

肖秀程, 黄丹青, 严佩文. 极端气温和极端降水复合事件的气候特征. 气象科学, 2020, 40(6): 744-751.

XIAO Xiucheng, HUANG Danqing, YAN Peiwen. The climatic characteristics of compound extreme events. Journal of the Meteorological Sciences, 2020, 40(6): 744-751.

极端气温和极端降水复合事件的气候特征

肖秀程¹ 黄丹青^{1,2} 严佩文³

(1 南京大学 大气科学学院, 南京 210023; 2 南京信息工程大学 气象灾害教育部重点实验室, 南京 210044;

3 绍兴市气象局 浙江 绍兴 312000)

摘要 基于1961—2014年的中国台站资料, 侧重探讨极端气温和极端降水复合事件的气候特征。结果表明, 基于客观方法检测出四类极端复合事件: 暖湿、暖干、冷湿和冷干。四类事件的频发区分别位于东北地区、华南地区、西藏及华南地区和长江以南及云贵高原一带。全国暖湿、暖干事件频数呈增加趋势, 春夏季频发; 冷湿事件频数在西藏东北一带呈增加趋势, 而在长江流域呈减少趋势, 夏秋季频发; 冷干事件频数呈减少趋势, 秋冬季频发。四类极端复合事件经验正交分解的时间序列主模态均表现为年代际信号。进一步分析四类复合事件与能源消费量的联系表明, 极端湿事件与能源消费量呈正相关, 而极端干事件则相反。

关键词 极端复合事件; 极端气温; 极端降水; 能源消耗

分类号: P434

doi: 10.3969/2019jms.0047

文献标识码: A

The climatic characteristics of compound extreme events

XIAO Xiucheng¹ HUANG Danqing^{1,2} YAN Peiwen³

(1 School of Atmospheric Sciences, Nanjing University, Nanjing 210023, China;

2 Key Laboratory of Meteorological Disaster, Ministry of Education Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China;

3 Shaoxing Meteorological Bureau, Zhejiang Shaoxing 312000, China)

Abstract Based on the observation stations data in China from 1961 to 2014, the climatic characteristics of the temperature and precipitation compound extreme events were investigated. Results show that: four events were indicated as warm-wet, warm-dry, cold-wet and cold-dry events. The frequency of warm-wet event and warm-dry event show significant increasing over China and the two events mostly occurs in spring and summer. The frequency of cold-wet events show significant increasing in northeastern Tibet and decreasing in the Yangtze River Basin, and the events frequently occur in summer, autumn and winter. The frequency of cold-dry events has generally decreased, and the events frequently occur in autumn and winter. The EOF results of the four compound extreme events show significant decadal variability. The frequency of extreme wet events has positively correlated with the energy consumption, while vice versa for the extreme dry events.

Key words compound extreme events; temperature extremes; precipitation extreme; energy consumption

收稿日期(Received): 2019-06-24; 修改稿日期(Revised): 2019-10-12

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFA0600701); 国家自然科学基金资助项目(41575071); 气象灾害教育部重点实验室(南京信息工程大学) 开放课题(KLME1502)

通信作者(Corresponding author): 黄丹青(HUANG Danqing). huangdq@nju.edu.cn

引言

近年来,随着全球变暖,全球气候日趋复杂,极端天气气候事件频发,对人类生产生活造成了极大的影响和危害^[1-2]。IPCC 评估报告^[3]指出极端事件会影响人类健康、农业生产、水利等,导致不同程度的人口伤亡和经济损失。我国幅员辽阔,受东亚季风、青藏高原大地形、厄尔尼诺等多种因子影响^[4-7],气候的时空分布复杂多样,区域性特征明显,受极端事件的影响更为显著。因此,深入研究极端事件的演变规律和形成机制对提高致灾极端事件的预测水平具有科学意义和应用价值。

目前,极端事件已成为国内外研究的重点。在进行特征和机理分析之前,首先需要给出极端事件的定义。从单个站点来看,极端事件通常使用相对极值或绝对物理界限值来定义^[8],主要包括累积频率法^[9-10]和概率拟合法。累积频率法常取某时间段气温和降水的百分位作为极端事件定义的阈值,超过高阈值或低于低阈值即为一次极端事件。而概率拟合法包含概率倒数表示的重现期^[11]和 GEV^[12]、Gamma^[13-14]、GPD^[15]等函数分布拟合。绝对物理界限值一般使用绝对阈值法定义,如暴雨的标准定义为日降水量超过 50 mm,霜冻日数定义为日最低气温低于 0 °C 的天数。也有部分研究考虑到区域性的极端事件,从空间区域性来看,黄丹青等^[16]利用基准站的高概率站群和面积指数定义了极端降水事件的区域性;杨萍等^[17]提出 k 阶最近邻距离丛集点提取算法适用于极端事件的区域群发性研究;任福民^[18]提出“糖葫芦串”客观识别方法定义区域性极端事件;况雪源等^[19]客观地引入了站点分组扫描半径和群发性事件站数阈值来定义群发性极端气温事件;孙婧超等^[20]使用站点区域平均结果的百分位阈值作为群发性事件定义的标准。

基于不同的极端事件的定义,大量前期研究都表现出几乎一致的结论,即各类极端事件的变化都极大程度地受到人类活动的影响^[21]。IPCC 评估报告把与天气和气候相关的极端事件分为四类,其中位居前两位的就是极端气温和极端降水事件,主要包括高温热浪、寒潮、极端干旱、强降水和闪洪等^[3]。以往研究大多针对气温和降水单一极端事件的特征、机制和未来预估问题。就中国而言,近 50 a 来的观测资料显示,全国的平均高温日数先降后增^[22]。2000s 以来极端高温事件频数和强度增多增强^[8, 23],年均极端高温频数趋于上升,但其变化存

在空间分布差异,频数上内蒙古和新疆北部显著增加,而东南沿海则减少,强度上东北地区明显减弱,云南西北部和海南省大部分地区明显增加^[9, 24-25]。极端低温的变化表现为气温日较差、平均霜冻日数和冷日冷夜的减少,极端低温天数和寒潮事件频数显著下降,强度减弱^[22, 26]。作为极端干旱事件频发的显著区域,近 50 a 全国气象干旱面积显著增加,尤其是北方半干旱地区如黄河中下游,这一变化的主要原因是降水特别是微量降水的减少和地表气温的升高。对于极端降水,总体上暴雨事件增多,极端降水强度在全国范围内存在普遍增加趋势,降水日数在全国除西北地区显著减少^[27-28],但存在明显的空间和季节性差异^[29-31]。

任国玉等^[8]回顾了近年来中国极端气候变化的观测研究,发现以往的研究大多针对极端强降水、极端干旱、极端高温和极端低温单个事件的探讨,缺乏对特定区域多种极端气候综合效应的研究。但是,气温和降水极端事件有时候是同时发生的,并且极端复合事件的致灾性更强。有研究已评估了极端复合事件的潜在风险,认为研究它们的协同效应更为重要^[1]。也有少量研究关注到极端复合事件,如 HAO *et al*^[10]从观测和模式两个方面评估了四种极端复合事件在全球尺度上的变化。但仍缺乏针对中国地区的极端气温和极端降水协同作用的研究。

本文将围绕中国地区极端气温和极端降水的复合事件,提出客观的检测方法,分析极端复合事件的气候态、趋势、时空异常和区域性特征,并进一步讨论极端气温和降水复合事件与我国主要能源消耗量的可能联系。

1 资料与方法

1.1 资料

选取中国气象局提供的全国 724 个站点的逐日气温资料和逐日降水量资料(<http://data.cma.cn/site/index.html>)。研究时段为 1961—2014 年。为了进一步分析极端复合事件的区域差异,沿用 ZHU *et al*^[32]的区域规划,侧重将我国划分成 8 个子区域以进一步分析区域性特征,区域划分为:东北地区(NEC, 42°~52°N, 110°~135°E),华北地区(NC, 34°~42°N, 110°~122°E),长江淮河流域(YHRB, 28°~34°N, 110°~122°E),华南地区(SC, 20°~28°N, 110°~122°E),黄河上游(UYR, 34°~43°N, 98°~110°E),西南地区(SWC, 20°~34°N,

98°~110°E),西北地区(NWC, 34°~47°N, 74°~98°E)和青藏高原(TP, 27°~34°N, 76°~98°E)。

能源资料来源于国家数据网(<http://data.stats.gov.cn>)分省年度数据能源分类中主要能源产品消费量,统计了柴油、电力、焦炭、煤炭、煤油、汽油、燃料油、天然气、原油 9 种主要能源,时间长度为 1995—2014 年,由于原数据统计单位不同未计算能源总量。

1.2 极端气温和极端降水复合事件的定义

为了从某种程度上排除极端事件只发生在某个特定的季节或月份,参考闵岫等^[27]和黄丹青等^[16]对单独极端降水和单独极端气温事件的定义,基于累积频率的方法,针对各站 1961—2014 年的逐日降水(气温)资料,各月均取第 75 和 25 个百分位所对应的日降水(气温)值作为降水(气温)的高、低阈值,某站某日气温(降水)大于等于该月高阈值或小于等于该月低阈值即为一次极端事件。由于考虑的是同时发生极端气温和极端降水的极端复合事件,所以百分位的选取上不同于以往定义中选取的 90%(95%)和 10%(5%),而是适当放低了标准,分别选取 75%和 25%来判定高、低阈值。

根据气温和降水量的高低阈值定义如下四类极端复合事件:

(1) 暖湿事件:某站某日气温与日降水量均大于等于同月高阈值,则判定为一次暖湿事件,记为 Warm-Wet(WW)。

(2) 暖干事件:某站某日气温大于等于同月高阈值且日降水量小于等于同月低阈值,则判定为一次暖干事件,记为 Warm-Dry(WD)。

(3) 冷湿事件:某站某日气温小于等于同月低阈值且日降水量大于等于同月高阈值,则判定为一次冷湿事件,记为 Cold-Wet(CW)。

(4) 冷干事件:某站某日气温与日降水量均小于等于同月低阈值,则判定为一次冷干事件,记为 Cold-Dry(CD)。

1.3 极端气温和极端降水复合事件区域性指数的定义

引入极端复合事件区域性指数表征极端复合事件的区域性特征。基于以下步骤给出区域性极端复合事件的定义:

(1) 判定极端气温和极端降水事件的频发季节。获取需要判定所有站点逐日的极端复合事件信息,分别计算四类极端复合事件在 4 个季节的发生频数,统计并找出所有站点四类极端复合事件发

生次数最多的季节;

(2) 针对选定的区域,对每个事件,分别计算区域内各个频发季节对应的站点数与总站点数之比,取比重最大的季节来确定该区域暖湿事件、暖干事件、冷湿事件和冷干事件分别对应的季节;

(3) 针对选定的区域,不同的极端复合事件,将研究时段锁定在发生频次最多的季节,分别统计单日同时发生某类极端复合事件的站点个数。

以华南地区的区域性暖湿事件为例,统计该区域 1961—2014 年的频发季节(春季 3—5 月)中,每日同时发生在华南地区暖湿事件的站点个数,选取逐年的华南地区同时发生暖湿事件站点个数的最大值作为该年的区域性指数。站点个数多则可近似表明区域性极端复合事件的影响范围较大,反之。以区域为单位进行划分,是因为在某个特定区域范围内的气候特征较为一致。此外,本文讨论的是空间的区域性,在后续的研究中还需要进一步添加时间群发性的讨论。

2 结果和分析

2.1 气候态

图 1 给出了 1961—2014 年平均的全国四类极端复合事件的频数分布。结果表明,暖湿事件的频发区位于东北、长三角和青海一带,尤其以东北最为显著。暖干事件多发生于 30°N 以南,尤其是华南一带。冷湿事件的频发区为西藏和华南地区。冷干事件多发生于长江以南地区,集中于云贵高原一带。综合比较四类极端复合事件频数分布可知,我国华南地区的暖干事件的发生频次是最高的。

2.2 线性趋势

图 2 给出了 1961—2014 年四类复合事件频数的趋势分布,表明,暖湿事件在整个中国区域均呈线性增长趋势,尤其以西藏、东北和西北地区最为明显。暖干事件除了在西藏地区的频数呈弱增加趋势,全国大部分地区都为减少趋势,尤以西南地区最为明显。冷湿事件则在西藏和东北一带频数明显增加,长江中游一带有较弱的减少趋势。冷干事件在全国大部分地区的发生频数都呈显著减少趋势。就四类事件比较而言,湿事件在全国范围均呈显著上升趋势,而干事件则表现为显著下降趋势,尤其是西南地区。

2.3 时空异常特征

利用 EOF 分解的方法,系统性分析四类极端复合事件的时空异常模态。由于篇幅限制,只给出了

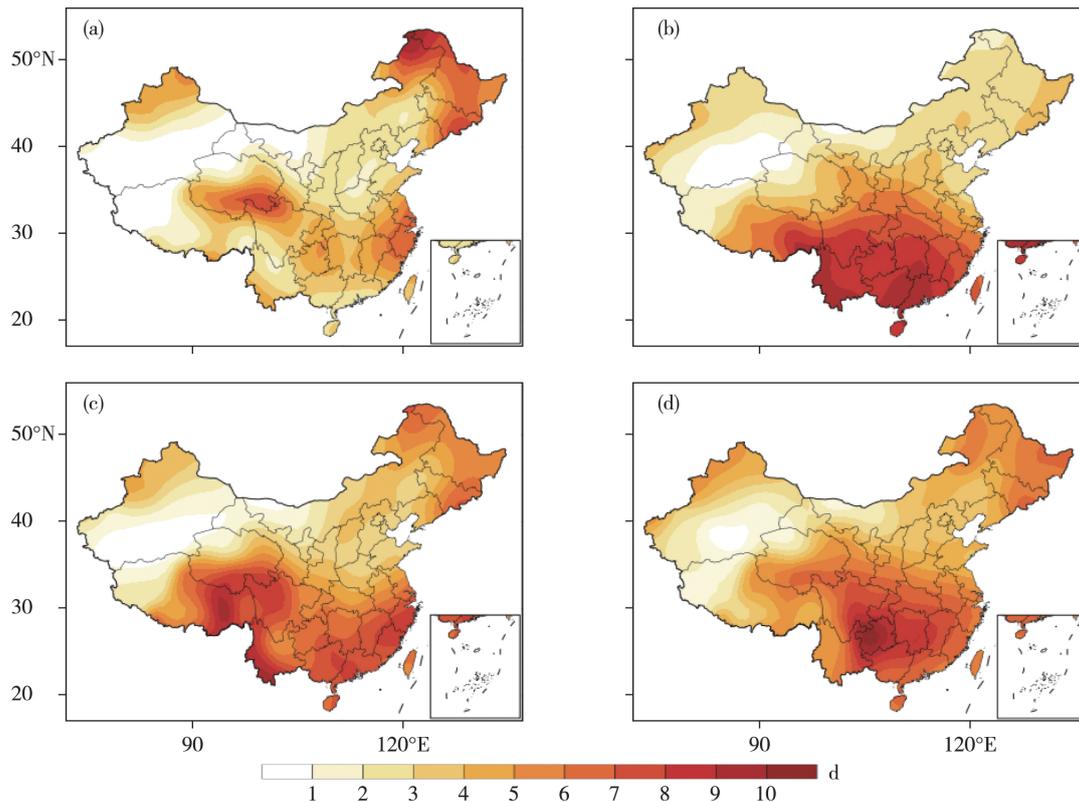


图1 1961—2014年平均的全国四类极端复合事件的频数分布(单位:日数):

(a) 暖湿事件; (b) 暖干事件; (c) 冷湿事件; (d) 冷干事件

Fig.1 Climatological annual frequency of four compound extreme events in China during 1961-2014 (unit: d):

(a) WW; (b) WD; (c) CW; (d) CD

EOF分解的第一模态结果(图3)。暖湿、暖干、冷湿和冷干事件发生频数的EOF分解第一模态的方差贡献分别是44.3%、27.0%、43.9%和43.7%。暖湿、冷湿和冷干事件的空间分布表现为全场一致的变化形式,大值中心分别位于新疆北部、西藏—青海地区和东北地区(图3a),西藏、云南、东北地区(图3c)和四川、云南、浙江(图3d)。暖干事件发生频数第一模态的空间分布表明全国大部分地区 and 新疆西部呈反相变化形式(图3b)。四类事件的时间序列呈现年代际异常,其中湿事件(暖湿和冷湿事件)呈显著上升趋势,而干事件(暖干和冷干事件)约在1970s末后迅速减少。EOF分解第二模态的结果(图略)表明,第二模态对应的时间序列则以年际变率为主。

2.4 区域性特征

以上结果均基于全年平均,然而,在不同季节发生的极端复合事件造成的气候影响完全不同。同时,在分析区域性特征之前,首先需要计算出全国各个站点的频发季节。因此,进一步分析了1961—2014年四类极端复合事件的频发季节。结果表明,暖湿事件多发于春、夏季,其中东北、华北

和西藏地区主要为夏季,其他地区主要为春季。暖干事件的频发季节同样集中在春季和夏季,其中西南地区 and 长江流域主要为春季,而其他地区主要为夏季。冷湿事件的频发季节则为夏、秋和冬季,从站点分布来看,全国大部分地区频发于秋季,华南和四川部分地区为冬季,而云南、西藏等部分地区为夏季。冷干事件的频发季节集中在秋季和冬季,除新疆和两广部分地区为冬季,我国其余地区多频发于秋季。

基于对极端气温和降水复合事件的区域性指数的定义,由于我国东部地区的站点比较密集,所以区域性特征侧重在东部地区,其区域性指数结果见表1,从线性趋势来看,只有东北地区的冷干事件和华南地区的冷湿事件有强的负趋势;暖湿事件对应均值的大、小值分别在华南、华北区域,暖干事件的最大均值在长江流域,最小均值在华北地区,冷湿事件的最大均值在长江流域,最小均值在东北地区,冷干事件对应的均值大、小值分别在华南、华北地区。该指数大值说明该区域同时发生该种极端复合事件的站点个数较多,影响范围较大,反之。

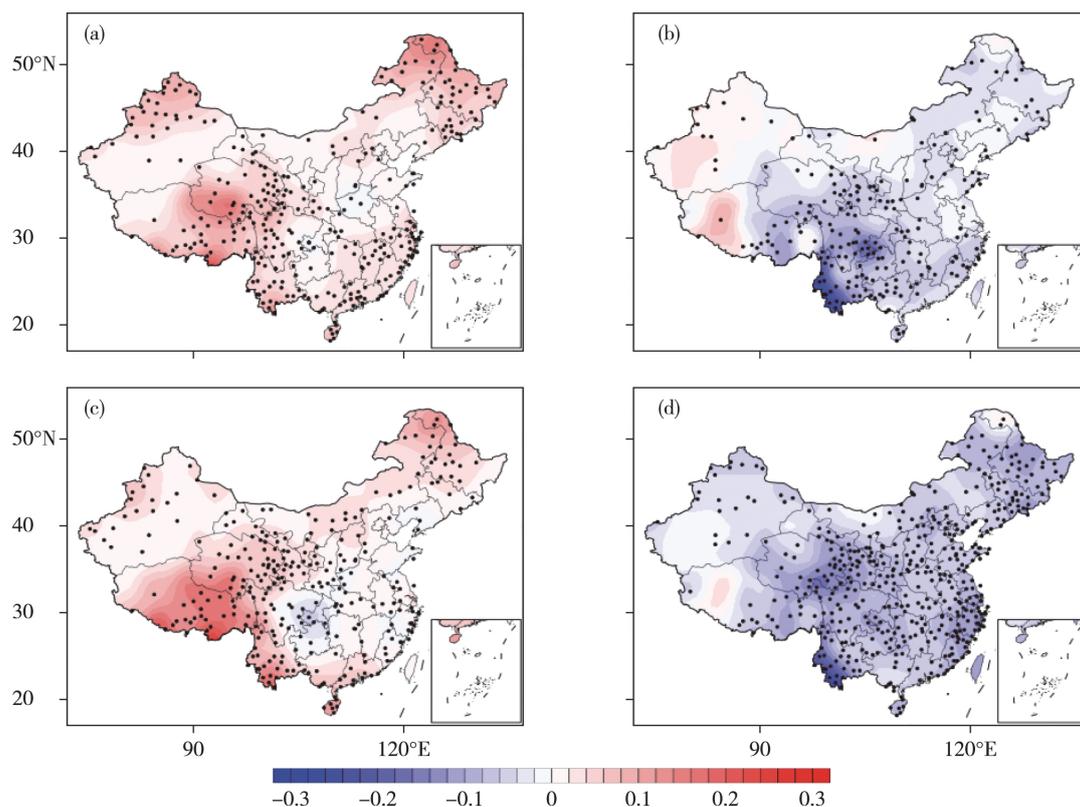


图2 1961—2014年四类复合事件频数的趋势分布(黑点表示通过 $\alpha=0.05$ 显著性水平检验的站点):

(a) 暖湿事件; (b) 暖干事件; (c) 冷湿事件; (d) 冷干事件

Fig.2 Trend distribution of the frequency of four compound extreme events in China during 1961-2014

(black dots indicate stations with trends are confident at the 95% level):

(a) WW; (b) WD; (c) CW; (d) CD

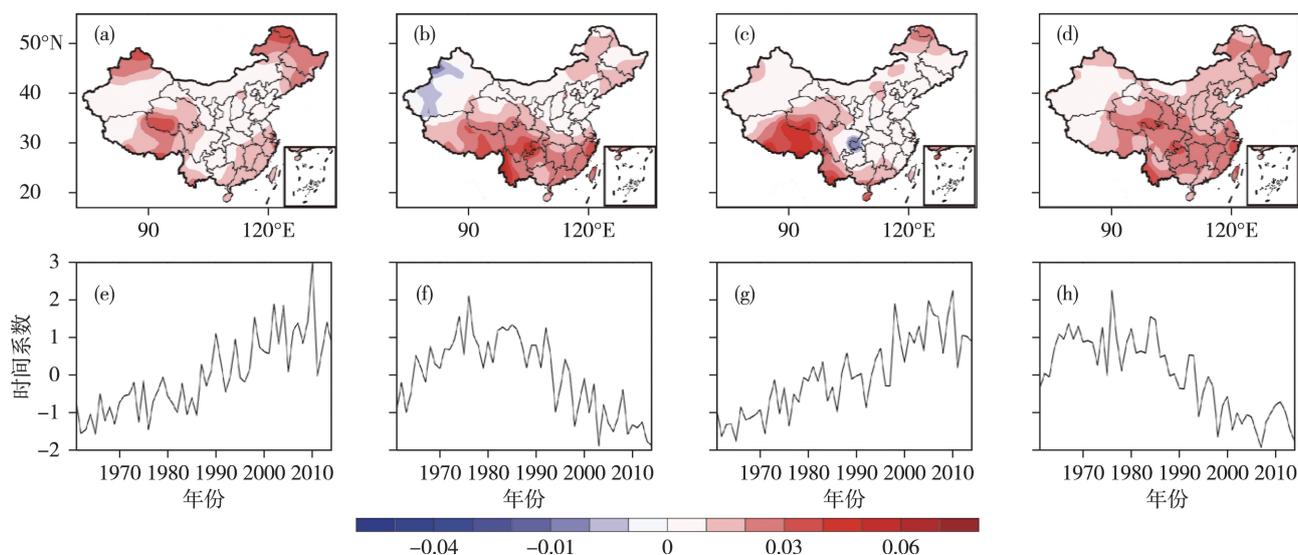


图3 极端复合事件频数 EOF 分析第一模态的特征向量 EOF1 (a—d) 和对应的标准化的时间系数 PC1 (e—h):

(a,e) 暖湿事件; (b,f) 暖干事件; (c,g) 冷湿事件; (d,h) 冷干事件

Fig.3 Spatial distribution and the corresponding time coefficient series of the first component of EOF analysis in the frequency of four compound extreme events in China from 1961 to 2014: (a, e) WW; (b, f) WD; (c, g) CW; (d, h) CD

2.5 与能源消耗的可能联系

选取多元回归的方法探讨四类极端复合事件对能源消耗作用的相对贡献。即分别针对我国 8 个

子区域,统计区域内所有站点受极端复合事件影响的主导因子,进而得到不同区域受九类复合极端事件影响因子比例(图 4)。由此可见,影响东北地区

表 1 中国东部地区区域性极端复合事件指数

Table 1 The regional index of four compound extreme events in eastern China

区域	WW			WD			CW			CD		
	趋势	均值	标准差	趋势	均值	标准差	趋势	均值	标准差	趋势	均值	标准差
NEC	-0.102	11.45	7.45	0.059	12.55	5.01	-0.028	23.46	14.17	-0.104*	25.58	5.85
NC	-0.053	11.44	6.68	-0.038	8.51	2.70	-0.158	30.37	13.13	-0.051	22.47	6.08
YHRB	-0.014	46.26	8.66	-0.013	25.61	4.12	-0.032	53.00	10.50	0.016	26.06	5.43
SC	0.015	56.31	12.06	-0.016	24.24	3.67	-0.621*	36.45	21.85	0.029	29.04	6.10

注: * 号代表趋势通过 $\alpha=0.05$ 显著性水平检验的站点。

燃料消费量的主导因子为暖干事件,影响华北地区的主导因子为暖湿和冷湿事件,影响长江流域的主导因子为冷干事件,影响黄河上游地区的主导因子都是暖湿事件,影响西北的主导因子为暖干和冷湿事件,影响华南、西南、西藏地区的主导因子都是暖干事件。同时检验了各类主要能源之间的相关性,表明我国 9 种燃料消费量在 1995—2014 年间的相关系数都大于 0.75(表略),因此,各类典型的燃料消费量与各类极端复合事件频数的回归结果较一致(图略)。

3 结论

基于 1961—2014 年的我国逐日气温和降水的站点资料,提出了客观检测极端气温和极端降水的复合事件的方法,并进一步分析四类复合事件的特征和气候效应,主要结论如下:

(1) 四类极端复合事件的气候态分布表明,暖湿事件频发于东北地区、长三角地区和青海一带,尤其以东北最为显著;暖干事件频发于 30°N 以南,

尤其是华南一带;冷湿事件频发于西藏地区和华南地区;冷干事件频发于长江以南地区和云贵高原一带。比较四类事件气候态特征表明,华南地区的暖干事件的发生频次最高。

(2) 四类极端复合事件的趋势分析表明,暖湿事件在中国整个区域均呈线性增长趋势,尤其以西藏、东北和西北地区最为明显。暖干事件除西藏地区的频数呈弱的增加趋势,全国大部分地区为减少趋势,尤其以西南地区最为明显。冷湿事件则是西藏和东北一带的频数明显增加,长江中游一带有较弱的减少趋势。冷干事件在全国大部分地区的发生频数都是显著减少的。

(3) 四类极端复合事件的时空异常表明,暖湿、冷湿和冷干事件频数的空间分布表现为全场一致的变化形式,而暖干事件则表现为全国大部分地区 and 新疆西部的反相变化形式,对应四类事件的时间序列主要表现为年代际异常。

(4) 四类极端复合事件区域性特征分析表明,东北地区冷干事件和华南地区的冷湿事件有

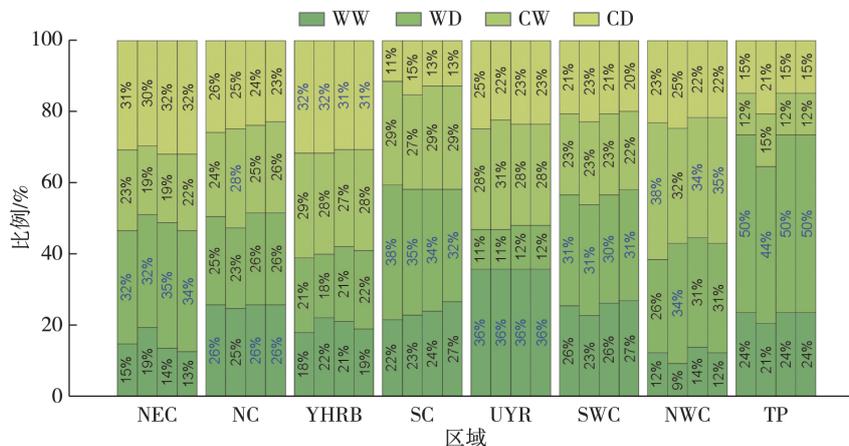


图 4 燃料消费量在不同区域受复合事件主要影响因子所占比例

(从左往右分别是柴油、电力、焦炭、煤炭,不同颜色代表不同复合事件,最大因子用蓝色数值标出)

Fig.4 The percentage of the dominant factors of compound extreme events on energy consumption in different regions (The columns are diesel, electricity, coke and coal from left to right; different colors represent different compound extreme events; the dominant factor is marked in blue)

强的负趋势; 暖湿事件对应的均值大、小值分别在华南、华北区域, 暖干事件的最大均值在长江流域, 最小均值在华北地区, 冷湿事件的最大均值在长江流域, 最小均值在东北地区, 冷干事件对应的均值大、小值分别在华南、华北地区。

(5) 极端复合事件频次与我国主要能源消费量间的关系表明, 影响东北地区燃料消费量的主导因子为暖干事件, 影响华北地区的主导因子为暖湿和冷湿事件, 影响长江流域的主导因子为冷干事件, 影响黄河上游地区的主导因子都是暖湿事件, 影响西北的主导因子为暖干和冷湿事件, 影响华南、西南、西藏地区的主导因子为暖干事件。

参 考 文 献

- [1] Zscheischler J, Westra S, van den Hurk B J J M, et al. Future climate risk from compound events. *Nat. Climate Change*, 2018, 8(6): 469-477.
- [2] Poumadère M, Mays C, Le Mer S, et al. The 2003 heat wave in France: dangerous climate change here and now. *Risk Anal.*, 2005, 25(6): 1483-1494.
- [3] IPCC. Managing the risks of extreme events and disasters to advance climate change adaptation: a special report of working groups I and II of the intergovernmental panel on climate change. Cambridge: Cambridge University Press, 2012.
- [4] 赵平, 陈隆勋. 35 a 来青藏高原大气热源气候特征及其与中国降水的关系. *中国科学(D 辑)*, 2001, 31(4): 327-332.
ZHAO Ping, CHEN Longxun. Climatic features of atmospheric heat source/sink over the Qinghai-Xizang Plateau in 35 years and its relation to rainfall in China. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 2001, 44(9): 858-864.
- [5] 赵平, 周秀骥, 陈隆勋, 等. 中国东部——西太平洋副热带季风和降水的气候特征及成因分析. *气象学报*, 2008, 66(6): 940-954.
ZHAO Ping, ZHOU Xiujun, CHEN Longxun, et al. Characteristics of subtropical monsoon and rainfall over eastern China and western North Pacific and associated reasons. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 2008, 66(6): 940-954.
- [6] HUANG Ronghui, WU Yifang. The influence of ENSO on the summer climate change in China and its mechanism. *Adv. Atmos. Sci.*, 1989, 6(1): 21-32.
- [7] HUANG Ronghui, CHEN Jilong, HUANG Gang. Characteristics and variations of the East Asian monsoon system and its impacts on climate disasters in China. *Adv. Atmos. Sci.*, 2007, 24(6): 993-1023.
- [8] 任国玉, 封国林, 严中伟. 中国极端气候变化观测研究回顾与展望. *气候与环境研究*, 2010, 15(4): 337-353.
REN Guoyu, FENG Guolin, YAN Zhongwei. Progresses in observation studies of climate extremes and changes in mainland China. *Climatic and Environmental Research (in Chinese)*, 2010, 15(4): 337-353.
- [9] 黄丹青, 钱永甫. 我国极端气温事件的定义和趋势分析. *中山大学学报(自然科学版)*, 2008, 47(3): 112-116.
HUANG Danqing, QIAN Yongfu. The definition of daily mean temperature extremes over China and its trend. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni (in Chinese)*, 2008, 47(3): 112-116.
- [10] HAO Zengchao, Aghakouchak A, Phillips T J. Changes in concurrent monthly precipitation and temperature extremes. *Environ. Res. Lett.*, 2013, 8(3): 034014.
- [11] 王艳君, 刘俸霞, 翟建青, 等. 全球升温 1.5 °C 与 2.0 °C 目标下长江流域极端降水的变化特征. *气象科学*, 2019, 39(4): 540-547.
WANG Yanjun, LIU Fengxia, ZHAI Jianqing, et al. Variation characteristics of extreme precipitation in the Yangtze River Basin under the global warming 1.5 °C and 2.0 °C. *Journal of the Meteorological Sciences (in Chinese)*, 2019, 39(4): 540-547.
- [12] 万仕全, 周国华, 潘柱, 等. 南京过去 100 a 极端日降水量模拟研究. *气象学报*, 2010, 68(6): 790-799.
WAN Shiquan, ZHOU Guohua, PAN Zhu, et al. A simulative study of extreme daily rainfall in Nanjing for the past 100 years. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 2010, 68(6): 790-799.
- [13] 翟盘茂, 潘晓华. 中国北方近 50 a 气温和降水极端事件变化. *地理学报*, 2003, 58(S1): 1-10.
ZHAI Panmao, PAN Xiaohua. Change in extreme temperature and precipitation over northern China during the second half of the 20th century. *Acta Geographica Sinica (in Chinese)*, 2003, 58(S1): 1-10.
- [14] 龚志强, 王晓娟, 支蓉, 等. 中国近 58 a 气温极端事件的区域特征及其与气候突变的联系. *物理学报*, 2009, 58(6): 4342-4353.
GONG Zhiqiang, WANG Xiaojuan, ZHI Rong, et al. Regional characteristics of temperature changes in China during the past 58 years and its probable correlation with abrupt temperature change. *Acta Physica Sinica (in Chinese)*, 2009, 58(6): 4342-4353.
- [15] 郭军, 任国玉, 李明财. 环渤海地区极端降水事件概率分布特征. *气候与环境研究*, 2010, 15(4): 425-432.
GUO Jun, REN Guoyu, LI Mingcai. Characteristics of the probability distribution of the extreme precipitation events around the Bohai Bay. *Climatic and Environmental Research (in Chinese)*, 2010, 15(4): 425-432.
- [16] 黄丹青, 钱永甫. 极端气温事件区域性的分析方法及其结果. *南京大学学报(自然科学版)*, 2009, 45(6): 715-723.
HUANG Danqing, QIAN Yongfu. The analysis method of regional characteristics of extreme temperature and its results. *Journal of Nanjing University (Natural Sciences) (in Chinese)*, 2009, 45(6): 715-723.
- [17] 杨萍, 封国林, 刘伟东, 等. 空间点过程理论在极端气候事件中的应用研究. *应用气象学报*, 2010, 21(3): 352-359.
YANG Ping, FENG Guolin, LIU Weidong, et al. Cluster extreme events based on point process theory. *Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese)*, 2010, 21(3): 352-359.
- [18] 任福民. 中国干旱、强降水、高温和低温区域性极端事件. *气*

- 象, 2015, 41(3): 388.
- REN Fumin. The drought, high precipitation, high temperature and low temperature regional extremes of China. *Meteorological Monthly (in Chinese)*, 2015, 41(3): 388.
- [19] 况雪源, 王遵娅, 张耀存, 等. 中国近 50 a 来群发性高温事件的识别及统计特征. *地球物理学报*, 2014, 57(6): 1782-1791. KUANG Xueyuan, WANG Zunya, ZHANG Yaocun, et al. Identification and statistical characteristics of the cluster high temperature events during last fifty years. *Chinese Journal of Geophysics (in Chinese)*, 2014, 57(6): 1782-1791.
- [20] 孙婧超, 管兆勇, 李明刚, 等. 华南地区 7—10 月两类区域性极端降水事件特征及环流异常对比. *气象学报*, 2019, 77(1): 43-57. SUN Jingchao, GUAN Zhaoyong, LI Minggang, et al. Anomalous circulation patterns in association with two types of regional daily precipitation extremes over South China from July to October. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 2019, 77(1): 43-57.
- [21] Coumou D, Rahmstorf S. A decade of weather extremes. *Nat. Climate Change*, 2012, 2(7): 491-496.
- [22] 丁一汇, 任国玉, 石广玉, 等. 气候变化国家评估报告(I): 中国气候变化的历史和未来趋势(英文). *气候变化研究进展*, 2006, 3(S1): 1-5. DING Yihui, REN Guoyu, SHI Guangyu, et al. China's national assessment report on climate change (I): climate change in China and the future trend. *Advances in Climate Change Research*, 2006, 3(S1): 1-5.
- [23] 刘学华, 季致建, 吴洪宝, 等. 中国近 40 a 极端气温和降水的分布特征及年代际差异. *热带气象学报*, 2006, 22(6): 618-624. LIU Xuehua, JI Zhijian, WU Hongbao, et al. Distributing characteristics and interdecadal difference of daily temperature and precipitation extremes in China for latest 40 years. *Journal of Tropical Meteorology (in Chinese)*, 2006, 22(6): 618-624.
- [24] 章大全, 钱忠华. 利用中值检测方法研究近 50 a 中国极端气温变化趋势. *物理学报*, 2008, 57(7): 4634-4640. ZHANG Daquan, QIAN Zhonghua. Analysis of extreme events in China's temperature in recent 50 years using detecting method based on median. *Acta Physica Sinica (in Chinese)*, 2008, 57(7): 4634-4640.
- [25] HUANG Danqing, QIAN Yongfu, ZHU Jian. Trends of temperature extremes in China and their relationship with global temperature anomalies. *Adv. Atmos. Sci.*, 2010, 27(4): 937-946.
- [26] 钱维宏, 张玮玮. 我国近 46 a 来的寒潮时空变化与冬季增暖. *大气科学*, 2007, 31(6): 1266-1278. QIAN Weihong, ZHANG Weiwei. Changes in cold wave events and warm winter in China during the last 46 years. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 2007, 31(6): 1266-1278.
- [27] 闵岫, 钱永甫. 我国近 40 a 各类降水事件的变化趋势. *中山大学学报(自然科学版)*, 2008, 47(3): 105-111. MIN Shen, QIAN Yongfu. Trends in all kinds of precipitation events in China over the past 40 years. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni (in Chinese)*, 2008, 47(3): 105-111.
- [28] 翟盘茂, 王萃萃, 李威. 极端降水事件变化的观测研究. *气候变化研究进展*, 2007, 3(3): 144-148. ZHAI Panmao, WANG Cuicui, LI Wei. A review on study of change in precipitation extremes. *Advances in Climate Change Research (in Chinese)*, 2007, 3(3): 144-148.
- [29] 沈阳, 孙燕, 吴海英, 等. 2018 年 5 月江苏极端降水事件发生前副热带高压异常及原因分析. *气象科学*, 2019, 39(2): 214-225. SHEN Yang, SUN Yan, WU Haiying, et al. Analysis of anomalies and causes of subtropical high before the extreme precipitation events in Jiangsu in May 2018. *Journal of the Meteorological Sciences (in Chinese)*, 2019, 39(2): 214-225.
- [30] 曹瑜, 游庆龙, 马茜蓉. 青藏高原中东部夏季极端降水年代际变化特征. *气象科学*, 2019, 39(4): 437-445. CAO Yu, YOU Qinglong, MA Qianrong. Interdecadal characteristics of the summer extreme precipitation in the central and eastern Tibetan Plateau. *Journal of the Meteorological Sciences (in Chinese)*, 2019, 39(4): 437-445.
- [31] 周莉, 胡瑞卿, 李伟, 等. 湖南省夏季极端降水异常时空特征及其成因分析. *气象科学*, 2018, 38(6): 838-848. ZHOU Li, HU Ruiqing, LI Wei, et al. Characteristics of summer extreme precipitation anomaly and the cause of concurrent anomaly pattern in Hunan province. *Journal of the Meteorological Sciences (in Chinese)*, 2018, 38(6): 838-848.
- [32] ZHU Jian, HUANG Danqing, YAN Peiwen, et al. Can reanalysis datasets describe the persistent temperature and precipitation extremes over China? *Theor. Appl. Climatol.*, 2017, 130(1/2): 655-671.