

杨萍, 侯威, 封国林. 2010. 中国极端气候事件的群发性规律研究 [J]. 气候与环境研究, 15 (4): 365–370. Yang Ping, Hou Wei, Feng Guolin. 2010. A study of the characteristics of the cluster extreme events in China [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 15 (4): 365–370.

中国极端气候事件的群发性规律研究

杨萍^{1,2} 侯威² 封国林^{2,3}

1 中国气象局北京城市气象研究所, 北京 100089

2 中国气象局气候研究开放实验室, 北京 100081

3 北京师范大学全球变化与地球系统科学研究院, 北京 100875

摘 要 基于 k 阶最近邻距离丛集点提取算法及一系列理论研究成果, 将其应用于群发性极端气候事件的研究中, 定义年代际群发性指数以及群发高值区, 对中国极端气候事件的群发性规律和年代际空间演变特征进行分析和探讨。研究结果表明, 极端高温事件在 20 世纪 60 年代与 70 年代空间分布上存在较大差异; 极端低温事件群发性指数 70 年代在南方地区的加强很可能为该年代际偏冷的气候背景贡献了主要作用; 大暴雨事件的群发高值区主要集中在中国的南方地区, 这和大暴雨事件的定义可能存在联系; 强降水事件的高群发带与中国近 50 年多雨带的分布格局具有很好的一致性。

关键词 极端温度事件 极端降水事件 群发性 年代际群发性指数

文章编号 1006-9585 (2010) 04-0365-06 **中图分类号** P468 **文献标识码** A

A Study of the Characteristics of the Cluster Extreme Events in China

YANG Ping^{1,2}, HOU Wei², and FENG Guolin^{2,3}

1 *Institute of Urban Meteorological, China Meteorological Administration, Beijing* 100089

2 *Laboratory for Climate Studies, China Meteorological Administration, Beijing* 100081

3 *College of Global Change and Earth System, Beijing Normal University, Beijing* 100875

Abstract Based on a comprehensive review for the spatial point theory, the method of k -order nearest-distance is combined with cluster events in order to analyze the characteristic of cluster extreme events in China. Decadal cluster index is defined to access interdecadal spatial variability and it is divided into the first and second high values in order to access the areas which have strong cluster extreme events. The results show that the spatial distribution has large difference between the 1960s and 1970s for extreme high-temperature events. The reinforcement of the cluster index of the extreme low-temperature events in the 1970s may have major activity on the chilling decadal background. The definition of the downpour is the probably reason that the area of high value of the cluster index about downpour centralize in the southern part of China. Strong precipitation is unanimous of the existing decadal variability.

Key words extreme temperature event, episodes of extreme rainfall, cluster, decadal cluster index

收稿日期 2010-03-10 收到, 2010-05-30 收到修定稿

资助项目 国家自然科学基金项目 40930592、40875040, 科技部支撑项目 2007BAC03A01、2007BAC29B01, 公益性行业 (气象) 科研专项 GYHY200806005

作者简介 杨萍, 女, 1981 年出生, 博士, 主要从事极端气候、城市气候方面的研究。E-mail: zz96998@163.com

通讯作者 封国林, E-mail: fenggl@cma.gov.cn

1 引言

近百年来全球气候正经历一次以变暖为主要特征的显著变化,温度的升高不仅直接影响温度极端值的变化,且导致高温干旱和暴雨洪涝等极端气候事件的发生频率与强度出现加剧的趋势(Trenberth et al., 2007)。大量统计事实表明,极端气候事件在发生频次、影响范围和破坏程度上都表现出群发性特征(Jones et al., 1997; Ren et al., 2007; 龚志强和封国林, 2008)。极端气候事件群发性大体上可分为不同种类极端事件的群发、时间持续群发性和空间区域群发性3类(杨萍等, 2010),本文所研究的群发性特指空间区域群发性。

受大气环流和区域地形地势的影响,中国极端气候事件具有明显的区域性和空间群发性特征。不同时间尺度的极端降水事件均体现出空间群发性特征(Qian et al., 2007),极端干旱、极端高温、暖冬事件等极端气候事件也具有明显的空间群发性特征(王跃男等, 2009; 陈峪等, 2009)。前人的工作已经为极端气候事件空间群发性的研究提供了很好的研究基础、研究思路和研究方法,但量化地界定群发性区域的工作尚未得到很好地开展,群发性极端气候事件的方法研发工作也值得进一步探讨。本文基于空间点过程理论的 k 阶最近邻距离丛集点提取算法的一系列理论研究结果,着重分析了近40余年中国极端气候事件的群发性规律和年代际空间演变特征。

2 资料和方法

2.1 研究区域和所用资料

为了在一定程度上克服客观上中国台站分布不均对丛集点提取结果的影响,本研究去除了新疆、西藏、内蒙古三省(区)的测站。所用资料为国家气象信息中心提供的中国大陆740个测站逐日最高温度、最低温度、日降水量资料集,去除了缺测较多的站点,迁站及仪器变更等对资料的非均一性影响未一一考虑。去除缺测站点后,最终取1960~2005年426个测站的温度资料、1960~2006年437个测站的降水资料,站点的分布如图1所示。

2.2 研究方法

极端气候事件的定义很多,从各种定义的极端气候事件来看,极端气候事件属于小概率事件。目前国际上使用最多的是百分位定义法(Trenberth et al., 2007),根据实际研究的需要以及时间序列长度的不同,可选择不同百分位等级,一般有90、95、99等几种百分位。本研究使用的46年无间断日温度资料具有较长的时间序列,故选取99百分位作为极端温度事件的阈值。具体定义如下:将某站点1960~2005年日最高(低)温度资料按照升(降)序排列,得到该站点第99个百分位的阈值,将其作为极端高(低)温事件的上(下)阈值。采用百分位阈值法定义的极端降水事件具体定义如下:将某站点1960~2006年雨日(日降水量 ≥ 1 mm)的降水资料按照升序排列,得到第

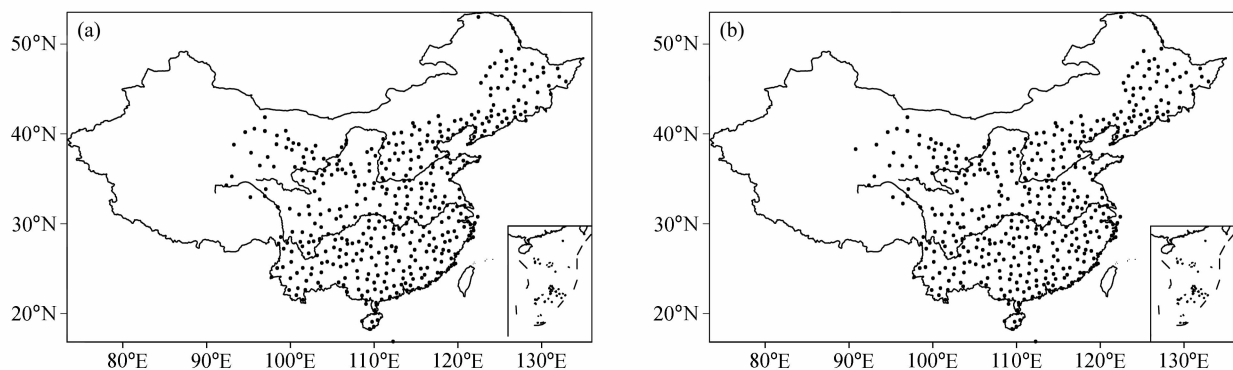


图1 站点分布:(a) 温度;(b) 降水

Fig. 1 Spatial distribution of the stations: (a) Temperature; (b) precipitation

95 个百分位所对应的日降水量定义为强降水日阈值(杨金虎等, 2008), 本文称之为强降水事件。为进行对比分析, 将日降水量 ≥ 100 mm 的降水事件也定义为极端降水事件, 本文称之为大暴雨事件。

2.2.1 k 阶最近邻距离丛集点提取算法

k 阶最近邻距离丛集点提取算法引入了空间点过程理论“ k 阶最近邻距离”的概念, 并基于此概念将一定空间范围内包含丛集点和分散点的二维数据转化为一维的混合密度的分布函数, 利用期望最大化算法(EM 算法)对混合密度进行分解, 从而达到识别丛集点的目的(Pei et al., 2006)。

通常而言, 两个叠加的二维空间点过程 W_k 分布服从如下混合分布:

$$W_k \sim p g_{W_k}(k, \lambda_1) + (1-p) g_{W_k}(k, \lambda_2), \quad (1)$$

其中, k 为距离阶数, W_k 为点的 k 阶最近邻距离, p 为比例系数, λ_1 和 λ_2 分别为丛集区域和背景区域的分布参数, 式(1)中概率密度函数

$$g_{W_k}(k, \lambda) = \frac{e^{-\lambda \pi x^2} 2(\lambda \pi)^k x^{2k-1}}{(k-1)!}.$$

λ_1 和 λ_2 的计算采用 Byers and Raftery (1998) 提出的 EM 算法来计算。

关于 k 的选取与方法错误率的关系、方法的适用范围及理论拓展等均有较为深入的研究, 由于篇幅限制不再一一赘述(裴韬等, 2004; Pei et al., 2007; 封国林等, 2006, 2009)。

2.2.2 站点权重

对算法的适用性研究中, 引入权重拓展了算法的适用性(杨萍等, 2009)。本研究中, 将各站点看成空间上的点, 以年平均频次为参照标准, 将极端气候事件的年总频次转化为该年极端气候事件的权重, 用站点重复出现的次数体现权重的大小, 从而实现算法在极端气候事件中的合理应用。为了检验该算法实际应用的有效程度, 针对多种定义下的极端气候事件进行了算法的有效性检验, 证明其能有效应用于群发性极端气候事件(杨萍等, 2010)。

2.2.3 年代际群发性指数

年代际群发性指数 p_{DCI} (decadal cluster index, DCI) 有助于分析极端气候事件群发性的年代际空间演变特征, 该定义基于 k 阶最近邻距离丛集点提取算法得到逐年群发随时间演变的结果, 通过一定的数学运算, 将不同时间尺度群发性的

强弱用统一的数学公式表达出来, 从而实现对年代际群发性进行定量描述的目标(杨萍, 2009)。 p_{DCI} 具体定义如下:

$$p_{DCI} = \frac{\frac{n_M}{M}}{\frac{n_L}{L}} \times \frac{n_M}{\frac{n_{sum}}{N}}, \quad (2)$$

其中, L 为时间序列总长度, n_L 为该时段内的总群发次数; M 为年代际长度, n_M 为 M 时段的群发次数, N 为总站点数, n_{sum} 为该年代际全国所有群发站点的总发生次数, 本文以 10 年尺度为主要研究对象。

从统计学的角度看, p_{DCI} 的高值属于小概率事件, 本文中定义 p_{DCI} 的累积概率大于 70% 为二级高值区, 累计概率大于 85% 为一级高值区。

3 结果分析

3.1 极端温度事件的群发性规律

图 2 左列显示, 极端高温事件不同年代际的空间分布较为复杂。20 世纪 60 年代, 黄淮至江淮流域存在大范围的高群发区域, 并由此向南扩展, 长江以南的区域群发强度与江淮流域相比稍弱, 但仍属于高群发区域; 70 年代, 华北、华中东部的高值区消失, 东北出现了大范围的高值区, 西部呈现出由南向北增加的趋势, 黄河的中上游地区有群发高值区出现; 80 年代和 90 年代群发性明显减弱; 80 年代, 西部地区有明显的群发高值区域, 西南的云南区域出现较大的一级群发高值区, 华南、东北有小范围的高值区; 90 年代, 长江以南区域呈现出由南向北递增的群发特征, 长江上、下游有明显的一级群发高值区, 此外, 华北有小范围的群发高值区。21 世纪 00 年代, 群发高值区呈现显著的由南向北的阶梯型跳跃式增加。从群发高值区在各年代间的移动路径看, 先纬向自东向西移动, 后经向自南向北移动, 移动强度则是先由强到弱, 后由弱到强。

图 2 右列可以看到, 20 世纪 60 年代高值区域主要在江南以北的东部沿海边缘地区; 70 年代以华南西南地区为主; 80 年代几乎没有一级群发高值区, 二级群发高值区的分布区域也非常零星; 90 年代主要分布于长江流域和黄河流域的中上游区域; 21 世纪 00 年代群发性呈现非常明显的南北

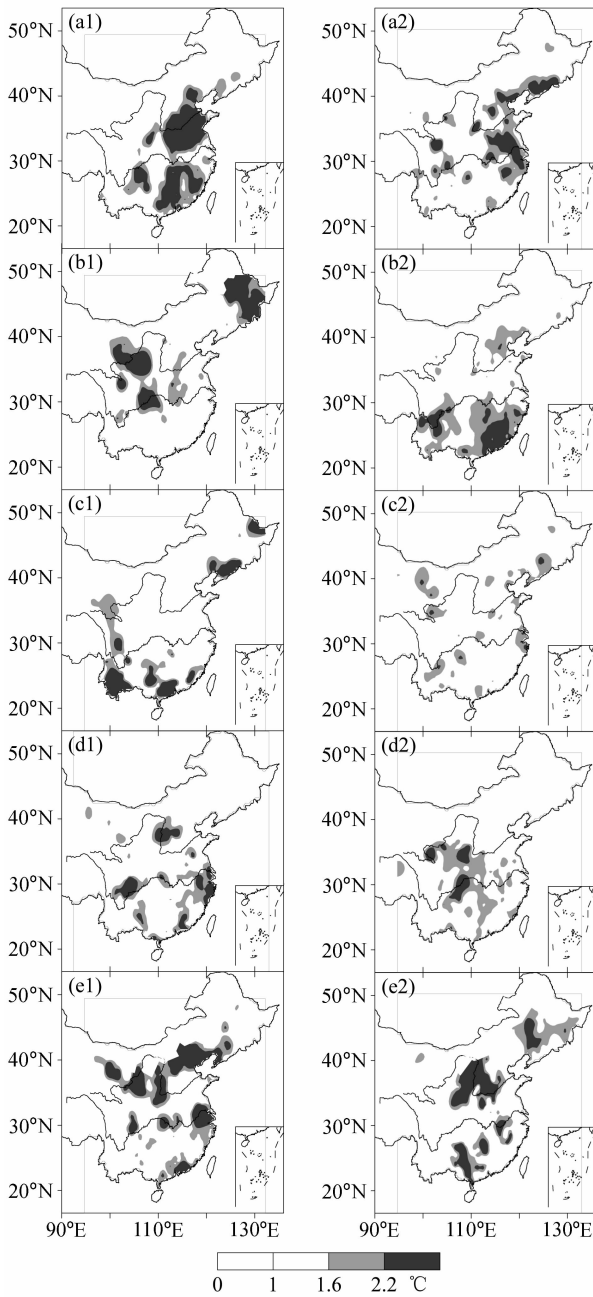


图2 极端温度事件年代际群发性指数高值区域的空间分布（左列为极端高温事件，右列为极端低温事件）：（a1）、（a2）为20世纪60年代；（b1）、（b2）为20世纪70年代；（c1）、（c2）为20世纪80年代；（d1）、（d2）为20世纪90年代；（e1）、（e2）为21世纪00年代。深色和浅色阴影分别为一级和二级高值区域

Fig. 2 Distribution of the high values of the decadal cluster index of the extreme temperature events (the left shows maximum temperature events, the right shows minimum temperature events): (a1) and (a2) The 1960s; (b1) and (b2) the 1970s; (c1) and (c2) the 1980s; (d1) and (d2) the 1990s; (e1) and (e2) the 2000s. Dark and light shaded areas represent the highest value and the second highest value, respectively

高、中间低的态势，华北、东北和华南地区为极端低温事件的高群发区域。张先恭和李小泉（1982）对20世纪50~70年代中国气温的研究发现，60年代冬季，中国偏冷的地区主要在西部，70年代冬季偏冷的地区主要集中在广大的华南和西南。图2中20世纪60年代黄淮上游（西北东部）有极端低温事件的群发高值区域，由于在计算中未考虑广大的西部地区，这种结论体现不明显，而70年代南方地区的群发高值区域与张先恭和李小泉（1982）的结论非常一致，这说明从年代际尺度来说，群发性极端低温事件的加强很可能为年代际气候偏冷贡献了主要作用。

极端高温事件和极端低温事件的年代际演变趋势表明，随着全球增暖，从20世纪60~90年代，中国极端低温事件的群发区域的范围都在不断缩小，而且80年代和90年代主要集中在平均气温相对偏高的我国南方，即极端低温值也相对偏高；而到了2000年以后，在我国北方再次出现了大范围的极端低温事件群发区域，发生了一次明显的跃变，同时极端高温事件的群发区域和强度也有较大增加，这是否意味着中国气候态的转型，还有待于进一步深入研究。

3.2 极端降水事件的群发性规律

图3左列中根据群发高值区域的覆盖面积，将其分为主群发区和次群发区。结果显示，20世纪60年代和70年代主群发区均集中在华南、西南等南方区域，80年代主群发区移到了江淮流域，90年代以后南方地区均未出现高群发区域。从主群发区的年代际空间演变特征看，20世纪60年代位于东南沿海地区，70年代向西南方向移动，80年代向东北方向移动，移至黄淮流域，90年代向南偏移，20世纪00年代向西北方向偏移，主群发区域的中心基本在中国的长江以南区域完成了一圈顺时针的环绕。次群发区则是先向南移动，80年代移至最南方的两广地区而后向北移动，到21世纪00年代移到了华北地区，从其移动的路径看，和主群发区的移动呈反向关系。整体来看，大暴雨事件的群发高值区主要集中在长江以南地区，这可能与定义有一定的关系，100 mm级别的降水事件在长江中下游等地区而言，其相对极端程度及影响要小于在东北、华北等地区（陈洪滨和范学花，2009）。由于本文侧重于其群发性，从空间

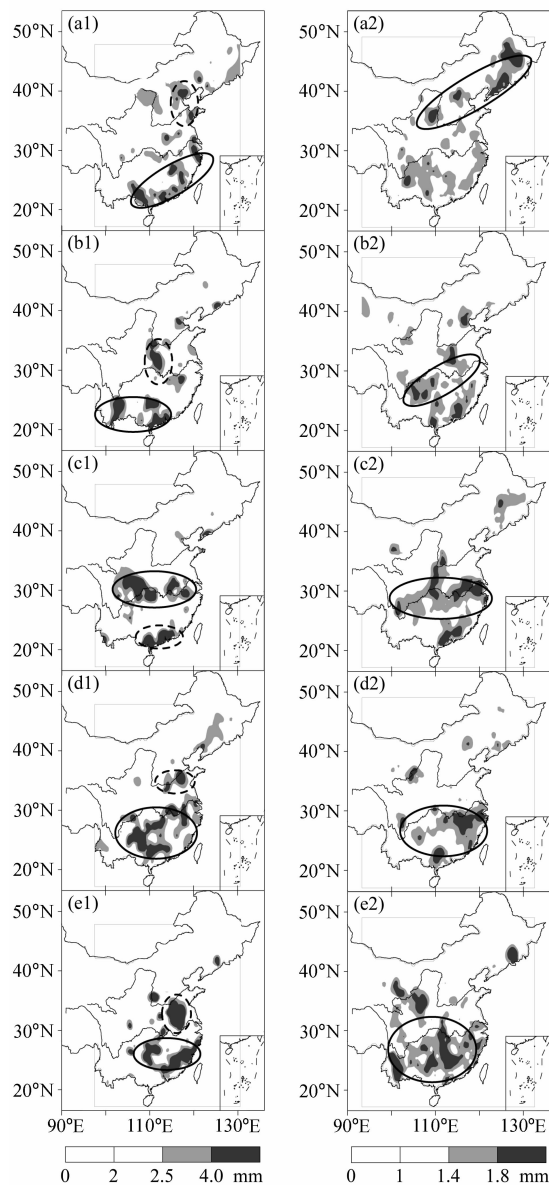


图3 极端降水事件年代际群发性指数高值区域的空间分布（左列为大暴雨事件，实线和虚线内分别为主群发区和次群发区；右列为强降水事件，实线内为高群发带）：(a1)、(a2) 为20世纪60年代；(b1)、(b2) 为20世纪70年代；(c1)、(c2) 为20世纪80年代；(d1)、(d2) 为20世纪90年代；(e1)、(e2) 为21世纪00年代。深色和浅色阴影分别为一级和二级高值区域

Fig. 3 Distribution of the high values of the decadal cluster index of the extreme precipitation events (the left shows rainstorm events, solid and dashed lines show the major cluster areas and the second cluster areas, respectively; the right shows strong precipitation events, the solid lines show the large cluster areas): (a1) and (a2) The 1960s; (b1) and (b2) the 1970s; (c1) and (c2) the 1980s; (d1) and (d2) the 1990s; (e1) and (e2) the 2000s. Dark and light shaded areas represent the highest value and the second highest value, respectively

分布和时间累积的角度来看，该定义下的极端降水事件仍具有潜在的致灾性，值得研究。

图3右列显示，20世纪60年代，强降水事件以华北—东北的高群发带布局为主；70年代，以长江上游和黄河中游为主，高群发带为西南—东北走向；80年代为典型的中间多南北少的布局，主要高群发带位于长江流域；90年代高群发带南移，主要集中在长江下游以南；21世纪00年代为南北多中间少的布局，西北、东北均出现一级群发高值区，长江以南区域有大范围的高群发带，黄淮流域则基本无群发高值区。强降水事件的高群发带与王永光等（2005）研究的中国近50年多雨带的分布格局具有很好的一致性，这可能说明群发性强降水事件的年代际变化规律在中国多雨带年代际空间分布格局的形成中占据了很大的作用。

4 小结

群发性特征是近年来极端气候事件表现出的新特征，目前研究一般局限于对中国局部地区气象要素统计的范畴，对群发性极端事件的量化工作及相关理论和方法的研讨还不成熟，本文基于 k 阶最近邻距离丛集点提取算法的方法及其一系列理论研究成果，用于揭示中国极端气候事件群发性的年代际空间演变特征，具体结果如下：

(1) 介绍了极端气候事件群发性研究的理论基础—— k 阶最近邻距离丛集点提取算法及其在极端气候事件应用中的研究思路，定义了年代际群发性指数，并定义一级和二级群发高值区。

(2) 极端温度事件年代际群发性指数高值区的空间分布特征显示，极端高温事件在各年代的空间分布较为复杂，尤其是20世纪60年代与70年代空间分布格局存在较大差异；极端低温事件年代际群发性指数70年代在南方地区的加强很可能为该年代际偏冷的气候背景贡献了主要作用。

(3) 极端降水事件年代际群发性指数高值区的空间分布特征显示，大暴雨事件的群发高值区主要集中在南方地区，这可能与大暴雨事件的定义有关；强降水事件的高群发带与中国近50年多雨带的分布格局具有很好的一致性，这可能说明群发性强降水事件的年代际变化规律在中国多雨带分布格局的形成中占据了较大作用。

参考文献 (References)

- Byers S D, Raftery A E. 1998. Nearest-neighbor cluster removal for estimating features in spatial point processes [J]. *Journal of the American Statistical Association*, 93: 577–584.
- 陈洪滨, 范学花. 2009. 2008 年极端天气和气候事件及其他相关事件的概要回顾 [J]. *气候与环境研究*, 14 (3): 329–340.
- Chen Hongbin, Fan Xuehua. 2009. Some extreme events of weather, climate and related phenomena in 2008 [J]. *Climatic and Environmental Research (in Chinese)*, 14 (3): 329–340.
- 陈峪, 任国玉, 王凌, 等. 2009. 近 56 年我国暖冬事件变化 [J]. *应用气象学报*, 20 (5): 539–545.
- Chen Yu, Ren Guoyu, Wang Ling, et al. 2009. Temporal change of warm winter events over the last 56 years in China [J]. *Quarterly Journal of Applied Meteorology (in Chinese)*, 20 (5): 539–545.
- 封国林, 董文杰, 龚志强, 等. 2006. 观测数据非线性时空分布理论和方法 [M]. 北京: 气象出版社, 85–96.
- Feng Guolin, Dong Wenjie, Gong Zhiqiang et al. 2006. Nonlinear theories and methods on spatial-temporal distribution of observational Data [M] (in Chinese) Beijing: China Meteorological Press, 85–96.
- 封国林, 杨杰, 万仕全, 等. 2009. 温度破纪录事件预测理论研究 [J]. *气象学报*, 67 (1): 61–74.
- Feng Guolin, Yang Jie, Wang Shiquan, et al. 2009. On the prediction of record-breaking daily temperature events [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 67 (1): 61–74.
- 龚志强, 封国林. 2008. 中国近 1000 年旱涝的持续性特征研究 [J]. *物理学报*, 57 (6): 3920–3931.
- Gong zhiqiang, Fengguolin. 2008. The research of durative characteristics of dry/wet series of China during the past 1000 years [J]. *Acta Physical Sinica (in Chinese)*, 57 (6): 3920–3931.
- Jones P D, Osborn T J, Briffa K R. 1997. Estimating sampling errors in large-scale temperature averages [J]. *J. Climate*, 10: 2548–2568.
- 裴韬, 周成虎, 杨明, 等. 2004. 混合二维泊松过程的分解算法及其在提取地震丛集模式中的应用 [J]. *地震学报*, 26 (1): 53–61.
- Pei Tao, Zhou Chenghu, Yang Ming, et al. 2004. The algorithm of decomposine superimposed 2-D passion processes and its application to the ex-tractine earthquake clustering pattern [J]. *Acta Seismogica Sinica (in Chinese)*, 26 (1): 53–61.
- Pei T, Zhu A X, Zhou C H, et al. 2006. A new approach to the nearest-neighbour method to discover cluster features in overlaid spatial point processes [J]. *International Journal of Geographical Information Science*, 19: 153–168.
- Pei T, Zhu A X, Zhou C H, et al. 2007. Delineation of support domain of feature in the presence of noise [J]. *Computers and Geosciences*, 33: 952–965.
- Qian W, Fu J, Yan Z. 2007. Decrease of light rain events in summer associated with a warming environment in China during 1961–2005 [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 34, L11705, doi: 10.1029/2007GL029631.
- Ren G Y, Chu Z Y, Chen Z H. 2007. Implications of temporal change in urban heat island intensity observed at Beijing and Wuhan stations [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 34 (7): 1–5.
- Trenberth K E, Jones P D, Ambenje P. 2007. Observation: Surface and atmospheric climate change [M] // *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Solomon S, Qin D, Manning M, et al, Eds. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press.
- 王永光, 龚振松, 许力, 等. 2005. 中国温度、降水的长期气候趋势及其影响因子分析 [J]. *应用气象学报*, 16 (增刊): 85–91.
- Wang Yongguang, Gong Zhensong, Xu Li, et al. 2005. Analysis of long trend of temperature and precipitation in China and its influencing factors [J]. *Quarterly Journal of Applied Meteorology (in Chinese)*, 16 (s1): 85–91.
- 王跃男, 何金海, 姜爱军. 2009. 江苏省夏季持续高温集中程度的气候特征研究 [J]. *热带气象学报*, 25 (1): 97–102.
- Wang Yuenan, He Jinhai, Jiang Aijun. 2009. A Study of on the climatic feature of the summer persistence high temperature concentration in Jiangsu Province [J]. *Journal of Tropical Meteorology (in Chinese)*, 25 (1): 97–102.
- 杨萍. 2009. 近四十年中国极端温度和极端降水事件的群发性研究 [D]. 兰州大学博士学位论文, 8pp.
- Yang Ping. 2009. Research of group-occurring extreme temperature and precipitation events during 1960–2005 [D]. Ph. D. dissertation (in Chinese), Lanzhou University, 8pp.
- 杨萍, 侯威, 支蓉. 2009. 利用空间点过程提取丛集点算法的适用性研究 [J]. *物理学报*, 58 (03): 2097–2105.
- Yang Ping, Hou Wei, Zhi Rong. 2009. Research in the validity of clusters delineation based on spatial point processes [J]. *Acta Physical Sinica (in Chinese)*, 58 (03): 2097–2105.
- 杨萍, 封国林, 刘伟东, 等. 2010. 空间点过程理论在极端气候事件中的应用研究 [J]. *应用气象学报*, 21 (3): 352–359.
- Yang Ping, Feng Guolin, Liu Weidong, et al. 2010. Effective research of cluster extreme events based on point process theory [J]. *Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese)*, 21 (3): 352–359.
- 杨金虎, 江志红, 王鹏祥, 等. 2008. 中国年极端降水事件的时空分布特征 [J]. *气候与环境研究*, 13 (1): 75–83.
- Yang Jinhui, Jiang Zhihong, Wang Pengxiang, et al. 2008. Temporal and spatial characteristic of extreme precipitation event in China [J]. *Climatic and Environmental Research (in Chinese)*, 13 (1): 75–83.
- 张先恭, 李小泉. 1982. 本世纪我国气温变化的某些特征 [J]. *气象学报*, 40 (2): 198–208.
- Zhang Xiangong, Li Xiaoquan. 1982. Some characteristics of temperature variation in China in the present century [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 40 (2): 198–208.