可以是欧洲热浪发生的前期条件, 欧洲大陆阻塞异常落后于 NAO 事件 1~5 d, 其中 IB 型和 WE 型与 NAO 同期相关, 其余 4 类型热浪对应阻塞落后于 NAO 4~5 d。另外, 也发现大西洋—欧洲大陆定常波列正距平的位置通过对欧洲阻塞的影响, 而影响欧洲热浪发生的频率和位置。

关键词 夏季热浪 欧洲 年代际变化 全球变暖

文章编号 1006-9585 (2016) 04-0367-13

中图分类号 P466

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2015.15022

Characteristics of Summer Heatwaves over Europe and Their Link with European Blocking Circulations

WANG Qianyun^{1,2}, LUO Dehai³, and WANG Jiani⁴

¹ College of Physical Environmental Oceanography, Ocean University of China, Qingdao 266100

² Xiamen Meteorological Bureau, Xiamen 361012

³ Key Laboratory of Regional Climate-Environment for East Asia, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

⁴ Aksu Air traffic station, Civil Aviation Administration of China, Aksu, Xinjiang 843001

Abstract Based on daily surface air temperature at 2 m and 500-hPa geopotential height fields from the NCEP/NCAR reanalysis dataset, a heat wave index over Europe is calculated in this paper. Spatial characteristics of heat waves over Europe and associated atmospheric circulations are investigated using the K-mean clustering analysis method. It is shown that the heat waves over Europe can be classified into six types with different spatial patterns: Western Europe (WE),

收稿日期 2015-02-03; 网络预出版日期 2016-02-26

作者简介 王倩云, 女, 1990 年出生, 硕士研究生, 主要研究方向为气候学。E-mail: wangqianyun813@163.com

资助项目 国家自然科学基金项目 41430533

Funded by National Natural Science Foundation of China (Grant 41430533)

Russian (RU), Eastern Europe (EE), Scandinavian (SC), North Sea (NS), and Iberian (IB). The frequency of heatwave events over Europe is found to have increased significantly after the 1980s, which may be associated with the global warming. The decadal variability of the summer North Atlantic oscillation (SNAO) is possibly a reason for the decadal variability of European heatwaves. While the global warming can increase the frequency of European heat waves, the atmospheric internal processes that affect the strength, position, and frequency of European heat waves seem to be dominant. Composite of geopotential height anomalies shows that the occurrence region of European heat waves is determined by the position of the blocking anticyclone over Europe that is tightly tied to positive stationary wave train anomalies over Euro-Atlantic region and the phase of NAO. Low latitude-type heat waves are more likely to take place when the SNAO index decreases to a negative value, while the high latitude-type heat waves often occur during the period when the NAO index is in a positive phase. Moreover, it is found that the NAO event precedes the European blocking by 1-5 days, suggesting that the phase of NAO can modulate the European heat waves.

Key words Heatwaves, Europe, Decadal variation, Global warming

1 引言

热浪是一种持续时间长的极端高温事件,近年来欧洲乃至全球频繁地受到热浪袭击。热浪给世界经济和人类健康带来了巨大损失(Fischer and Schär, 2010),因此极端天气事件的变化及发生机制越来越受到各国气象学家的高度关注。而欧洲地中海地区由于夏干冬湿以及海洋性气候条件,更容易受到热浪袭击。Meehl and Tebaldi (2004)使用一个全球气候耦合模式结果预测在 21 世纪后半叶欧洲和北美地区的热浪将会更加频繁地出现,而且热浪的持续时间也会变得更长。因此带来的影响可能更大。

已有研究表明欧洲夏季热浪的发生与同时期欧洲大陆的持续反气旋环流(阻塞)有关(Black et al., 2004; Stefanon et al., 2012)。另外的研究也表明夏季热浪的发生与冬季地中海地区降水减少有关(Vautard et al., 2007)。Stott et al. (2004)发现人类活动的影响在 2003 年欧洲西部热浪的发生中起很重要的作用,但 Dole et al. (2011)的研究发现 2010 年俄罗斯热浪主要是由于大气内部动力学过程引起的。最近 Barriopedro et al. (2011)的研究表明温室气体浓度的增加也会增大欧洲大陆夏季温度的变率。而 Trenberth and Fasullo (2012)则认为 ENSO 以及人类活动的共同作用对 2010 年俄罗斯热浪的发生有重要的影响。

尽管前人对欧洲大陆热浪发生的原因作了大量的研究,但欧洲大陆热浪发生频率的年代际变化的成因仍是一个未解决的重要科学问题。特别是作为大西洋—欧洲大陆夏季的一个重要环流模态的北大西洋涛动(NAO)是否对欧洲大陆夏季热浪的

发生有重要的影响还并不清楚。本文试图通过使用聚类分析方法并结合合成方法来探讨欧洲大陆夏季热浪年代际变化的可能成因以及大气环流的不同环流结构对热浪发生的影响。

2 资料、方法和热浪的定义

2.1 数据说明

本文所采用的气温资料是美国环境预报中心和国家大气研究中心(NCEP/NCAR)再分析地面 2 m 每日最高气温场逐日数据,时间跨度为 1950 年夏季至 2012 年夏季,水平分辨率为 1.875° (纬度) $\times 1.875^\circ$ (经度)。这里的夏季定义为 6 月至 8 月。高度场资料采用 NCEP/NCAR 再分析逐日 500 hPa 位势高度场,水平分辨率为 2.5° (纬度) $\times 2.5^\circ$ (经度)。夏季逐日的 NAO 指数选取了美国气候预报中心(CPC)发布的资料。

2.2 处理方法

本文所使用的逐日资料是去掉季节内变化影响的逐日距平场。计算方法是:逐日场减去逐日多年气候平均场,即可得到逐日距平场。同时我们对高度场资料进行了插值,用 4 点插值方法将高度场插值到 1.875° 的经纬度格点上。这种插值方法能够使高度场得到与气温场相同的水平分辨率。然后利用这些资料通过 K 均值聚类方法可以得到欧洲热浪的不同类型及所对应的环流型。

2.3 欧洲热浪事件的定义

热浪是一种持续时间长的极端天气,不同的学者根据持续时间的不同,热浪的定义略有不同。例如,Stefanon et al. (2012) 用了一个基于气温的概率密度函数来定义欧洲热浪,再对热浪进行分类。而世界气象组织推荐的热浪定义方法是:每日最高

气温超过平均最高气温 5°C (9°F) 并至少持续 5 d 以上, 平均态的期间取 1961~1990 年。

本文采用了 STRADEX (Statistical and Regional dynamical Downscaling of Extremes for European regions) 项目 ([https://crudata.uea.ac.uk/projects/stardex/\[2015-02-23\]](https://crudata.uea.ac.uk/projects/stardex/[2015-02-23])) 定义的一系列极端温度指数中的热浪指数 (hcwdi)。这个热浪指数能够较准确的描述欧洲地区的极端高温天气。这种指数是基于地面 2 m 每日最高气温场来定义热浪的, 同时本文为了考虑热浪发生的区域和持续性, 还对热浪指数作了推广。例如一次热浪事件的发生定义为: (1) 取 1961~1990 年的夏季 (6~8 月) 每日气温场的 30 年平均作为气温的气候态平均场, 然后根据这个气候态平均场得到 1950~2012 年夏季的逐日距平场。对于每个格点, 若该格点某日气温距平超过 5°C , 则定义该格点该日为一次瞬时高温。(2) 若一个格点气温距平超过 5°C 并持续 5 d 以上, 则定义在该格点有一次热浪发生。(3) 若在某一地区 3.75° (纬度) $\times 3.75^{\circ}$ (经度) 的空间范围内满足条件 (1) 和 (2), 则定义在该地区发生了一次热浪事件。

根据我们所给出的热浪定义方法, 我们识别出的 1950~2012 夏季欧洲大陆热浪事件为 127 次, 其发生的总天数为 1122 d。在这里, 本文所定义的欧洲大陆地区为 ($30^{\circ}\text{N}\sim 70^{\circ}\text{N}$, $15^{\circ}\text{W}\sim 45^{\circ}\text{E}$) 区域。

3 欧洲夏季热浪发生频率的空间分布和长期变化

3.1 欧洲夏季热浪的分布

为了更加细致的研究欧洲热浪的特点, 将识别出的 127 次热浪事件每个事件全过程的每日气温距平场进行平均, 得到 127 个事件的气温距平场。使用类似于 Stefanon et al. (2012) 分类欧洲热浪时采用的 K 均值聚类方法, 把 127 次热浪事件的气温距平场进行聚类分析。在 Stefanon et al. (2012) 的研究中, 根据气温正距平中心的位置, 使用相异指数 (Dissimilarity index) 来作为热浪事件分类个数的函数, 得到了欧洲热浪事件的最优分类个数, 表明随着分类个数的增加, 类别之间的差异性增加, 但当分类个数从 6 个增加到 7 个的时候, 最后分的两类之间差异显著减小, 即最后分的两类热浪型气温正距平中心很接近 [Stefanon et al. (2012), 图 1]。

基于他们的研究成果, 本文在对欧洲区域热浪使用 K 均值聚类方法的时候, 将 K 定为 6, 因此根据气温正距平中心的位置, 将欧洲夏季热浪分为 6 类, 这 6 类各自的合成场如图 1 所示, 其中合成场的样本容量为各自发生次数。图中的实线表示热浪所对应的 500 hPa 位势高度距平场的合成。在这 127 次热浪事件中, 西欧型 (WE) 有 16 次, 占总次数的 12.6%, 气温正距平中心的位置位于欧洲西部 50°N 附近, 大西洋沿岸。俄罗斯型 (RU) 有 35 次, 占总次数 27.6%, 气温正距平中心的位置位于 50°N 以北以及 30°E 以东的莫斯科地区。东欧型 (EE) 有 24 次, 占 18.9%, 气温正距平位置位于地中海以北及 30°E 。斯堪的纳维亚半岛型 (SC) 有 29 次, 占 22.8%, 正中心位置位于斯堪的纳维亚半岛上及 60°N 以北。北海型 (NS) 有 16 次, 占 12.6%, 正中心位置在 50°N 以北和 60°N 以南, 北海沿岸。伊比利亚半岛型 (IB) 发生 7 次, 占 5.5%, 正中心位置在 40°N 以南和环地中海地区。从图 1 中也可以看出每种热浪相应位置都对应一种阻塞反气旋环流, 可见阻塞的位置对热浪的发生区域有重要的控制作用。

3.2 欧洲夏季热浪发生频率的长期变化

在热浪 6 类的基础上, 从各类热浪的时间分布图 (图 2a) 上可以清楚的看出: 欧洲夏季热浪整体分布有明显的年代际变化, 主要分为 3 个阶段: 1965 年之前, 发生热浪天数较少; 1970~1980 年, 热浪事件开始增多; 1985 年以后, 热浪事件显著增多。本文所得到的热浪事件发生频率很好地表现出了近年来的欧洲热浪发生频率的增加趋势以及最典型的热浪事件, 如 2010 年的俄罗斯热浪, 2003 年的西欧热浪。其中有几类热浪也表现出了明显的年代际变化, 比如 WE 型, 在 1950 年附近有明显的存在, 1995 年以后显著增多; EE 型也有相似的分布特征, 在 20 世纪 90 年代以后事件明显增多; 而相反 SC 型在 20 世纪 90 年代之前, 特别是在 70 年代至 80 年代期间分布较为集中。而另一方面从欧洲整体热浪趋势来看, 本文所使用的热浪定义方法很好的反映了 1985 年以后全球温度持续增高, 热浪事件显著增多的气候现象, 弥补了 Stefanon et al. (2012) 使用的热浪定义方法的不足之处。Stefanon et al. (2012) 用了一个基于气温的概率密度函数来定义欧洲热浪, 再对热浪进行分类, 这种方法识别出的热浪不能反映 20 世纪 80 年代, 特别是 1985

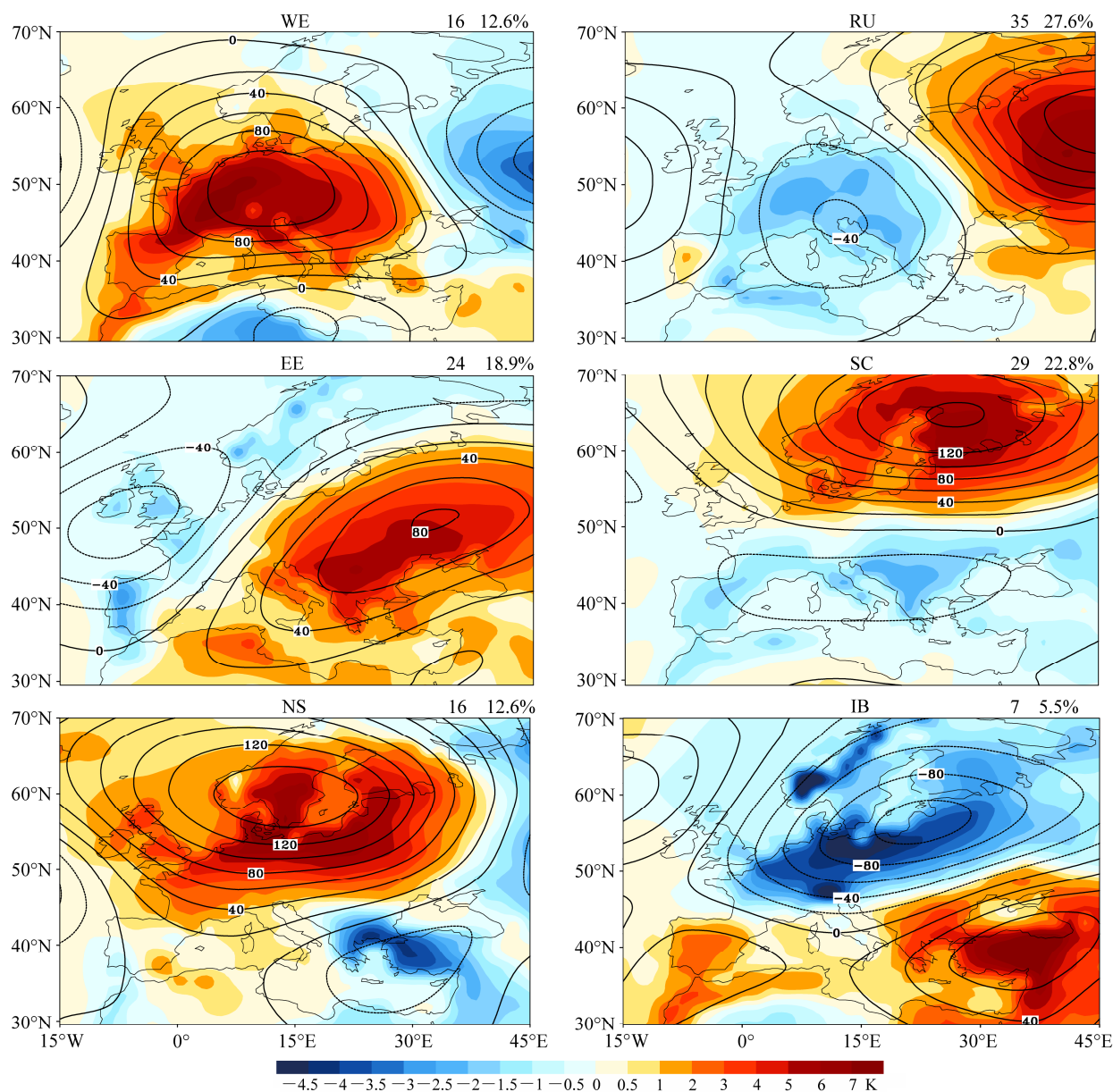


图1 欧洲6类热浪型的合成场。填色区域表示每日最高气温异常场；等值线表示500 hPa位势高度异常合成（单位：gpm）；右上角第一个数值表示各类型样本个数，第二个数值表示各类型所占总体比重。WE：西欧型；RU：俄罗斯型；EE：东欧型；SC：斯堪的纳维亚半岛型；NS：北海型；IB：伊比利亚半岛型

Fig. 1 Daily maximum air temperature anomaly (colored, units: K) and 500-hPa geopotential height anomaly (counter, units: gpm) of six heatwave patterns; the first number denotes the number of every heatwave pattern, the second number denotes the ratios of the total number of heatwave. WE: Western Europe cluster; RU: Russian cluster; EE: Eastern Europe cluster; SC: Scandinavian cluster; NS: North Sea cluster; IB: Iberian cluster

年以后变暖的气候现象，详见 Stefanon et al. (2012) 的图2。

受全球变暖的影响，近30年来欧洲地区夏季平均气温持续升高，尤其是1985年以后表现出的显著增暖趋势可能与全球变暖有关。本文通过对欧洲地区气温数据进行去趋势处理，将气温增暖的线性变化趋势去掉，再对去趋势后的气温数据进行热

浪识别，统计出113次热浪，共持续956 d。重新聚类分析，图3给出的新聚类结果中没有了NS型，取代它的是偏东的波罗的海型（BS）；也没有了IB型，俄罗斯热浪分为南北两类：南俄罗斯型（SRU）和北俄罗斯型（NRU）。各类所占的比例也与去趋势前并无大的改变。

比较图2a和图2b，去掉气温变化的趋势后（图

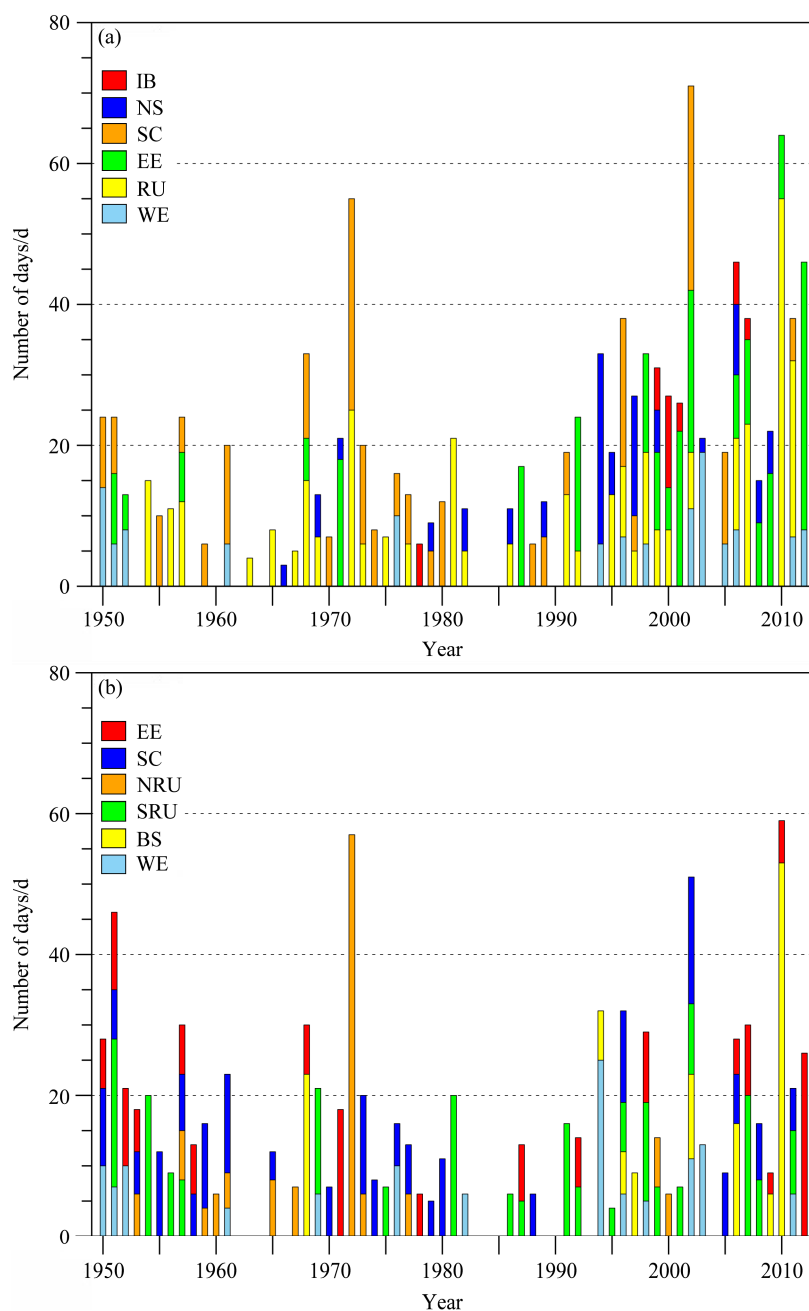


图 2 (a) 欧洲地区 6 类热浪事件 1950~2012 年的热浪持续时间分布; (b) 去趋势后欧洲地区 6 类热浪事件 1950~2012 年的热浪持续时间分布 (BS: 波罗的海型; SRU: 南俄罗斯型; NRU: 北俄罗斯型)

Fig. 2 Climatology of heatwave clusters of the six patterns over Europe from 1950 to 2012: (a) Original data; (b) detrended data (BS: Baltic Sea cluster; SRU: South Russian cluster; NRU: North Russian cluster)

2b) 欧洲热浪仍然存在与图 2a 同步的年代际变化, 并且这种年代际变化 1963 年和 1984 年的两个拐点更加明显。而 1985 年以后热浪发生频率明显比去趋势前热浪发生的频率降低, 并且增长趋势放缓。这一结果表明, 20 世纪 80 年代以后欧洲大陆热浪发生频率明显的增多趋势可能与欧洲大陆增暖背景有关, 而这种增暖背景并不是造成欧洲热浪显著

年代际变化的原因, 欧洲大陆热浪发生频率的年代际变化可能与大气内部过程有关。

4 影响欧洲地区热浪的两种大气背景环流模式

上文已经讨论过每种热浪发生期间, 其相应位

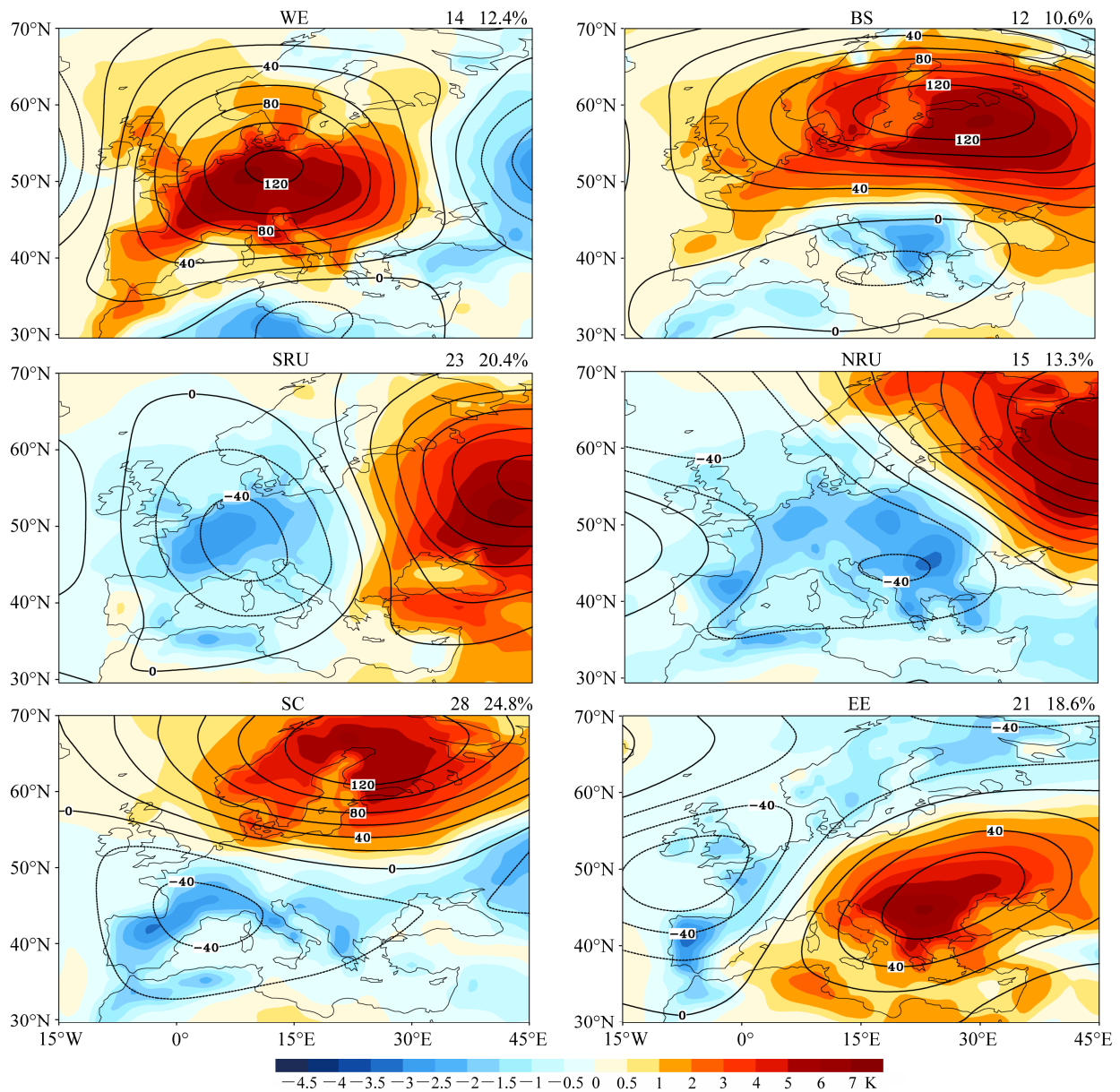


图3 去趋势后欧洲6类热浪型的合成场。填色区域表示每日最高气温异常场；等值线表示500 hPa位势高度异常合成（单位：gpm）；右上角第一个数值表示各类型样本个数，第二个数值表示各类型所占总体比重。WE：西欧型；BS：波罗的海型，SRU：南俄罗斯型；NRU：北俄罗斯型；SC：斯堪的纳维亚半岛型；EE：东欧型

Fig. 3 Daily maximum air temperature anomaly (colored, units: K) and 500 hPa geopotential height anomaly (counter, units: gpm) of the six heatwave patterns from the detrended data; the first number denotes the number of every heatwave pattern, the second number denotes the ratios of the total number of heatwave. WE: Western Europe cluster; BS: Baltic Sea cluster; SRU: South Russian cluster; NRU: North Russian cluster; SC: Scandinavian cluster; EE: Eastern Europe cluster

置都对应一种阻塞反气旋环流（图1等值线所示），前人的很多研究也表明欧洲夏季热浪的发生与同时期欧洲大陆的持续反气旋环流（阻塞）有直接关系（Black et al., 2004; Stefanon et al., 2012），但是这些局地阻塞反气旋环流是如何建立并且增强的，是否和大气内部过程有关，都还不是很清楚。

本文为了探究大气内部动力学过程在欧洲热浪发生、发展中可能的作用，分析了6类热浪事件过程中500 hPa位势高度距平合成场，将127次热浪事件中每一次温度振幅达到最大所在日期设为lag0，前一天为lag-1，后一天为lag1，以此类推找出每次热浪事件最大振幅日期的前后各15 d。从每

类事件的 500 hPa 位势高度合成场在 lag-15 至 lag15 之间的演变情况来看 (图略), 每类热浪发生所对应的大气内部变化过程都是不一样的, 有的对应定常波列的放大过程, 而有的对应与 NAO 有关的大西洋—欧洲偶极子放大过程。

对于 WE 型热浪, 从 lag-6 开始西欧地区反气旋环流开始增强, 并一直维持在该区域。而在 lag-6 至 lag0 西欧反气旋距平持续且增长阶段, 整个北半球中纬度来看其实是一个单极子定常波列的放大过程。

对于 RU 型热浪, 从 lag-8 开始俄罗斯反气旋距平开始存在, 并持续增强。而在 lag-8 至 lag0 俄罗斯反气旋距平持续增长阶段, 北半球中高纬度也表现为单极子定常波列的放大过程, 另一个反气旋距平中心位于中纬度大西洋东部。

对于 EE 型热浪, lag-6 开始东欧反气旋距平存在并持续增强。对全球尺度, 北半球中高纬度是一个自西北向东南倾斜的单极子定常波列的放大过程, 另一个反气旋距平中心位于格陵兰岛南部。

对于 SC 型热浪, lag-10 开始斯堪的纳维亚半岛反气旋增强, 背景流场表现为在大西洋—欧洲地区的 NAO 正位相偶极子结构。NS 型和 SC 型的高度场结构演变很相似, 都表现为大西洋—欧洲地区的 NAO 正位相偶极子放大过程。

IB 型个例数很少, 但也有一个明显的全球尺度结构演变过程, 尤其是在大西洋—欧洲地区为明显的 NAO 负位相双偶极子结构增强过程。

综上所述, 我们发现这些造成欧洲地区各类型热浪的阻塞反气旋环流的建立、发展, 都是与全球定常波列的放大或 NAO 在大西洋—欧洲地区偶极子的放大这两种流场结构演变有关。如图 4a 所示 WE 型热浪背景流场对应明显波列结构, 美洲东岸存在反气旋结构, 大西洋地区是一个气旋, 另一个正距平中心位于西欧地区; RU 型 (图 4b) 的波列结构的分布与 WE 型相反, 表现为正—负—正的西南东北倾斜结构; 而 EE 型 (图 4c) 对应大西洋—欧洲地区西北东南倾斜的正—负—正波列, 也类似于倾斜的偶极子结构; SC 型 (图 4d) 的流场结构在欧洲大陆呈现南北向的负—正偶极子, 但是大西洋上的偶极子较弱, 仅在中纬度有明显反气旋距平, 对应 NAO 正位相; 而 IB 型 (图 4f) 对应了标准的 NAO 双偶极子结构: 大西洋上呈 NAO 负位相的负—正的南北型, 欧洲大陆呈正—负的南北型;

NS 型 (图 4e) 的 NAO 正位相双偶极子结构在欧洲存在倾斜, 大西洋呈正—负的南北型, 欧洲大陆呈西南东北倾斜的负—正型。

因此本文认为夏季大西洋欧洲地区定常波列的放大、NAO 偶极子的增强这些大尺度的环流背景都有利于欧洲大陆反气旋阻塞异常的建立和增强, 从而影响欧洲热浪事件。其中大西洋—欧洲地区的定常波列通过影响正距平中心的位置来控制热浪的发生区域, 因此定常波列的不同分布、不同倾斜方式都会引起热浪发生区域的不同; 另一方面, 北大西洋涛动是通过在大西洋—欧洲地区的双偶极子结构来控制产生热浪事件的欧洲大陆反气旋阻塞环流, 偶极子的形状或不同倾斜都会引起欧洲大陆阻塞高压位置的不同, 阻塞高压的位置又决定了热浪发生的区域。正如 Schubert et al. (2014) 的研究也表明了夏季罗斯贝 (Rossby) 定常波对欧亚大陆北部地区的表面气温和降水的变化起着重要的作用。

5 欧洲热浪发生的频率与夏季北大西洋涛动的可能关系

本文已经讨论欧洲—大西洋波列和夏季 NAO 这些背景都有利于欧洲热浪事件发生, 从图 4 可以很明显看到有波列结构, 也有 NAO 偶极子结构。本文中, 当 NAO 指数绝对值大于 1 且最少持续 3 d 以上, 我们定义为一次 NAO 事件。1950~2012 年的这 127 次热浪中, 若热浪发生在一次 NAO 事件后的 6 d 之内, 则将这次热浪定义为与 NAO 有关的一个热浪事件。

如图 5, 用上述方法我们共挑出 NAO 正位相事件 83 次, 与 NAO 正位相有关的热浪 26 次, 占热浪事件总数的 20.5%; NAO 负位相事件 114 次, 与 NAO 负位相有关的热浪 29 次, 占热浪事件总数的 22.8%。

为了研究 NAO 正位相和 NAO 负位相对欧洲热浪影响的差异, 我们给出了热浪生命期间表面气温和 500 hPa 位势高度异常, 如图 6。与 NAO 正位相有关的欧洲大陆上的高度异常表现出明显的西北—东南倾斜偶极子结构, 欧洲大陆上的阻塞高压位于欧洲北部 (图 6a), 而与 NAO 负位相有关的欧洲大陆上高度异常偶极子结构的阻塞高压位于欧洲南部 (图 6b)。因此与 NAO 正位相有关的阻塞高压

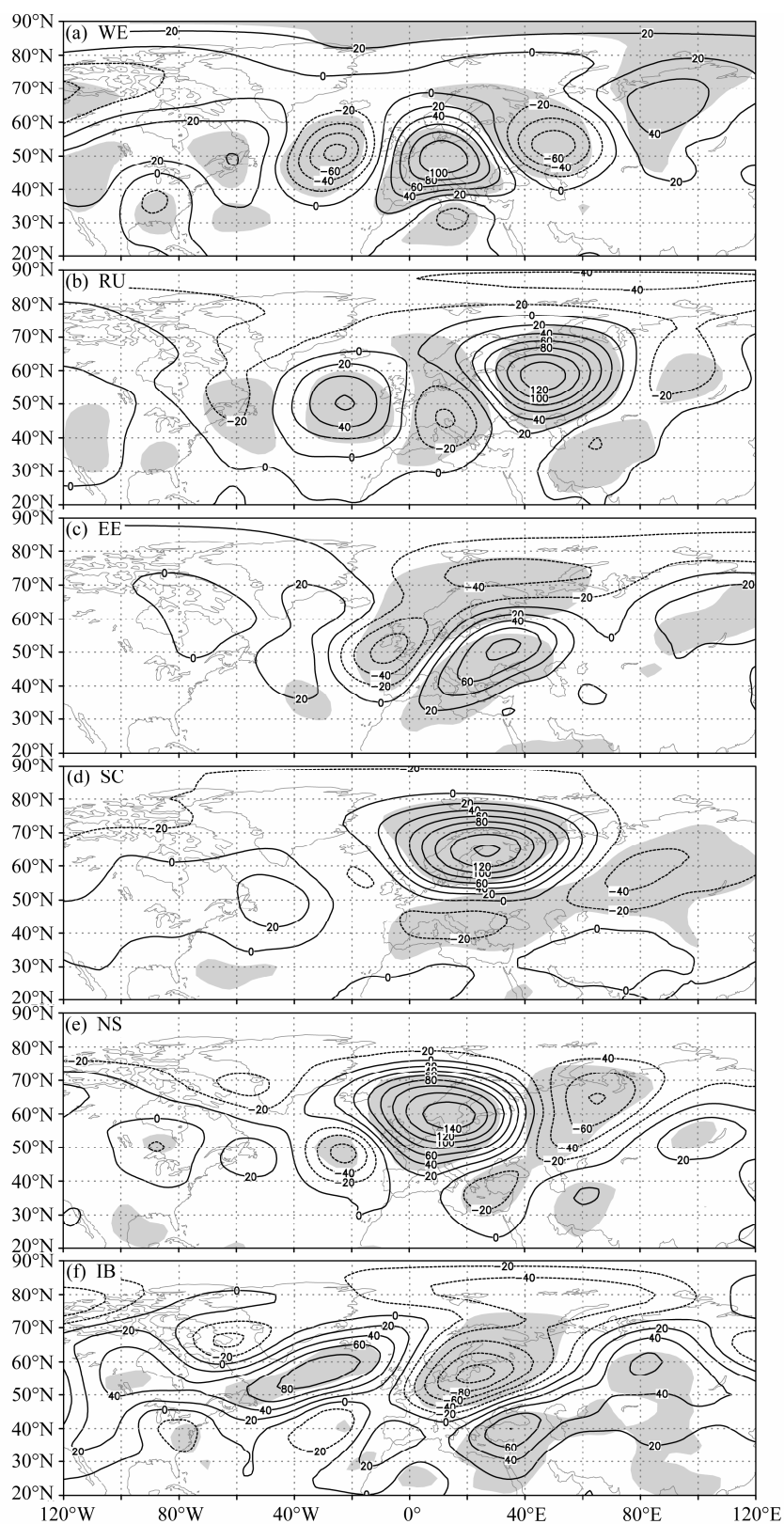


图4 热浪生命期间 500 hPa 位势高度异常合成场 (阴影区域表示通过 95%置信度检验): (a) WE 型; (b) RU 型; (c) EE 型; (d) SC 型; (e) NS 型; (f) IB 型。热浪生命期间: 识别出的每次事件的开始时间至结束时间作为每一个热浪事件的生命期间

Fig. 4 Composites of 500-hPa geopotential height anomalies from the beginning to the end of the heatwave events corresponding to (a) WE pattern, (b) RU pattern, (c) EE pattern, (d) SC pattern, (e) NS pattern, and (f) IB pattern. The grey shading denotes the region above the 95% confidence level for two-sided student's test

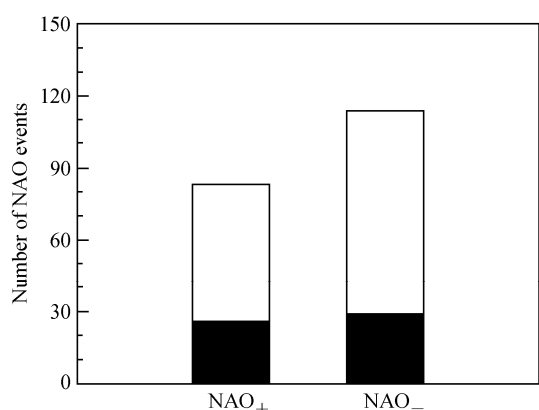


图5 与NAO有关的热浪事件个数, 黑色区域分别表示与NAO正位相有关的热浪事件(26个)和与NAO负位相有关的热浪事件(29个)

Fig. 5 The number of NAO events and heatwave events that are related to NAO events. The black area demotes the 26 heatwave events that are related to positive phase NAO event and the 29 heatwave events that are related to negative phase NAO event

容易使欧洲北部增温产生热浪(图6c), 与NAO负位相有关的阻塞高压在欧洲南部产生热浪(6d)。

本文在这种关系基础上继续探究了欧洲地区63年共5796 d的夏季气温与夏季NAO之间的相关性, 如图7a以45°N为界欧洲高纬地区夏季气温异常与NAO指数存在显著的正相关, 而低纬地区气温异常与其存在显著负相关。将一次NAO事件中NAO指数达到最大值所在日期定义为lag0, 从温度合成场来看83次NAO正位相事件的lag-3到lag3, 45°N以北欧洲高纬地区偏暖(图7b); 114次NAO负位相事件期间欧洲低纬地区地中海沿岸及乌拉山地区偏暖(图7c)。因此本文研究认为NAO为负位相时, 欧洲低纬地区气温可能会异常升高, 低纬型热浪比较容易发生; 而当NAO为正位相, 欧洲地区气温可能会异常偏高, 高纬型热浪更容易发生。而进一步将气温数据去趋势处理后, 欧洲大陆

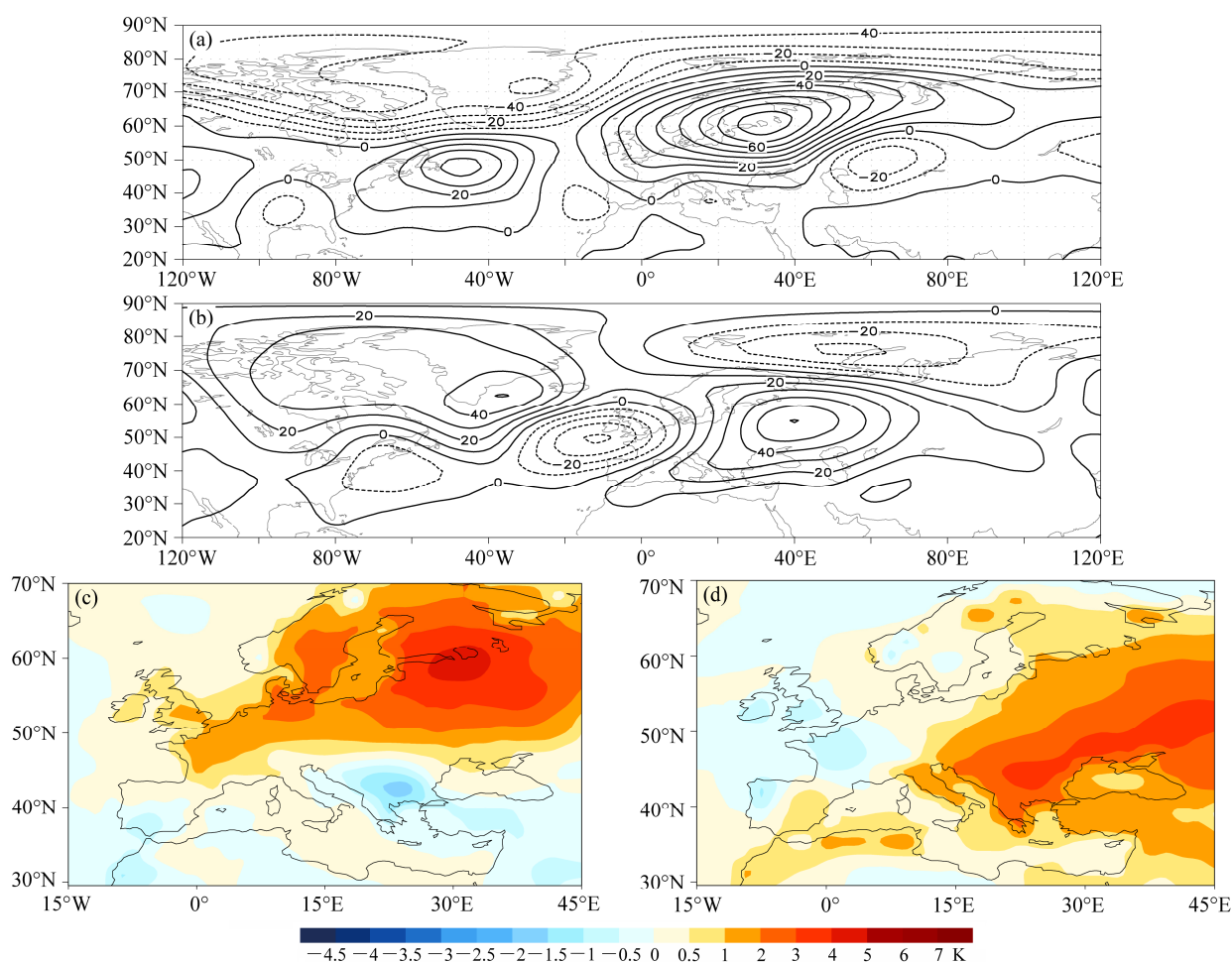


图6 与NAO正位相有关的26次热浪事件相应(a)500 hPa位势高度异常合成场和(c)温度异常合成场; 与NAO负位相有关的29次热浪事件相应(b)500 hPa位势高度异常合成场和(d)温度异常合成场

Fig. 6 Composites of (a, b) geopotential height anomalies at 500 hPa and (c, d) surface air temperature anomalies corresponding to heatwave events: (a, c) 26 events that are related to positive phase NAO events; (b, d) 29 events that are related to negative phase NAO events

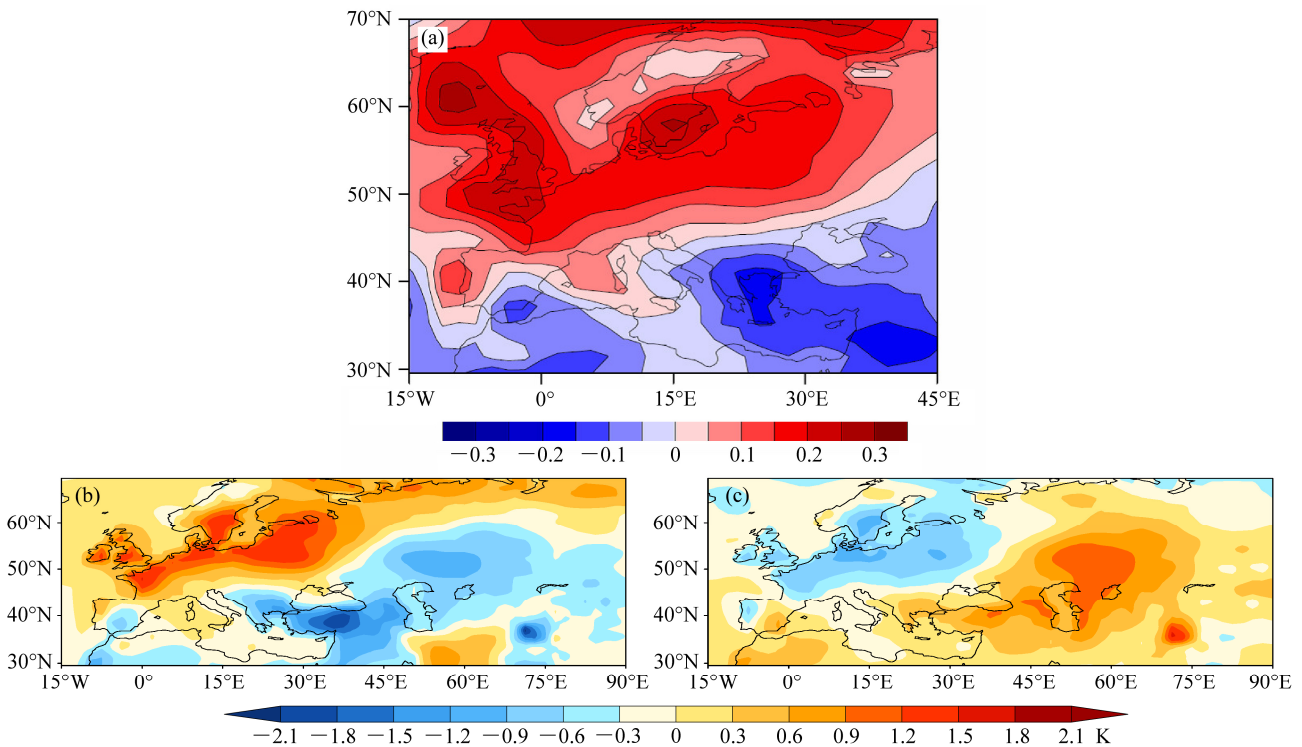


图7 (a) 1979~2012年夏季NAO逐日指数与欧洲地区夏季气温距平的相关系数, 自由度5796; (b) NAO正位相事件lag-3到lag3气温距平合成场, lag0表示正位相NAO指数达到最大值的日期; (c) NAO负位相事件lag-3到lag3气温距平合成场, lag0表示负位相NAO指数达到最大值的日期。

Fig. 7 (a) The correlation coefficient between daily NAO index and daily air temperature anomaly in the summer, the number of degrees of freedom is 5796. (b) Composite of air temperature anomaly for positive NAO phase event from lag-3 to lag3 days. At lag0, the positive phase NAO amplitude reaches its largest. (c) Composite of air temperature anomaly for negative NAO phase event from lag-3 to lag3 days. At lag 0, the negative phase NAO event amplitude is the largest

气温响应NAO正、负位相的位置不变(图略), 仅仅是中心强度略微增强。去趋势前后二者结果说明上游NAO活动通过偶极子中的阻塞高压对下游欧洲地区的气温有明显的调制作用, 并且欧洲大陆增暖趋势并不影响NAO对欧洲气温调制的影响位置。

夏季北大西洋涛动(NAO)指数强度较冬季弱, 但经过分析发现也存在一个明显的年代际变化。如图8虚线所示, NAO指数在1950~1965年呈明显的负指数阶段; 而在1970~1980年, NAO为正指数阶段; 1980年以后开始呈下降趋势, 1995年以后为负指数阶段。上一节中我们指出NAO对欧洲气温和热浪有调制作用, 那么图2展示的热浪显著年代分布是否也与夏季NAO的年代际分布有关? 为了探究这一问题, 我们将WE型、EE型、IB型定义为低纬型热浪, 将SC型、NS型、RU型定义为高纬型热浪。低纬型热浪(图8a)分布有明显年代际变化, 并且它与NAO指数的分布有相反的趋

势, 在NAO指数下降阶段处于负指数的1990年以后低纬型热浪明显增多; 负指数阶段的1965年之前低纬型热浪也有较高的频率分布; 在NAO指数上升阶段(1965~1980年), 低纬度热浪发生频率较前后两个阶段明显减少。高纬型热浪的变化与NAO指数的变化大致相同, 在1960~1980年NAO正指数上升阶段, 高纬度热浪发生频率显著增多; 另一方面高纬型热浪在九十年代以后的又明显地增加主要可能与RU型热浪(图8c)有关。从上文讨论的图6c和图6d可以看出, NAO的正、负位相都对俄罗斯莫斯科地区有影响, 因此这可能就是RU型热浪没有显著年代际变化的原因。

比较图8的曲线指数和直方图, 结果表明莫斯科以东欧洲东部地区热浪发生频率的年代际变化可能与NAO的年代际变化有关, 当夏季平均NAO为负位相时, 低纬型热浪发生频率明显增多; 而当夏季平均NAO指数增加并为正位相时, 则高纬型

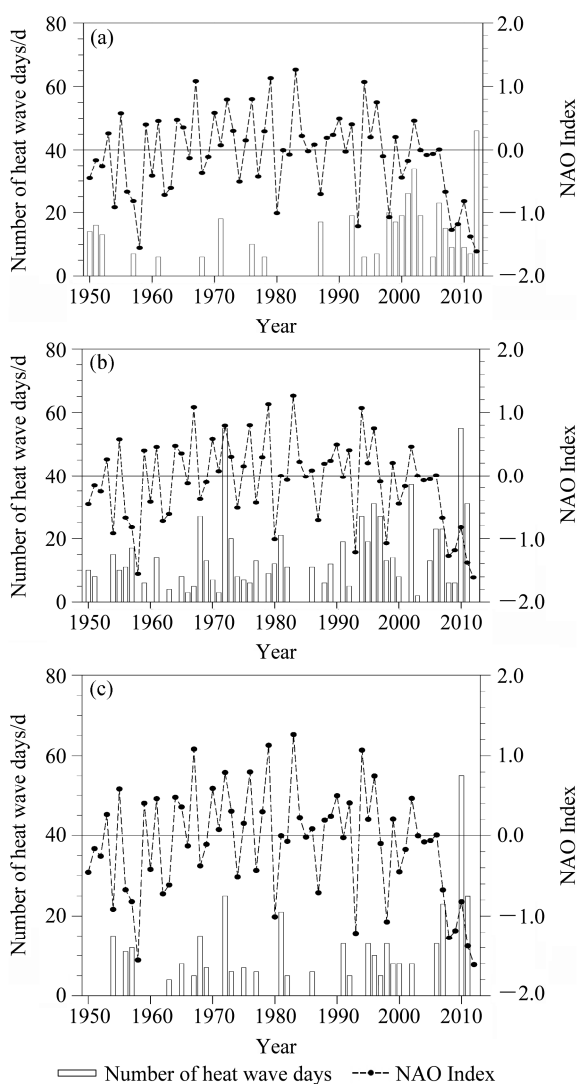


图8 热浪发生天数与NAO指数时间序列(实线段表示NAO指数的趋势走向,虚线段表示热浪发生频率的趋势走向):(a)低纬型热浪与NAO指数;(b)高纬型热浪与NAO指数;(c)RU型与NAO指数

Fig. 8 Time series of summer NAO index (dashed line) and climatology of heatwave events from 1950 to 2012: (a) Low-latitude heatwaves that contain WE pattern, EE pattern, and IB pattern; (b) high-latitude heatwaves that contain SC pattern, NS pattern, and RU pattern; (c) RU pattern

热浪事件的发生频率明显增多。

6 NAO如何影响欧洲地区热浪

Luo et al. (2007) 的理论结果表明在大西洋上NAO正位相偶极子的衰减有利于欧洲大陆上的阻塞产生。本文在这一理论基础上,为了更好的理解NAO与产生热浪的欧洲阻塞异常之间的关系,我们定义欧洲大陆正距平中心值作为阻塞强度,而由于美国气候预报中心发布的NAO指数是用大西洋上

平均海平面气压的经验正交函数(EOF)得到的指数结果,并不能准确反映NAO活动在大西洋上偶极子的情况,因此本文用大西洋海盆高纬度距平中心减去低纬度距平中心的绝对值作为NAO事件偶极子的强度, $S_{NAO} = |H_{high} - H_{low}|$, 其中 H_{high} 为大西洋海盆高纬度($60^{\circ}\text{N} \sim 85^{\circ}\text{N}$, $60^{\circ}\text{W} \sim 0^{\circ}$)位势高度距平中心值, H_{low} 为低纬度($35^{\circ}\text{N} \sim 60^{\circ}\text{N}$, $60^{\circ}\text{W} \sim 0^{\circ}$)位势高度距平中心值,特别的对于IB型热浪,其对应的大西洋上的偶极子位置较偏南(如图4f),在本文中其对应的NAO事件偶极子强度标准适当调整为:大西洋海盆高纬度取 25°N ,低纬度取 $50^{\circ}\text{N} \sim 75^{\circ}\text{N}$ 。标准化的NAO事件偶极子强度和阻塞强度的合成指数如图9所示, lag0 为阻塞强度最大值所在日期。对于WE型(图9a)和IB型(图9f),我们发现NAO的偶极子强度与这两个地区的阻塞近乎同期相关;而对于其余4种类型热浪,这4个地区的阻塞明显滞后于NAO偶极子大约4~5 d。这一现象说明夏季北大西洋涛动事件的偶极子强度可以是欧洲热浪发生的前期条件,因此我们在这篇文章认为夏季北大西洋涛动事件通过偶极子结构调制欧洲大陆的阻塞反气旋环流来进一步控制欧洲大陆的夏季气温。

7 讨论与总结

本文采用NCEP/NCAR再分析资料中地面气温场、500 hPa位势高度场和NAO指数,通过聚类的方法分析了欧洲地区($30^{\circ}\text{N} \sim 70^{\circ}\text{N}$, $15^{\circ}\text{W} \sim 45^{\circ}\text{E}$)夏季热浪的年代际变化及背景环流场的变化特征,得到以下主要结论:

(1) 欧洲大陆热浪发生的频率呈明显的年代际变化,20世纪80年代以后热浪发生频率明显的增多趋势可能与欧洲大陆增暖背景有关,而这种增暖背景并不是造成欧洲热浪显著年代际变化的原因,欧洲大陆热浪发生频率的年代际变化可能与夏季NAO的年代际变化有关,当夏季平均NAO为负位相时,低纬型热浪发生频率显著增多;而当夏季平均NAO指数增加并为正位相时,高纬型热浪事件的发生显著增多。

(2) 夏季大西洋—欧洲地区定常波列的放大、NAO偶极子的增强这些大尺度的环流背景都是有利于欧洲热浪产生的,并且定常波列的不同分布、北大西洋涛动偶极子形状或不同倾斜都会引起欧

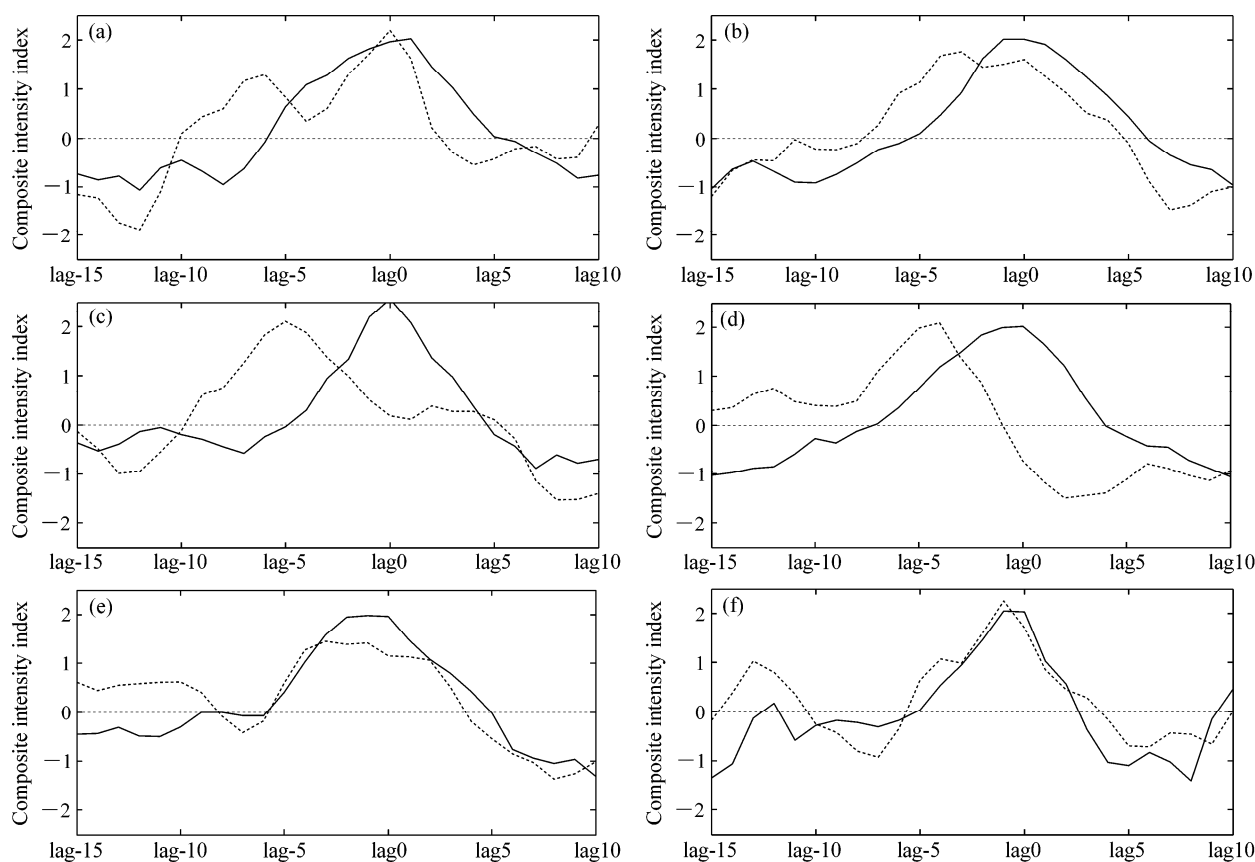


图9 大西洋NAO强度(实线)和阻塞强度(虚线)标准化时间序列:(a) WE型;(b) RU型;(c) EE型;(d) SC型;(e) NS型;(f) IB型
Fig. 9 Time variations of normalized composite daily NAO (dashed) and European blocking (solid) intensity indices for (a) WE, (b) RU, (c) EE, (d) SC, (e) NS, and (f) IB patterns

洲大陆阻塞高压位置的不同,阻塞高压的位置又决定了热浪发生的区域。

(3) 上游NAO活动通过影响欧洲大陆的阻塞高压而对下游欧洲地区的气温有明显的调制作用,并且欧洲大陆增暖趋势并不影响NAO对欧洲气温的调制作用。大西洋夏季NAO事件的产生可以是欧洲热浪发生的前期条件,因此大西洋夏季NAO事件的年代际变化可以引起欧洲大陆热浪的年代际变化。

本文初步研究了夏季欧洲热浪的时空分布、年代际变化及背景环流场特征,发现定常波列、北大西洋涛动和增暖趋势对欧亚地区热浪事件有显著的影响。最近Sun(2012)研究发现中国极端炎热事件(EHE)与夏季北大西洋涛动(SNAO)的关系,SNAO是正位相时对应中国北部EHE发生频率减少,SNAO负位相时对应中国北部EHE发生频率增加;同时他们在2011年发现中国的EHE也存在较强的年代际变化特征。此外东亚地区纬度跨度

大,我们在接下来对东亚地区热浪研究中会考虑改进热浪的5度距平定义方法,并且东亚地区气温影响因子多,很多前人的研究都表明北大西洋涛动、北太平洋涛动、副热带高压以及热带大气低频振荡(MJO)都对东亚地区夏季温度有很大影响,我们将在以后的研究中会进一步探讨这些问题。

参考文献 (References)

- Barriopedro D, Fischer E M, Luterbacher J, et al. 2011. The hot summer of 2010: Redrawing the temperature record map of Europe [J]. *Science*, 332 (6026): 220–224, doi: 10.1126/science.1201224.
- Black E, Blackburn M, Harrison G, et al. 2004. Factors contributing to the summer 2003 European heatwave [J]. *Weather*, 59 (8): 217–223, doi: 10.1256/wea.74.04.
- Dole R, Hoerling M, Perlwitz J, et al. 2011. Was there a basis for anticipating the 2010 Russian heat wave? [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 38 (6): L06702, doi: 10.1029/2010GL046582.
- Fischer E M, Schär C. 2010. Consistent geographical patterns of changes in high-impact European heatwaves[J]. *Nature Geoscience*, 3 (6): 398–403,

doi:10.1038/ngeo866.

- Luo D, Lupo A R, Wan H. 2007. Dynamics of eddy-driven low-frequency dipole modes. Part I: A simple model of North Atlantic Oscillations [J]. *J. Atmos. Sci.*, 64 (1): 3–28, doi: 10.1175/JAS3818.1.
- Meehl G A, Tebaldi C. 2004. More intense, more frequent, and longer lasting heat waves in the 21st century [J]. *Science*, 305 (5686): 994–997.
- Schubert S D, Wang H L, Koster R D, et al. 2014. Northern Eurasian heat waves and droughts[J]. *J. Climate*, 27 (9): 3169–3207, doi: 10.1175/JCLI-D-13-00360.1.
- Stefanon M, D’Andrea F, Drobinski P. 2012. Heatwave classification over Europe and the Mediterranean region [J]. *Environmental Research Letters*, 7 (1): 014023, doi:10.1088/1748-9326/7/010423.
- Stott P A, Stone D A, Allen M R. 2004. Human contribution to the European heatwave of 2003[J]. *Nature*, 432 (7017): 610–614, doi: 10.1038/nature03089.
- Sun J Q. 2012. Possible impact of the summer North Atlantic Oscillation on extreme hot events in China[J]. *Atmospheric and Oceanic Science Letters*, 5(3): 231–234, doi: 10.1080/16742834.2012.11446996.
- Trenberth K E, Fasullo J T. 2012. Climate extremes and climate change: The Russian heat wave and other climate extremes of 2010 [J]. *J. Geophys. Res.*, 117 (D17): D17103, doi: 10.1029/2012JD018020.
- Vautard R, Yiou P, D’Andrea F, et al. 2007. Summertime European heat and drought waves induced by wintertime Mediterranean rainfall deficit [J]. *J. Geophys. Res.*, 34 (7): L07711, doi: 10.1029/2006GL028001.