

DOI :10.3876/j.issn.1000-1980.2011.06.008

钱塘江流域极端气温和最大降水事件的时空变化

张徐杰¹ 林盛吉² 田 焱¹ 徐 晓¹ 许月萍¹

(1. 浙江大学水文与水资源工程研究所, 浙江 杭州 310058; 2. 奉化市水利局, 浙江 奉化 315500)

摘要 基于 1951—2008 年钱塘江流域内外 15 个气象站月极端高温、月极端低温和月最大降水量资料, 采用 Mann-Kendall 趋势分析方法和协克里金插值方法分析了不同区域、不同季节的极端气温和最大降水量的空间分布及变化趋势特征。结果表明: 钱塘江流域最大降水量总体呈缓慢减少的状态, 而极端气温都有上升的趋势; 季节分布上, 夏季最大降水量有增加的趋势, 其他季节降水量减少, 而极端气温在各个季节都呈升温趋势; 空间分布上, 钱塘江流域极端高温有着较为明显的地域差别, 沿海一带极端高温上升快, 尤以嵊县一带最为严重, 而淳安一带变化趋势最不明显。

关键词 钱塘江流域; 极端气温; 最大降水量; 空间分布特征

中图分类号: P333 P467

文献标志码: A

文章编号: 1000-1980(2011)06-0635-05

对于气候变化的研究很多, 但是主要集中在气温和降水的变化方面, 而对极端气候事件的变化规律研究不多。极端气候事件对国民经济发展、社会稳定和人民生活等方面造成了严重的灾害^[1]。近年来, 全世界许多地区已经历了若干极端气候事件, 如 2002 年夏天中欧毁灭性的洪水, 2003 年夏季非洲大陆许多地方遭受热浪, 2010 年春季中国西南地区遇到百年一遇的干旱。极端气温和最大降水是在极端事件中最受关注的问题之一, 是指在一段时间内温度的极值以及降水的最大值。极端气温和最大降水同样会对自然环境和人们生活造成严重影响, 长时间大面积的极端气温和最大降水将会造成大范围的干旱、冰冻以及洪涝灾害。极端气温和最大降水对社会经济和生态环境的影响已越来越受到人们关注。

极端气温和最大降水作为极端气候事件的一部分, 国内外已有学者开始利用不同方法研究其不同尺度上的规律以及影响。Manton 等^[2]分析了 1961—1998 年的东南亚及南太平洋的极端气温和最大降水趋势情况。Bonsal 等^[3]对加拿大南部每日极端气温进行了极端时空分布特征分析, 特别强调了极端高温的变化所带来的影响。Malcolm 等^[4]用最大降水指数分析了澳大利亚东部和西南部最大降水的强度以及频率。李捷等^[5]用距平分析法等相关水文统计方法对额尔齐斯河流域内的气候特征及变化趋势进行了分析。郭利丹等^[6]用滑动平均法和差积曲线法分析了巴尔喀什流域的气候变化特征。王志福等^[7]采用百分位的方法定义最大降水事件的阈值, 分析了不同持续时间的最大降水事件的时空分布及变化趋势特征。本文采用月极端气温和月极端降水量来表征极端气候, 研究钱塘江流域的极端气温和最大降水的变化特征, 以及在不同区域和不同季节的变化趋势, 为深入了解钱塘江流域气候变化规律和对该流域的水资源评估、旱涝监测提供参考。

1 研究数据和研究方法

1.1 研究数据

研究数据为钱塘江流域内外 15 个气象站 1951—2008 年月极端气温和月最大降水数据, 数据主要由中国气象局国家气象信息中心提供。其中新安江流域有 3 个站点(黄山、屯溪和淳安), 兰江流域有 2 个站点(衢州和金华), 富春江流域(至出口)有 4 个站点(天目山、诸暨、杭州和嵊县), 流域外 6 个站点(玉山、龙泉、丽水、鄞县、慈溪和宁国)。站点分布均匀, 在全流域中具有较好的代表性。其中黄山、屯溪和宁国在安徽省, 玉山在江西省, 其余各站都在浙江省。钱塘江有南北两源, 均在安徽省休宁县。北源(新安江)和南源(兰江)在建德

收稿日期: 2010-11-01

基金项目: 国家自然科学基金(50809058); 浙江省自然科学基金(Z5080048); 教育部博士点新教师基金(200803351029); 国家国际科技合作计划(2010DFA24320)

作者简介: 张徐杰(1987—), 男, 浙江余姚人, 硕士研究生, 主要从事气候变化下水资源风险分析研究。E-mail: zxzju@zju.edu.cn

县梅城汇合,汇合后沿着东北流向,在北岸上海市南汇县芦潮港闸与南岸浙江省宁波市镇海区外游山的连线上注入东海.

1.2 研究方法

趋势分析的方法很多,常用的方法有线性倾向估计法、滑动平均法、累积距平法、二次平滑法、Mann-Kendall 法等.到目前为止,趋势分析应用于水文、气候、水质以及其他自然时间序列已超过 30 a,在世界上许多国家及地区广泛应用^[8-9].本文尝试应用 Mann-Kendall 法来检验钱塘江流域极端气候的变化趋势,并计算倾斜度 β 用于反映序列单调趋势的大小.

1.2.1 Mann-Kendall 非参数检验方法

Mann-Kendall 非参数检验方法是世界气象组织推荐并已广泛使用的非参数检验方法,最初由 Mann 和 Kendall 提出^[10]. Mann-Kendall 检验是提取序列变化趋势的有效工具. Mann-Kendall 法适用于非正态分布的数据和有删减的数据,这种情况经常在水文气象中遇到,且其趋势检测能力与参数趋势检测方法相同,因而被广泛应用于水文序列的分析中^[11-13].

Mann-Kendall 检验统计变量计算式为

$$S = \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{j=k+1}^n \text{sgn}(x_j - x_k) \tag{1}$$

其中
$$\text{sgn}(x_j - x_k) = \begin{cases} 1 & x_j - x_k > 0 \\ 0 & x_j - x_k = 0 \\ -1 & x_j - x_k < 0 \end{cases} \tag{2}$$

式中: x_j, x_k ——第 j 年和第 k 年的数值, $j > k$; n ——系列的长度.

随机序列 $S(i = 1, 2, \dots, n)$ 近似服从正态分布,那么 S_i 的均值和方差分别为 0 和 $n(n-1)(2n+5)/18$, 计算统计检验值 Z_s 计算公式为

$$Z_s = \begin{cases} (S-1)/\sqrt{V_{\text{ar}}(S)} & S > 0 \\ 0 & S = 0 \\ (S+1)/\sqrt{V_{\text{ar}}(S)} & S < 0 \end{cases} \tag{3}$$

若 Z_s 为正,表明有上升趋势; Z_s 为负,表明有下降趋势.在双边检验中,给定的 α 置信水平, $Z_{1-\alpha/2}$ 从标准正态分布函数获得.若 $|Z_s| \leq Z_{1-\alpha/2}$,表明时间序列没有明显趋势;如果 $|Z_s| > Z_{1-\alpha/2}$,则表明时间序列存在明显的上升或下降趋势. Mann-Kendall 检验利用非参数方法估计趋势变化的幅度来评估确定变化趋势的变化程度.假定趋势变化是线性的,趋势函数可以表示如下:

$$x_t = bt + B \tag{4}$$

式中: x_t ——序列值; b ——变化趋势程度,即斜率; B ——常数.为了获得式(4)中 b 的估计值,计算所有序列值的斜率, Mann-Kendall 倾斜度 β 值可以用来量化单调趋势:

$$\beta = \text{Median}\left(\frac{x_i - x_j}{i - j}\right) \quad (j < i) \tag{5}$$

Median 表示取中值.通过式(5)可以获得最多 $N = \frac{1}{2}n(n-1)$ 个斜率估计值 b . N 个 b 的中值就是斜率估计值,即:

$$b = \begin{cases} b_{(N+1)/2} & N \text{ 为奇数} \\ \frac{1}{2}(b_{N/2} + b_{(N+2)/2}) & N \text{ 为偶数} \end{cases} \tag{6}$$

当 b 为正值时,表示序列有增加的趋势;当 b 为负值时,则表示序列有减少的趋势.

1.2.2 空间分布特征分析方法

目前对于空间分布的主要研究方法有统计模型法、空间插值法及综合方法 3 种类型.本文选用协克里金空间插值法.协克里金空间插值法充分吸收了空间统计的思想,认为任何空间连续性变化的属性非常不规则,不能用简单的平滑数学函数进行模拟,但是可以用随机表面给予较恰当的描述.

协克里金空间插值法的模型计算公式为

$$Z_{s1} = \mu_1 + \varepsilon_{s1} \quad Z_{s2} = \mu_2 + \varepsilon_{s2} \tag{7}$$

式中： μ_1, μ_2 ——未知的常数； $\varepsilon_{s1}, \varepsilon_{s2}$ ——随机误差。除了有主变量外，协克里金空间插值法比普通克里金方法多了辅助变量，本文中的辅助变量为气象站的高程。

较常规方法而言，协克里金空间插值法的优点在于不仅考虑了各已知数据点的空间相关性，而且在给出待估计点的数值的同时，还能给出表示估计精度的方差^[14]。

2 结果分析

为了减少单站实测资料的片面性，利用新安江流域、兰江流域和富春江流域（至出口）各站的算术平均序列进行 Mann-Kendall 趋势分析，并将其统计值 Z_s 进行协克里金插值。表 1 为利用 Mann-Kendall 趋势分析计算的钱塘江各子流域极端灾害序列统计检验值 Z_s 。

表 1 钱塘江流域极端气象灾害变化趋势分析

Table 1 Change trend analysis of extreme climatic disasters in Qiantangjiang Basin

区 域	统计检验值 Z_s														
	春季			夏季			秋季			冬季			年		
	极端 高温	极端 低温	最大 降水	极端 高温	极端 低温	最大 降水	极端 高温	极端 低温	最大 降水	极端 高温	极端 低温	最大 降水	极端 高温	极端 低温	最大 降水
新安江流域	1.58	3.47	-0.81	1.23	1.80	0.26	2.11	2.76	-0.43	1.85	3.56	-1.75	0.79	1.76	-0.81
兰江流域	1.87	2.18	-1.03	1.30	0.10	0.48	0.91	3.63	-0.54	1.45	2.80	0.25	0.80	0.93	-0.74
富春江流域(至出口)	2.50	3.55	-2.00	2.14	1.34	1.34	2.62	3.07	-2.13	2.41	3.39	-1.36	2.58	2.39	-1.51

在双边检验中，设置信水平 $\alpha = 0.05$ ，查正态分布表得临界值 $Z_{1-\alpha/2} = 1.96$ 。由表 1 可见，夏季 Z_s 均为正值，绝大多数统计检验值满足 $|Z_s| \leq 1.96$ ，表明钱塘江流域极端高温、极端低温和最大降水气象灾害没有明显的趋势，只有富春江流域（至出口）夏季极端高温气象灾害满足 $|Z_s| > 1.96$ ，表明夏季极端高温有明显增加的趋势。钱塘江流域年序列以及春季、秋季和冬季的最大降水大多数 Z_s 均为负值，只有兰江流域冬季例外，但是趋势均不明显。富春江流域（至出口）春季和秋季满足 $|Z_s| > 1.96$ ，表明这两季最大降水均有明显减少的趋势。极端高温和极端低温 Z_s 均为正值，部分满足 $|Z_s| > 1.96$ ，意味着钱塘江流域极端高温和极端低温有增加的趋势，部分增加趋势明显。

2.1 极端气温趋势分析

利用钱塘江流域内外 15 个气象站月极端气温数据，分析钱塘江流域极端高温和极端低温趋势统计值 Z_s 。由表 1 可知，计算结果 Z_s 均为正值。将 Z_s 进行协克里金插值分析空间变化情况，见图 1。

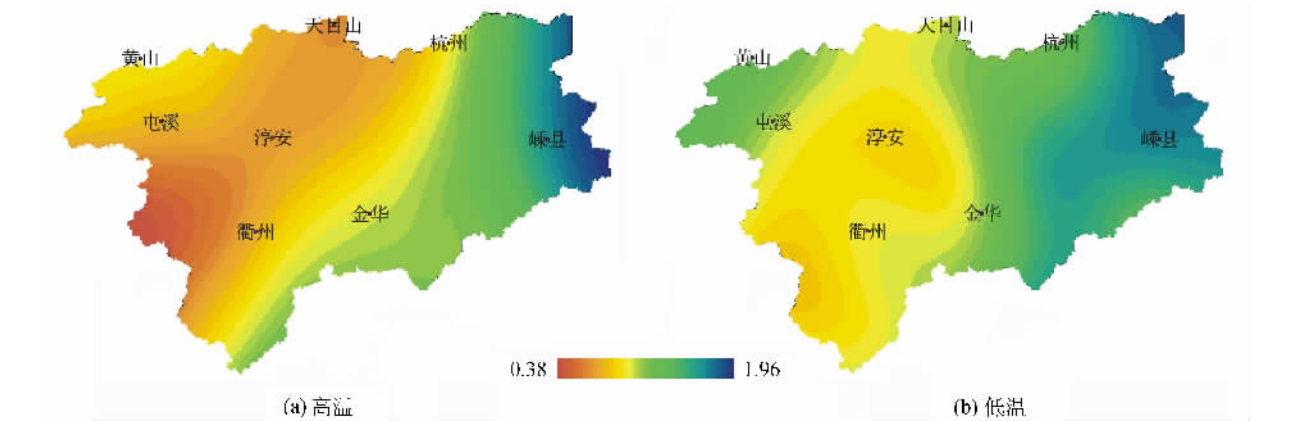


图 1 钱塘江流域年极端气温序列 Z_s 空间插值

Fig. 1 Spatial interpolation of Z_s for annual extreme temperature series in Qiantangjiang Basin

1951—2008 年钱塘江流域极端高温和极端低温均在波动中上升（图 1），而且这种趋势在富春江流域（至出口）最为明显。钱塘江流域极端高温有着较明显的地域差别，沿海一带极端高温上升快，尤以嵊县一带最为严重，而淳安一带变化趋势最不明显。钱塘江流域极端低温上升的趋势极为一致，差别不大。其中杭州、金华、天目山和屯溪站的气温上升趋势均为极端低温高于极端高温，意味着这些地方的温差范围将缩小。

表2为钱塘江流域极端气温趋势变化情况,由表2可知,除了在1月极端高温表现出微弱的降温趋势外,其他月份极端高温和极端低温均呈现上升趋势.极端低温在1月、2月、5月、9月和10月表现出明显的升温趋势,上升幅度超过了 $0.035^{\circ}\text{C}/\text{a}$,其中最大上升幅度为 $0.053^{\circ}\text{C}/\text{a}$.极端高温各月表现的升温趋势也较明显,尤其是2月、5月、6月和10月升温趋势更为显著,升温幅度超过了 $0.030^{\circ}\text{C}/\text{a}$,其中最大上升幅度为 $0.041^{\circ}\text{C}/\text{a}$.极端低温在5—7月上升幅度小于极端高温,意味着钱塘江流域春末至夏末温差将增大,增加幅度 $0.006\sim 0.011^{\circ}\text{C}/\text{a}$.夏季极端高温的升温趋势将会加重钱塘江流域伏旱灾害.而其他月份的气温上升幅度均为极端低温高于极端高温,意味着这些月份气温变化范围正在逐步缩小,极端气温情况趋于缓和.

2.2 最大降水趋势分析

应用 Mann-Kendall 方法计算钱塘江流域内外各气象站最大降水量的统计检验值 Z_s ,由于气象站点设置的局限性,绝大多数空间位置上的数据是无法获得的,需要对空间进行插值来解决这个问题,图2为协克里金插值结果.由图2可知,钱塘江流域西北方向 Z_s 为负值,每月最大降水量减弱,嵊县一带最大降水量基本无变化趋势,嵊县以东地带最大降水量有增加的趋势,这与表1的结论是一致的.钱塘江流域除夏季外,其他季节最大降水量均减少.兰江流域最大降水量在夏季和冬季都有增加的趋势,而其他流域就只有在夏季才会有增加的趋势.钱塘江流域在夏季往往是梅雨和台风的高发期,夏季最大降水量增加将会增加洪涝灾害.最大降水量增加和洪涝灾害以及农业生产有着密切的联系,表3为兰江流域各月最大降水量的变化趋势参数计算结果.

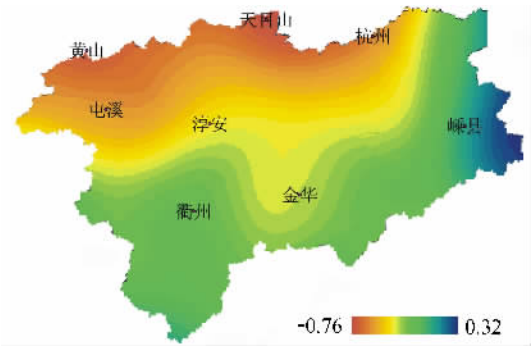


图2 钱塘江流域最大降水序列 Z_s 空间插值
Fig. 2 Spatial interpolation of Z_s for maximum precipitation series in Qiantangjiang Basin

综合分析,可得以下结论 (a) 钱塘江流域最大降水量总体呈缓慢减少的状态,其中富春江流域(至出口)减少最明显 (b) 钱塘江流域各季最大降水量也是缓慢减少的,但是夏季却是增加的趋势,兰江流域的秋季最大降水量也是缓慢增加的.

3 结 论

- a. 钱塘江流域最大降水量总体呈缓慢减少的状态,其中富春江流域(至出口)减少最明显,而在夏季最大降水量却有增加的趋势,其中富春江流域(至出口)增加最快,其他季节最大降水量有减少的趋势.
- b. 钱塘江流域极端气温在各个季节均有升温的趋势,部分季节升温趋势较为明显,这种趋势在富春江流域(至出口)尤为明显.
- c. 钱塘江流域极端高温有着较为明显的地域差别,沿海一带极端高温上升快,尤以嵊县一带最为严重,而淳安一带变化趋势最不明显.
- d. 钱塘江流域部分区域部分月份气温上升趋势为极端低温高于极端高温,意味着这些地方的温差范围将缩小.

表2 钱塘江流域极端气温趋势变化情况
Table 2 Change trend of extreme temperatures in Qiantangjiang Basin

月份	$\beta(^{\circ}\text{C}\cdot\text{a}^{-1})$		月份	$\beta(^{\circ}\text{C}\cdot\text{a}^{-1})$	
	极端高温	极端低温		极端高温	极端低温
1	-0.010	0.044	7	0.011	0.000
2	0.036	0.053	8	0.007	0.009
3	0.017	0.033	9	0.006	0.038
4	0.011	0.042	10	0.030	0.053
5	0.041	0.035	11	0.020	0.042
6	0.033	0.017	12	0.011	0.011

表3 兰江流域各月最大降水序列趋势参数
Table 3 Trend parameters of monthly maximum precipitation series in Lanjiang Basin

月份	Z_s	$\beta(^{\circ}\text{C}\cdot\text{a}^{-1})$	月份	Z_s	$\beta(^{\circ}\text{C}\cdot\text{a}^{-1})$
1	1.03	0.09	7	0.00	0.00
2	-0.83	-0.07	8	0.42	0.05
3	-0.01	0.00	9	-1.48	-0.20
4	-0.97	-0.12	10	-0.50	-0.07
5	-1.10	-0.18	11	0.81	0.08
6	0.89	0.20	12	-0.16	-0.01

从表3可以看出,有5个月最大降水序列有逐渐增加的趋势,主要分布在夏冬两季,这与表1的结论是一致的.最大增加幅度和最大减少幅度均为-0.20,变化幅度不大.

参考文献：

[1] FANG X Q ,YE Y ,ZENG Z Z. Extreme climate events ,migration for cultivation and policies :a case study in the early Qing Dynasty of China[J]. Science in China Series D :Earth Sciences 2007 ,50(3) :411-421.

[2] MANTON M J ,DELLA P M ,HAYLOCK M R. Trends in extreme daily rainfall and temperature in southeast Asia and the South Pacific : 1961-1998[J]. International Journal of Climatology 2001 ,21(3) :269-284.

[3] BONSAI B R ,ZHANG X ,VINCENT L A ,et al. Characteristics of daily and extreme temperatures over Canada[J]. Journal of Climate , 2001 ,14(9) :1959-1976.

[4] MALCOLM H ,NEVILLE N. Trends in extreme rainfall indices for an updated high quality data set for Australia ,1910-1998[J]. International Journal of Climatology 2000 ,20 :1533-1541.

[5] 李捷 ,夏自强 ,郭利丹 ,等. 额尔齐斯河流域气候特征及变化趋势分析[J]. 河海大学学报 :自然科学版 ,2008 ,36(3) :311-315.(LI Jie ,XIA Zi-qiang ,GUO Li-dan ,et al. Characteristics and trends of change in the climate of the Irtysh River Basin[J]. Journal of Hohai University :Natural Sciences 2008 ,36(3) :311-315.(in Chinese))

[6] 郭利丹 ,夏自强 ,李捷 ,等. 巴尔喀什湖流域气候变化特征分析[J]. 河海大学学报 :自然科学版 ,2008 ,36(3) :316-321.(GUO Li-dan ,XIA Zi-qiang ,LI Jie ,et al. Characteristics of climatic change in the Balkhash Lake Basin[J]. Journal of Hohai University :Natural Sciences 2008 ,36(3) :316-321.(in Chinese))

[7] 王志福 ,钱永甫. 中国极端降水事件的频数和强度特征[J]. 水科学进展 ,2009 ,20(1) :1-9.(WANG Zhi-fu ,QIAN Yong-fu. Frequency and intensity of extreme precipitation events in China[J]. Advances in Water Science 2009 ,20(1) :1-9.(in Chinese))

[8] DOUGLAS E M ,VOGEL R M ,KROLL C N. Trends in flood and low flows in the United States :impact of spatial correlation[J]. Journal of Hydrology 2000 ,240 :90-105.

[9] XU Z X ,TAKEUCHI K ,ISHIDAIRA H. Monotonic trend and step changes in Japanese precipitation[J]. Journal of Hydrology 2003 ,279 :144-150.

[10] YUE S ,PILON P ,CAVADIAS G. Power of the Mann-Kendall and Spearman 's rho tests for detecting monotonic trends in hydrological series[J]. Journal of Hydrology 2002 ,259 :254-271.

[11] HAMED K H ,RAO A R. A modified Mann-Kendall trend test for autocorrelated data[J]. Journal of Hydrology ,1998 ,204 :182-196.

[12] 张润润. 香港地区降水趋势及其演变过程分析[J]. 河海大学学报 :自然科学版 ,2010 ,38(5) :505-510.(ZHANG Run-run. Trend and evolution of precipitation in Hong Kong[J]. Journal of Hohai University :Natural Sciences ,2010 ,38(5) :505-510.(in Chinese))

[13] 黄峰 ,夏自强 ,王远坤. 长江上游枯水期及 10 月径流情势分析[J]. 河海大学学报 :自然科学版 ,2010 ,38(2) :129-133.(HUANG Feng ,XIA Zi-qiang ,WANG Yuan-kun. Runoff regimes of upstream Yangtze River in dry season and October[J]. Journal of Hohai University :Natural Sciences 2010 ,38(2) :129-133.(in Chinese))

[14] 刘鹏 ,张万昌. 考虑数据变换的泾河流域月降雨空间插值[J]. 水土保持研究 ,2008 ,15(4) :1-4.(LIU Peng ,ZHANG Wan-chang. The month precipitation in Jinghe River basin considering data-transformation[J]. Research of Soil and Water Conservation 2008 ,15(4) :1-4.(in Chinese))

Analysis of spatial and temporal variation of extreme temperatures and maximum precipitation in Qiantangjiang Basin

ZHANG Xu-jie¹ , LIN Sheng-ji² , TIAN Ye¹ , XU Xiao¹ , XU Yue-ping¹

(1. Institute of Hydrology and Water Resources , Zhejiang University , Hangzhou 310058 , China ;
2. Fenghua Municipal Bureau of Water Resources , Fenghua 315500 , China)

Abstract : Based on statistics of monthly maximum precipitation and extremely high and low temperatures from 15 weather stations in the Qiantangjiang Basin from 1951 to 2008 , the characteristics of the spatial distribution and change trend of extreme temperatures and maximum precipitation in different regions and seasons were analyzed with the co-kriging interpolation method and the Mann-Kendall trend method. The results show the following : the maximum precipitation shows a gradually decreasing trend in general , while the extreme temperatures have a rising trend ; the maximum precipitation has an increasing trend in the summer and a decreasing trend in other seasons , and the extreme temperatures have a decreasing trend in all seasons ; and there are obvious differences in the extreme temperatures between various areas in the Qiantangjiang Basin : the extremely high temperature grows rapidly in the coastal areas , particularly in Sheng County , while the change trend is not obvious in Chun 'an County.

Key words : Qiantangjiang Basin ; extreme temperature ; maximum precipitation ; spatial distribution characteristics