

吴昊旻, 黄安宁, 姜燕敏. 2013. 华东地区不同等级降水日数的时空分布特征 [J]. 气候与环境研究, 18 (3): 387–396, doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2012.11187. Wu Haomin, Huang Anning, Jiang Yanmin. 2013. Temporal and spatial distribution of different grades of precipitation days in East China [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 18 (3): 387–396.

华东地区不同等级降水日数的时空分布特征

吴昊旻^{1,2} 黄安宁¹ 姜燕敏²

¹ 南京大学大气科学学院, 南京 210093

² 丽水市气象局, 丽水 323000

摘 要 根据华东地区 1961~2010 年逐日降水量台站观测资料, 利用趋势分析、Mann-Kendall 检验和经验正交函数 (EOF) 分析等方法揭示不同强度降水日数的时空演变特征。结果表明, 华东地区的小雨日数为总雨日数的 72.42%, 占总雨日数的最大比重。同时发现小雨日数和总雨日数 (暴雨和大暴雨日数) 表现为显著的减少 (增加) 趋势, 说明总雨日数的减少主要是由于小雨日数的减少所致。EOF 分析结果显示总雨日和小雨日的主要 EOF 模态在空间上表现出全场一致的减少趋势以及南北反相位的特征。福建中部既是总雨日数和小雨日数最大的区域, 也是两者减少趋势最明显的地区。暴雨日数和大暴雨日数高值中心出现的区域基本重合, 大致在浙江—江西—安徽三省交界处。

关键词 气候学 降水 Mann-Kendall 检验 经验正交函数 (EOF) 分析 降水等级 华东

文章编号 1006-9585 (2013) 03-0387-10

中图分类号 P467

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2012.11187

Temporal and Spatial Distribution of Different Grades of Precipitation Days in East China

WU Haomin^{1,2}, HUANG Anning¹, and JIANG Yanmin²

¹ School of Atmospheric Science, Nanjing University, Nanjing 210093

² Lishui Meteorological Office, Lishui 323000

Abstract The spatial and temporal distributions of rainy days with different precipitation intensities over East China were revealed using trend analysis, Mann-Kendall test, and EOF (Empirical Orthogonal Function) analysis methods on observed daily precipitation data for East China between 1961 and 2010. The results show that light precipitation rainy days made up 72.42% of the total number of rainy days, which was more than the other three precipitation grades. It was also evident that the number of light precipitation rainy days decreased and the total number of torrential and heavy precipitation days increased significantly over the study period. The EOF analysis results indicated that the two dominant EOF modes, number of light precipitation rainy days and total number of rainy days, decreased over the whole of East China and had opposite phases in northern and southern East China. The areas with the highest total numbers of rainy days and light precipitation days were in the middle of Fujian Province, where both parameters decreased the most. However, the areas with the highest numbers of torrential rain and heavy rain days were Zhejiang, Jiangxi, and Anhui provinces.

Keywords Climatology, Precipitation, Mann-Kendall test, EOF analysis, Precipitation grades, East China

收稿日期 2011-12-06 收到, 2012-10-25 收到修定稿

资助项目 国家自然科学基金项目 41175086, 浙江省丽水市科技计划项目 2010JYZB10, 江苏高校优势学科建设工程资助项目

作者简介 吴昊旻, 男, 1980 年出生, 硕士, 高级工程师, 主要从事应用气象及气候变化等相关研究。E-mail: wuhaomin8048@gmail.com

1 引言

降水是表征气候变化的重要气象要素之一,与人类生产活动及动植物的生长发育密切相关。近年来,不少学者对降水的气候变化特征进行了相关研究,内容主要针对汛期和季节降水的分布特征(张林梅等, 2009; 吴昊旻等, 2011)、年际降水和极端降水等(韩海涛等, 2008; 赵明松等, 2008; 周浩等, 2008; 王春玲等, 2010)。为了全面了解降水的气候特征和演变规律,有些学者侧重于降水频率、降水强度和降水日数等方面的研究,如对中国夏季降水特征(陈晓燕等, 2010)和不同等级雨日(李红梅等, 2008)的分析;通过线性回归等气候诊断方法,研究各量级降水量的气候特征和变化趋势(符娇兰等, 2008; 宁亮和钱永甫, 2008; 彭贵芬和刘瑜, 2009)。另外,气候模式和再分析资料也得到广泛应用,如朱坚等(2009)利用全球海气耦合气候模式 MIROC Hires 输出的逐日降水资料,分析了全球变暖背景下中国东部地区不同等级降水的变化特征;韩振宇和周天军(2012)运用 APHRODITE 高分辨率逐日降水资料,对中国大陆地区的降水强度、降水量分布等进行了研究。

20 世纪 90 年代中后期以来,随着极端气候变化研究热潮的兴起,按等级对降水气候变化的研究日益增多。严中伟和杨赤(2000)最早指出中国的“毛毛雨”普遍减少; Qian et al. (2007) 的研究表明随着气候变暖,小雨出现的频率明显减少。Qian et al. (2010) 利用 NCAR 的全球地面日资料数据集研究北美、欧洲和亚洲的小雨变化特征,指出在 1973~2009 年间小雨明显减少,尤其是在东亚地区表现最明显。华东地区处于东亚季风区,在全球气候变暖的大背景下,极端气候事件日益频发。关于华东地区降水特征的研究,目前主要有降水集中度(白爱娟和刘晓东, 2010)、降水量和雨日(顾骏强等, 2002)、降水的多模式数值模拟(Li and Feng, 2011)和降水量变化的全球高分辨率模式预估(Feng et al., 2011)等。按照等级研究华东地区降水日数变化,进而探究华东地区各级降水事件的时空分布特征,不仅能全面深入认识华东气候变化特点,而且对防灾减灾、促进经济发展具有重要的科学意义和应用价值。

2 资料和方法

本研究所有的降水数据取自国家气象信息中心 752 个站点的逐日数据。资料本身经过较严格的质量控制,具有较高的可靠性。本研究对华东地区七省一市的 132 个基准和基本站(站点分布见图 1)所选择资料进行了精心筛选。由于迁站会导致数据的非均一性(Craddock, 1979; Hanssen-Bauer and Forland, 1994),所以剔除了所有迁过站的站点。最终挑选出 85 个具有较好代表性,分布比较均匀的站点,以其 1961~2010 年的降水日资料作为基础数据。少量的缺测值通过同一站点和其邻近站点的前后时间的数据插值来补齐(宁亮和钱永甫, 2008)。降水量等级以中国气象局颁布的“降水强度等级划分标准(内陆部分)”中的 24 h 雨量值范围为分类的参考依据,去除过渡的等级,分为小雨、中雨、大雨、暴雨、大暴雨和特大暴雨等 6 个等级(详见表 1)。

本研究首先按照降水量等级标准,统计华东地区不同等级的降水日数,并对其进行趋势分析和显著性检验,筛选出几类变化明显,且具有一定代表

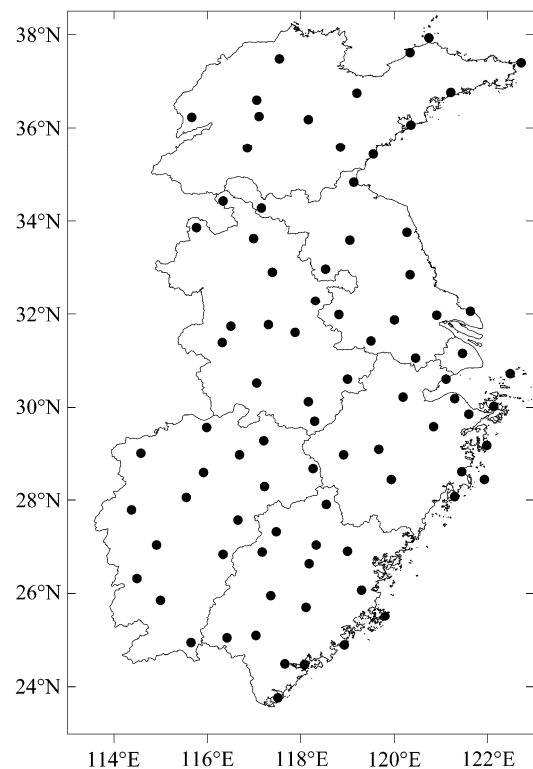


图 1 华东地区所选站点位置示意图

Fig. 1 The spatial distribution of selected stations in East China

表 1 华东地区年度不同等级降水日数分布统计

Table 1 The distribution of precipitation days of different grades in East China

年降水日类型	24 h 雨量划分标准 (mm)	年平均日数 (d)	所占雨日百分比	气候倾向率 (d/10 a)	最大日数 (d)	最少日数 (d)
总雨日		134.56		-6.336**	295	43
小雨日	0.1~9.9	97.45	72.42%	-6.569**	237	33
中雨日	10.0~24.9	23.28	17.30%	-0.066	53	3
大雨日	25.0~49.9	9.95	7.39%	0.138	31	0
暴雨日	50.0~99.9	3.29	2.45%	0.117*	14	0
大暴雨日	100.0~249.9	0.58	0.43%	0.043**	7	0
特大暴雨日	≥250.0	1.46×10 ⁻⁴	1.09×10 ⁻⁴	3.73×10 ⁻³	2	0

* 表示通过 0.05 显著性水平, **表示通过 0.01 显著性水平。

性的降水日数序列做进一步研究; 其次运用 Mann-Kendall 检验(魏凤英, 2007)和经验正交函数 EOF 等分析方法, 从降水日数空间结构和趋势分布两方面出发, 探讨华东地区近 50 a 来降水日数的变化特征和演变规律。

Mann-Kendall 检验法(Sneyers, 1991; 严中伟, 1998; 董新宁和孙照渤, 2006)是一种非参数统计检验方法, 其优点是不需要样本遵从一定的分布, 也不受少数异常值的干扰。在该检验法中, 对于具有 n 个样本量的时间序列 x , 构造一秩序列 S_k , 该序列是第 i 时刻数值大于 j 时刻数值个数的累计值, 在时间序列随机独立的假定下, 定义统计量, 如下:

$$UF_k = \frac{[s_k - E(s_k)]}{\sqrt{\text{var}(s_k)}}, \quad k = 1, 2, \dots, n,$$

其中, $UF_1 = 0$, $E(s_k)$ 、 $\text{var}(s_k)$ 是累计数 s_k 的均值和方差。按时间序列 x 逆序 $x_n, x_{n-1}, \dots, x_1$, 再重复上述过程, 同时使 $UB_k = -UF_k (k=n, n-1, \dots, 1)$, $UB_1 = 0$ 。如果两线出现交点, 且交点在临界值之间, 那么交点对应时刻即为突变开始时间。

3 降水日数的时空变化特征分析

3.1 降水日数分布统计

1961~2010 年华东地区年平均降水日数为 134.56 d。结合表 1 进行分析, 华东降水日数分布主要表现出以下几个特征: 1) 小雨日数为总降水日数的 72.42%, 占最大比重。中雨日数为 17.30%, 其余降水日数均小于 10%, 而大暴雨和特大暴雨的比例甚至低于 1%; 2) 空间分布不均。从单站年极值来看: 华东地区的最大年雨日数为 295 d (福建泰宁, 1975 年), 最小年雨日数为 43 d (山东长岛, 1999 年); 年平均最大雨日数出现在福建九仙山, 为 216.54 d, 而最小值则出现在山东济南, 仅 70.02 d;

3) 趋势变化差异较大。从气候倾向率来看, 总雨日数、小雨和中雨日数均呈下降趋势, 并且前两者的变化趋势通过 99%置信度检验; 而大雨、暴雨、大暴雨和特大暴雨日数则表现为增加趋势, 暴雨和大暴雨日数尤为明显, 分别通过 95%和 99%的置信度检验, 这与陈晓燕等(2010)的研究结论一致。为了深入探讨华东地区降水日数的时空分布特征, 同时又不失一般性和普遍性, 下面主要对总雨日数、小雨、暴雨和大暴雨 4 类降水日数序列做进一步的分析, 进而探讨其时空演变规律。

3.2 华东地区不同等级降水日数空间分布特征

图 2a 给出了华东地区年平均降水日数的空间分布。从图中可以看出, 华东降水日数分布存在由南向北递减的特性, 同时受到海陆分布的影响。华东地区年降水日数极大值出现在福建, 而极小值则在山东。山东的年平均雨日分布表现为南少北多。高值区域在山东北部惠民县和沂源一带, 中心数值达 137 d; 中部的济南、泰山和东南部的莒县为低值区域, 最小值 70 d (山东济南)。江苏和安徽北部, 雨日数由南向北呈现递减趋势。浙江年雨日数等值线较稀疏, 数值在 140~160 d 之间, 沿海的鄞县和洪家一大陈岛一带出现高中心, 数值达 170 d。安徽、江西和福建三省的等值线分布与其它省份有所差异, 均存在着高低值中心。其中福建九仙山一南平一屏南一带, 存在明显的高值区域, 中心最大值达 216 d (九仙山)。而沿海崇武和东山一带年雨日数较少, 均在 110 d 以下。

小雨日数空间分布见图 2b。等值线的分布、走势和高低值区域所在位置都与年雨日数较为相似。这与小雨日数占总雨日 72.42%的最大比重密切相关。一定程度上, 小雨日数的空间结构基本能表征总雨日的分布特性。

暴雨日数的分布如图 2c 所示。总体上, 南方

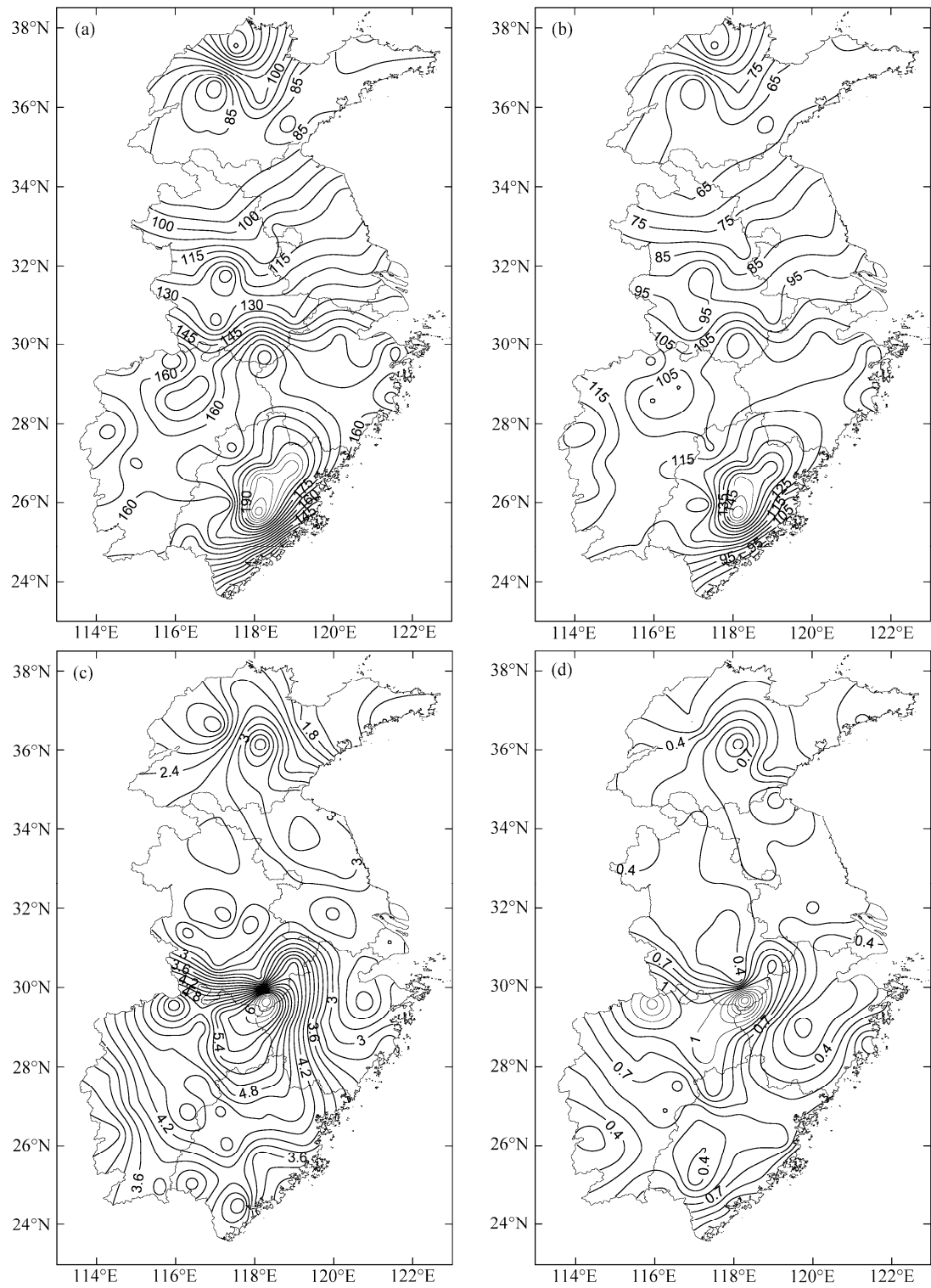


图2 1961~2010年华东地区不同等级降水日数空间分布特征:(a)总雨日数;(b)小雨日数;(c)暴雨日数;(d)大暴雨日数
Fig. 2 The spatial distribution characteristics of precipitation days of different grades during 1961 to 2010 in East China: (a) Annual rain days; (b) light rain days; (c) torrential rain days; (d) heavy rain days

暴雨日数多于北方,以华东中部为最多。高值区域主要出现在安徽、江西和浙江三省交界处,达6.98 d(屯溪);其次为庐山(5.84 d)。另外,在福建永安和漳州、江西广昌也有小的高值区域存在,暴雨

日数为4.5~4.8 d。以“安庆—溧阳—杭州”所构成的折线为界,在该界以南大部分地区暴雨日数大于3 d(除江西西南少数地区);折线以北地区,暴雨日数的高低值中心交替出现。

大暴雨日数分布图(图 2d)中,大暴雨日数达到 1.0 d 以上的区域分布在浙江—江西—安徽三省交界处,以安徽屯溪最为明显,达到 1.78 d,其次是庐山(1.38 d)。此外,沿海地区也多有高值中心出现,浙江洪家和福建“平潭—崇武”一带,数值均在 0.9 以上,福建平潭甚至达到了 1.32 d。山东、安徽、浙江三省大部以小于 0.5 d 的区域为主,最小值出现在浙江金华(0.16 d)。江苏省大暴雨日数普遍在 0.5~0.7 d 之间。

3.3 降水日数的时间变化趋势

图 3 是华东地区不同等级降水日数序列的 Mann-Kendall 检验结果。使用 Mann-Kendall 检验能够在分析序列变化趋势的同时,检验其突变转折点。总雨日数的统计序列 UF 曲线显示,近 50 a 来华东地区的降水日数以减少趋势为主,只在 1962、1964~1966、1975~1977 年表现为增加。在 1985 年前,降水日数减少不明显,未超过 0.05 显著性水平。自 1985 年之后,表现出一致的下降趋势,1986 年超过 95%置信度检验,并在 1987 年突破 0.01 的显著性水平,呈极显著的减少趋势。图 3a 中 UF 和 UB 曲线相交于 1984 年,表明华东地区的年雨日发生了突变,即在 1984 年总雨日数急剧减少。

图 3b 给出了小雨日数序列的 Mann-Kendall 检验结果。在 1978 年之前,华东地区的小雨日一直

保持围绕零点的小幅波动。1978 年之后(包含 1978 年),UF 曲线呈下降趋势,1981 年 UF 超过 0.05 显著性水平,1983 年突破 0.01 的显著性水平,表现出极显著的下降趋势。UF 和 UB 曲线相交于 1982~1983 年,且交点在两临界线之间,说明华东地区的小雨日在此期间发生突变,由缓慢变化变为显著减少。

图 3c 是暴雨日数的 Mann-Kendall 检验图。近 50 a,华东地区的年暴雨日序列仅在 1999~2002 和 2010 年期间超过 95%置信度检验,表现为显著增加趋势。其它时间均为小幅波动下的上升趋势,这说明华东地区的暴雨概率有所增加,并于 1999 年后趋于明显。图 3c 中 UF 和 UB 曲线的交点可以看出,1988 年华东地区的年暴雨日数变化发生了突变。

图 3d 中大暴雨日数的 UF 曲线变化趋势比暴雨日数更明显。在 1996 年前,UF 曲线基本都小于 0 (除 1962 年),并且在 1967~1969、1978~1982 和 1988 年,UF 曲线超过 0.05 显著性水平,大暴雨日数减少趋势显著(甚至在 1968 年和 1979 年突破 99%信度检验)。1996 年后,UF 曲线保持一致的增长趋势,并在 2005 年开始表现为明显增长(通过 95%信度检验)。从 UF 和 UB 曲线的交点来看,在 1996 年前后,大暴雨日数序列存在突变。

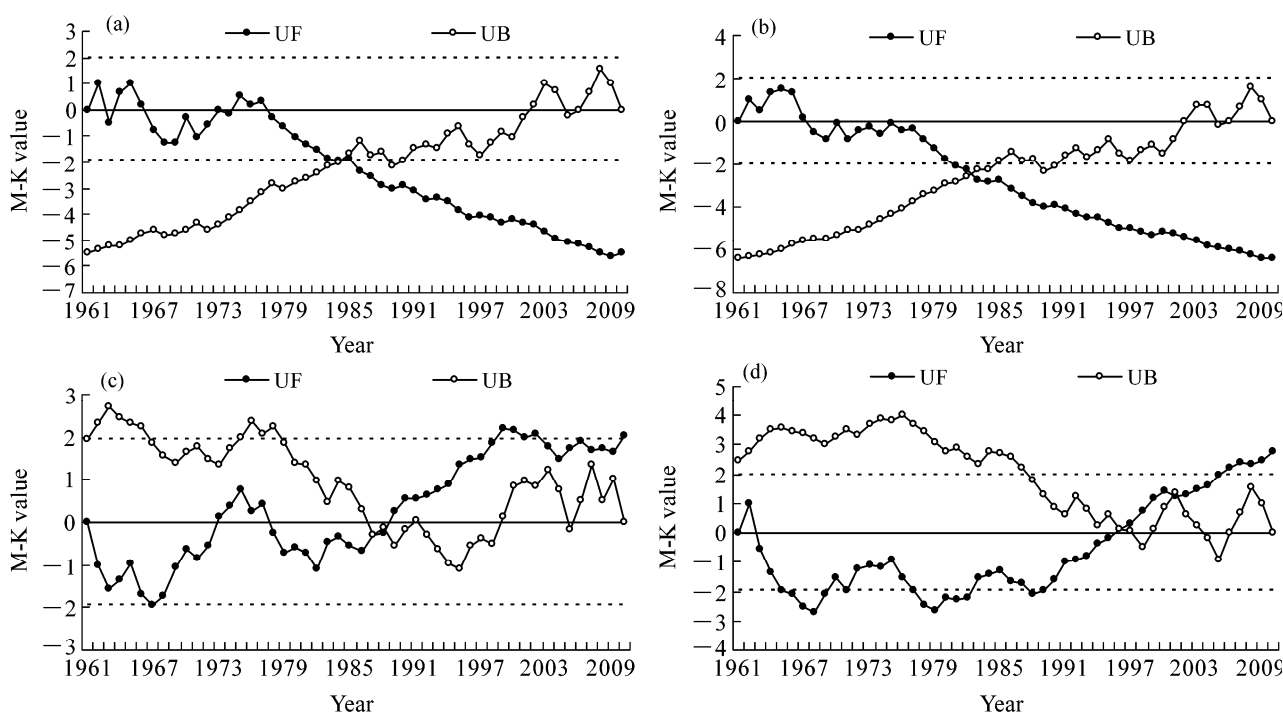


图 3 同图 2, 但为降水日数时间变化的 Mann-Kendall 检验

Fig. 3 Same as Fig. 2, but for the Mann-Kendall test curve of the temporal changes of different grades of precipitation days

3.4 降水日数变化趋势的空间分布

3.1 节中对不同等级降水日数的趋势做了研究,但由于华东地区范围较大,南北跨度 15 个纬度,东西 10 个经度,可能存在较明显的区域差异。因此有必要对显著变化的几类降水日数做空间趋势分布研究。

图 4a 为总雨日数变化趋势的空间分布。从等值线数值符号来看,整个华东地区的气候倾向率均小于 0。这说明,近 50 a 来,降水日数为一致的减少趋势。雨日减少最显著的地方为福建中部,等值线分布密集,变化梯度大,近中心最低值为 $-26.18 \text{ d}/10 \text{ a}$ (福建南平),其次是九仙山,为 $-20.88 \text{ d}/10 \text{ a}$ 。

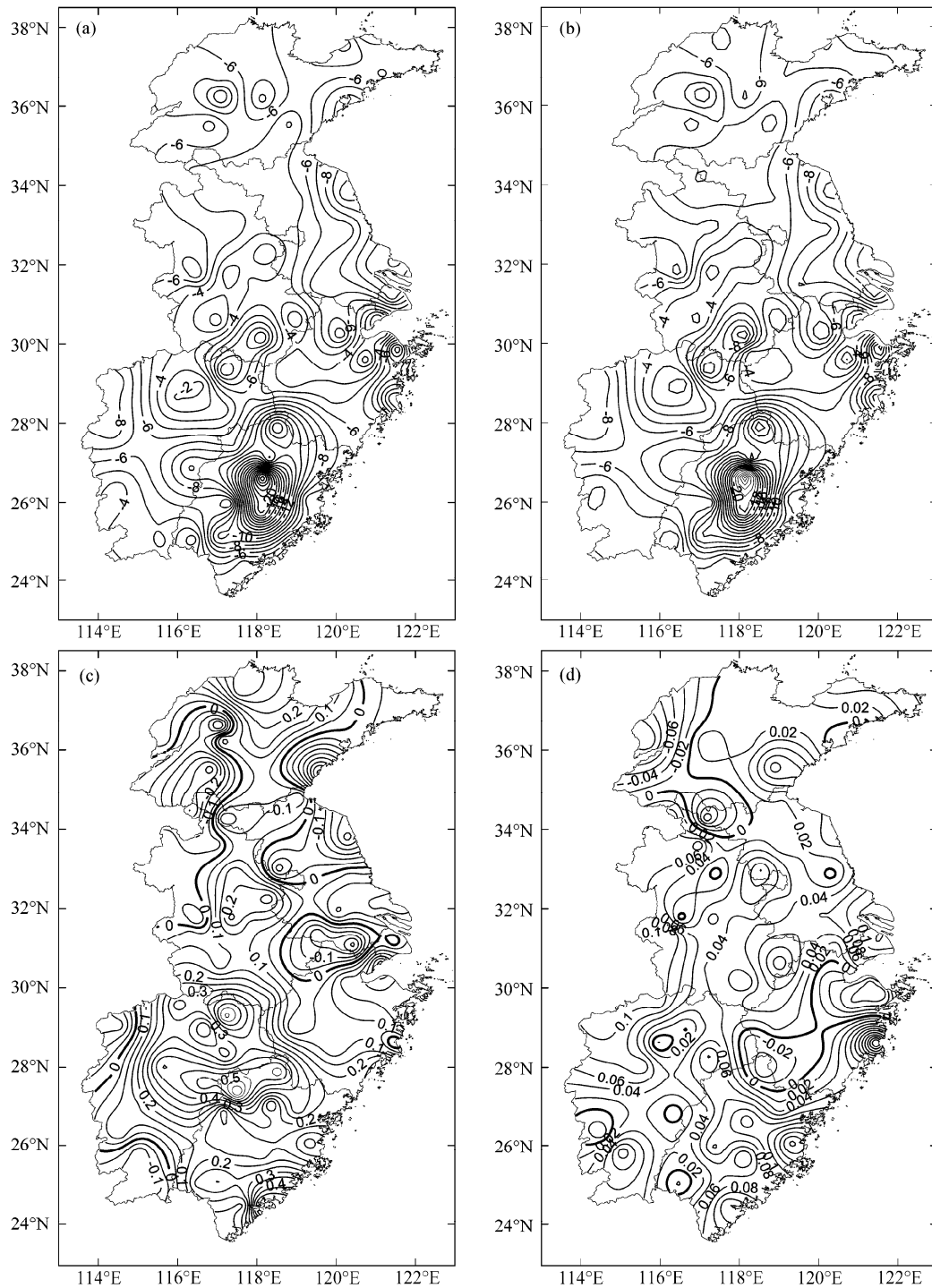


图 4 同图 2, 但为气候倾向率 (单位: $\text{d}/10 \text{ a}$) 空间分布特征

Fig. 4 Same as Fig. 2, but for the spatial distribution characteristics of precipitation days trend ($\text{d}/10 \text{ a}$)

福建大部分地区 and 江苏—浙江—上海沿海年雨日数减少趋势最为显著。

图 4b 中可以看出，小雨日数与总雨日数的变化趋势基本一致，等值线数值均小于 0。对比图 4b 和图 4a，两者相似点主要体现在低值中心出现位置和等值线的走向。小雨日数减少最明显的地区同样是福建大部 and 江浙沪沿海。

为了能较好的分辨暴雨日数、大暴雨日数减少与增加的区域，对趋势数值为零的等值线进行了加粗，如图 4c 和图 4d 所示。图 4c 中，华东地区暴雨日数增大区域多于减少区域，且高值中心数值的绝对值大于低值中心。低值区域主要集中在山东的西南和东南面、安徽西北面、江苏的中部及东部沿海和江苏—浙江—安徽交界处，中心最小值为 $-0.45 \text{ d}/10 \text{ a}$ （山东日照）。正值区域主要分布在浙江—福建—江西三省交界地区、安徽—江西交界处、福建南部以及山东北部。其中以浙江—福建—江西三省交界到安徽—江西交界一带最为明显，气候倾向率在 $0.40 \text{ d}/10 \text{ a}$ 以上。

图 4d 中，华东的大暴雨日数主要表现为上升趋势，并且显著增加的地区多集中在沿海的洪家、福州和厦门以及上海和山东莒县等地，安徽西部到江西北部一带也有所体现，最高值为 $0.21 \text{ d}/10 \text{ a}$ （福建福州）。

3.5 降水日数 EOF 分析

为了进一步研究降水日数时空分布特征及其演变规律，应用经验正交函数分解 EOF 分析华东地区几个显著变化的降水日数场，并使用特征值误差范围检验法（魏凤英，2007）进行显著性检验。取前三个特征向量，其解释方差贡献如表 2 所示。总雨日数和小雨日数的前三个特征向量均为显著，第一特征向量贡献均超过 50%；暴雨日数仅前两特征向量显著，而大暴雨的所有特征向量均不明显。暴

表 2 华东地区不同等级降水日数 EOF 分解前三个特征向量的方差贡献

Table 2 The first three vectors ratios of EOF analysis of different grades of precipitation days in East China

年降水日 类型	方差贡献			前三个向量 累计方差贡献
	第一向量	第二向量	第三向量	
总雨日	50.87%*	17.53%*	5.99%*	74.39%
小雨日	51.65%*	10.36%*	5.07%*	67.08%
暴雨日	13.37%*	8.53%*	6.73%	28.621%
大暴雨日	8.48%	7.88%	6.14%	22.50%

*表示通过 0.05 显著性水平。

雨和大暴雨日数的第一特征向量所占方差比例较小，与第二、第三向量的贡献差距不大。

下面选取通过显著性检验并且满足方差贡献大于 10% 的特征向量做空间分析，主要有总雨日数和小雨日数的第一、第二特征向量以及暴雨日数的第一向量，并对 3 类降水的第一特征向量所对应时间系数做 Mann-Kendall 检验，结果如图 5 和图 6 所示。

图 5a 和图 5b 为总雨日数 EOF 分解的第一、第二特征向量的空间分布。第一特征向量的空间分布均为正值，即在空间上华东地区总雨日数表现出一致的变化特征，同增同减。在江苏和安徽两省，等值线近似于西南—东北走向。福建沿海地区和“上海—慈溪—嵊县”一带存在低值区域。江西中部、福建中北部以及浙江大部（除嵊县外）为高值区域，以浙江、福建、江西 3 省交界的福建浦城最为显著，其次为浙江沿海的鄞县和玉环等地。图 5b 表现出华东总雨日分布的另一个特征：南北反相位，且北部的变率大于南部。零线出现在上海到浙北以及安徽—江西交界处。负值区域集中在山东、安徽和江苏 3 省；而正值区域分布在上海、浙江、江西和福建等地。在负值区，随纬度增加，等值线绝对值增大，在山东省达到最大。正值区域的高值中心出现在江西北部的波阳和西南面的遂川、浙江衢州和嵊县以及福建福州。

图 5c 和图 5d 是年小雨日数的 EOF 第一、第二特征向量的空间分布。将其与总雨日数的前两个特征向量进行对比可知，小雨日数与总雨日数的高低值中心分布以及零线出现位置基本重合，较为相似。这与 3.2 节和 3.4 节的研究结论一致。从等值线数值来看，小雨日数的第一特征向量空间分布南北差异小于总雨日。

暴雨日数第一特征向量空间分布如图 5e 所示，主要表现为从南向北递减的特征，同时局地性明显。负值区域主要包括山东东南部和江苏东北部。大于 0.1 的正值区域主要分布在安徽南部，浙江和江西大部以及福建西北部，其中浙江衢州和淳安、江西玉山与樟树的数据均在 0.20 以上。

图 6 是利用 Mann-Kendall 方法对总雨日数、小雨和暴雨日数的 EOF 第一特征向量（EOF1）所对应的时间序列进行检验的结果。对比图 3a 与图 6a，两者较为相似，除了在 1962、1963 年 UF 曲线数值差距较大外，其余基本一致，且突变时间均出现

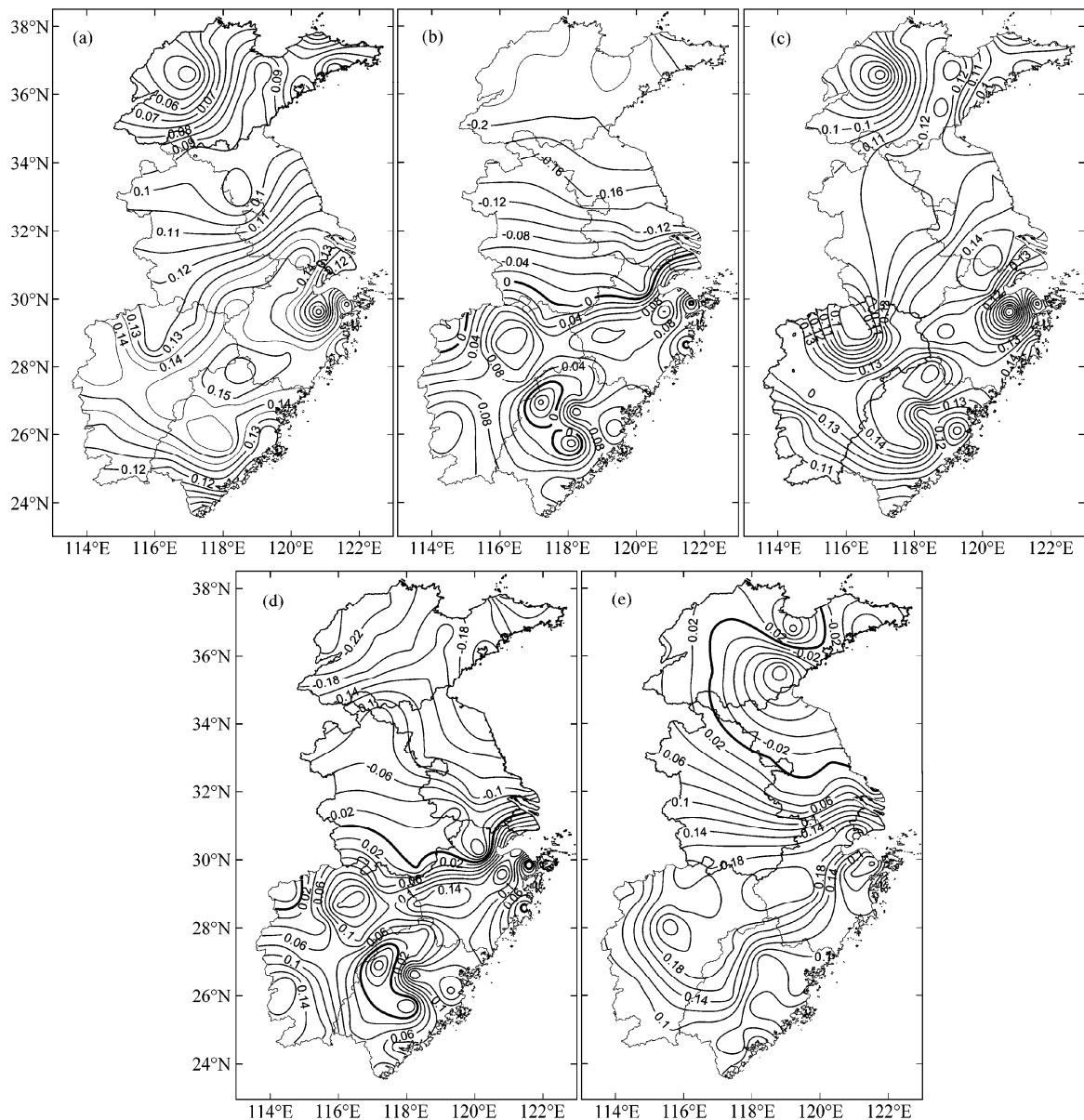


图 5 华东地区不同等级降水日数特征向量空间分布特征: (a) 总雨日第一特征向量; (b) 总雨日第二特征向量; (c) 小雨日第一特征向量; (d) 小雨日第二特征向量; (e) 暴雨第一特征向量

Fig. 5 The spatial distribution of characteristic vectors of precipitation days at different grades in East China: (a) The first vector of annual rain days; (b) the second vector of annual rain days; (c) the first vector of light rain days; (d) the second vector of light rain days; (e) the first vector of torrential rain days

在 1984 年前后。小雨日的 UF 和 UB 曲线 (图 6b), 与图 3b 中差距不大。

图 6c 是暴雨日数的 EOF 第一特征向量时间系数的 Mann-Kendall 检验结果。UF 曲线在 1968 年前小于零, 呈减少趋势, 并在 1963 年达到最低值。1968 年后, 暴雨日数转为增加, 并于 2005 年突破 0.05 的显著性水平, 甚至在 1997 年超过 0.01 的显著性水平。从 UF 和 UB 的交点来看, 1985~1986 年该时间系数发生突变。对比图 3c 和图 6c, 曲

线的走势既有区别, 又有相似之处。从数值上来看, 图 6c 中的 UF 曲线只有 1960~1967 年间小于 0, 并在 1995 年之后保持显著增加; 而图 3c 中 UF 曲线 1960~1972、1978~1988 年均小于 0, 并且仅在 1999~2002 年以及 2010 年增加显著; 从走势看, 1982~2010 年之间, 两者的 UF 曲线的起伏波动比较接近, 几个转折点的时间及相对位置基本一致; 从突变时间来看, 1985~1986 年 (图 6c) 早于 1996 年 (图 3c)。这些差异可能与暴雨日数的 EOF

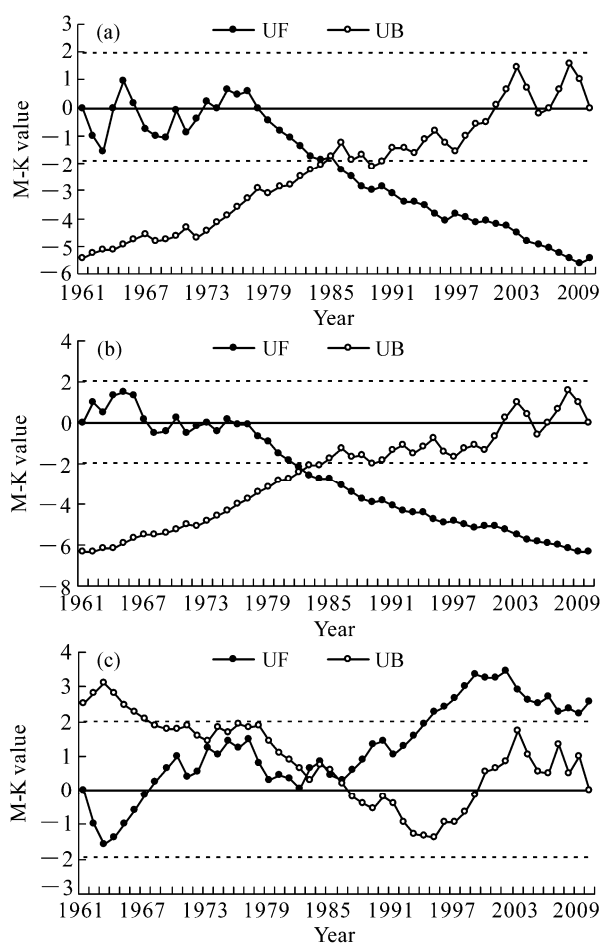


图6 华东地区 (a) 总雨日第一特征向量、(b) 小雨日第一特征向量、(c) 暴雨日第一特征向量时间系数的 Mann-Kendall 检验

Fig. 6 The Mann-Kendall test for time coefficients of primary characteristic vectors of (a) annual rain days, (b) light rain days, and (c) torrential rain days in East China

第一特征向量占总方差比例 (13.37%) 较低有关。

4 结论与讨论

(1) 1961~2010 年, 华东地区的小雨日数占总雨日数的 72.42%, 居最大比重。近 50 a 来, 华东地区的雨日显著减少, 主要是由小雨日数减少所致。与此同时, 暴雨和大暴雨日数却显著增加。华东地区的年雨日数、小雨、暴雨和大暴雨日数均在 50 a 内发生过突变, 其中总雨日数和小雨日数的突变时间均在 1983~1984 年, 而暴雨日数突变发生在 1988 年, 大暴雨日数则在 1996 年。根据趋势变化推测, 华东地区像小雨这种程度较低的降水出现概率会显著下降, 而像暴雨、大暴雨等极端降水事件的发生可能性将明显增大。

(2) EOF 分析表明总雨日数和小雨日数存在很

多相似点, 主要表现出全场一致的减少趋势以及南北反相位的变化特征。其中福建中部地区, 既是总雨日数和小雨日数出现最大值的区域, 也是两者减少趋势最明显的地方。暴雨和大暴雨日数的高值中心基本重合, 大致在浙江、江西、安徽 3 省交界处。

影响华东地区降水的气候因素很多, 有资料 (白爱娟和刘晓东, 2010) 显示, 华东地区的降水主要受季风和台风的影响。而最新的研究进一步揭示了我国东部地区降水的年代际变化, 与对流层中上层大气温度的变化有直接联系 (宇如聪等, 2008), 具体表现特征随季节而变化。Zhou et al. (2009) 研究了东亚夏季风的年代际变化; Yu et al. (2004)、Yu and Zhou (2007) 指出中国的降水变化是由于东亚对流层变冷的趋势导致, 并对夏季风的三维结构和季节性进行了深入分析。3 月, 华南降水量的增加主要由亚洲东北部地区对流层上层冷却引起; 4~5 月, 随着对流层冷却区域的南扩和增强, 东亚南部副热带急流加强了西风, 造成雨带的正常迁移被打断, 导致长江以南地区干旱。6 月, 随着西风带北部急流的加强, 对流层上部的变暖和东亚北部上空强大的平流层底层急流, 促进了雨带向北迁移到长江中下游地区。7~8 月期间, 对流层上部的冷却反馈增强了西风南部急流, 而削弱了南部季风发展, 导致黄河中下游流域干旱和长江流域的洪涝。本研究对不同等级降水日数的分析结论, 与上述文献中所提及的分布特征有相似之处, 雨日的分布特征与季风活动密切相关。

参考文献 (References)

- 白爱娟, 刘晓东. 2010. 华东地区近 50 年降水量的变化特征及其与旱涝灾害的关系分析 [J]. 热带气象学报, 26 (2): 194~200. Bai Aijuan, Liu Xiaodong. 2010. Characteristics of rainfall variation over east China during the last 50 year and their relationships with droughts and floods [J]. Journal of Tropical Meteorology (in Chinese), 26 (2): 194~200.
- 陈晓燕, 尚可政, 王式功, 等. 2010. 近 50 年中国不同强度降水日数时空变化特征 [J]. 干旱区研究, 27 (5): 766~772. Chen Xiaoyan, Shang Kezheng, Wang Shigong, et al. 2010. Analysis on the spatiotemporal characteristics of precipitation under different intensities in China in recent 50 years [J]. Arid Zone Research (in Chinese), 27 (5): 766~772.
- Craddock J M. 1979. Methods of comparing annual rainfall records for climatic purposes [J]. Weather, 34: 332~345.
- 董新宁, 孙渤瀚. 2006. 北极海冰变化及其与中国秋季气温的相关分析 [J]. 南京气象学院学报, 29 (1): 82~87. Dong Xinning, Sun Zhaobo. 2006. Characteristics of arctic sea-ice and its relation with autumn air temperature in China [J]. Journal of Nanjing Institute of Meteorology (in

- Chinese), 29 (1): 82–87.
- Feng L, Zhou T J, Wu B, et al. 2011. Projection of future precipitation change over China with a high-resolution global atmospheric model [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 28 (2): 464–476.
- 符娇兰, 林祥, 钱维宏. 2008. 中国夏季分级雨日的时空特征 [J]. *热带气象学报*, 24 (4): 367–373. Fu Jiaolan, Lin Xiang, Qian Weihong. 2008. The temporal and spatial characteristics of graded summer rain days over China [J]. *Journal of Tropical Meteorology (in Chinese)*, 24 (4): 367–373.
- 顾骏强, 施能, 薛根元. 2002. 近 40 年浙江省降水量、雨日的气候变化 [J]. *应用气象学报*, 13 (3): 322–329. Gu Junqiang, Shi Neng, Xue Genyuan. 2010. Climatic variation of rainfall and wet days in Zhejiang [J]. *Quarterly Journal of Applied Meteorology (in Chinese)*, 13 (3): 322–329.
- 韩海涛, 胡文超, 司建华, 等. 2008. 阿拉善荒漠地区近 50 年气候变化的多时间尺度分析 [J]. *中国农业气象*, 29 (2): 139–142. Han Haitao, Hu Wenchao, Si Jianhua, et al. 2008. Multi-time scale analysis of climate change in desert areas of Alashan during 1961–2005 [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 29 (2): 139–142.
- 韩振宇, 周天军. 2012. APHRODITE 高分辨率逐日降水资料在中国大陆地区的适用性 [J]. *大气科学*, 36 (2): 361–373. Han Zhenyu, Zhou Tianjun. 2012. Assessing the quality of APHRODITE high-resolution daily precipitation dataset over contiguous China [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 36 (2): 361–373.
- Hanssen-Bauer I, Forland E J. 1994. Homogenizing long Norwegian precipitation series [J]. *J. Climate*, 7: 1001–1013.
- 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*, 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.
- Li H M, Feng L. 2011. Multi-model projection of July–August climate extreme changes over China under CO₂ doubling. Part I: Precipitation [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 28 (2): 433–447.
- 宁亮, 钱永甫. 2008. 中国年和季各等级日降水量的变化趋势分析 [J]. *高原气象*, 27 (5): 1010–1020. Ning Liang, Qian Yongfu. 2008. Analyses on trends of annual and seasonal four kinds of daily precipitation in China [J]. *Plateau Meteorology (in Chinese)*, 27 (5): 1010–1020.
- 彭贵芬, 刘瑜. 2009. 云南各量级雨日的气候特征及变化 [J]. *高原气象*, 28 (1): 214–219. Peng Guifeng, Liu Yu. 2009. Climatic characteristic and change of rain day for different intensities in Yunnan [J]. *Plateau Meteorology (in Chinese)*, 28 (1): 214–219.
- Qian W H, Fu J L, Yan Z W. 2007. Decrease of light rain events in summer associated with a warming environment in China during 1961–2005 [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 34: L11705.
- Qian Y, Gong D Y, Leung R. 2010. Light rain events change over North America, Europe, and Asia for 1973–2009 [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 11 (4): 301–306.
- Sneyers R. 1991. On the statistical analysis of series of observations [M]. *World Meteorological Organization*, 192pp.
- 王春玲, 崔力, 时风云, 等. 2010. 近 54 年濮阳市降水变化特征及突变分析 [J]. *中国农业气象*, 31 (1): 5–10. Wang Chunling, Cui Li, Shi Fengyun, et al. 2010. Analysis of varying characteristics and abrupt change of precipitation in recent 54 years in Puyang city [J]. *Chinese Journal of Agrometeorology (in Chinese)*, 31 (1): 5–10.
- 魏凤英. 2007. 现代气候统计诊断与预测技术 [M]. 北京: 气象出版社, 63–66, 110–111. Wei Fengying. 2007. *Modern Climatic Statistic Diagnosis and Prediction Technology [M]* (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 63–66, 110–111.
- 吴昊旻, 杨羨敏, 姜燕敏. 2011. 浙江省夏秋季降水量时空分布特征及趋势演变规律 [J]. *中国农业气象*, 32 (3): 326–330. Wu Haomin, Yang Xianmin, Jiang Yanmin. 2011. Temporal and spatial distribution of precipitation in summer and autumn and its trend evolution in Zhejiang Province [J]. *Chinese Journal of Agrometeorology (in Chinese)*, 32 (3): 326–330.
- 严中伟. 1998. 近 100 年全球温度场中的年代际振荡 [J]. *气候与环境研究*, 3 (3): 201–208. Yan Zhongwei. 1998. Inter-decadal oscillations in global temperature field during the last 100 years [J]. *Climatic and Environmental Research (in Chinese)*, 3 (3): 201–208.
- 严中伟, 杨赤. 2000. 近几十年我国极端气候变化格局 [J]. *气候与环境研究*, 5 (3): 267–272. Yan Zhongwei, Yang Chi. 2000. Geographic patterns of extreme climate changes in China during 1951–1997 [J]. *Climatic and Environmental Research (in Chinese)*, 5 (3): 267–272.
- Yu R C, Wang B, Zhou T J. 2004. Tropospheric cooling and summer monsoon weakening trend over East Asia [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 31: L22212.
- Yu R C, Zhou T J. 2007. Seasonality and three-dimensional structure of the interdecadal change in East Asian monsoon [J]. *J. Climate*, 20: 5344–5355.
- 宇如聪, 周天军, 李建, 等. 2008. 中国东部气候年代际变化三维特征的研究进展 [J]. *大气科学*, 32 (4): 893–905. Yu Rucong, Zhou Tianjun, Li Jian, et al. 2008. Progress in the studies of three-dimensional structure of interdecadal climate change over eastern China [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 32 (4): 893–905.
- 张林梅, 庄晓翠, 胡磊, 等. 2009. 新疆阿勒泰地区汛期降水集中度和集中期的时空变化特征 [J]. *中国农业气象*, 30 (4): 501–508. Zhang Linmei, Zhuang Xiaocui, Hu Lei, et al. 2009. Temporal and spatial distribution of precipitation concentration degree and concentration period in flood season in Altay region Xinjiang [J]. *Chinese Journal of Agrometeorology (in Chinese)*, 30 (4): 501–508.
- 赵明松, 程先富, 张建春. 2008. 六安地区近 50 年来降水量的变化特征 [J]. *中国农业气象*, 29 (4): 397–401. Zhao Mingsong, Cheng Xianfu, Zhang Jianchun. 2008. Analysis of characteristics of precipitation changes in Liu'an of Anhui Province over last 50 years [J]. *Chinese Journal of Agrometeorology (in Chinese)*, 29 (4): 397–401.
- 周浩, 杨宝钢, 程炳岩. 2008. 重庆近 46 年气候变化特征分析 [J]. *中国农业气象*, 29 (1): 23–27. Zhou Hao, Yang Baogang, Cheng Bingyan. 2008. Analysis of characteristics of climate change over last 46 years in Chongqing [J]. *Chinese Journal of Agrometeorology (in Chinese)*, 29 (1): 23–27.
- Zhou T J, Gong D Y, Li J, et al. 2009. Detecting and understanding the multi-decadal variability of the East Asian summer monsoon—Recent progress and state of affairs [J]. *Meteorologische Zeitschrift*, 18 (4): 455–467.
- 朱坚, 张耀存, 黄丹青. 2009. 全球变暖情景下中国东部地区不同等级降水变化特征分析 [J]. *高原气象*, 28 (4): 889–896. Zhu Jian, Zhang Yaocun, Huang Danqing. 2009. Analysis of changes in different-class precipitation over eastern China under global warming [J]. *Plateau Meteorology (in Chinese)*, 28 (4): 889–896.