

我国极端气温指数的时空变化与分区研究

向旬^{1,2} 王冀³ 王绪鑫² 徐琪⁴

(1. 南京大学大气科学系, 南京 210093; 2. 鞍山市气象台;
3. 南京信息工程大学; 4. 民航江苏空中交通管理局)

提 要: 利用 1961—2000 年全国 550 个台站的逐日最高气温、最低气温资料计算出热浪指数和暖夜指数并对两个指数分别进行时空变化分析, 结果表明极端气温指数的前 2 种模态基本代表了该指数的空间分布特征。热浪指数和暖夜指数的第一特征向量的荷载场空间分布基本一致, 全区为一致的增加和减少趋势, 并且在时间变化上存在着明显年际和年代际变化特征。利用 REOF 和 CAST 聚类分析相结合的方法对热浪指数和暖夜指数进行分区, 将全国热浪指数和暖夜指数分别分成 11 个和 10 个变化区。经过验证发现该方法既克服了前者确定荷载值界限的主观性, 又避免了后者选择气候中心的不确定性, 使区划结果更具有客观性。

关键词: 极端气温指数 聚类统计检验 旋转主分量分析

Research of Temporal-Spatial Variation and Distribution of Extreme Temperatures Index in China

Xiang Xun^{1,2} Wang Ji³ Wang Xuxin² Xu Qi⁴

(1. Atmospheric Science department of Nanjing University, Nanjing 210093;
2. Anshan Meteorological Observatory; 3. Nanjing University
of Information Science and Technology; 4. Jiangsu Air
Traffic Management Branch Bureau of CAAC)

Abstract: Using the daily maximum temperature and minimum temperature data from 550 stations for the period 1960 - 2000, the heat wave days index (HWDI) and the warm night index (Tn90) are calculated and their temporal and spatial variation are analyzed. The first two modes are able to represent the spatial distribution characteristics. The spatial distribution of first eigenvector of the two indexes is generally similar, with the same increase and decrease trend. Their inter-annual and inter-decadal variability in temporal characteristic is remarkable. The changes of heat index and warm night index can be divided into 11 and 10 districts by using REOF and

收稿日期: 2007 年 12 月 18 日; 修定稿日期: 2008 年 5 月 4 日

CAST Clustering Analysis Method, which can overcome the subjectivity of the boundary of the load values by REOF and the uncertainty of climate center by CAST and make the division more objective.

Key Words: extreme temperatures index clustering statistical test rotary principal component analysis

引 言

近百年来随着全球气候迅速变暖,极端天气事件发生频率急剧上升,由此给人类带来巨大的灾害与损失。因此对极端气温事件的研究日益引起人们的重视,众多学者研究发现^[1-6]我国的极端温度事件也出现显著变化,大部分地区的低温日数也趋于减少。在中国东部,日最高气温高于某一界限的高温日数明显减少。就全国平均而言,近几十年日最高气温大于 35 °C 的高温日数略呈减少,长江中下游一些地区的下降更为显著;日最低气温小于 0 °C 的霜冻日数减少也更显著,下降速率约为 21d/10a。我国霜冻日数减少最快的时期是 1980 年代中期以后。此外,全国平均的热日和暖夜频率显著增加,而冷日频率减少,冷夜减少趋势更为明显。由此可见,我国极端气温事件的变化同气温一样具有明显的区域特征。因此,对我国极端气温事件的年际变化进行客观区划,研究不同区域极端气温事件的年际变化特征,掌握其年际变化规律,以便对未来极端气温事件的变化进行预测。关于气候区划方法已有很多研究成果,江志红和丁裕国^[7]应用方差极大准则下的正交旋转因子分析,对我国 40 年标准化年降水量场序列进行客观区划。刘吉峰^[8-9]等采用聚类分析和旋转主分量分析相结合的方案,对我国年最高(低)气温的年际变化型态进行地理区划。丁裕国等^[10]更好地发展了这一新的学术观点,论证了 CAST 与 REOF/RPCA 用于气候聚类分型区划的

理论联系。同时,也印证出 CAST 与 PCA 用于气象场分类区划具有等价性和互补性的事实。

在国际上通用极端气候指数^[11-12]中选取了两种变化显著的极端气温指数也采用聚类统计检验分析和 REOF 相结合确定气温变化型和中心站的方法,利用我国多年极端气温资料,对我国极端气温变化及其特征分区进行探讨,这对国家和各级政府的规划决策具有重要的意义。

1 资料和方法

1.1 资料

采用全国 550 个测站年最高气温和最低气温(1961—2000 年)资料作为基本研究对象。选取了 Firsch^[11]提出极端气候指数中的暖夜指数(TN90),热浪指数(HWDI),具体的计算方法详见 <http://ccma/seos.uvic.ca/ETC-CDMI>,并利用 EOF 方法对两种指数的空间变化进行时空变化的特征分析,同时通过 REOF 和 CAST 方法对指数进行分区研究。

1.2 极端指数定义

暖夜指数就是最低气温通过 90 % 阈值气候态分布的天数百分率。

$$Tn_{ij} > Tn_{in90}$$

其中 Tn_{ij} 为某日极端最低气温, Tn_{in90} 为最低气温 90 % 的分位数值^[13]。热浪指数是指连续 5 天最高气温高于气候态相同日期(1961—1990 年) 5 °C 的总天数。

1.3 聚类统计检验

所谓 CAST 聚类,就是具有显著性检验标准的聚类分析。一般可有两种计算方案:均匀聚类和中心聚类。对于地理空间上的气候区划来说,用中心聚类方案更适合。

设任意两站某项气候指标(如极端气温)的年代代表值分别为 x_i 和 x_j 其中 $i = 1, 2, \dots, p$ 和 $j = 1, 2, \dots, p$, 它们实际是气候变量场中每个变量的样本取值。设 r_{ij} 为两者的线性相关系数, n 为其样本容量, d_{ij} 为两站之间的距离系数, $d_{ij} = \{2n(1 - r_{ij})\}^{1/2}$ 。根据文献[15]构造服从自由度为 $\eta - 1$ 的 χ^2 分布的统计量,得

$$\chi^2 = 2n \sum_i (\sqrt{1 - \gamma_{ij}} - \hat{c})^2 \text{var}(d_{ij}), \quad (1)$$

$$\hat{c} = \frac{\sum_i \left(\frac{\sqrt{1 - \gamma_{ij}}}{\sum_i \text{var}(d_{ij})} \right)}{\sum_i \text{var}(d_{ij})}, \quad (2)$$

$$\eta = \frac{1}{2} p(p - 1), \quad (3)$$

式中 η 实际上就是式(1)中求和的项数,而 p 则为同类样品中变量的个数。聚类统计检验方法,就是依据式(1)~(3)逐一计算出相应的 χ^2 统计量,并检验零假设 $H_0: d_{ij} = \hat{c}$ 和备择假设 $H_1: d_{ij} \neq \hat{c}$ 。在给定信度 α 下,可有临界区间:

$$\chi^2 \geq \chi^2_{1-\alpha}(\eta - 1), \quad (4)$$

如若:

$$\chi^2 < \chi^2_{1-\alpha}(\eta - 1) \quad (5)$$

则表明该测站可归于同类区域。计算过程中采用逐步增加站点的方法^[13]。当站点增至

$$\chi^2_{\text{实}}(\eta) < \chi^2_{1-\alpha}(\eta - 2), \quad (6)$$

且有:

$$\chi^2_{\text{实}}(\eta + 1) \geq \chi^2_{1-\alpha}(\eta - 2), \quad (7)$$

则表明该区域所包含的 $\eta + 1$ 个站点已经足够,不能再增加,由此就可以确定该区域的大

致边界。

2 空间结构和时间演变特征

2.1 热浪指数的空间结构和时间演变特征

热浪指数第一特征向量的方差贡献为 27.1%,其相应的荷载场空间分布如图 1a,可以看出其主要的变化特征:全国呈一致增加变化,其中我国中部是荷载的高值区,而东部和西部的荷载值比较小。由第一特征向量相应的时间系数演变曲线及其线性趋势代表了高荷载区近 40 年来热浪指数的变化呈明显上升趋势,通过了 0.05 显著性水平。其中在 1960 年代中期到 1970 年代中期,1980 年代热浪指数均处于低值区,其中 1970 年和 1975 年是热浪指数最低的年份。1980 年代后期开始热浪指数明显增加,其中 1987 年和 1998 年,热浪指数达到最高值。

热浪指数第二特征向量的方差贡献为 11.1%。其相应的空间分布如图 2a,可以

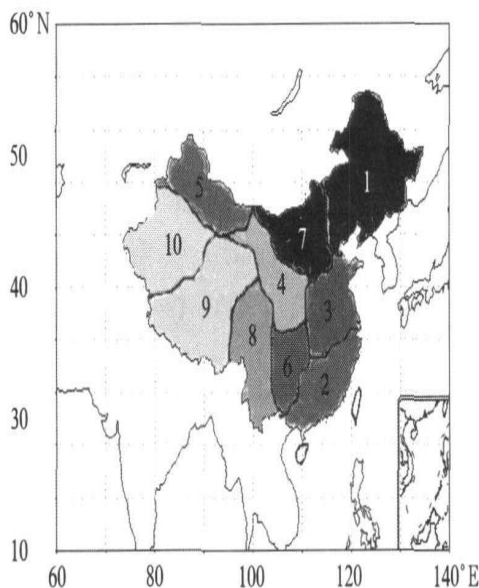


图 1 热浪指数的第一个特征向量空间分布(a)及时间系数演变曲线图(b)

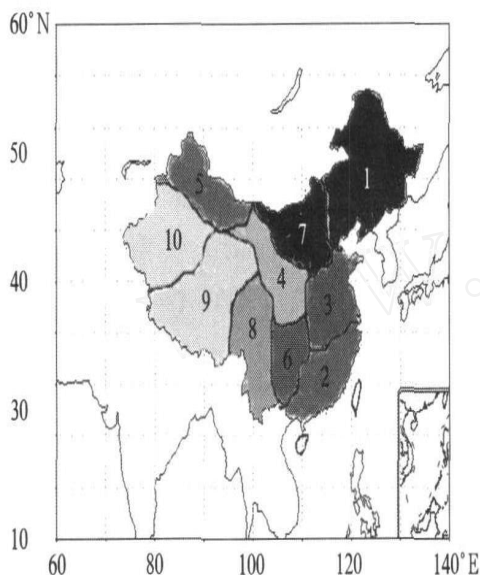


图 2 热浪指数的第二个特征向量场空间分布(a)及时间系数演变曲线图(b)

看出其主要的变化特征:东北地区为正值区,而负值区在华东南部和华南北部地区为负值区,体现了北高南低的变化特征,也就是热浪指数在我国北方和南方呈相反变化。由第二特征向量相应的时间系数演变曲线及其线性趋势,我国北部和华东、华南呈一致的增加(减少趋势)。其中 1970 年前我国东北地区和华东、华南地区分别处于高值(低值)区,其中 1961 年、1966 年东北地区(华东、华南)热浪指数为最低(高年份),而 1980 年之后,东北地区(华东、华南)热浪指数处于高值(低值)区,1987 年和 1998 年为东北地区(华东、华南)的高(低)值年。

2.2 暖夜指数空间结构和时间演变特征

Tn90 的第一特征向量的方差贡献为 50.8%。其相应的空间分布如图 3(a),可以看出其主要的变化特征:全国呈一致的负变化,负值的高荷载区在东北,华北到内蒙古的

西部,和华中地区。通过第一特征向量相应的时间系数变化曲线及其线性趋势。近 40 年来我国大部分地区暖夜指数呈明显上升趋势,并且通过了 0.05 显著性水平检验。在 1980 年代之前全国暖夜指数基本处于低值区,暖夜指数的最低年份是 1967 年、1970 年。1980 年代之后,全国的暖夜指数基本处于高值区,最高的年份处于 1997 年和 1998 年。

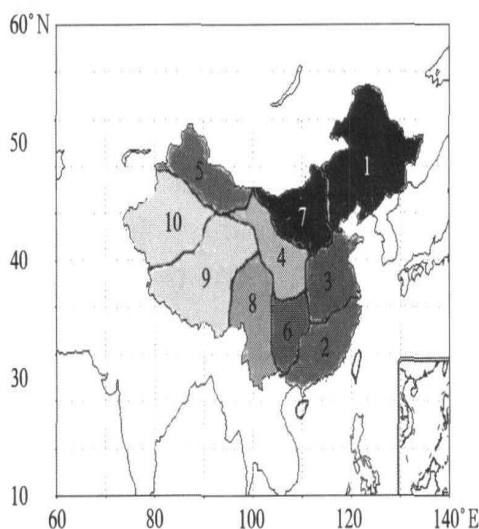


图 3 Tn90 的第一个特征向量场空间分布(a)及时间系数变化曲线图(b)

暖夜指数的第二特征向量的方差贡献为 7.9%。其相应的荷载场空间分布如图 4(a),可以看出其主要的空间分布特征:我国北部和西部为负值区;华中、华南和华东为正值区,主要的高荷载区在我国东南部。由第二特征向量相应的时间系数演变曲线及其线性趋势线发现。近 40 年来我国东南部暖夜指数呈明显下降趋势。1980 年代以前我国东南地区暖夜指数处于高值区,最低值位于 1970 年,在 1980 年代之后暖夜指数下降,在 1995 年和 1996 年出现最低值。

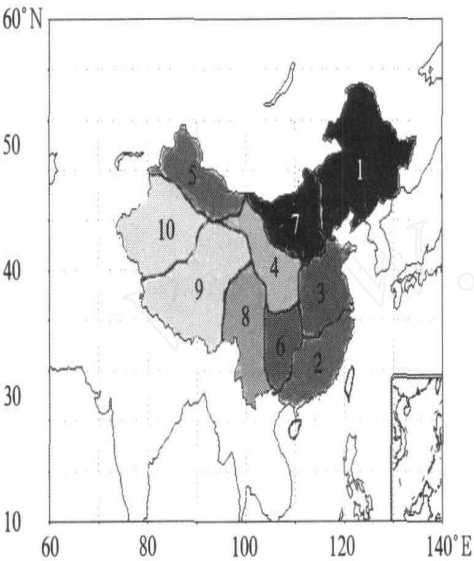


图 4 Tn90 的第一个特征向量空间分布
及时间系数变化曲线图

3 两种极端气温指数的分区研究

首先利用暖夜指数和热浪指数 EOF 分析的结果,分别选取前 11 和 10 个特征向量进行旋转 EOF 分析,由于篇幅原因,文中略去特征向量的空间分布图,只对结果进行分析。如图 5 和表 1 所示。

热浪指数第一特征向量高荷载区位于福建省和江西省,这一部分占方差贡献的 11.73 %。最大值中心位于石城附近。

第二特征向量的高荷载区位于内蒙古中部,这一部分占方差贡献的 9.76 %。最大值

中心位于乌海附近。

第三特征向量的高荷载区位于吉林省和辽宁的东北部。这一部分占方差贡献的 7.96 %。最大值中心位于抚顺附近。

第四特征向量的高荷载区位于山东、江苏和安徽省的北部,这一部分占方差贡献的 5.98 %。最大值中心位于徐州附近。

第五特征向量有两个高荷载区,一个位于重庆和四川东部,另一个为于青海省和西藏。这一部分占方差贡献的 5.38 %。最大值中心一个位于内江附近,另一个位于玉树附近。

第六特征向量的高荷载区位于新疆西部,这一部分占方差贡献的 4.33 %。最大值中心位于喀什附近。

第七特征向量的高荷载区位于黑龙江省,这一部分占方差贡献的 4.32 %。最大值中心位于绥化附近。

第八特征向量的高荷载区位于新疆西北部,这一部分占方差贡献的 3.88 %。最大值中心位于准葛尔盆地附近。

第九特征向量的高荷载区位于云南西部,这一部分占方差贡献的 3.83 %。最大值中心位于思茅附近。

第十特征向量的高荷载区位于广西和贵州,这一部分占方差贡献的 3.60 %。最大值中心位于桂林附近。

第十一特征向量高荷载区位于西藏地区大部,这一部分占方差贡献的 2.23 %。

综上所述热浪指数可划为十一个区,分

表 1 热浪指数前 11 个主要特征向量的方差贡献百分率

主要特征向量	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
EOF 方差贡献	15.98	13.51	6.85	5.41	4.39	4.04	3.65	3.21	2.96	2.51	1.30
REOF 方差贡献	11.73	9.76	7.96	5.98	5.38	4.33	4.32	3.88	3.83	3.60	2.23

别位于福建和江西省、内蒙古中部、吉林省和辽宁的东北部、山东省、江苏和安徽的北部、重庆和四川东部、青海省、新疆西部、黑龙江省、

新疆西北部、云南西部和广西和贵州、西藏大部。

暖夜指数第一特征向量高荷载区位于黑

龙江和吉林,这一部分占方差贡献的 17.77 %。高值中心位于松原附近。

第二特征向量高荷载区位于广东和福建,这一部分占方差贡献的 11.26 %。高值中心位于河源附近。

第三特征向量高荷载区位于江苏和安徽,这一部分占方差贡献的 9.14 %。高值中心位于合肥附近。

第四特征向量高荷载区位于甘肃,这一部分占方差贡献的 6.20 %。高值中心位于白银附近。

第五特征向量高荷载区位于新疆西北部,这一部分占方差贡献的 5.88 %。高值中心位于乌鲁木齐西部。

第六特征向量高荷载区位于广西和湖南

南部,这一部分占方差贡献的 5.48 %。高值中心位于桂林附近。

第七特征向量高荷载区位于山西、内蒙古中部、陕西北部,这一部分占方差贡献的 4.85 %。高值中心位于河套附近。

第八特征向量高荷载区位于四川和云南西部,这一部分占方差贡献的 4.70 %。高值中心位于保山附近。

第九特征向量高荷载区位于青海和西藏的西部,这一部分占方差贡献的 2.50 %。高值中心位于都兰附近。

第十特征向量高荷载区位于新疆西部,这一部分占方差贡献的 2.46 %。高值中心位于喀什附近。

表 2 暖夜指数前 10 个主要特征向量的方差贡献百分率

主要特征向量	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
EOF 方差贡献	27.50	12.91	6.92	5.30	3.75	3.69	3.01	2.70	1.60	1.54
REOF 方差贡献	17.77	11.26	9.14	6.20	5.88	5.48	4.85	4.70	2.50	2.46

综上所述暖夜指数可划为十个区,分别位于黑龙江和吉林、广东和福建、江苏和安徽、甘肃、新疆西北部、广西和湖南南部、山西、内蒙古中部、陕西北部、四川和云南西部、青海和新疆西部。

由于有了 REOF 的分区,可以对这个分区结果进行聚类检验,并选取 REOF 旋转的最高值做为中心聚类的中心点,进行聚类的原则是:(1) 选择某一中心聚类的站点数超过 5 个,且在地域上连成一片的可以划分为同一个极端气温区。(2) 以同一站为中心若有地理上不连续的两块或以上符合条件(1)的区域,则将其分为不同的气温区。(3) 假设某一中心站周围的测站少于 5 个,则该中心站自动变为一般站,相应区域也就不存在,所聚测站按与周围区域的相似程度(相关系数大小)决定其归属。(4) 对于同时归属于不同中心站的个别台站和不属于任何中心站

的台站按其周围中心站的相似程度决定其归属。这样,各气温极端区之间就有了明确的界限,便于今后做进一步的研究。

根据上述原则,将我国将热浪指数和暖夜指数分区效果进行检验并得到区结果见(图 5、图 6)。

热浪指数为 11 个客观分区,1 区,华东华南沿海地区;2 区,内蒙古地区;3 区,北南

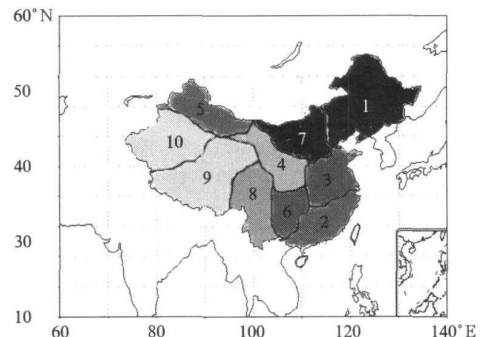


图 5 中国热浪指数分区

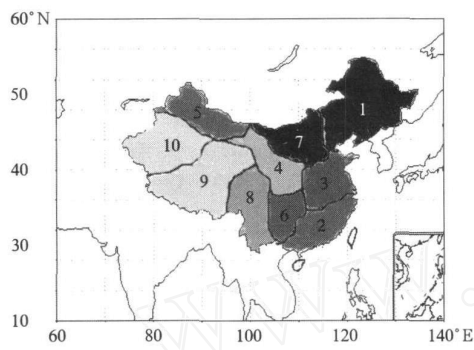


图 6 中国暖夜指数分区

部地区;4区,黄淮流域;5区,西藏西部和华中北部地区;6区,新疆南部地区;7区,东北北部地区;8区,新疆北部地区;9区,西藏东部地区;10区,华中南部地区;11区,西藏地区。

暖夜指数为 10 个客观分区,1 区,东北和华北南部地区;2 区,华南沿海地区;3 区,华东地区;4 区,华中北部和西北的中部地区;5 区,新疆北部地区;6 区,华中南部地区;7 区,华北北部地区;8 区,西藏东部地区;9 区,西藏西部地区;10 区,新疆西南部地区。

对分区后的结果重新进行 EOF 展开发现(表 3 和表 4)可以看到热浪指数和暖夜指数各区域第一主分量方差贡献率,除了热浪

表 3 热浪指数各区域第一主分量方差贡献率(%)

高温区	地理位置	方差贡献
1	华东南沿海地区	64
2	内蒙古地区	47
3	东北南部地区	61
4	黄淮流域	53
5	陕西和甘肃的南部	64
6	新疆南部地区	68
7	东北北部地区	56
8	新疆北部地区	69
9	西藏东部地区	39
10	华中南部地区	52
11	西藏西部地区	54

表 4 暖夜指数各区域第一主分量方差贡献率(%)

低温区	地理位置	方差贡献
1	东北和华北南部地区	64
2	华南沿海地区	68
3	华东地区	75
4	西北东部地区	53
5	新疆北部地区	50
6	华中南部地区	92
7	华北北部地区	48
8	西藏东部地区	50
9	西藏西部地区	72
10	新疆西南部地区	58

指数 2 区和 9 区、暖夜指数 7 区外,其余均大于 50 %,说明各区域内的变化是基本一致的,分区的效果很好。

4 结 论

(1) 热浪指数和暖夜指数的经验正交函数展开(EOF)结果表明,前 2 个模态基本代表了极端气温指数的空间分布特征。热浪指数和暖夜指数的第一特征向量的荷载场空间分布基本一致,全区为一致的增加和减少趋势,只是高荷载区位置不同。

(2) 利用 REOF 对热浪指数和暖夜指数分别进行分析,并通过聚类统计检验,确定边界的站点所在的区域,将热浪指数和暖夜指数分别分为 11 个和 10 个变化区。

(3) 通过 EOF 再次展开发现,将旋转主分量分析和聚类统计检验相结合用于气候区划,既克服了前者确定荷载值界限的主观性,又避免了后者选择气候中心的不确定性,使区划结果更具有客观性。

参考文献

[1] 姚愚,李晓鹏,闫丽萍,等. 近 44 年云南年平均气温的时空变化特征[J]. 气象,2006,32(10):81-87.
[2] 任国玉,初子莹,周雅清,等. 中国气温变化研究最新进展[J]. 气候与环境研究,2005,10(4):702-716.

- [3] 向辽元,陈星. 近 55 年中国大陆气温突变的区域特征和季节特征[J]. 气象, 2006 32(6):44-47.
- [4] 赵宗慈. 近 39 年中国的气温变化与城市化影响[J]. 气象, 1991, 17(4): 14-17.
- [5] 丁一汇,戴晓苏. 中国近百年来的温度变化[J]. 气象, 1994, 20(12):19-26.
- [6] 唐国利,林学椿. 1921—1990 年我国气温序列及变化趋势[J]. 气象, 1992, 18(7): 3-6.
- [7] 江志红,丁裕国. 近 40 年我国降水量年际变化的区域性特征[J]. 南京气象学院学报, 1994, 17(1):73-78.
- [8] 刘吉峰,李世杰,丁裕国,等. 一种用于中国年最高(低)气温区划的新的聚类方法[J]. 高原气象, 2005, 24(6):966-973.
- [9] 刘吉峰,李世杰,丁裕国,等. 近几十年我国极端气温变化特征分区方法探讨[J]. 山地学报, 2006, 24(3):291-297.
- [10] 丁裕国,张耀存,刘吉峰. 一种新的气候分型区划方法[J]. 大气科学, 2006, 31(1):129-136.
- [11] Frich, P., 1999: REWARD-A Nordic Collaborative Project. Annex of "Meeting of the Joint CCI/CLIVAR Task Group on Climate Indices, Bracknell, UK, 2-4 September 1998, Folland, C. K., Horton, E. B. and Scholefield, P. R. (Eds), World Climate Data and Monitoring Programme, WCDMP-No. 37, WMO-TD No. 930. WMO (1999).
- [12] Alexander, L. V., Zhang, X., Peterson, T. C., et al., Global observed changes in daily climate extremes of temperature and precipitation[J]. Geophys. Res, 2006, 111:1-22.
- [13] Zhang, X., G. Hegerl, F. W. Zwiers, et al. 2004: Avoiding inhomogeneity in percentile-based indices of temperature extremes[J]. J. Climate, 2005, (18): 1642-1651.
- [14] 魏凤英. 现代气候统计诊断与预测技术[M]. 北京: 气象出版社, 1999.
- [15] 刘吉峰,李世杰,丁裕国,等. 一种用于中国最高(低)气温区划的新的聚类方法[J]. 高原气象, 2005, 24(6):966-973.