

近 60 a 丹东极端温度和降水事件变化特征

杜海波¹, 吴正方¹, 张 娜², 宗盛伟¹, 孟祥君^{1,3}

(1. 东北师范大学地理科学学院, 吉林 长春 130024; 2. 辽宁省丹东市第二中学, 辽宁 丹东 118000;
3. 吉林财经大学工商管理学院, 吉林 长春 130024)

摘要: 利用丹东 1951~2010 年逐日温度和降水资料, 以多重分形去趋势波动分析法定义极端事件的阈值, 分析了该地区极端最高温度、极端最低温度和极端降水的变化特征。结果表明: 近 60 a 丹东极端最低温度事件比极端最高温度和极端降水事件发生次数多, 极端最高温度强度比极端最低温度大, 平均超出了 1.5 °C, 而极端降水平均强度为 30.3 mm, 都在 20 世纪 70 年代最小, 70 年代是转折期; 50 年代的极端气候事件(温度和降水)最为严重, 其次是 90 年代, 70 年代的严重度最轻; 极端降水频次变化不明显, 极端最高温度事件可以由夏季平均最高温度的变化预测, 有不显著的增多趋势, 而极端最低温度事件可以用冬季平均日较差温度的变化预测, 在今后一段时间内有显著减少的趋势。

关 键 词: 极端温度; 极端降水; 多重分形去趋势波动分析

中图分类号: P467

文献标识码: A

文章编号: 1000-0690(2013)04-0473-08

在全球变暖的背景下, 极端气候事件对人类生命、社会经济和自然生态系统的危害和严重影响受到了各国政府和学术界的极大关注^[1-4]。极端气候事件造成了严重的损失^[5-8], 因此, 研究极端气候事件频次和强度特征显得非常重要。

在确定极端事件阈值后, 极端事件的频次和强度就很容易计算, 而不同的定义方法会得到不同的结果, 所以研究极端事件最主要的就是确定其阈值。经过对大量文献的调查, 现主要存在以下 3 种确定极端事件阈值的方法: ① 绝对阈值或固定阈值法^[9]。例如 Zhai 等^[10]以 35 °C 作为中国东部逐日极端最高温度的阈值。② 标准差法^[11, 12]。例如 Schönwiese 等^[12]指出逐日降水超过 ± 2 或 ± 3 个标准差就为极端降水。③ 运用最广泛的方法: 百分位法^[12-16]。例如, 逐日最高温度或逐日降水超过第 90、95、97.5 或 99 个百分位时即为极端事件。这些方法都具有理论和实际价值。但目前还没有一个公认的完全能接受的方法来定义极端事件^[17, 18]。固定阈值法可用于气候状况变异较小的区域, 但不适用于跨越广泛气候类型的区域。标准差法是在假设最高和最低温度服从正态分布的

基础上进行, 对定义温度最小值是一个问题^[19]。对于百分位法来说, 最重要的一个问题就是究竟第几个百分位来定义极端事件合适没有得到公认。例如, 第 90 个^[3, 14]、第 95 个^[2]、第 97.5 个^[20]和第 99 个^[21, 22]百分位被用于确定同样的“极端事件”(极端温度或极端降水)。同时, 此方法就意味着当以第 90(97.5)个百分位确定阈值时, 1 a(365 d)有 36(9)d 数据是极端日。但是这可能不能反映某地极端事件发生的实际情况。实际上, 人们已经认识到气候系统的变化具有自记忆特征, 并且在气候时间序列里存在长程相关性, 即系统演化状态具有持续性^[23, 24]。由于极端事件是系统演化的极端状态或异常状态, 不属于系统自身正常演化状态的范畴^[25]。用多重分形去趋势波动分析法(multifractal detrended fluctuation analysis, MF-DFA)^[26]得到的 DFA 指数能衡量系统在某一时间尺度内演化的长程相关性。同时, 极端事件不影响系统整体的长程相关性或影响很小。因此, 可以用 DFA 指数确定极端事件的阈值^[27]。

极端温度和降水事件在大尺度区域已经进行了深入研究, 但具体特定区域没有确定^[28], 而且也

收稿日期: 2012-03-21; 修订日期: 2012-08-05

基金项目: 国家自然科学基金项目(41171038)、吉林省自然科学基金项目(20101561)资助。

作者简介: 杜海波(1987-), 男, 四川南充人, 博士研究生, 研究方向为生态气候。E-mail: duhb655@nenu.edu.cn

通讯作者: 吴正方, 教授。E-mail: wuzf@nenu.edu.cn

需要评估^[29]。极端气候事件的频次和强度概率在不同的区域和时间不同^[17, 30]。丹东是东北地区降水量最多的地区,属于温带大陆季风气候。研究像丹东这样具有特殊气候特点的小区域尺度上极端气候事件有重要的意义^[3, 31],因此,本文选取辽宁省丹东市作为研究区。

1 研究区概况

丹东是辽东山地丘陵的一部分,属于长白山脉向西南延伸的支脉(图1),位于123°31'E~125°41'E,39°45'N~41°7'N,南北宽约160 km,东西长约196 km。地势由东北向西南逐渐降低,以山地和丘陵为主,森林覆盖率达66%。丹东属于温带大陆季风气候,年平均气温为7.23~10.15℃,冬季时间最长,夏季次之,春秋最短。丹东降水量较多,占辽宁省降水量的70%,年平均降水量为581.2~1 470.7 mm。全年降水量的2/3集中在夏季,其中7月中旬至8月中旬是该区暴雨的集中期。

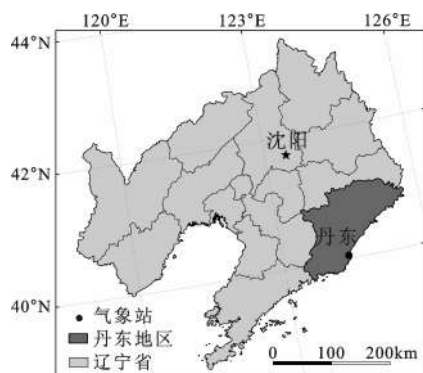


图1 研究区地理位置

Fig. 1 Geographical distribution of the study area

2 数据与方法

2.1 数据

本研究的数据是由中国国家气象局提供的丹东地区1951~2010年逐日温度和降水数据。对极少数缺失数据通过以下方法处理:① 60 a总计21 915 d数据,平均温度有1 d(1951年1月1日)缺测,用之后5 d数据平均而得,不影响本研究结果。最高温度和最低温度无缺失值。② 降水数据中有1 d(1956年6月15日)数据缺测,2 096 d为微量值(<0.1 mm),307 d为雾露霜,总计2 404 d数据以0值代替。本研究所用数据质量高,可以用于极端温度和降水事件的分析。

2.2 方法

本文以多重分形去趋势波动分析法(multifractal detrended fluctuation analysis, MF-DFA)为基础,确定极端事件的阈值。趋势分析主要采用Mann-Kendall方法^[32, 33]。严重度分析用到Du等^[34]定义的极端事件严重度指数(extreme event severity index, EESI)。EESI越大,极端事件越严重。

2.2.1 MF-DFA方法

MF-DFA不仅能检测时间序列的长程相关性,确定其分形结构,还能判断时间序列是否具有多重分形特征并确定其多重分形特征^[26]。假设 x_k 是长度为 N 的时间序列($x_k, k=1, 2, 3, \dots, N$),MF-DFA方法包括以下5个步骤:

1) 构造一个新的序列 $y(i)$

$$y(i) = \sum_{k=1}^i (x_k - X), i = 1, \dots, N \quad (1)$$

式中, X 是 x_k 的平均值。

2) 将新序列 $y(i)$ 划分为长度为 s 的不重叠的 $N_s = \text{int}(N/s)$ 个子区间。但是序列长度 N 不一定能被子区间长度 s 整除,为保证原序列信息不丢失,可以从序列末端开始反向前再划分一次,这样可得到共 $2N_s$ 个子区间。

3) 用最小二乘法拟合每个子序列的趋势函数,再对每一个子序列 $v(v=1, 2, 3, \dots, N_s)$ 计算其方差:

$$F^2(v, s) = \frac{1}{s} \sum_{i=1}^s \{y[(v-1)s+i] - y_v(i)\}^2 \quad (2)$$

对每一个子序列 $v=N_s+1, N_s+2, \dots, 2N_s$ 计算方差:

$$F^2(v, s) = \frac{1}{s} \sum_{i=1}^s \{y[N - {}^2(v - N_s)s + i] - y_v^2(i)\}^2 \quad (3)$$

式中, $y_v(i)$ 是子序列 v 的拟合多项式,并且 $y_v(i)$ 可以是一阶、二阶或更高阶的多项式,分别记为DFA1, DFA2等。

4) 确定全序列 q 阶波动函数:

$$F_q(s) = \left\{ \frac{1}{2N_s} \sum_{v=1}^{2N_s} [F^2(v, s)]^{q/2} \right\}^{1/q} \quad (4)$$

式中, q 能是任何非零实数。当 $q=0$ 时,式(4)变为:

$$F_0(s) = \exp \left\{ \frac{1}{4N_s} \sum_{v=1}^{2N_s} \ln[F^2(v, s)] \right\} \quad (5)$$

5) 通过分析阶数为 q 的双对数坐标图,可以确定波动函数的标度指数 h_q 。如果序列 x_k 存在长程幂律相关性,则存在幂律关系:

$$F_q(s) \propto s^{h(q)} \quad (6)$$

通过这个方法,可以判断序列是长程负相关的($0 < h_q < 0.5$)、不相关的($h_q = 0.5$)和长程正相关的($0.5 < h_q < 1$)。当 $0.5 < h_q < 1$ 时, h_q (DFA 值) 越大, 序列的长程相关性就越强。通过分析极值对系统 h_q (DFA 值) 的影响来确定极端事件的阈值。

2.2.2 确定极端事件阈值

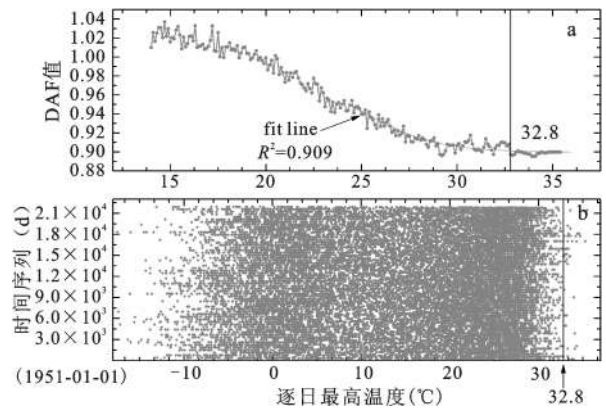
由 MF-DFA 方法得到的 DFA 值能确定在一定的时间内系统演化的长程相关性。而极端事件不会(或很小)影响整个系统的长程相关性。因此, DFA 值能确定极端事件的阈值^[27]。假设 x_i 是长度为 n 的序列 $x_i (x_i, i = 1, 2, 3, \dots, n)$, 确定极端事件的阈值包括以下步骤: ① 找出 x_i 的最大值 x_{\max} 和最小值 x_{\min} ; ② 计算出 x_i 的中点(R), 可以是 x_i 的平均值或中值; ③ 从 x_{\max} 开始, 依次舍去 x_i 区间 $\{x_i, x_i \geq x_{\max} - d \times k\}$ 内的值, 直到 $x_i = R$, 可以依次得到新的序列 $y_j (j = x_{\max} - d \times k)$, 其中 d 是区间间隔, $k = 1, 2, 3, \dots, (x_{\max} - R)/d$ 。同样地, 从 x_{\min} 开始, 依次舍去 x_i 区间 $\{x_i, x_i \leq x_{\min} + d \times k\}$ 内的值, 直到 $x_i = R$, 则依次得到新的序列 $y_j (j = x_{\min} + d \times k)$, 其中 d 是区间间隔, $k = 1, 2, 3, \dots, (R - x_{\min})/d$ 。 d 值代表了此方法的分辨率。 d 值越小, 分辨率越高, 但同时也会导致计算量的增加, 反之亦反。本文中, 确定极端温度阈值时 d 为 0.1°C , 确定极端降水阈值时 d 为 0.1 mm ; ④ 计算每一个新序列 y_j 的长程相关性指数 (DFA 值, D_j); ⑤ 当 D_j 的变化趋于平缓并收敛于数据的原始 h_q 值时, 则此时的 j 值即数据 x_i 极端事件的阈值。

以极端最高温度为例, 图 2 表示了丹东 1951~2010 年逐日最高温度序列的新序列 y_j 的 DFA 值 (D_j) 的变化 (a) 以及逐日最高温度随时间的变化 (b)。可以看出丹东极端最高温度阈值的定义过程, 其结果是 32.8°C 作为近 60 a 丹东极端最高温度阈值。由此方法得出的极端最低温度和极端降水的阈值分别为 -21.3°C 和 111.7 mm 。

3 结果与分析

3.1 平均温度和降水变化趋势

温度和降水的极端情况比平均情况复杂, 因此为了分析极端温度和降水, 首先分析了丹东近 60 a 来逐月、季和年的平均温度、最高温度、最低温度、温度日较差和降水的变化趋势 (表 1)。平均温度在所有月份、季度和年尺度上都为增温趋势, 但有 4 个月的增温不明显 (7 月、8 月、11 月和 12 月),



注: DFA 值变化 (a) 和逐日最高温度随时间的变化 (b), R^2 是判定系数。

图 2 丹东 1951~2010 年逐日极端最高温度阈值

Fig. 2 Threshold of extreme daily maximum temperature in Dandong in 1951-2010

其余 8 个月份均达到 0.05 的显著水平。最高温度也全都表现为上升趋势, 但只有少数月份达到 0.05 显著水平 (1 月、2 月、3 月和 9 月), 而夏季的增温没有达到显著水平。最低温度和平均温度的变化特征基本相似, 都为上升趋势, 并且 7 月、8 月、11 月和 12 月的上升趋势不显著。除了 3 月和 8 月的最高温度上升趋势比最低温度的上升趋势小以外, 其他的都是最低温度上升趋势较大。因此, 除了 3 月和 8 月的温度日较差分别为不显著增加和没有变化以外, 其他时间尺度的温度日较差都为变小趋势, 但只有 1 月、4 月、5 月、12 月、春冬季和年的变小趋势明显。以上分析也说明了丹东地区 2 月的温度对全球变化的响应最明显。降水的变化情况相对复杂, 6~11 月的降水量都有减少趋势, 但均未达到 0.05 的显著水平。其他 6 个月都为增加趋势, 但 4 月的增加趋势不显著。从季节来看, 春冬季均为显著的增加趋势, 而夏秋季则为不显著的减少趋势。春季的增加趋势最大 (1.450 mm/a), 这与姜逢清等^[35]研究新疆北部降水变化时结果为冬夏季增加最多不同, 也说明了区域不同, 其变化特征不同。研究区在年尺度上变化趋势为 -0.401 mm/a 。

3.2 极端温度和降水频次和强度变化特征

为对比 MF-DFA 方法和其他方法的差异, 选取了运用最广泛的百分位方法进行比较 (表 2)。由表 2 可知由百分位确定的阈值的绝对值明显低于由 MF-DFA 方法得到的阈值, 而百分位方法得到的丹东地区近 60 a 的极端温度和降水事件远远高于由 MF-DFA 方法得到的值。比如由 97.5% 百

表1 月、季和年尺度的平均温度、最高温度、最低温度、温度日较差和降水的变化趋势

Table 1 Trends in average, maximum and minimum temperature, daily temperature range and precipitation of month, season and year										
	平均温度		最高温度		最低温度		温度日较差		降水	
	趋势(℃/a)	Sig.	趋势(℃/a)	Sig.	趋势(℃/a)	Sig.	趋势(℃/a)	Sig.	趋势(mm/a)	Sig.
1月	0.050*	0.002	0.037*	0.014	0.063*	0.000	-0.019*	0.004	0.072*	0.000
2月	0.055*	0.001	0.054*	0.002	0.065*	0.001	-0.005	0.519	0.137*	0.000
3月	0.037*	0.002	0.041*	0.002	0.034*	0.003	0.005	0.588	0.240*	0.011
4月	0.031*	0.001	0.015	0.118	0.038*	0.000	-0.024*	0.004	0.401	0.124
5月	0.022*	0.001	0.007	0.515	0.036*	0.000	-0.033*	0.000	0.715*	0.013
6月	0.023*	0.000	0.019	0.059	0.032*	0.000	-0.010	0.362	-0.027	0.939
7月	0.005	0.459	0.002	0.702	0.012	0.073	-0.008	0.254	-1.192	0.170
8月	0.010	0.086	0.011	0.082	0.009	0.233	0.000	0.990	-0.902	0.403
9月	0.025*	0.001	0.023*	0.003	0.034*	0.001	-0.010	0.149	-0.456	0.251
10月	0.019*	0.038	0.017	0.134	0.022*	0.030	-0.004	0.515	-0.248	0.348
11月	0.013	0.301	0.005	0.745	0.015	0.233	-0.008	0.248	-0.019	0.848
12月	0.008	0.433	0.005	0.764	0.017	0.233	-0.016*	0.009	0.174*	0.000
春季	0.031*	0.000	0.022*	0.003	0.037*	0.000	-0.013*	0.003	1.450*	0.001
夏季	0.013*	0.003	0.010	0.124	0.018*	0.000	-0.005	0.329	-2.306	0.134
秋季	0.019*	0.002	0.013*	0.043	0.023*	0.001	-0.007	0.079	-0.741	0.216
冬季	0.044*	0.000	0.036*	0.002	0.051*	0.000	-0.011*	0.024	0.718*	0.000
年	0.026*	0.000	0.019*	0.000	0.032*	0.000	-0.009*	0.003	-0.401	0.813

注: *表示达到0.05显著水平。

表2 MF-DFA方法与百分位方法结果比较

Table 2 Comparisons between MF-DFA method and percentile method				
	MF-DFA 方法		百分位方法(97.5%)	
	阈值	频次(d)	阈值	频次(d)
极端最高温度(℃)	32.8	55	29.9	597
极端最低温度(℃)	-21.3	67	-16.2	626
极端降水(mm)	111.7	25	30.6	517

分位方法计算得到的极端最低温度平均每年发生超过 10 d,这与实际情况差异较大。从阈值大小和极端事件发生的频次上可以看出,由 MF-DFA 方法来研究极端事件更加符合实际情况。

图 3 表示了丹东近 60 a 极端温度和极端降水频次(图 3a)和强度(图 3b)的年代际变化特征。由图 3a 可知,极端温度和降水的年代际频次变化较为复杂,发生次数从 1~34 次不等,20 世纪 50~60 年代发生的比较多,70 年代最少,极端最高温度、最低温度和降水分别只发生了 4 次、2 次和 1 次。自 70 年代以后,极端事件发生次数增加/减少交替变化。比较特别的是,极端最高温度在 90 年代发生次数突然增加,比 80 年代增加了 25 次。而 Gong 等^[5]利用第 90 个百分位研究表明东北地区极端最高、最低温度频次的线性变化趋势分别为 1.23 d/10a

和-1.09 d/10a。Zhai 等^[10]和 Gong 等^[11]研究表明华北和东北亚极端最低温度频次有减少趋势。这与丹东极端温度变化相似,但丹东的变化更为复杂,年代际间波动较大。Li 等^[4]研究表明黄土高原极端降水事件没有明显的变化,Xu 等^[14]研究表明东北地区极端降水频次也只有很小的变化。其结果与丹东极端降水相似。从极端事件类型上比较,除了 90 年代外,都是极端最低温度事件发生的最多,极端最高温度事件次之,最少的是极端降水事件的发生。从这个方面来说,丹东的极端气候事件以极端最低温度为主,对低温冷害的防范和应对措施应成为此地区极端自然灾害防范的重点。图 3b 显示了极端温度和降水强度的年代际变化。本研究所指的强度实际上是平均强度,即每个年代际期间极端事件超出阈值部分的总强度除以发生的次数。由图 3 可以看出,极端最低温度事件不仅比极端最高温度事件发生的次数较多,而且其强度相对也较大,平均超出了 1.5℃,这更有力地说明了丹东地区的极端最低温度事件较为严重。极端最低温度强度的年代际变化为先增加,到 70 年代后减少,而极端最高温度强度的年代际变化为先减弱,到 70 年代后又逐渐增强,他们的变化趋势刚好相反。Xu 等^[14]研究表明东北地区极端降水强

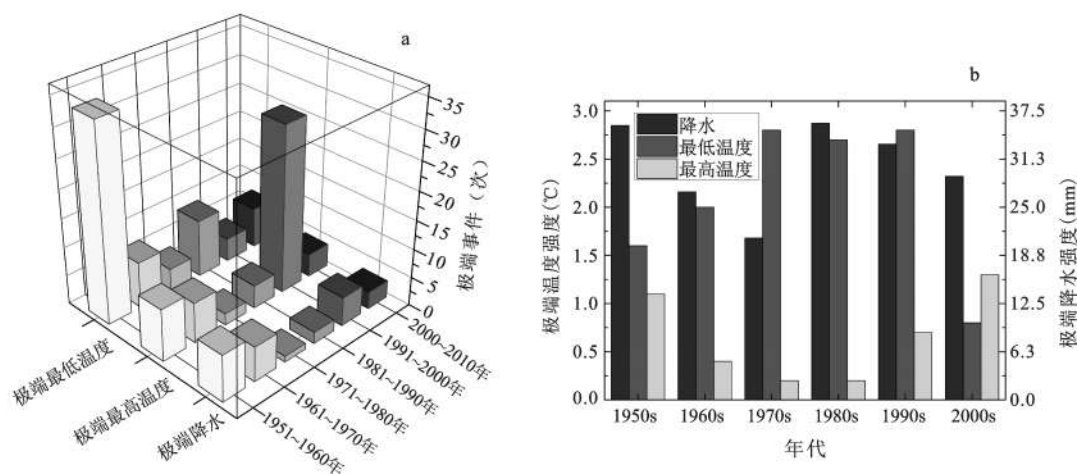


图3 极端最高温度、最低温度和降水的频次及强度的年代际变化

Fig. 3 Interdecadal changes in the frequency and intensity of extreme maximum and minimum temperature and extreme precipitation

度只有微弱的变化,而丹东极端降水强度在70年代前逐渐减弱,在80年代时突然增加,随后又开始减弱。从此分析可以得出,丹东地区在20世纪70年代和80年代前后极端气候(温度和降水)事件的发生特征明显不一样,发生了突变。由于数据时间序列不够,资料的缺乏,检测出的极端事件频次和强度的变化规律不是很明显;另一方面,极端事件自身的不确定性、易变性和难检测性也是极端事件发生规律不明显的重要原因^[36]。

3.3 极端温度和降水严重度分析

单一地分析极端事件发生的频次或强度^[37, 38]往往不能准确地表征极端事件的严重度。只有在某一地区某一时期内极端事件发生次数较多并且强度也较大时,才能较准确地说明此区域在这段时间内极端事件比较严重。本文利用严重度指数

EESI, 分析了丹东地区近60 a来极端温度和降水事件发生的严重度(图4)。由图4a可以看出,丹东地区极端温度和降水严重度的年代际变化较为复杂。极端温度和降水的严重度没有明显规律可寻,在同年代际时期内极端温度和降水的严重程度大小关系不一,而在年代际尺度上,他们总体上都为变小-增大-变小的趋势。极端降水和极端最低温度最严重时期发生在20世纪50年代,极端最高温度最严重时期是在90年代。而图4b则显示极端气候事件严重度的年代际变化。是由各年代际极端温度和降水严重度之和,可以得出,丹东地区20世纪50年代的极端气候事件最为严重,其次是90年代,而在70年代时最轻。50年代到70年代严重度减弱,70年代到90年代又增加,到90年代以后又开始减弱。

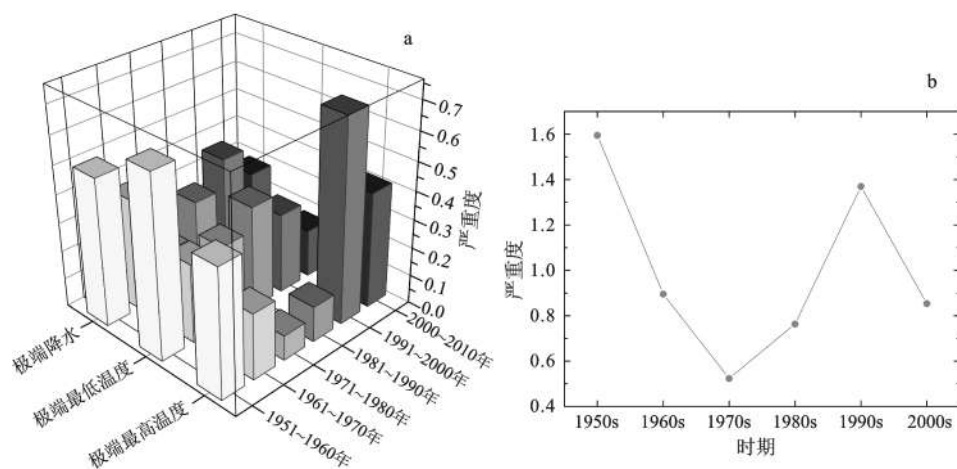


图4 极端最高温度、最低温度和降水严重度的年代际变化

Fig. 4 Interdecadal changes in the severity order of extreme maximum and minimum temperature and extreme precipitation

3.4 极端事件的预测

由于极端事件的不确定性、难检测性以及发生较少的特点,直接从极端事件自身的发生特征去预测未来一段时间的变化是很难的,因此可以尝试通过他们与平均状况的气候要素进行相关分析来预测极端事件的变化。表3为极端温度和降水发生的频次及强度与夏季、冬季和年尺度上的降水、平均温度、平均最高温度、平均最低温度和平均日较差温度的相关分析。由于极端温度和降水主要发生在冬、夏两季,所以相关分析时没有考虑春、秋两季的数据。另外极端最低温度与夏季数据没做相关分析,极端最高温度和降水与冬季数据没做相关分析。由表3可知,各平均状况的温度和降水要素与极端温度和降水之间的相关性非常复杂,没有明显的规律,这与极端温度和降水的不确定性和多变性有关。与极端最高温度频次相关性最高的是夏季平均最高温度,相关系数为0.85,并且达到了0.05的显著水平。与极端最高温度强度、极端最低温度强度和极端降水强度相关系数最大的是年平均降水(分别为0.50、-0.68和0.55),但没有达到显著水平。与极端最低温度频次相关性最大的是冬季平均日较差温度(0.89),而且达到了0.05显著水平。与极端降水频次相关性最大的年平均日较差温度(0.75),没有达到显著水平。由此可知,由单一的平均温度或

降水来预测极端温度的强度或极端降水时需非常谨慎,这与Unkašević等^[39]研究结果相似。而极端最高温度频次可以由夏季平均最高温度的变化来预测,极端最低温度频次可以用冬季平均日较差温度的变化来预测。由前面所得到的结果可知,夏季平均最高温度有上升趋势(0.01℃/a),但没有达到显著水平,因此也不能准确预测丹东地区未来一段时间极端最高温度事件的发生次数。冬季平均日较差温度变化趋势为-0.011℃/a,而且达到了0.05的显著水平,表明今后一段时间内丹东地区极端最低温度事件发生有减少的趋势,这也可能与全球气温上升有关,对改善丹东地区的低温冷害是有利的条件。

4 结 论

本文利用多重分形去趋势波动分析法(MF-DFA)确定了极端事件的阈值,在此基础上分析丹东地区1951~2010年逐日极端温度和极端降水的变化特征。其结果如下:

1) 丹东月、季和年尺度的温度都为上升趋势,但显著性各不相同。由于最高温度上升趋势比最低温度小,使得温度日较差有减小趋势。2月的温度对全球变暖的响应最为敏感。降水在夏秋季为不显著的减少趋势,春冬季为显著的增加趋势,并且春季增加最多,达到1.450 mm/a,年降水量

表3 极端气候事件频次和强度与不同尺度的平均温度和降水相关分析
Table 3 Correlation analysis between the frequency and intensity of extreme climate events and the average temperature and precipitation of different scale

		极端最高 温度频次	极端最高 温度强度	极端最低 温度频次	极端最低 温度强度	极端降 水频次	极端降 水强度
夏季	降水	-0.12	0.14	—	—	0.69	0.46
	平均温度	0.69	0.32	—	—	-0.05	0.24
	平均最高温度	0.85	0.48	—	—	0.20	0.48
	平均最低温度	0.53	0.46	—	—	-0.15	0.23
	平均日较差温度	0.45	-0.06	—	—	0.65	0.39
冬季	降水	—	—	-0.43	-0.27	—	—
	平均温度	—	—	-0.68	0.09	—	—
	平均最高温度	—	—	-0.49	0.11	—	—
	平均最低温度	—	—	-0.67	0.09	—	—
	平均日较差温度	—	—	0.89	-0.05	—	—
年	降水	-0.12	0.50	0.46	-0.68	0.59	0.55
	平均温度	0.42	0.23	-0.70	-0.08	-0.40	-0.03
	平均最高温度	0.63	0.37	-0.49	-0.05	-0.20	0.17
	平均最低温度	0.33	0.31	-0.61	-0.14	-0.46	0.03
	平均日较差温度	0.25	-0.11	0.64	0.24	0.75	0.22

变化为 -0.401 mm/a 。

2) 在年代际尺度上, 极端最低温度事件比极端最高温度和极端降水事件发生次数多。极端最低温度频次有不显著的减少趋势, 极端最高温度频次有不显著的增加趋势, 极端降水频次变化趋势则不明显; 他们的出现频次在年代际之间波动较大, 并且都在 20 世纪 70 年代为最少, 70 年代为转折期。极端最高温度强度比极端最低温度大, 平均超出了 1.5°C 。极端降水平均强度为 30.3 mm , 而年代际之间变化较复杂, 70 年代前减少, 80 年代增加较多, 随之又减少。

3) 丹东地区 20 世纪 50 年代的极端气候事件最为严重, 其次是 90 年代, 70 年代的严重度最轻。50 年代到 70 年代严重度减弱, 70 年代到 90 年代又增加, 到 90 年代以后又开始减弱。

4) 丹东地区极端最高温度频次可以由夏季平均最高温度的变化来预测, 极端最低温度频次可以用冬季平均日较差温度的变化来预测。极端最高温度事件有不显著的上增多趋势, 而极端最低温度事件在今后一段时间内有显著减少的趋势。

参考文献:

- [1] Dong Q, Chen X, Chen T. Characteristics and changes of extreme precipitation in the Yellow - Huaihe and Yangtze - Huaihe Rivers Basins, China[J]. *Journal of Climate*, 2011, **24**(14): 3781-3795.
- [2] Rodrigo F. Changes in the probability of extreme daily precipitation observed from 1951 to 2002 in the Iberian Peninsula[J]. *International Journal of Climatology*, 2010, **30**(10):1512-1525.
- [3] Lupikasza E. Spatial and temporal variability of extreme precipitation in Poland in the period 1951-2006[J]. *International Journal of Climatology*, 2010, **30**(7):991-1007.
- [4] Li Z, Zheng F L, Liu W Z, et al. Spatial distribution and temporal trends of extreme temperature and precipitation events on the Loess Plateau of China during 1961-2007[J]. *Quaternary International*, 2010, **226**(1-2):92-100.
- [5] Gong D Y, Pan Y Z, Wang J A. Changes in extreme daily mean temperatures in summer in eastern China during 1955-2000[J]. *Theoretical and Applied Climatology*, 2004, **77**(1):25-37.
- [6] Zong Y, Chen X. The 1998 flood on the Yangtze, China[J]. *Natural Hazards*, 2000, **22**(2):165-184.
- [7] Thailand Flooding 2011: Death Toll Above 600 (PHOTOS)[N/OL]. *Huffington Post*, [2011-11-20]. http://www.huffingtonpost.com/2011/11/20/thailand-flooding-2011-death-toll_n_1103930.html#s486774.
- [8] 纪晓梅. 95 抗洪抢险检阅众志成城 的丹东力量[N/OL]. 鸭绿江晚报, [2009-09-10]. <http://dd.nen.com.cn/76567825094803456/>
- [9] López-Moreno J I, Beniston M. Daily precipitation intensity projected for the 21st century: seasonal changes over the Pyrenees [J]. *Theoretical and Applied Climatology*, 2009, **95**(3):375-384.
- [10] Zhai P, Sun A, Ren F, et al. Changes of climate extremes in China[J]. *Climatic Change*, 1999, **42**(1):203-218.
- [11] Gong D Y, Ho C H. Intra-seasonal variability of wintertime temperature over East Asia[J]. *International Journal of Climatology*, 2004, **24**(2):131-144.
- [12] Schönwiese C D, Grieser J, Trömel S. Secular change of extreme monthly precipitation in Europe[J]. *Theoretical and Applied Climatology*, 2003, **75**(3):245-250.
- [13] 姜德娟, 李志, 王昆. 1961~2008 年山东省极端降水事件的变化趋势分析[J]. *地理科学*, 2011, **31**(9):1118~1124.
- [14] Xu X, Du Y G, Tang J P, et al. Variations of temperature and precipitation extremes in recent two decades over China[J]. *Atmospheric Research*, 2011, **101**(1-2):143-154.
- [15] 李志, 刘文兆, 郑粉莉. 1965~2005 年辽河流域极端温度事件变化特征[J]. *地理科学*, 2010, **30**(3):469~474.
- [16] 杨素英, 孙凤华, 马建中. 增暖背景下中国东北地区极端降水事件的演变特征[J]. *地理科学*, 2008, **28**(2):224~228.
- [17] Begueria S, Vicente-Serrano S M, López-Moreno J I, et al. Annual and seasonal mapping of peak intensity, magnitude and duration of extreme precipitation events across a climatic gradient, northeast Spain[J]. *International Journal of Climatology*, 2009, **29**(12):1759-1779.
- [18] Prieto L, Herrera R G, Díaz J, et al. Minimum extreme temperatures over Peninsular Spain[J]. *Global and Planetary Change*, 2004, **44**(1-4):59-71.
- [19] Henderson K G, Muller R A. Extreme temperature days in the south-central United States[J]. *Climate Research*, 1997, **8**(2): 151-162.
- [20] Sen Roy S, Balling Jr R C. Trends in extreme daily precipitation indices in India[J]. *International Journal of Climatology*, 2004, **24**(4):457-466.
- [21] Rahimzadeh F, Asgari A, Fattahi E. Variability of extreme temperature and precipitation in Iran during recent decades[J]. *International Journal of Climatology*, 2009, **29**(3):329-343.
- [22] 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[J]. *International Journal of Climatology*, 2005, **25**(10):1301-1330.
- [23] Feng G L, Dong W J, Jia X J. Application of retrospective time integration scheme to the prediction of torrential rain [J]. *Chinese Physics*, 2004, **13**(3):413-422.
- [24] Shukla J. Predictability in the midst of Chaos: A scientific basis for climate forecasting[J]. *Science*, 1998, **282**(5389): 728-731.
- [25] 李建平, 丑纪范. 非定常外源强迫下大尺度大气方程组解的性质[J]. *科学通报*, 1995, **40**(13):1207~1209.
- [26] Kantelhardt J W, Zschiegner S A, Koscielny-Bunde E, et al. Multifractal detrended fluctuation analysis of nonstationary

- time series[J]. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 2002, **316**(1):87-114.
- [27] 杨 萍, 侯 威, 封国林. 基于去趋势波动分析方法确定极端事件阈值[J]. *物理学报*, 2008, **57**(8):5333~5342.
- [28] Kunkel K E. North American trends in extreme precipitation[J]. *Natural Hazards*, 2003, **29**(2):291-305.
- [29] Romero Y L, Bessembinder J, van de Giesen N C, et al. A relation between extreme daily precipitation and extreme short term precipitation[J]. *Climatic Change*, 2011, **106**:393-405.
- [30] Klein Tank A M G, Peterson T C, Quadir D A, et al. Changes in daily temperature and precipitation extremes in central and south Asia[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2006, **111**: 1961-2005.
- [31] Beguería S, Angulo-Martínez M, Vicente-Serrano S M, et al. Assessing trends in extreme precipitation events intensity and magnitude using non-stationary peaks-over-threshold analysis: a case study in northeast Spain from 1930 to 2006[J]. *International Journal of Climatology*, 2010, **31**:2102-2114.
- [32] Kendall M G. Rank correlation measures[M]. London: Charles Griffin, 1975.
- [33] Mann H B. Nonparametric tests against trend[J]. *Journal of the Econometric Society*, 1945, **13**:245-259.
- [34] Du H B, Wu Z F, Li M, et al. Characteristics of extreme daily minimum and maximum temperature over Northeast China, 1961-2009[J]. *Theoretical and Applied Climatology*, 2012, - DOI:10.1007/s00704-012-0649-3.
- [35] 姜逢清, 朱 诚, 胡汝骥. 1960~1997年新疆北部降水序列的趋势探测[J]. *地理科学*, 2002, **22**(6):669~672.
- [36] Frei C, Schar C. Detection probability of trends in rare events: theory and application to heavy precipitation in the Alpine region[J]. *Journal of Climate*, 2001, **14**:1568-1584.
- [37] Nandintsetseg B, Greene J S, Goulden C E. Trends in extreme daily precipitation and temperature near lake Hövsgöl, Mongolia [J]. *International Journal of Climatology*, 2007, **27**(3):341-347.
- [38] Yan Z, Jones P D, Davies T D, et al. Trends of extreme temperatures in Europe and China based on daily observations[J]. *Climatic Change*, 2002, **53**(1):355-392.
- [39] Unkašević M, Vujović D, Tošić I. Trends in extreme summer temperatures at Belgrade[J]. *Theoretical and Applied Climatology*, 2005, **82**(3):199-205.

Characteristics of Extreme Temperature and Precipitation Events over Dandong During the Last Six Decades

DU Hai-bo¹, WU Zheng-fang¹, ZHANG Na², ZONG Sheng-wei¹, MENG Xiang-jun^{1,3}

(1. School of Geographical Science, Northeast Normal University, Changchun, Jilin 130024, China;
2. The Second Middle School of Dandong, Dandong, Liaoning 118000, China; 3. Business of Administration,
Jilin University of Finance and Economics, Changchun, Jilin 130024, China)

Abstract: Based on the daily temperature and precipitation in Dandong during 1951-2010 and the definition of the threshold of extreme events using the multifractal detrended fluctuation analysis, this study analyzes the characteristics of extreme maximum temperature, extreme minimum temperature and extreme precipitation. The results show that the frequency of extreme minimum temperature event is more than that of extreme maximum temperature and extreme precipitation events over Dandong in recent six decades. The intensity of extreme maximum temperature is larger than that of extreme minimum temperature, with the average value of 1.5 °C. The average intensity of extreme precipitation is 30.3 mm. Both the frequency and intensity of these extreme events are the smallest in 1970s, which is also the turning point. The extreme climate events (temperature and precipitation) in 1950s are the severest, and these events in 1990s are the second severest, whereas the severity of these events in 1970s is the smallest. Meanwhile, the frequency of extreme precipitation varies unobviously. The frequency of extreme maximum temperature event could be predicted by the changes in the average summer maximum temperature, which shows that there is insignificant positive trend in extreme maximum temperature. The frequency of extreme minimum temperature can be forecasted using the average winter daily temperature range, which results in the significant negative trend in the frequency of extreme minimum temperature in future.

Key words: extreme temperature; extreme precipitation; multifractal detrended fluctuation analysis