李丽平，章开美，王超，等. 2010. 近40年华南前汛期极端降水时空演变特征［J］. 气候与环境研究，15（4）：443－450. Li Liping, Zhang Kaimei, Wang Chao, et al. 2010. Temporal and spatial variations of extreme precipitation in the pre-flood period of South China in recent 40 years［J］. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 15（4）：443－450.

近40年华南前汛期极端降水时空演变特征

李丽平[1] 章开美[1] 王超[1] 朱界平[2]

1 南京信息工程大学气象灾害省部共建教育部重点实验室和大气科学学院，南京 210044
2 中国气象局国家气候中心，北京 100081

摘 要 利用国家气象信息中心提供的华南89个代表站1969～2008年逐日降水资料，研究了近40年我国华南前汛期（4～6月）极端降水时空演变特征，主要结论是：（1）华南前汛期降水强度、强降水量和暴雨日数的空间分布与总降水量的空间分布基本一致；（2）极端降水指数随时间的变化对华南整个区域前汛期总降水量的变化有很好的指示意义，特别是强降水量、强降水频率和暴雨日数；90年代以来华南前汛期总降水量的显著增加与强降水量、强降水频率以及暴雨日数显著增加密切相关，且极端强降水量异常程度明显增强。

关键词 极端降水 时空特征 华南前汛期
文章编号 1006-9585（2010）04-0443-08 **中图分类号** P446 **文献标识码** A

Temporal and Spatial Variations of Extreme Precipitation in the Pre-flood Period of South China in Recent 40 Years

LI Liping[1], ZHANG Kaimei[1], WANG Chao[1], and ZHU Jieping[2]

1 *Ministry of Education Key Laboratory of Meteorological Disaster of Cooperation of Ministries and Provincial Governments, and College of Atmospheric Sciences, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing* 210044
2 *National Climate Center, China Meteorological Administration, Beijing* 100081

Abstract Daily precipitation data of the 89 representative stations from 1969 to 2008, provided by the National Meteorological Information Center, are used to investigate the spatial and temporal variable characteristics of extreme precipitation for the pre-flood season (April－June) in South China, the main conclusions are: (1) The spatial distribution of the precipitation intensity, heavy precipitation amount, and rainstorm days are basically in agreement with the distribution of the total precipitation in South China during the pre-flood season; (2) the temporal variation of extreme precipitation indices are of good indicating significance to the area-averaged total precipitation, a significant increase in area-averaged total precipitation is closely related to that of heavy precipitation amount, its frequency and rainstorm days since the 1990s for the pre-flood season in South China; the anomalies of extremely heavy precipitation are significantly enhanced since the 1990s.

Key words extreme precipitation, temporal and spatial characteristics, pre-flood of South China

收稿日期 2010-01-11 收到，2010-03-10 收到修定稿
资助项目 国家科技支撑计划项目2007BAC29B02，国家自然科学基金主任基金项目40940008，公益性行业科研专项200801001
作者简介 李丽平，女，1971年出生，博士，副教授，研究方向为区域气候和海陆气相互作用、低频振荡。E-mail：liliping@nuist.edu.cn

1 引言

IPCC（2007）第四次评估报告指出，随着全球气候变暖，陆地大部分地区强降水比例增加，我国极端降水事件发生的频率也在增加，并具有明显的区域性和季节变化（潘晓华和翟盘茂，2002；丁一汇等，2006 ）。许多学者对不同地区降水长期变化特征进行了深入研究。翟盘茂和潘晓华（2003）、翟盘茂等（2007）指出华北地区强降水事件趋于减小，但西北地区强降水事件趋于增加。张天宇等（2007）指出长江中下游汛期极端强降水事件发生频次的多寡很大程度影响着汛期总降水量。秦大河等（2006）指出，长江及长江以南地区年降水量和极端降水量趋于增加，极端降水值和降水事件强度有所加强。苏布达等（2006，2007）的分析表明45年来长江流域极端强降水量、降水强度与日数在中下游地区呈现显著的增加趋势，极端强降水日数显著增加和减少的空间分布与极端强降水的空间分布相一致。钱维宏等（2007）研究表明：在全球变暖的背景下中国的微量雨日普遍减少，大暴雨事件增多。蔡敏等（2007）认为，近50年来中国东部极端降水趋势虽无明显变化，但其时空差异较大。张爱英等（2008）分析了近45年来华北中部极端降水事件频率变化的时空特征。李红梅等（2008）分析了近40年我国东部盛夏即7、8月份降水长期趋势和年代际变化特征，发现中国东部地区盛夏降水60％的变化主要受暴雨强度降水变化的影响，且盛夏长江流域降水量、降水频率、极端降水频率以及暴雨降水强度近40年来均呈增大趋势，华北地区则呈减小趋势。肖伟军等（2009）研究了近45年华南夏季降水时空演变特征，指出华南中部和西北部是华南夏季降水的两个主要气候变异区，华南中部夏季降水以年代际变化特征为主，华南西北部夏季降水则以年际变化特征为主。张婷和魏凤英（2009）研究了华南地区近46年前、后汛期极端降水量、日最大降水量极值、暴雨日数等变量的时空概率分布特征，指出华南地区年降水量在1992年经历了一次由减少趋势到增加趋势的突变，华南地区的日最大降水量和年平均暴雨日数间有很好的相关关系。综上可见，极端降水事件的研究越来越引起气象学者的关注，但极端降水事件的变化存在明显地区差异，学者们对华南极端降水特别是前汛期极端降水的研究还不多见。华南属副热带季风气候区，是我国汛期时间最长、降水最多、雨涝最多的地区之一。华南汛期主要集中在4～9月，其中4～6月为前汛期，主要表现为锋面降水；7～9月为后汛期，主要以台风降水为主。华南前汛期占华南地区全年降水40％～50％或更多。进入5月后华南雨量急增，5、6月暴雨频繁，常引起山洪爆发、滑坡、泥石流、江河泛滥等自然灾害。因此本文将重点研究近40年我国华南前汛期（4～6月）极端降水长期变化的时空分布特征，为进一步研究华南极端降水的成因奠定基础，研究结果对华南地区短期气候预测和防灾减灾有一定意义。

2 资料和方法

2.1 资料及处理

本文利用国家气象信息中心提供的1969～2008年753站逐日降水资料，选取（20°N～28°N，106°E～120°E）的范围作为研究区域。剔除降水资料长度不足40年的站点，最后选取89个测站代表华南地区，站点分布见图1，其中不包括海南省。丁菊丽等（2009）研究指出，海南地区的水汽主要来自孟加拉湾和南海，与华南其他省份有所不同，故本文暂不考虑海南省站点资料。

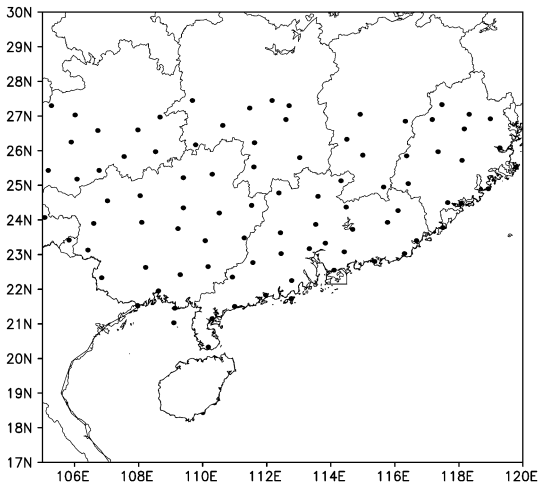

图1 代表华南地区的89个测站分布

Fig. 1 Spatial distribution of the 89 stations in South China

2.2 方法

根据国家气候中心发布的最新极端降水统计指标，本文选取其中 6 个指标研究华南前汛期极端降水变化时空分布特征，指标及其定义和单位具体见表 1。

表 1　本文选用的极端降水统计指标及其定义
Table 1　The statistical indices and their definitions of extreme precipitation selected in this paper

序号	指数名称	定义	单位
1	总降水量	全部雨（雪）日（日降水量≥1.0 mm）的总降水量	mm
2	降水强度	降水总量与降水日数（日降水量≥1.0 mm）比值	$mm \cdot d^{-1}$
3	强降水量	日降水量>第 95 百分位值的总降水量	mm
4	降水频率	有降水的日数与总日数的比值	(%)
5	强降水频率	日降水量大于第 95 百分位值的日数与总日数的比值	(%)
6	暴雨日数	日降水量≥50 mm 的日数	d

本文把华南各站 1969～2008 年逐年 4～6 月日降水量序列的第 95 个百分位值的 40 年平均值定义为该站极端强降水事件的阈值，当该站某日降水量超过这一阈值时，称该站发生了极端强降水事件（翟盘茂和潘晓华，2003）。该方法的优越之处在于它充分考虑了降水的地区间差异，使得各地极端强降水的阈值都依本地降水情况而定，能够更好地反映降水变化的区域性特征（李红梅等，2008）。下面简单介绍第 95 个百分位降水量的计算方法（Bonsal et al.，2001）。

把降水序列按升序排列为

$$x_1, x_2, \cdots, x_m, \cdots, x_n, \tag{1}$$

某个值小于或等于 x_m 的概率为

$$p = \frac{m - 0.31}{n + 0.38}, \tag{2}$$

式中，m 为 x_m 的序号，n 为降水序列（含无降水日）长度，第 95 个百分位值就是指 $p=95\%$ 所对应 x_m 的值。例如，本文研究的华南前汛期 $n=91$（4～6 月总日数），当 $p=95.0\%$ 时，根据（2）式计算得 $m=87.2$，取第 95 百分位上的值为排序后的 x_{87}（$p=94.9\%$）和 x_{88}（$p=96\%$）的线性插值（杨金虎等，2008）。

此外，本文还采用线性趋势估计法研究极端降水的长期变化趋势。为检验极端降水在 1969～2008 年期间的变化是否稳定，对整个时段中的子时段之间的极端降水均值和方差进行显著性检验，均值检验采用 t 检验，方差检验采用 F 检验（魏凤英，2009）。

3 华南前汛期极端降水变化趋势时空特征

3.1 华南前汛期极端降水空间分布特征

图 2 为 1969～2008 年共 40 年平均的华南前汛期强降水量阈值空间分布。可见，强降水量阈值分布存在明显区域差异，湖南、贵州及江西和福建大部地区阈值偏小，均小于区域平均值（整个区域阈值平均值为 39 $mm \cdot d^{-1}$）；广东和广西大部地区及赣闽交界处阈值大于平均值，广东的阳江和广西的防城港尤为显著，其阈值已超过暴雨强度（大于 50 $mm \cdot d^{-1}$）。

图 3 为华南前汛期近 40 年平均的总降水量、降水强度、强降水量、强降水频率、暴雨日数空间分布图，阴影区表示大于各量的区域平均值，各量的区域平均值依次为 660 mm、13 $mm \cdot d^{-1}$、281 mm、4.8%、2.7 d。对比图 3a－e 可见，广东大部、广西北部和西南部及赣闽交界处总降水量大，上述区域的降水强度也偏大，强降水量、暴雨日数同样偏多，广东大部强降水频率也偏多，

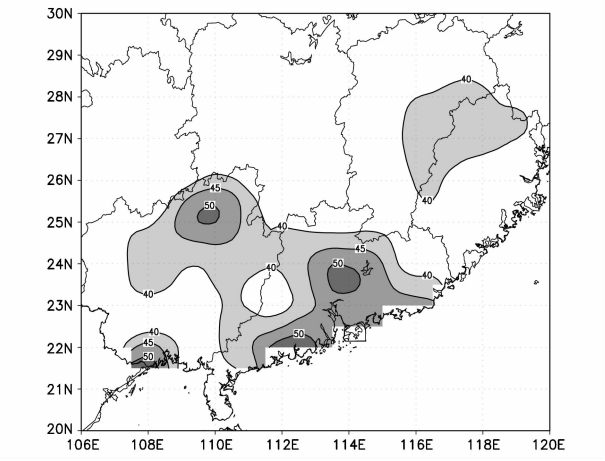

图 2　华南前汛期多年平均强降水量阈值（单位：$mm \cdot d^{-1}$）空间分布。阴影区值为降水大于等于 40 $mm \cdot d^{-1}$ 的区域
Fig. 2　Spatial distribution of the threshold of multi-year mean heavy rainfall ($mm \cdot d^{-1}$). Regions with values equal to or greater than 40 $mm \cdot d^{-1}$ are shaded

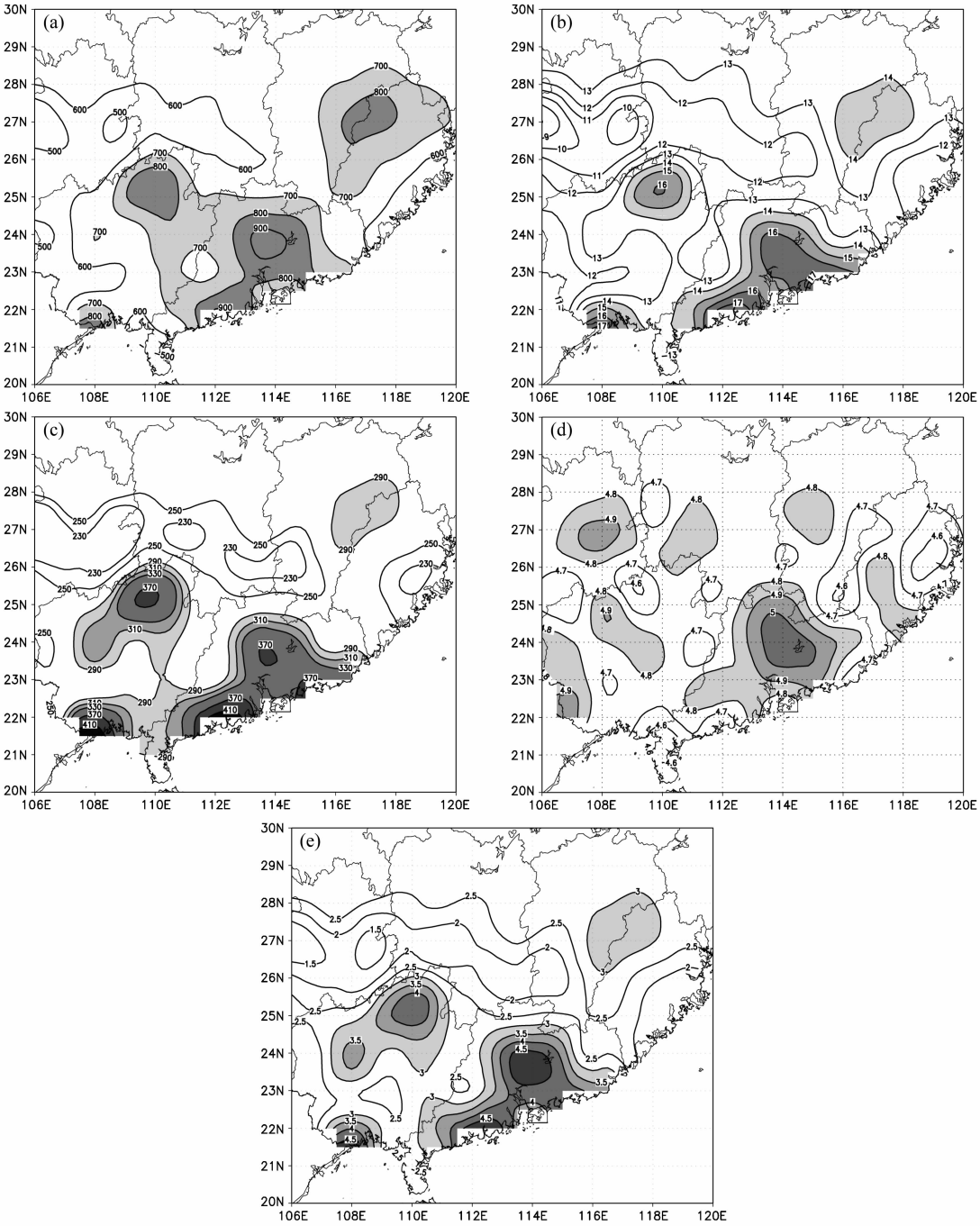

图3 华南前汛期1969～2008年共40年平均的各极端降水指数空间分布图，阴影区域值均大于其区域平均值：(a) 总降水量（单位：mm)；(b) 降水强度（单位：mm·d^{-1})；(c) 强降水量（单位：mm)；(d) 强降水频率（%)；(e) 暴雨日数（单位：d)

Fig. 3 Spatial distribution of extreme precipitation indices averaged form 1969 to 2008 during the pre-flood season in South China. The shaded area indicated greater than the area-averaged value: (a) Total precipitation (mm); (b) rainfall intensity (mm·d^{-1}); (c) heavey rainfall amount (mm); (d) heavy rainfall frequency (%); (e) strom rainfall days (d)

这些指标的分布特征与强降水量阈值（图2）分布非常相似，这说明本文所选上述指标能很好反映华南前汛期极端降水空间分布特征，也说明华南前汛期的降水强度、强降水量和暴雨日数的异常很大程度影响着总降水量的多寡。

进一步计算了华南前汛期区域平均的总降水

量与其它极端降水指数序列的相关系数，如表 2 所示。可见，相关系数全部通过显著水平 $\alpha=0.05$ 的显著性检验。其中，强降水量、强降水频率、暴雨日数与总降水量的相关系数均大于 0.9，说明本文所选极端降水指数对华南整个区域前汛期总降水量的时间变化有很好的指示意义，特别是强降水量和强降水频率及暴雨日数。

表 2　华南前汛期区域平均总降水量和各极端降水指数相关系数

Table 2　Correlation coefficients between region averaged total precipitation and extreme rainfall indices in the pre-flood season of South China

	与区域平均总降水的相关系数
降水强度	0.78
强降水量	0.91
降水频率	0.75
强降水频率	0.95
暴雨日数	0.92

3.2　华南前汛期极端降水变化趋势

首先分析了华南前汛期近 40 年区域平均总降水量和各极端降水指数长期变化线性趋势，发现各降水指数略呈增加趋势，但趋势变化都不显著（图略）。为进一步了解近 40 年华南前汛期极端降水的变化是否存在阶段性差异，图 4 给出了华南前汛期近 40 年总降水量以及与其相关更好的降水强度、强降水量、强降水频率、暴雨日数时间序列。可见，所有序列的变化趋势基本可分为 3 个阶段，即 1969～1984 年（记为 T_1）、1985～1991 年（记为 T_2）、1992～2008 年（记为 T_3）三个时段，图 4 中的虚直线分别为三个阶段的平均值，具体值见表 3。可见，第二个时段总降水量和各个极端降水指数均值都较第一和第三时段值明显偏小，第一、三个时段各量均值接近。

为了解 3 个阶段各量均值差异是否显著，采用 t 检验方法，分别计算了总降水量和各个极端降水指数在 3 个时段中任 2 个时段做均值显著性检验的统计值 t，见表 4。可见，总降水量和各极端降水指数在 T_1 和 T_3 时段的均值与 T_2 时段均值存在显著差异，差异程度通过显著水平 $\alpha=0.05$ 的显著性检验。钱维宏等（2007）的研究就曾指出，华南在 1991 年出现了转湿突变，大暴雨事件增多；张婷和魏凤英（2009）指出华南地区降水趋势在 1992 年以来呈比较明显增加趋势。这些结论与本文相应指标的研究结论相同。

尽管 T_1 与 T_3 时段各极端降水指标均值不存在显著差异，但注意到图 4 中各极端降水指数变化的振幅在 T_3 时段要明显大于 T_1 时段，为了解这一异常差异是否显著，分别计算了各极端降水指数在三个时段的均方差 I_a（如表 5）。可见，各极端降水指数均方差在 T_3 时段均明显大于 T_1 和 T_2 时段。进一步对三个时段的方差进行显著性检验，所计算的统计值 F 和标准值 $F_{a/2}$ 见表 6。可见，T_3 时段的总降水量和各极端降水指数与 T_1 和 T_2 时段的方差差异通过显著水平 $\alpha=0.05$ 的显著性

表 3　各极端降水指数在 3 个时段的均值

Table 3　The average of extreme rainfall indices during three periods

时段	总降水量/mm	降水强度/mm·d^{-1}	强降水量/mm	强降水频率	暴雨日数/d
1969～1984 年（T_1）	690.44	12.97	286.49	4.94%	2.80
1985～1991 年（T_2）	568.03	11.80	224.73	3.83%	2.18
1992～2008 年（T_3）	669.44	13.52	299.03	4.99%	2.85

表 4　3 个时段极端降水指数两两进行均值差异显著性检验的统计值 t 和检验标准 t_a（$\alpha=0.05$）

Table 4　The statistics t and test standardization t_a ($\alpha=0.05$) of mean difference test for extreme rainfall indices during three different periods

时段	标准值 t_a	统计值 t				
		总降水量	降水强度	强降水量	强降水频率	暴雨日数
T_1 与 T_2	2.08	4.190	3.372	3.838	4.302	3.674
T_1 与 T_3	2.038	0.771	1.666	0.737	0.191	0.307
T_2 与 T_3	2.07	2.830	3.675	3.273	3.727	3.011

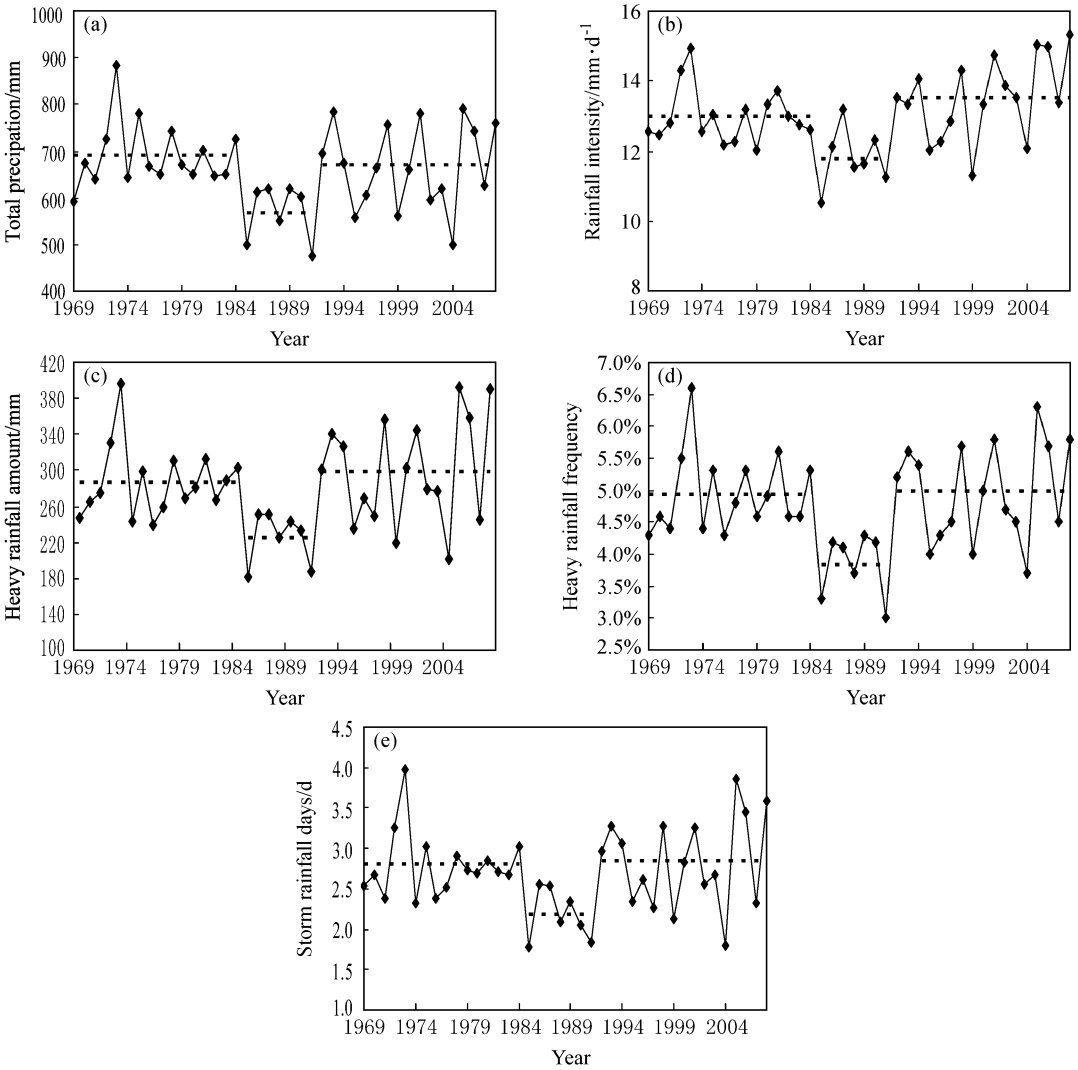

图4 1969～2008年华南前汛期极端降水指数时间序列：(a) 总降水量（单位：mm)；(b) 降水强度（单位：mm·d^{-1})；(c) 强降水量（单位：mm)；(d) 强降水频率（%)；(e) 暴雨日数（单位：d)

Fig. 4 Time series of extreme rainfall indices from 1969 to 2008：(a) Total precipitation (mm)；(b) rainfall intensity (mm·d^{-1})；(c) heavy rainfall amount (mm)；(d) heavy rainfall frequency (%)；(e) rainstorm days (d)

表5 3个时段各极端降水指数的均方差 I_a

Table 5 The mean square deviation I_a of extreme rainfall indices during the three periods

时段	均方差 I_a				
	总降水量/mm	降水强度/mm·d^{-1}	强降水量/mm	强降水频率	暴雨日数/d
T_1	67.56	0.752	38.41	0.604%	0.401
T_2	56.01	0.784	26.96	0.468%	0.293
T_3	87.05	1.125	56.92	0.756%	0.555

检验，说明T_3时段总降水量和各极端降水指数年际异常显著增强；T_1时段与T_2时段强降水量和暴雨日数两个指数的方差也存在显著差异，T_2时段较T_1时段强降水量和暴雨日数异常强度减弱。

表 6　3 个时段各极端降水指数做方差显著性检验的统计值 F 和检验标准 $F_{a/2}$（α=0.05）
Table 6　The statistics F and test standardization $F_{a/2}$（α=0.05）of variance significance test of extreme rainfall indices during the three periods

时段	标准值 $F_{a/2}$	统计值 F				
		总降水量	降水强度	强降水量	强降水频率	暴雨日数
T_1 与 T_2	1.76	1.330	0.841	1.856	1.524	1.712
T_1 与 T_3	1.43	1.654	2.231	2.188	1.560	1.915
T_2 与 T_3	1.76	2.200	1.876	4.060	2.377	3.278

4　结 论

（1）华南前汛期降水强度、强降水量和暴雨日数能很好反映华南前汛期极端降水空间分布特征，且其空间分布与华南前汛期总降水量的空间分布基本一致，强降水频率分布与广东总降水量分布关系也很密切。

（2）极端降水指数对华南整个区域前汛期总降水量的时间变化有很好指示意义，特别是强降水量、强降水频率和暴雨日数。90 年代初以来华南前汛期总降水量呈显著增加趋势，这与强降水量、强降水频率以及暴雨日数增加有密切关系；90 年代以来极端强降水量异常程度明显增强，发生旱涝的可能性均增大。

参考文献（References）

Bonsal B R，Zhang X，Vincent L A，et al . 2001. Characteristics of daily and extreme temperature over Canada［J］. J. Climate，14（9）：1959－1976.

蔡敏，丁裕国，江志红. 2007. 我国东部极端降水时空分布及其概率特征［J］. 高原气象，26（2）：309－317. Cai Min，Ding Yuguo，Jiang Zhihong. 2007. Extreme precipitation experimentation over eastern China based on L-moment estimation［J］. Plateau Meteorology（in Chinese），26（2）：309－317.

丁一汇，任国玉，石广玉，等. 2006. 气候变化国家评估报告（I）：中国气候变化的历史和未来趋势［J］. 气候变化研究进展，2（1）：3－8. Ding Yihui，Ren Guoyu，Shi Guangyu，et al. 2006. Assessment of climate and environment changes in China（I）：Climate and environment changes in China and their projection［J］. Advances in Climate Change Research（in Chinese），2（1）：3－8.

丁菊丽，徐志升，费建芳，等. 2009. 华南前汛期起止日期的确定及降水年际变化特征分析［J］. 热带气象学报，25（1）：59－65. Ding Juli，Xu Zhisheng，Fei Jianfang，et al. 2009. Analysis of the definition of the onset and ending dates of the annually first rainy season in South China and its interannual variation characteristics［J］. Journal of Tropical Meteorology（in Chinese），25（1）：59－65.

IPCC. 2007. Summary of Policymakers of Climate Change 2007：The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change［M］. Cambridge，UK and NewYork，USA：Cambridge University Press.

李红梅，周天军，宇如聪. 2008. 近四十年我国东部盛夏日降水特性变化分析［J］. 大气科学，2008，32（2）：358－370. Li Hongmei，Zhou Tianjun，Yu Rucong. 2008. Analysis of July－August daily precipitation characteristics variation in eastern china during 1958－2000［J］. Chinese Journal of Atmospheric Sciences（in Chinese），32（2）：358－370.

潘晓华，翟盘茂. 2002. 气候极端值的选取与分析［J］. 气象，28（18）：28－31. Pan Xiaohua，Zhai Panmao. 2002. Analysis of surface air temperature extremum［J］. Meteorological Monthly（in Chinese），28（18）：28－31.

秦大河，丁一汇，苏纪兰，等. 2006. 中国气候与环境演变评估（I）：中国气候与环境变化及未来趋势［J］. 气候变化研究进展，1（1）：4－9. Qin Dahe，Ding Yihui，Su Jilan，et al. 2006. Assessment of climate and environment changes in china（I）：Climate and environment changes in China and their projection［J］. Advances in Climate Change Research（in Chinese），1（1）：4－9.

钱维宏，符娇兰，张玮玮，等. 2007. 近 40 年中国平均气候与极值气候变化的概述［J］. 地球科学进展，22（7）：673－684. Qian Weihong，Fu Jiaolan，Zhang Weiwei，et al. 2007. Change in mean climate and extreme climate in China during the last 40 years［J］. Advances in Earth Science（in Chinese），22（7）：673－684.

苏布达，姜彤，任国玉. 2006. 长江流域 1960～2004 年极端强降水时空变化趋势［J］. 气候变化研究进展，2（1）：9－14. Su Buda，Jiang Tong，Ren Guoyu. 2006. Observed trends of precipitation extremes in the Yangtze River Basin during 1960 to 2004［J］. Advances in Climate Change Research（in Chinese），2（1）：309－317.

苏布达，Gemmer M，姜彤，等. 2007. 1960～2005 年长江流域降水极值概率分布特征［J］. 气候变化研究进展，3（4）：208－

213. Su Buda, Gemmer M, Jiang Tong, et al. 2007. Probability distribution of precipitation extremes over the Yangtze River Basin during 1960 to 2005 [J]. Advances in Climate Change Research (in Chinese), 3 (4): 208-213

魏凤英. 2009. 现代气候统计诊断与预测技术 [M]. 北京: 气象出版社, 27-29. Wei Fengying. 2009. Modern Climatic Statistical Diagnostics and Prediction Technique [M]. Beijing: China Meteorological Press, 27-29.

肖伟军, 陈炳洪, 刘云香, 等. 2009. 近45 a华南夏季降水时空演变特征 [J]. 气象研究与应用, 30 (1): 12-22. Xiao Weijun, Chen Binghong, Liu Yunxiang, et al. 2009. Temporal and spatial characteristic of summer precipitation over southern china during the last 45 Years [J]. Journal of Meteorological Research and Application (in Chinese), 30 (1): 12-22.

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 Jinhu, Jiang Zhihong, Wang Pengxiang, et al. 2008. Temporal and spatial characteristic of extreme precipitation event in China [J]. Climatic and Environmental Research, 13 (1): 75-83.

翟盘茂, 潘晓华. 2003. 中国北方近50年温度和降水极端事件 [J]. 地理学报, 58 (增刊): 2-10. Zhai Panmao, Pan Xiaohua. 2003. Change in extreme temperature and precipitation over northern China during the second half of the 20th century [J]. Journal of Geographical science (in Chinese), 2003, 58 (suppl.): 2-10.

翟盘茂, 王萃萃, 李威. 2007. 极端降水事件变化的观测研究 [J]. 气候变化研究进展, 3 (3): 144-148. Zhai Panmao, Wang Cuicui, Li Wei. 2007. A review on study of change in precipitation extremes [J]. Advances in Climate Change Research (in Chinese), 3 (3): 144-148.

张天宇, 程炳岩, 刘晓冉. 2007. 近45年长江中下游地区汛期极端强降水事件分析 [J]. 气象, 33 (10): 80-87. Zhang Tianyu, Cheng Bingyan, Liu Xiaoran. 2007. Analysis of extreme heavy precipitation event over the mid-lower reaches of Yangtze River in flood season during last 45 years [J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 33 (10): 80-87.

张爱英, 高霞, 任国玉. 2008. 华北中部近45 a极端降水事件变化特征 [J]. 干旱气象, 26 (4): 46-50. Zhang Aiying, Gao Xia, Ren Guoyu. 2008. Charateristic of extreme precipitation events change in central North China in recent 45 years [J]. Arid Meteorology (in Chinese), 26 (4): 46-50.

张婷, 魏凤英. 2009. 华南地区汛期极端降水的概率分布特征 [J]. 气象学报, 67 (3): 442-451. Zhang Ting, Wei Fenyin. 2009. The probability distribution of precipitation extremes during the rainy seasons in South China [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 67 (3): 442-451.