

增暖背景下中国东北地区极端降水事件的演变特征

杨素英^{1,2}, 孙凤华³, 马建中¹

(1 中国气象科学研究院, 北京 100081; 2 南京信息工程大学, 江苏 南京 210044;
3 中国气象局沈阳大气环境研究所, 辽宁 沈阳 110016)

摘要: 利用中国东北地区 93 站 1959~2002 年逐日降水资料, 研究该区极端降水事件时空演变特征, 结果表明: 东北地区极端降水事件阈值由东南沿海向西北内陆逐渐减小, 6~9 月是极端降水事件集中出现月份; 1985~2002 年是极端降水事件偏多, 且为一突变现象; 东北地区短时间内连续发生极端降水事件概率较大, 其中 1~5 天时间间隔极端降水事件占 23.7%; 80 年代中期后东北地区增暖背景下, 极端降水事件和有 1~5 天时间间隔的极端降水事件明显增加, 特别是松花江下游和牡丹江流域及西辽河上游地区, 频次和强度存在增加或增强趋势。

关键词: 东北地区; 极端降水; M-K 趋势检验

中图分类号: P426 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-0690(2008)02-0224-05

与全球气候变暖背景相伴随, 一些极端天气和气候事件频繁发生给许多国家和地区带来严重灾害^[1,2]。据报告, 2003 年夏季法国西南部地区气温与往年平均气温相比高 5~7℃^[3], 美国在 20 世纪 90 年代年均洪水损失达到 49.50 亿美元。中国洪涝、干旱等气象灾害每年损失占整个自然灾害损失的 70% 左右, 直接经济损失占国民生产总值的 3%~6%, 如 1998 年的洪涝灾害全国农田受灾面积 $2.229 \times 10^4 \text{ km}^2$, 成灾面积 $1.378 \times 10^4 \text{ km}^2$, 死亡 4 150 人, 直接经济损失达 2 551 亿元^[4]。中国气温和降水对全球变暖有一定程度的响应^[5~8]。目前中国对区域极端气象事件气候变化规律的研究还不够, 翟盘茂等^[9]、严中伟^[10]、刘小宁^[11]、龚道溢等^[12]对中国及中国北方地区极端降水事件进行了一些研究, 但对增暖显著的东北地区极端降水事件的研究还很少见报。在全球气候变暖的背景下, 东北地区的气候具有更为显著的变暖趋势^[13,14]。研究认为, 由于温室效应加强会使地面温度升高的同时, 还会导致地面蒸发能力的增强, 为了与蒸发过程相平衡, 降水也将增加, 易于发生洪涝灾害。近年的资料表明, 由于降水的时空分布不均, 东北区持续性暴雨洪涝等气候灾害频繁发生, 严重洪涝

灾害的发生频次在全国位于前列, 给当地国民经济特别是农业生产以及生态环境等带来较大损失。1995 年松辽流域和 1998 年松嫩流域发生的特大洪涝灾害所造成的直接经济损失就高达千亿元人民币^[15]。虽然东北地区平均降水量对洪涝具有一定的影响, 但极端降水变化在灾害发生过程中的作用更应受到重视。因此需要从极端降水变化角度探讨东北地区洪涝的成因。东北地区是中国重要的粮食生产基地, 研究东北地区极端降水事件变化规律对于降低该地区因洪涝灾害造成的农业经济损失和保障粮食生产安全具有重要意义。本文将采用 Mann-Kendall 趋势检验法、Mann-Kendall 突变检验法、差值 T 检验、和二项式系数滑动平均法对近 40 多年来中国东北地区极端降水事件的时空演变特征进行分析。

1 资料和方法

1.1 资料

本文所选资料为中国国家气象中心提供的东北地区 93 个国家常规气象观测站 1959 年 1 月至 2002 年 12 月逐日降水资料, 其中东北地区包括辽宁、吉林、黑龙江三省的全部, 内蒙古自治区东部的

收稿日期: 2007-04-12 修订日期: 2007-09-10
基金项目: 中国气象局气候变化专项 (CCSF2007-17) 资助。
作者简介: 杨素英 (1975-), 女, 辽宁葫芦岛人, 博士研究生, 从事气溶胶间接气候效应研究。E-mail: yangsuying75@gmail.com
通讯作者: 孙凤华, 副研究员。E-mail: sh3910839@sina.com

呼伦贝尔盟、兴安盟、哲里木盟(通辽市)和赤峰市;东北地区主要水系包括黑龙江、松花江、乌苏里江、嫩江、辽河以及额尔古纳河(图 1)。

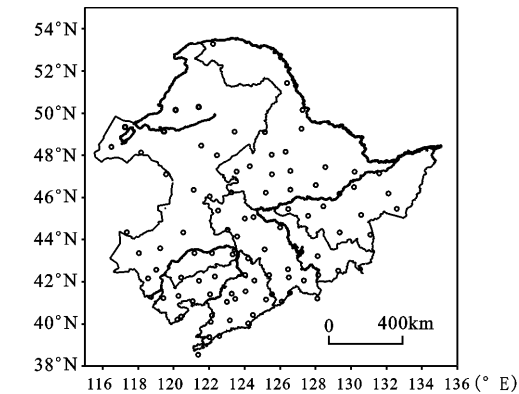


图 1 中国东北地区代表站点和主要河流的空间分布

Fig 1 Spatial distribution of representative stations and main rivers in Northeast China

1 2 极端降水事件阈值的确定方法

本文根据每一个测站的日降水量定义东北地区极端降水事件的阈值。其具体方法是把 1961~1990 年逐年日降水量序列的第 99 个百分位值的 30 年平均值定义为极端降水事件的阈值,当某站某日降水量超过极端降水事件的阈值时,就称之为一个极端降水事件^[9]。

1 3 Mann-Kendall 趋势检验法

Mann-Kendall 趋势检验法是一种非参数趋势检验法。该方法适合于非正态分布的气象数据的非线性趋势检验,目前已广泛用于气象领域的研究^[16, 17]。本文采用该方法检测东北地区极端降水事件的长期变化趋势。检验过程如下:

$$S_i = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{k=i+1}^n \text{sgn}(x_k - x_i)$$

$$\begin{cases} \text{sgn}(x_k - x_i) = 1 & x_k - x_i > 0 \\ \text{sgn}(x_k - x_i) = 0 & x_k - x_i = 0 \\ \text{sgn}(x_k - x_i) = -1 & x_k - x_i < 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中, x_k 和 x_i 为样本数据值, n 为数据集合长度。当 $n \geq 8$ 时,统计数 S 近似呈正态分布,且其方差 $V(S)$ 可由下式计算得到。

$$V_s = \left[n(n-1)(2n+5) - \sum_{i=1}^{n-1} t_i(i-1) \times (2i+5) \right] / 18$$

(2)

式中, t_i 是与观测值 x_i 相同的数据个数。相应地, M-K 趋势检验的统计量 z_c 为:

$$z_c = \begin{cases} (s-1)/b(s)^{1/2} & s > 0 \\ 0 & s = 0 \\ (s+1)/b(s)^{1/2} & s < 0 \end{cases} \quad (3)$$

对于给定的趋势检验显著性水平 α 如果 $|z_c| > z_{\alpha}$, 表示变量存在显著的单调趋势;当 z_c 为正值时,表示变量 x 存在上升趋势,负值为存在下降趋势。

2 结果与分析

2 1 极端降水事件阈值的空间分布及月际变化

极端降水事件是高风险小概率事件,极端降水事件降水量的多少因受地理环境的制约,不同区域有不同量值,那么东北地区日降水量达到多少才成为一个极端降水事件,其时空变化又有什么特点,为此我们利用前文确定的极端降水事件阈值方法给出了东北地区极端降水事件阈值的空间分布图(图 2)。图 2 看出,东北地区极端降水事件阈值的空间分布确实存在明显的地域差异,基本上呈由东南沿海向西北内陆逐渐变小的特征,数值在 20~45 mm/d 之间,最大阈值中心出现在东南沿海的大连和丹东附近,其值大于 45 mm/d 而深处内陆的大兴安岭北部地区最小,小于 20 mm/d。

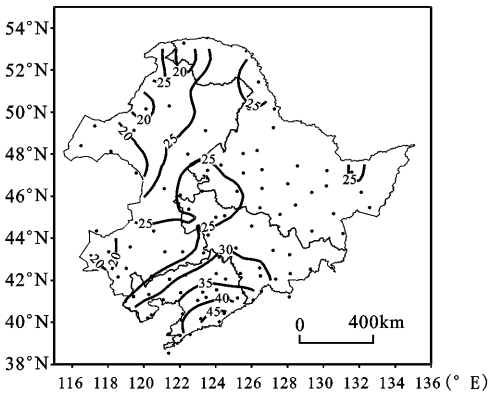


图 2 东北地区降水极值阈值的空间分布特征

Fig 2 Spatial distribution of precipitation extremes threshold in Northeast China

东北地区极端降水事件出现的频率存在明显的月际变化,统计表明,东北地区从 10 月至次年的 5 月,极端降水事件出现的频率分别为 2.22%, 0.20%, 0.03%, 0.02%, 0.02%, 0.065%, 1.44%, 4.12%, 占年总频次的 8.12%; 6~9 月 (13.51%, 39.16%, 31.24%, 7.98%) 占 91.88%, 是极端降水事件集中出现的时段,特别是 7、8 月。

2 2 东北地区极端降水趋势特征

趋势分析是研究东北地区极端降水的一重要指标,而 Mann-kendall非参数趋势检验法是检验极端降水趋势的一较好方法^[16 17]。本文将采用 Mann-kendall趋势检验法对东北地区极端降水频率和强度的趋势分别进行分析。

东北地区年总极端降水频次趋势(图 3)在地域上呈正、负趋势相间分布,正趋势强于负趋势。正趋势主要分布在吉林省南部和黑龙江省南部,处于松花江和牡丹江交汇的流域(该区域趋势通过 90%的显著性检验,图中数值不小于 1.5的范围),大兴安岭东麓的黑龙江齐齐哈尔和嫩江地区(对应于嫩江流域)、大兴安岭西麓海拉尔-满洲里一带(海拉尔河和额尔古纳河交汇的贝尔湖)及东北西部的巴林和翁牛特旗周围地区(西辽河上游),由此可见,近 44年来,东北地区极端降水事件增多趋势主要集中在东北地区各主要河流域。

由 11 年滑动平均曲线(点虚线)可知,年总极端降水频次存在明显的年代际变化特征,60、70 和 80 年代前期为极端降水事件发生偏少时段,而 80 年代中期之后则属于极端降水事件发生偏多时段。

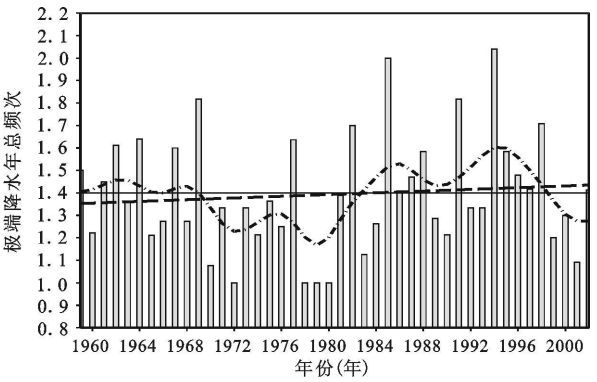
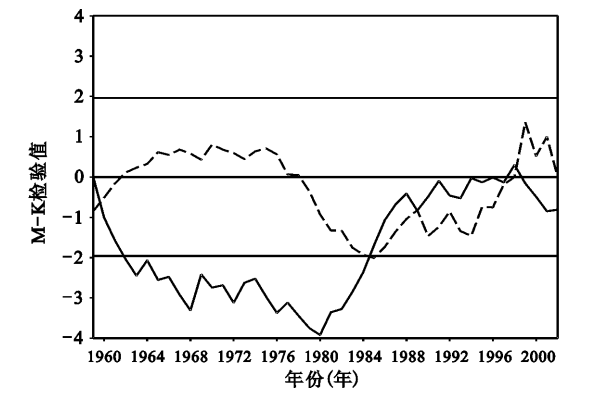


图 4 东北地区各极端降水事件年总频次的时间序列及 11 年平滑平均曲线(虚线)

Fig 4 Sequences of annual precipitation extremes (bar), 11-year running average (dash-dotted line) in Northeast China

20 世纪 80 年代中期前后这种由偏少向偏多阶段的剧烈变化是否是一种气候突变,为此我们采用 M-K 突变检验方法进行突变检测^[27],图 5 中,UF(UB)曲线在零线以上(下)表示呈增加(减少)趋势。在临界线之间,UF 和 UB 的交点所对应的时刻为突变开始的时间。根据 UF 和 UB 曲线交点的位置(交点在 $u_{0.005} = 1.96$ 之间),确定东北地区 80 年代中后期(1985 年开始)后年总极端降水频次的增多是一突变现象,即东北地区极端降水事件在 80 年代中期之后偏多是一突变现象。



实线为 UF 线;虚线为 UB 线;直线为 0.05 信度下的显著水平
图 5 东北地区极端降水事件年总频次 M-K 突变检验曲线

Fig 5 Mann-Kendall catastrophe test of annual precipitation extremes in Northeast China

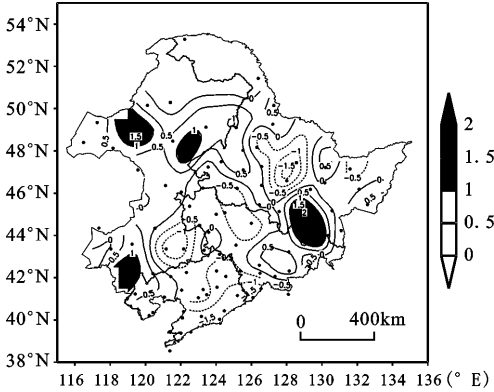


图 3 1959~2002 年东北地区年极端降水频次的趋势空间分布

Fig 3 Spatial distribution of monotonic trend of annual total precipitation extremes frequency in Northeast China during the 1959-2002

东北地区极端降水年平均强度的趋势分布(图略)与年总频次的趋势分布存在类似的特征,即在主要河流的部分流域为增强趋势,但其正趋势不如年总频次明显。

2 3 东北地区极端降水事件的年代际演变特征

在全球增暖的背景下,中国东北地区增暖显著,特别是 20 世纪 80 年代中期之后^[18~26]。在该增暖背景下,图 4 给出了东北地区年总极端降水频次的时间演变特征。图 4 显示,东北地区极端降水年总频次的多年平均值为 3.78 次/a 极端降水事件出现最多的年份是 1985、1986、1994 和 1998 年。

为进一步了解中国东北地区在 20 世纪 80 年代中期前后两时段年总极端降水频次的差异, 以及 80 年代中期之后极端降水频次的增多是否具有显著性, 我们对 1959~ 1984 和 1985~ 2002 年两个时段的东北地区年总极端降水频次进行差值 T 检验 (图略), 研究表明, 1985~ 2002 年极端降水事件较 1959~ 1984 年偏多, 其中东北东部的黑龙江牡丹江和吉林敦化一带 (松花江和牡丹江交汇地区)、内蒙赤峰附近 (西辽河上游) 差异最为明显, 通过了 90% 的显著性检验, 由此可见, 80 年代中期后增暖背景下全区极端降水事件明显增加, 特别是黑龙江的牡丹江和松花江交汇的流域和西辽河上游。

2 4 1~ 5 天时间间隔的年总极端降水频次特征

极端降水事件发生的时间间隔长短对区域洪涝灾害的发生具有重要作用, 短期连续极端降水事件会增加洪涝灾害发生的风险。我们对东北地区相邻两次极端降水事件发生的时间间隔进行了统计 (表 1), 发现东北地区极端降水事件绝大部分具有 1~ 20 天的时间间隔 (占 65.7%), 其中极易造成洪涝灾害的具有 1~ 5 天间隔的极端降水事件占 23.7%, 由此说明, 东北地区具有 1~ 5 天时间间隔的短期连续极端降水事件出现较多, 因此研究具有 1~ 5 天时间间隔的极端降水事件具有重要意义。

表 1 1959~ 2002 年东北地区相邻两次极端降水事件不同时间间隔的分配特征

Table 1 Proportion of precipitation extremes separated by different time gaps during the 1959~ 2002 period in Northeast China							
时间间隔 (d)	1~ 5	6~ 10	11~ 15	16~ 20	21~ 25	26~ 30	
百分比 (%)	23.7	18.0	12.9	11.1	7.90	6.0	
时间间隔 (d)	31~ 35	36~ 40	40~ 45	46~ 50	51~ 60	61~ 65	
百分比 (%)	4.6	3.4	2.7	2.2	1.8	1.2	

2 5 1~ 5 天间隔极端降水事件时间演变特征

图 6 可以看出, 该指标近 44 年表现为略增加的趋势 (图中线性倾向估计), 多年平均值为 1.4 次/a 且存在年际变化特征, 发生最多的是 1985 和 1994 年均均为 2 次/a 最少的为 1 次/a。20 世纪 60 年代和 80 年代中期之后至 90 年代为发生偏多的时段, 70 年代和 21 世纪前 3 年为偏少阶段 (点虚线)。在 80 年代中期之后也表现为增多。

采用 M-K 趋势检验法对具有 1~ 5 天时间间隔的极端降水年总频次进行趋势检验 (图略) 的结果显示, 具有 1~ 5 天时间间隔的极端降水事件年总频次正值区域 (增多趋势) 具体分布在三江平

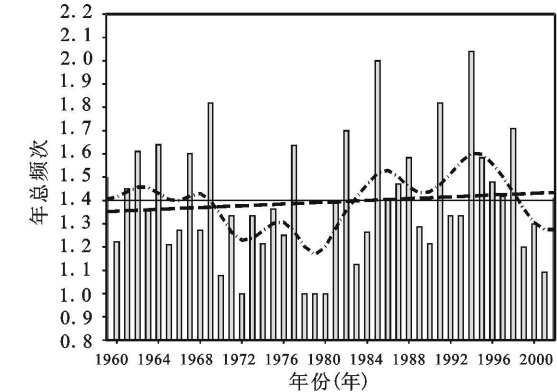


图 6 东北地区具有 1~ 5 天时间间隔极端降水事件年总频次的时间序列及 11 年滑动平均曲线

Fig 6 Sequences of annual precipitation extremes with 1-5 day gap (bar), 11-year running average (dashedotted line) and linear trend (dashed line) in Northeast China

原、哈尔滨周围南北带状松花江流域以及辽宁中部的辽河流域, 其它地区为减少趋势, 但正、负趋势都不很显著。可见东北地区具有 1~ 5 天时间间隔的极端降水事件在东北主要河流部分流域有增加的趋势, 集中在较短时间间隔的极端降水能够造成河流水位的迅速上涨, 极易造成洪涝灾害。

3 结 论

1) 东北地区极端降水事件阈值的空间分布存在地域差异, 由东南沿海向西北内陆逐渐变小, 数值范围 20~ 45 mm/d 最大值在东南沿海的大连和丹东附近, 最小值在内陆的大兴安岭北部地区。

2) 东北地区 6~ 9 月是极端降水事件集中出现月份。20 世纪 60、70 和 80 年代前期为极端降水事件发生偏少时段; 80 年代中期后为极端降水事件发生偏多阶段, 且是一突变现象。

3) 东北地区短时间内连续发生极端降水事件概率较大, 其中 1~ 5 天时间间隔的极端降水事件占 23.7%; 20 世纪 80 年代中期后东北地区增暖背景下, 极端降水事件和有 1~ 5 天间隔的极端降水事件明显增加, 特别是松花江下游和牡丹江流域及西辽河上游地区, 频次和强度有增加或增强趋势。

参考文献:

[1] G O P Obasi Reducing vulnerability to weather and climate extremes Information and Public Affairs Office of R]. WMO, 2002.
[2] Houghton JT, Y Ding D J G riggs et al Climate change 2001: Scientific Basis[M]. Cambridge University Press 2001: 881
[3] World Meteorological Organization - No. 966 WMO Statement

on the status of the global climate in 2003: global temperatures in 2003 in third warmest [R]. Geneva: 16 December 2003.

[4] 姜付仁,程晓陶,向立云,等. 美国 20 世纪洪水损失分析及中美 90 年代比较研究 [J]. 水科学进展, **114**(13): 384~ 388

[5] 张耀存,张录军. 东北气候和生态过渡区 50 年来降水和温度概率分布特征变化 [J]. 地理科学, 2005 **25**(5): 561~ 566.

[6] 靳立亚,符娇兰,陈发虎. 近 44 年来中国西北降水量变化的区域差异以及对全球变暖的响应 [J]. 地理科学, 2005 **25**(5): 567~ 572

[7] 王翠花,李 雄,缪启龙. 中国近 50 年来日最低气温变化特征研究 [J]. 地理科学, 2003 **23**(4): 442~ 448

[8] 刘晓东,安芷生,方建刚,等. 全球气候变暖条件下黄河流域降水的可能变化 [J]. 地理科学, 2002 **22**(5): 513~ 519.

[9] 翟盘茂,潘晓华. 中国北方近 50 年温度和降水极端降水事件变化 [J]. 地理学报, 2003 **23**(supplement): 1~ 10

[10] 严中伟,杨 赤. 近几十年中国极端气候变化格局 [J]. 气候与环境研究, 2000 **5**(3): 267~ 272

[11] 刘小宁. 我国暴雨极端事件的气候变化特征 [J]. 灾害学, 1999 **14**(1): 54~ 59.

[12] 龚道溢,韩 晖. 华北农牧交错带夏季极端气候的趋势分析 [J]. 地理学报, 2004 **59**(2): 230~ 238.

[13] 孙凤华,任国玉,赵春雨,等. 中国东北地区及不同典型下垫面的气温异常变化分析 [J]. 地理科学, 2005, **25**(2): 167~ 171

[14] 孙凤华,杨素英,陈鹏鹏. 东北地区近 44 年的气候暖干化趋势分析及可能影响 [J]. 生态学杂志, 2005 **24**(7): 751~ 755.

[15] 孙 力. 中国东北地区夏季旱涝的分析研究 [J]. 地理科学, 2002 **22**(3): 311~ 316.

[16] Su B D, Xiao B, Zhu D, et al Trends in frequency of precipitation extremes in the Yangtze River basin, China, 1960~ 2003 [J]. Hydrol Sci J, 2005 **50**(3): 479~ 492

[17] Kendall M G. Rank Correlation Methods 3rd ed [M]. New York: Hafner Publishing Company, 1962.

[18] 杨素英,王谦谦,孙凤华. 中国东北南部冬季气温异常及其大气环流特征变化 [J]. 应用气象学报, 2005 **16**(3): 334~ 344.

[19] 卢爱刚,庞德谦,何元庆,等. 全球升温对中国区域温度纬向梯度的影响 [J]. 地理科学, 2006, **26**(3): 345~ 350

[20] 许炯心. 人类活动和降水变化对嘉陵江流域侵蚀产沙的影响 [J]. 地理科学, 2006, **26**(4): 432~ 487.

[21] 吴宏安,蒋建军,周 杰,等. 基于影象融合的干旱区域城镇居民地信息提取研究 [J]. 地理科学, 2006, **26**(4): 477~ 482

[22] 曲金华,江志红,谭桂容,等. 冬季北大西洋海温年际、年代际变化与中国气温的关系 [J]. 地理科学, 2006 **26**(5): 557~ 563.

[23] 徐新良,刘纪远,曹明奎,等. 近期气候波动与 LUCC 过程对东北农田生产潜力的影响 [J]. 地理科学, 2007 **27**(3): 318~ 324.

[24] 何云玲,张一平,杨小波. 中国内陆热带地区近 40 年气候变化特征 [J]. 地理科学, 2007, **27**(4): 499~ 505

[25] 房巧敏,龚道溢,毛 睿. 中国近 46 年来冬半年日降水变化特征分析 [J]. 地理科学, 2007, **27**(5): 711~ 717

[26] 李红军,江志红,魏文寿. 近 40 年来塔里木河流域旱涝的气候变化 [J]. 地理科学, 2007, **27**(6): 801~ 807

[27] 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 44~ 45

Ev olvem ent of Precipitation Extrem es in Northeast Ch ina on the Background of C limate W arm ing

YANG Su-Y ing^{1 2}, SUN FengHua³, MA Jian-Zhong¹

(1 Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081; 2 Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing Jiangsu 210044; 3 Institute of Atmospheric Environment, China Meteorological Administration, Shenyang, Liaoning 110016)

Abstract Determination of the threshold by Gamma distribution function and study on spatial and temporal change of precipitation extremes are based on the daily precipitation data of 93 stations during the period 1959–2002 in Northeast China. The main results are summarized as follows. The precipitation extremes’ thresholds decreased gradually from the southeast littoral areas to the northwestern inland. Precipitation extremes were concentrated in June–September, and the increasing was a catastrophe during the period 1985–2002. The probability of the precipitation extremes successively occurred was greater, in which the neighbouring extremes separated by a time gap of 1–5 days was 23.7%. The total extremes increased especially in the lower reaches of the Songhua River and the Mudanjiang River, and the upper reaches of the Liaohe River, as the same with the precipitation extremes with the time gap of 1–5 days.

Key words Northeast China, precipitation extremes, Mann-Kendall trend test