

卞洁, 何金海, 李双林. 2012. 近 50 年来长江中下游汛期暴雨变化特征 [J]. 气候与环境研究, 17 (1): 68-80, doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2011.10062. Bian Jie, He Jinhai, Li Shuanglin. 2012. Heavy rain variation characteristics in flood season in the middle and lower reaches of Yangtze River in the last 50 years [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 17 (1): 68-80.

近 50 年来长江中下游汛期暴雨变化特征

卞洁^{1,2} 何金海¹ 李双林²

1 南京信息工程大学大气科学学院, 南京 210044

2 中国科学院大气物理研究所竺可桢-南森国际研究中心, 北京 100029

摘要 基于 1960~2008 年逐日降水观测资料, 分析了长江中下游汛期暴雨的气候分布特征、年际、年代际变化以及趋势变化特征。结果表明, 该区域汛期暴雨分布呈现南部多、向北递减的总格局。最大暴雨量中心位于江西北部, 其形成可能与地形因素有关。在年际尺度上, 该区域暴雨量、暴雨强度存有准两年及 6~8 年的周期变化特征; 从年代际尺度看, 在时间域上, 存在 12~14 年的周期变化。具体地, 汛期区域平均暴雨量、频次在 1960 年代至 1980 年代是一个相对平稳的时期, 1990 年代开始则进入一个高值期, 21 世纪以后又开始回落。相比较而言, 暴雨强度的年代际变化不显著。在空间域上, 进入 21 世纪后随着雨带向淮河流域推进, 暴雨量、频次、强度在苏北、皖北增强。从趋势分析看来, 过去 50 年汛期暴雨量、频次呈现较大范围的增加趋势。暴雨强度也表现一定程度的增加趋势。

关键词 长江中下游 汛期 暴雨 年际 年代际 趋势

文章编号 1006-9585 (2012) 01-0068-13 **中图分类号** P468 **文献标识码** A

doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2011.10062

Heavy Rain Variation Characteristics in Flood Seasons in the Middle and Lower Reaches of Yangtze River in the Last 50 Years

BIAN Jie^{1,2}, HE Jinhai¹, and LI Shuanglin²

1 *College of Atmospheric Science, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044*

2 *Nansen-Zhu International Research Centre, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029*

Abstract Based on the daily precipitation dataset archived in China Meteorology Administration during 1960-2008, interannual and decadal variations of heavy rain events in flood seasons in the middle and lower reaches of the Yangtze River as well as their trends are analysed. The results suggest that, on the interannual timescale, both the occurrence and intensity of heavy rain events display a variation with two types of periods, a quasi-biennial one and a nearly 6-8-year one. On the interdecadal timescale, a nearly 12-14-year period is revealed. Particularly, there was less occurrence during the period through the 1960s to the 1980s, which was followed by more occurrence in the 1990s. Since the beginning of the 21st century, the occurrence of the events is becoming less again, albeit an occur-

收稿日期 2010-05-06 收到, 2011-08-24 收到修定稿

资助项目 中国科学院知识创新工程重要方向项目“重大气象灾害综合风险评估研究”KZCX2-YW-Q03-08

作者简介 卞洁, 女, 1986 年出生, 硕士研究生, 主要研究气象灾害风险评估。E-mail: youyuanyun@126.com

rence increases in the northern boundary of the region, i. e., northern part of Jiangsu and Anhui provinces. The modest shift of heavy rain events to the north is in agreement with the northward shift of climatological seasonal rain band after the end of the 20th century, which was found recently. The trend analysis shows an increase in the occurrence of the events and the seasonal accumulated rainfall due to the events, albeit an insignificant decrease of the intensity of the events.

Key words middle and lower reaches of the Yangtze River, flood season, interannual and interdecadal variations, long-term trend

1 引言

长江流域受东亚季风影响,是我国暴雨最为多发区域之一(Tao and Ding, 1981)。资料分析和数值模拟都显示整个长江流域夏季洪涝发生频率高,是我国洪涝最严重的区域(李吉顺等, 1996),且每次洪涝都是由暴雨形成(骆承政和乐嘉祥, 1996; Matsumoto and Takahashi, 1999; 黄丹青和钱永甫, 2007)。区域洪涝不仅对基础设施造成严重破坏,而且对人民群众的生命财产构成极大的损害和威胁,已经成为我国经济社会可持续发展的重要制约因素之一。因此,关于暴雨的研究一直是大气科学重要研究课题之一(丁一汇, 1998)。

对于长江流域的暴雨,不少学者已进行了系统性的探究(张顺利等, 2001; 张庆云等, 2002; 张小玲等, 2006)。这些工作主要集中在持续性强降雨的形成因子,特别是暴雨发生的天气尺度和中尺度条件,对于其气候学特征的研究较少。直到最近几年,随着观测资料的增多,有关暴雨气候特征的分析才慢慢增多(张建敏等, 2001; 杨宏青等, 2005; 平凡等, 2006; 毛文书等, 2006; 李红梅等, 2008)。鲍名和黄荣辉(2006)对我国近 40 年暴雨发生频率的年代际时空变化特征进行分析,结果表明:夏季暴雨发生频率年代际变化明显,长江流域暴雨日在 20 世纪 70 年代末增加一次,80 年代又有一次显著增加。就季节演变来看,春秋季节暴雨发生区域和频率远不如夏季,年代际趋势变化也不明显。张文等(2007)基于对长江中下游地区 87 站极端降水量,运用统计方法对该区域汛期暴雨进行了时空分布特征分析,指出汛期极端降水的平均空间差异大,皖、赣交界极端降水量最多,可分为两湖平原型、北方型、

沿海型以及南方型 4 个空间分型。之后,赵勇和钱永甫(2008)针对夏季江淮流域暴雨,从气候分布和年代际变化进行分析,结果显示:暴雨降水存在明显的区域差异,局地暴雨频繁,具有明显的年代际变化特征,20 世纪 90 年代是高值期。

以前大多数研究都集中于该区主汛期(夏季 6~8 月)暴雨的研究,并且受观测资料长度限制,研究都截止至 20 世纪 90 年代或以前。最近,司东等(2010)指出:我国东部夏季气候在 20 世纪 90 年代末发生了一次新的年代际变化,表现为雨带向淮河流域移动,长江中下游降水减少。这样的年代际变化对暴雨的季节演变特征有什么影响,是否暴雨降水、频次、强度也发生了相应的变化,目前还不清楚。此外,长江中下游受东亚季风以及西北太平洋台风登陆的影响,暴雨在 5~9 月较集中。因此,有必要利用最新的资料重新检查一下长江中下游整个汛期(5~9 月),特别是进入 21 世纪以来,暴雨量、频次以及强度的时空变化特征,为暴雨洪涝灾害的风险评估提供更现实的参考。

2 资料和方法

所用资料为中国气象局信息中心提供的全国 753 站逐日降水观测资料。长江中下游地区系指江、浙、皖、赣、鄂、湘 6 省(上海由于观测资料不完整,分析中没有涉及)。为了消除长期预测的偏差,选取站点时存在较为严格的标准:(1) 1960~2008 年逐日资料完整的站点;(2) 资料中若某一年有多于 10 天以上的缺测值,则这一年被定为缺测年;(3) 如某站点存在一个及以上的缺测年,则站点不选。基于上述要求,研究区域共选取站点 88 个。

暴雨的定义遵照气象部门业务标准,即日降水量 ≥ 50 mm称为暴雨降水。此外,还定义了其它一些暴雨指标,如暴雨频次—各站点暴雨降水的总日数;暴雨强度—暴雨量与暴雨日数比。

对于这些指标的分析,主要运用合成、11年滑动平均、曼—肯德尔趋势检验(魏凤英,2007)、Morlet小波分析、以及趋势分析(施能等,1995)统计方法。文中气候场定义为1971~2000年共30年的平均。

3 暴雨的气候分布与季节演变

长江中下游地区属于东亚典型季风区的一部分,5~9月降水是比较集中的。图1a为长江中下游汛期(5~9月)降水的气候分布。可以看出:降水呈现江南多,江北相对较少的特征。长江以南降水量在800 mm以上,而以北则维持800 mm以下。最大降水量呈二极分布,一个中心位于江

西的东北部,另一中心位于湘鄂黔交界处。图1b显示了暴雨量的分布。暴雨量大值中心与汛期总降水量的大值中心基本吻合,主要中心位于赣北、皖南以及鄂东南(与地形有关)交界处,这与该地区汛期极端降水量的异常特征(张文等,2007)分析结果一致。最大值约350 mm,大致对应7个暴雨日。但湘鄂黔交界处却不再是暴雨量的最大值中心,说明该区域汛期暴雨量对总降水的贡献相比赣北、皖南以及鄂东南要小。图1c给出了暴雨量对总降水的方差贡献(暴雨降水序列与总降水量序列相关系数的平方)。整体上暴雨对汛期总降水贡献都较大,绝大部分地区超过了50%。比较而言,赣北、皖南以及鄂东南交界区域方差贡献最大,达75%,而鄂西、湘南、赣南及浙江方差贡献相对就比较弱。除苏北地区外,方差贡献分布形势与暴雨量的空间分布大致相对应。从暴雨频次的气候分布与暴雨量比较来看,二者相似(图略)。图1d给出了暴雨强度的分布情况。其分

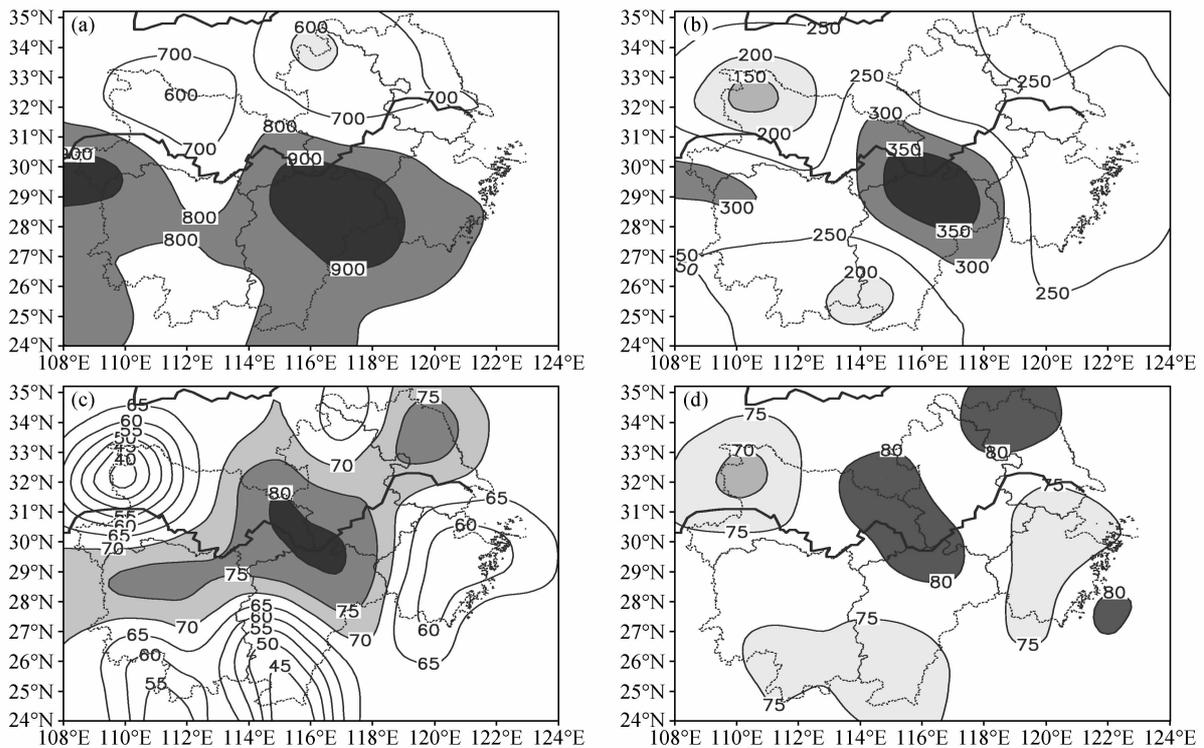


图1 长江中下游地区汛期 (a) 降水的气候分布 (单位: mm), (b) 暴雨量的气候分布 (单位: mm), (c) 暴雨降水对总降水的方差贡献率 (%), (d) 暴雨强度的气候分布 (单位: mm · d⁻¹)

Fig. 1 Distribution of climatological mean of (a) precipitation (mm), (b) rainstorm amount (mm), (c) the contribution of rainstorm to total precipitation variance (%), and (d) rainstorm intensity (mm · d⁻¹) from May to September during 1971 - 2000 in the middle and lower reaches of Yangtze River

布特征与暴雨量恰好相反，呈现北强南弱的气候分布。强度最大值主要位于苏北、湖北东部、皖西南、赣北以及浙江沿海地带。与以前关于长江下游暴雨（1960~2003 年 4~8 月）平均强度结果（朱宵峰等，2008）相比，强度大值中心发生了变化，高强度区已经由该区西部、沿江分布向长江以北的江苏、安徽以及鄂东北偏移了。这与最近些年雨带向北、向黄淮流域移动是一致的。

长江中下游地区受季风的影响汛期暴雨存在明显的季节演变特征。鲍名和黄荣辉（2006）对全国暴雨日数做过分析，显示夏季（6~8 月）是长江中下游地区发生暴雨日数最多的季节，春季（4~5 月）和秋季（9~10 月）暴雨发生的范围和频率就明显减少。但汛期暴雨特征量在各季节空间分布又有什么差异还不清楚。图 2 显示了汛期不同季节暴雨降水分布。汛期的春季和秋季分别只选了 5 月和 9 月，因其它月份暴雨量明显偏少。与汛期中的春、秋季比较，夏季（6~8 月月平均值）的暴雨降水量要大得多。春季主要集中于江南的江西以及湖南南部地区，与雨带还维持在江

南一致。夏季全区暴雨降水量最大。最大降水中心相比春季明显北抬，数值跃变至 90 mm。此时在苏北也出现一个降水量 ≥ 80 mm 的暴雨雨量中心，反映了夏季江淮地区暴雨多的季节特点。其它绝大多数地区的暴雨量都维持在 60~70 mm。鄂北、湘南、苏南以及浙江沿海暴雨降水相对较少。到了秋季，暴雨降水就明显衰退了，除了浙江沿海地区出现大值区，其余 5 省暴雨量都变得十分稀少。秋季浙江沿海的大值区与西北太平洋台风登陆有关（陈敏等，1999）。暴雨频次空间分布的季节变化与暴雨量分布相似，不再赘述。

从暴雨强度空间分布季节差异的比较来看（图 3），3 个季节大部分地区强度基本都介于 70~80 mm·d⁻¹ 范围，而以春季暴雨强度相对较小。夏季全区强度均在 75 mm·d⁻¹ 以上，普遍大于春季，且在长江以北苏、皖、鄂东部，以及江南的赣北强度最大。秋季，浙江、江苏沿海一带暴雨强度比较强，特别是浙江沿海，强度最大值甚至达到 85 mm·d⁻¹。反映了台风登陆易造成强降水、大暴雨的观测事实。

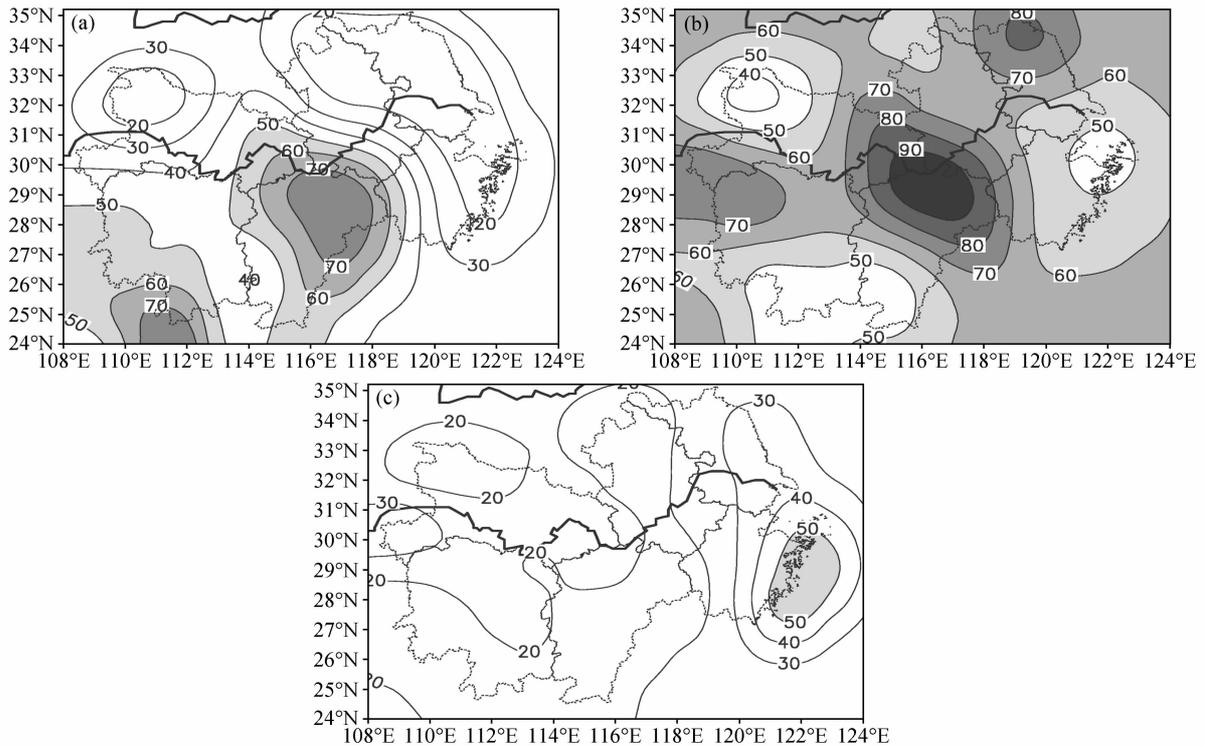


图 2 1971~2000 年平均汛期中的 (a) 春季 (5 月)、(b) 夏季 (6~8 月平均)、(c) 秋季 (9 月) 暴雨量分布 (单位: mm)

Fig. 2 Distribution of climatological mean of rainstorm amount (mm) in flood seasons in (a) spring (May), (b) summer (from June to August), and (d) autumn (September) in the middle and lower reaches of Yangtze River during 1971-2000

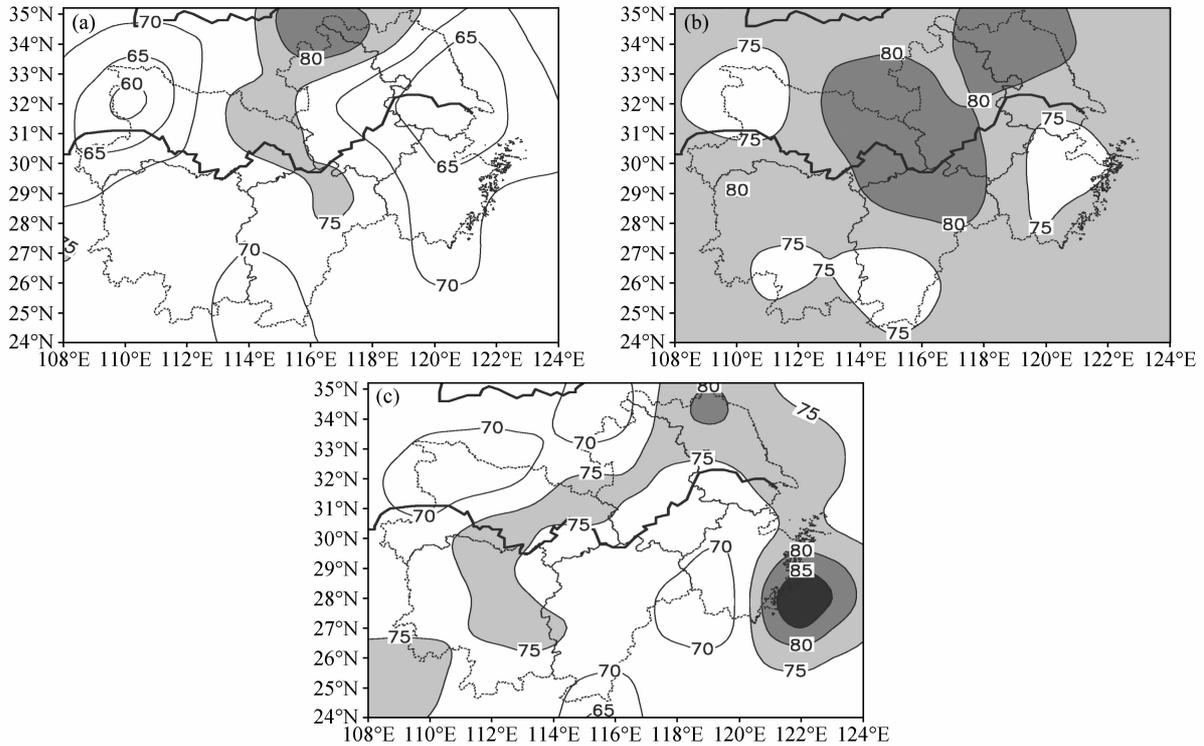


图3 同图2, 但为暴雨强度分布(单位: $\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$)

Fig. 3 Same as Fig. 2, but for distribution of climatological mean of rainstorm intensity ($\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$)

4 年代际变化与趋势分析

4.1 周期分析

以上分析说明, 长江中下游地区暴雨在时空上有明显的季节演变, 那是否还存在其他的变化特征呢? 为认识这一问题, 利用暴雨特征量 1960~2008 年的序列资料进行小波分析, 以 Morlet 函数为母小波, 通过对其实部的分析来研究该区域暴雨特征量的周期变化特征。小波变换可以将一个一维信号在时域和频域上展开, 利用该方法就能对该区暴雨进行时间域和频率谱的分析。图 4a 为近 50 年来长江中下游地区汛期暴雨量的小波变换实部。可以看到, 不仅存在明显的年际变化, 同时也存有年代际的周期。年际尺度上看, 准两年周期的信号在整个 20 世纪 70 年代都很强。而 6~8 年的周期振荡信号在整个期间最强, 70 至 80 年代表现为 6~8 年周期, 90 年代周期信号延长至 8~9 年, 整体上呈现延长的趋势。年代际尺度来看, 从 1980 年代开始, 12~14 年的年代际振荡最为明显。图中还反映出暴雨量变化有明显的阶段

性, 60 年代到 80 年代末期暴雨量变化相对稳定, 而从 80 年代末开始, 暴雨量变化就比较剧烈, 直到 21 世纪才恢复平稳的状态。

汛期暴雨强度的小波变化实部(图 4b)显示, 6~8 年的周期信号贯穿在整个资料分析期, 与暴雨的年际周期相似。从年代际尺度来看, 18~23 年的年代际振荡最为明显, 但是受资料长度限制, 该周期信度并不高。下面将更具体地分析年代际变化特征。

4.2 时间域上的年代际变化

从图 5a 可以看到, 暴雨量在 1960 年代主要以负距平为主, 仅在 60 年代末出现了一次正异常峰值; 之后 70 年代、80 年代变化幅度并不大, 1978 年出现了一次负距平极值; 到了 20 世纪 90 年代, 暴雨量明显增多, 大多数年份表现为正距平, 特别是 1998、1999 年, 正距平最为明显。进入 21 世纪后, 暴雨量开始慢慢回落, 2001 年出现低值, 之后变化很小, 暴雨量基本维持在 200~300 mm 之间。这样的演变反映了总雨带的年代际演变, 即 20 世纪 80 至 90 年代雨带位于长江, 而 90 年代末开始逐渐北移。长江暴雨量减少, 淮河

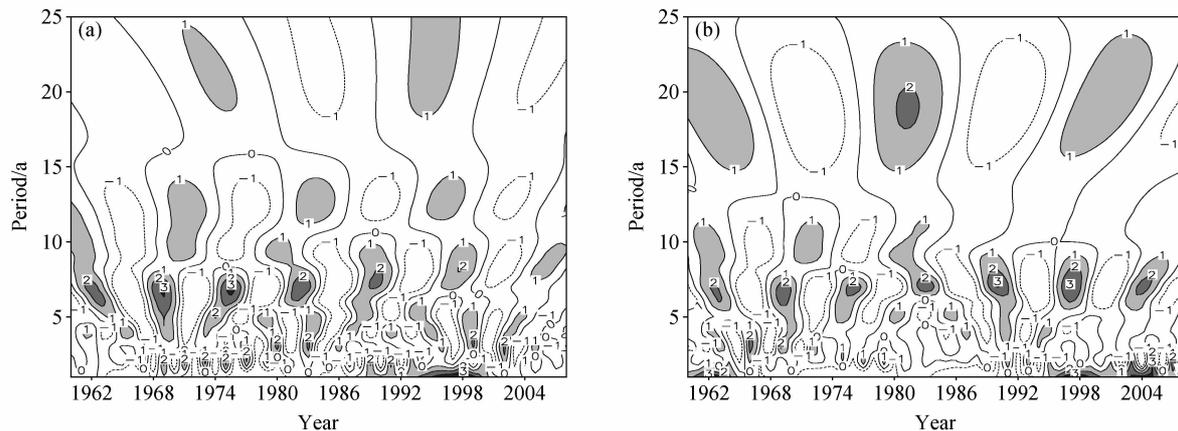


图 4 1960~2008 年长江中下游地区汛期 (5~9 月) 年平均 (a) 暴雨量、(b) 暴雨强度的 Morlet 小波变换实部

Fig. 4 The real part of Morlet wavelet transform of rainstorm (a) amount and (b) intensity from May to September during 1960-2008 in the middle and lower reaches of Yangtze River

暴雨量增多。

图 5b 为汛期暴雨频次的变化。异常值出现年份与图 5a 匹配得很好。20 世纪 70、80 年代暴雨频次相比 60 年代有所增加, 而 90 年代增加幅度就更显著了, 其距平值几乎全部为正。从 11 年滑动平均看, 暴雨频次在 90 年代呈现明显增长趋势, 尤其是 1998、1999 年。这两年正是长江流域洪涝很严重的年份。这种年代际的增长趋势以前也被揭示过 (鲍名和黄荣辉, 2006)。但是进入 21 世纪以后, 暴雨频次就有所减少, 不过绝大多数年份仍以正距平为主, 即相比前 30 年的平均还是有所增加。

图 5c 反映的是暴雨强度的变化。近 50 年来, 暴雨强度 11 年滑动平均曲线十分平缓, 变化幅度小, 总体上都介于 $70 \sim 90 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ 。

为了进一步分析暴雨指标特征的年代际变化, 分别对各序列进行了 Mann-Kendall 突变检验, 结果见图 6。从暴雨量序列检验结果 (图 6a) 看来, 该区暴雨降水在 60 年代末呈现最小值, 之后就进入一个增长期。1988 年, 曲线 UF 与 UB 相交, 且交点位于 0.05 显著性水平临界线之间, 表明该区暴雨降水在 80 年代末发生了较明显的年代际跃变。之后 80 年代末到 90 年代末表现为比较稳定的增长趋势。特别是到 1999 年, 暴雨量偏多的趋势超过了置信区间 ($-1.96 \sim 1.96$)。而 21 世纪以后, 暴雨量开始减少, 多年维持在正距平。这与上述暴雨量时间域的年代际变化分析非常一致。

图 6b 为暴雨频次序列的突变检验结果, 与暴雨量突变检验变化趋势很相似, 都在 1962 出现高值后转入低值期, 到 60 年代末开始逐步增长, 于 80 年代末发生突变, 随后增长趋势加剧, 在 1998、1999 年超过置信区。21 世纪, 整个形态就变得平稳了。

降水强度的突变检验和上面特征量的检验结果有所差别。图 6c 清晰地显示: 降水强度从 20 世纪 60 年代末从正距平向负距平转变, 但是直到 90 年代末都维持在较低水平, 1978 年和 1988 年位于了临界值边缘, 强度低值最为明显。直到 2000 年强度才开始又由负距平向正距平转变。这一结果说明暴雨降水强度自 60 年代末开始有减少的趋势, 即极端大暴雨较少发生, 而自 90 年代末开始, 暴雨降水强度有增加的趋势, 即极端大暴雨有多发趋势, 尽管总的暴雨频次和暴雨量减少了。值得指出的是, 由于对有多尺度波动序列的检验, Mann-Kendall 尚存有难度, 即暴雨强度检验结果中两序列的交叉点处不能说明存有跃变。因此, 需结合图 5c 来分析。总的看来, 暴雨强度在近 50 年相对稳定, 其变化幅度相比暴雨量和暴雨频次要小得多。

4.3 空间域上的年代际变化

图 7 为各年代的汛期暴雨量的分布。总体上看, 各个年代大值中心所在范围比较稳定, 但强度有所差异。1960 年代 (图 7a), 暴雨量大值区域 ($\geq 300 \text{ mm}$) 位于江西北部。苏北沿海以及湖

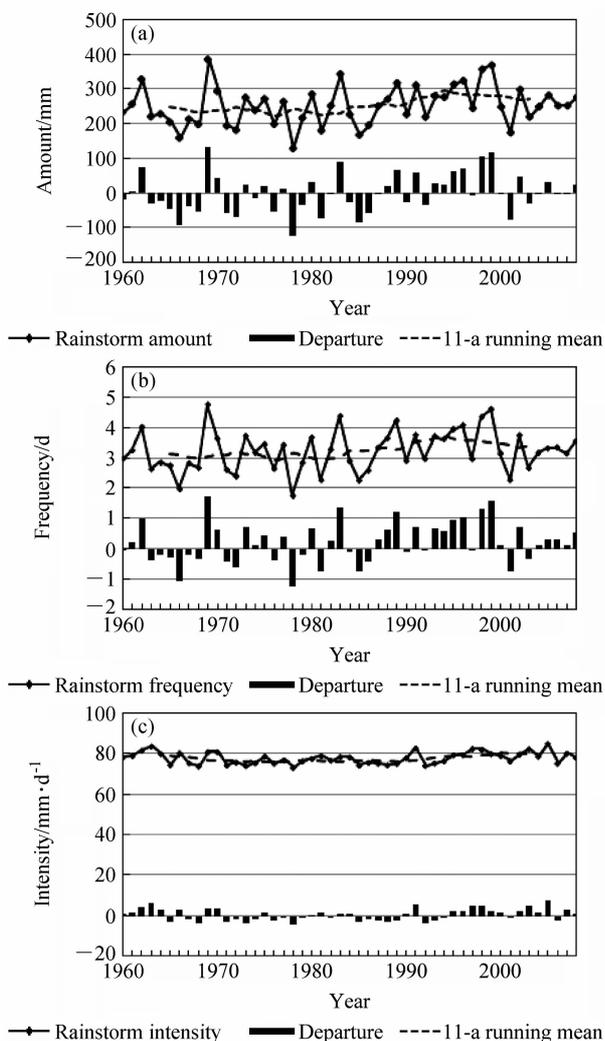


图5 1960~2008 汛期各暴雨特征量年平均、距平以及11年滑动平均 (a) 暴雨量、(b) 暴雨频次、(c) 暴雨强度
Fig. 5 The average, anomalies, and 11-year moving average of the (a) rainstorm amount, (b) rainstorm frequency, and (c) rainstorm intensity from May to September during 1960 - 2008

北西部也有小范围的分布。70年代(图7b),暴雨量大值区域范围有所缩小,与汛期总降水年代际减少、长江流域较早一致。到了80年代(图7c),暴雨量最大值明显增加,有350 mm以上的大值区,且中心较60、70年代北抬明显,并涵盖江西、安徽和湖北三省的交界处,但此期间苏北地区的暴雨量大值却明显减少了。反映了雨带在长江中下游停滞、降水增多的年代际变化。进入90年代(图7d),暴雨量的变化就更加明显了,其大值由80年代的350 mm跃变至450 mm。暴雨量超过300 mm的区域,也从三省交界区延展到

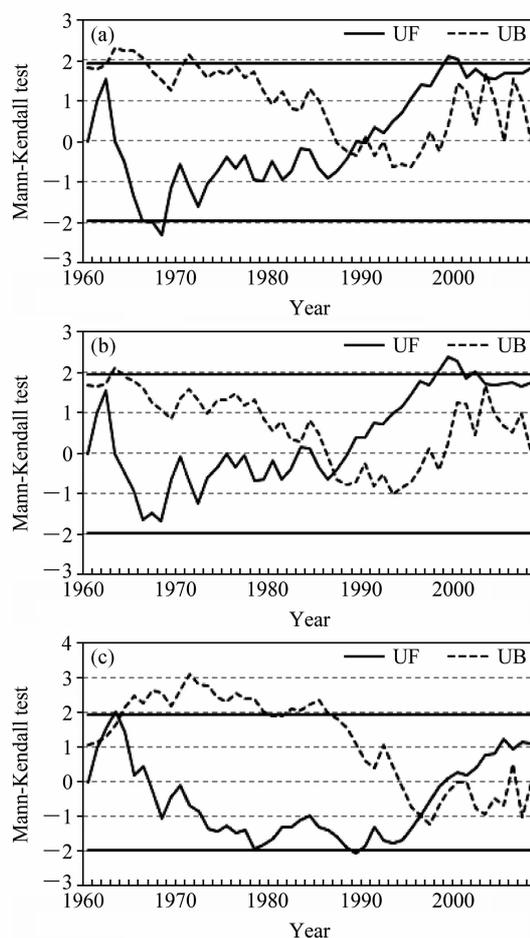


图6 1960~2008 年汛期各暴雨特征量的 Mann-Kendall 突变检验: (a) 暴雨量; (b) 暴雨频次; (c) 暴雨强度。水平实线为 Mann-Kendall 检验 5% 显著性水平临界值

Fig. 6 The Mann-Kendall test of (a) rainstorm amount, (b) rainstorm frequency, and (c) rainstorm intensity from May to September during 1960 - 2008. The solid lines indicate the 0.05 significance level of the Mann-Kendall test

湖南北部,从西向东形成一个连续区域。另外,江苏北部的大值区再次呈现,且范围较60、70年代有进一步的扩展。之后21世纪近10年(图7e),暴雨量大值减弱了,恢复到了300 mm。除苏北大值区变得异常突出外,其它主要的大值中心较之前明显缩小。苏北的暴雨量增加再一次反映了雨带向淮河流域移动的观测事实。浙江沿海也出现了大值区,这可能与这个时期登陆台风更强有关(俞燎霓等,2007)。

暴雨量在近50年中,20世纪60至70年代为偏少期,90年代为多雨期,这与赵勇和钱永甫(2008)研究结果相同。但是21世纪以后,该区

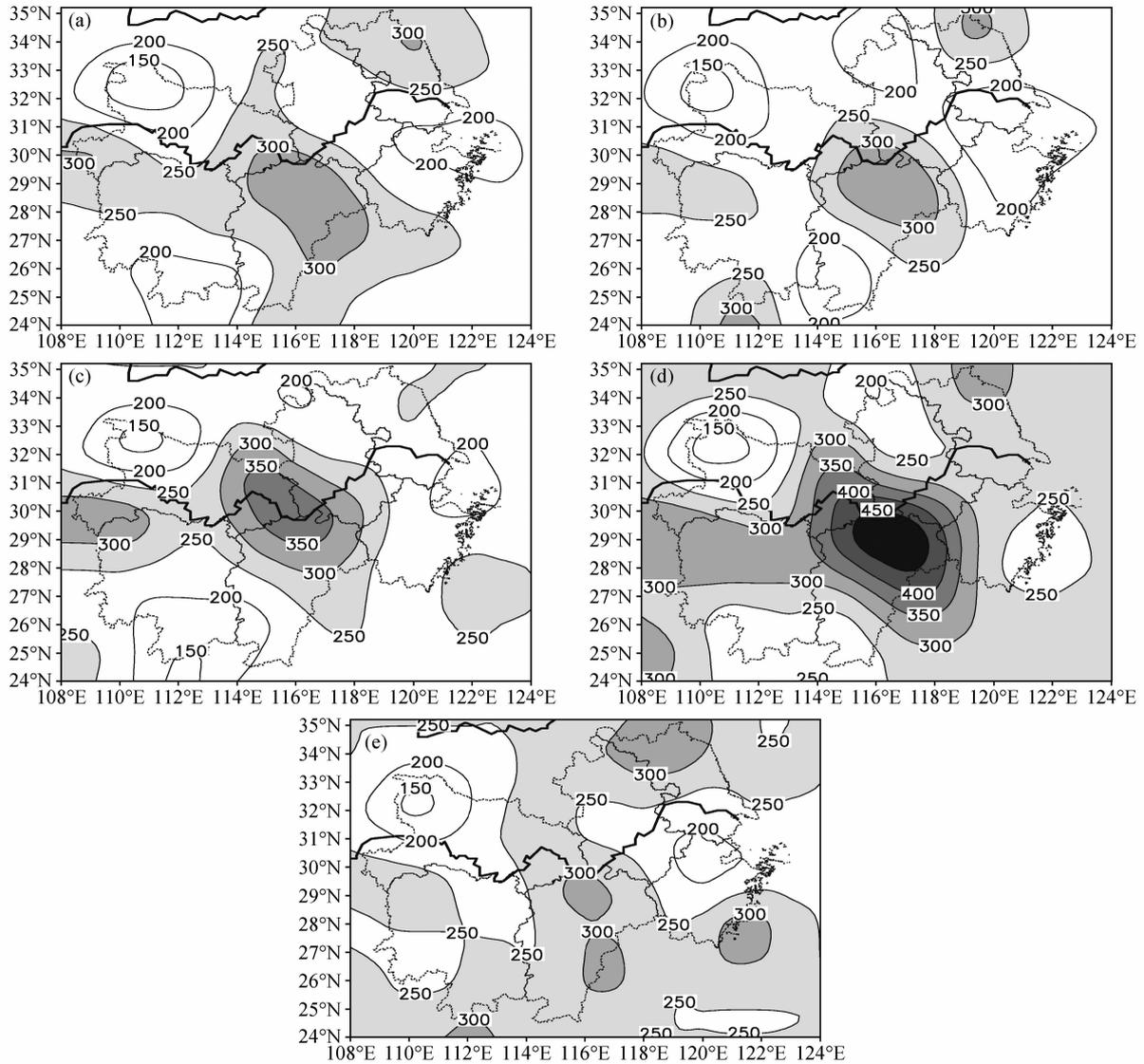


图7 各个年代汛期平均暴雨量分布 (单位: mm): (a) 1960年代; (b) 1970年代; (c) 1980年代; (d) 1990年代; (e) 2000~2008年

Fig. 7 Distributions of the decadal mean of rainstorm amount (mm) from May to September in (a) the 1960s, (b) the 1970s, (c) the 1980s, (d) the 1990s, and (e) during 2000–2008

大部分地区都进入少暴雨期, 仅苏北以及皖东北暴雨偏多, 与雨带向淮河流域推进应该有关。这是一个新特点。

暴雨频次的年代际变化与暴雨量也很相似 (图8所示)。20世纪60年代, 暴雨频次大值区主要位于赣北, 另外苏北沿海以及两湖西部也有小范围的分布。进入70年代后, 随着全区暴雨量的减少, 频次大值区也相应缩小, 但最大值区 (≥ 4 d) 的范围却有所扩展。80年代, 暴雨频次的变化就很显著了, 大值中心有4 d增至4.5 d, 且整

个大值区明显北抬, 只是苏北的暴雨频次减少, 维持于60、70年代 (≥ 3.5 d) 的大值区消失。到了90年代, 频次跃变最为突出, 最大值增大到5.5 d, 长江以南, 两湖形成连续 (≥ 3.5 d) 大值区。另外, 苏北的大值区又重新呈现。而近10年, 全区暴雨频次回落至3~3.5 d, 区域差异并不显著, 只是苏北的大值区延伸至皖东北, 变化最为突出。总体上, 暴雨频次的年代际变化与暴雨量是一致的。

图9显示了暴雨强度分布的年代际变化。与

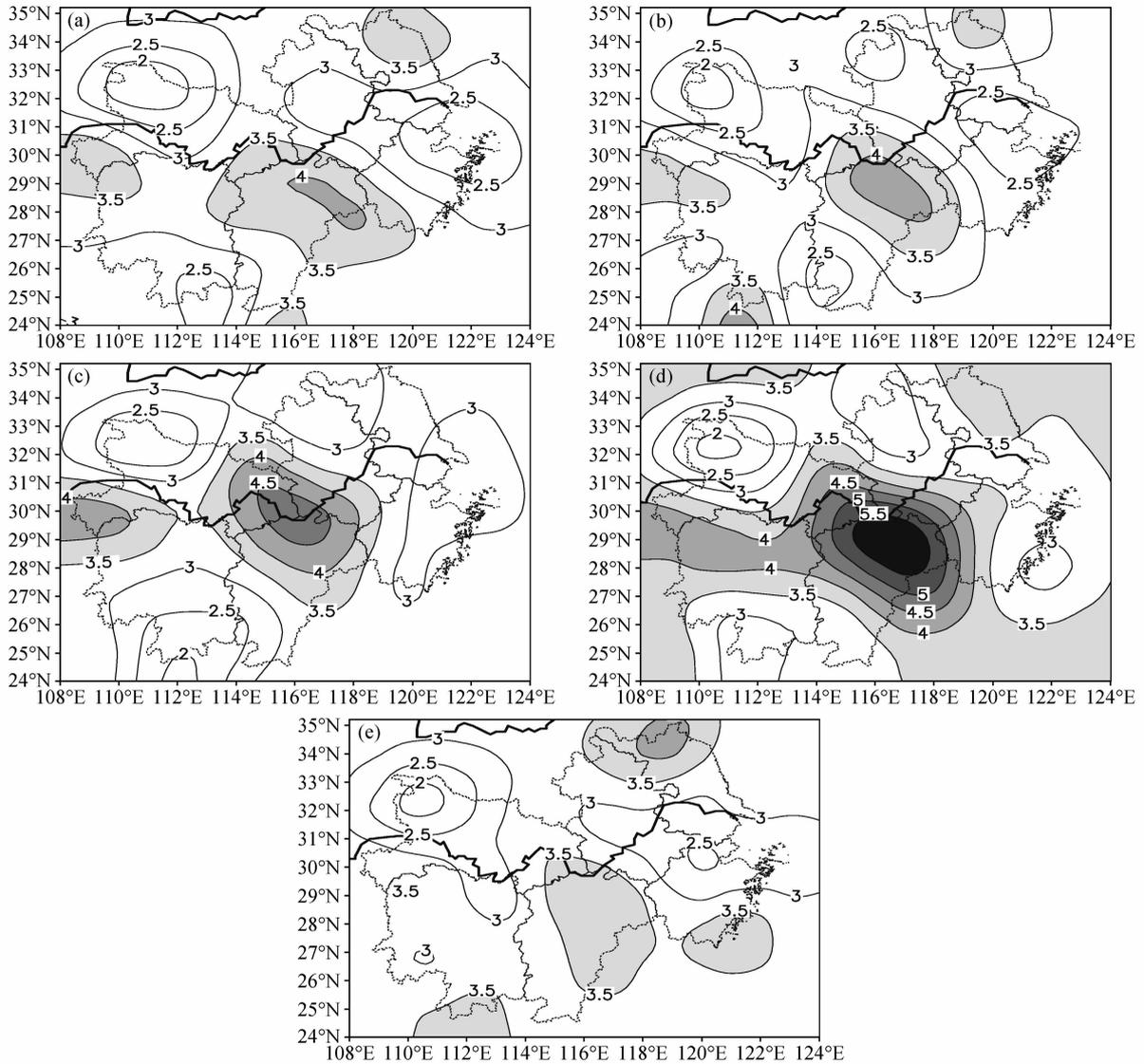


图8 同图7, 但为各个年代汛期平均暴雨频次分布(单位: d)

Fig. 8 Same as Fig. 7, but for rainstorm frequency (d)

暴雨量、暴雨频次相比, 差异显著。20世纪60年代(图9a)最强, 其最大值达到 $90 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$, 位于长江口的江苏沿海。强度大于 $80 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ 的范围在江苏、浙江分布较广, 另外在湖北和江西还形成一个强度大值狭长带。70年代(图9b), 整体强度减弱, 超过 $80 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ 强度范围缩小到零散的3个小区域: 苏北、赣北以及浙江沿海。80年代(图9c), 苏北强度大值中心扩展至安徽东北部, 而江西大值中心则北移至湖北安徽交界处。到了90年代(图9d)暴雨强度大值范围继续延展, 在长江以北以及江西北部形成片状区域, 同时在湖南西部以及浙江、江苏沿海也出现强度大

于 $80 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ 的区域。进入21世纪后(图9e), 大值区的范围就更加广阔了, 几乎涵盖了长江以北所有地区, 而长江以南地区包括浙江沿海、江西南部大值区域也有增强。

长江中下游汛期暴雨强度, 从时间域来看, 除了20世纪60年代出现过 $90 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ 的强度, 之后各年代绝大部分地区强度都始终维持在 $75 \sim 80 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ 的范围。但是, 在空间分布上却体现出明显的年代际变化, 强度大值范围表现出明显的由南向北推移的特征。

相比较而言, 暴雨量与暴雨频次的年代际分布不论是时间上还是空间上都很好的匹配, 但是

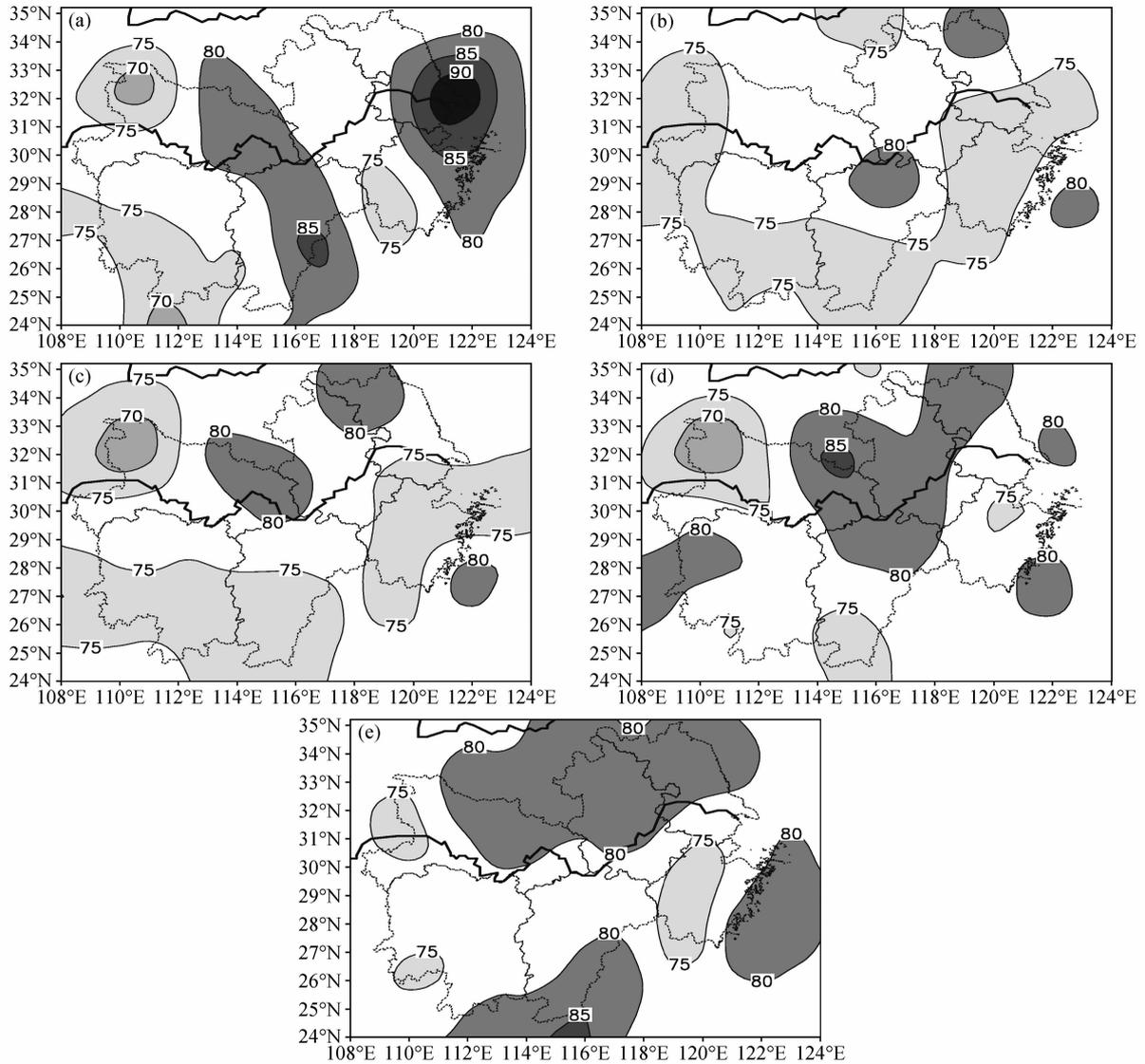


图 9 同图 7，但为各个年代汛期平均暴雨强度分布 (单位: $\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$)

Fig. 9 Same as Fig. 7, but for rainstorm intensity ($\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$)

与暴雨强度则有较为明显的区别。这就说明该区域暴雨量的变化主要是由暴雨频次引起的。同时在分析中还注意到苏北地区无论是暴雨量、频次还是暴雨强度在年代际变化过程中都在增多、增强，这与雨带逐渐北移有着必然的联系。

4.4 趋势分析

图 10a 为汛期暴雨量的趋势变化。近 50 年，长江中下游大部分站点呈现增长趋势，在选取的 88 个站点中 69 站表现为上升趋势，不过仅 4 站通过了显著性检验。安徽以及湖南南部增长趋势最大最明显，趋势系数达到 0.34 左右，对应其气候倾向 (图略) (每 10 年气象要素的变化值)，分别

为 55.27 和 42.14 $\text{mm} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ ，即相当于约 10 年增加一场暴雨。江西北部位于大值区的站点暴雨量依旧呈现较为明显的增长趋势，其气候倾向达 56.58 $\text{mm} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ 。而另外的 19 个站点表现出减少趋势，但是趋势并不显著，这与 1960~2004 年汛期 (5~9 月) 暴雨量的气候趋势 (张文等, 2007) 相比有了一定的差异，减少趋势不仅仅表现在该区域的东北部，暴雨量减少的站点在各省都有出现。而暴雨频次趋势分析 (图略) 显示: 64 站呈现增长趋势，24 站为减少趋势，与暴雨量趋势基本同步。

暴雨强度的气候趋势 (图 10b)，52 站呈现增

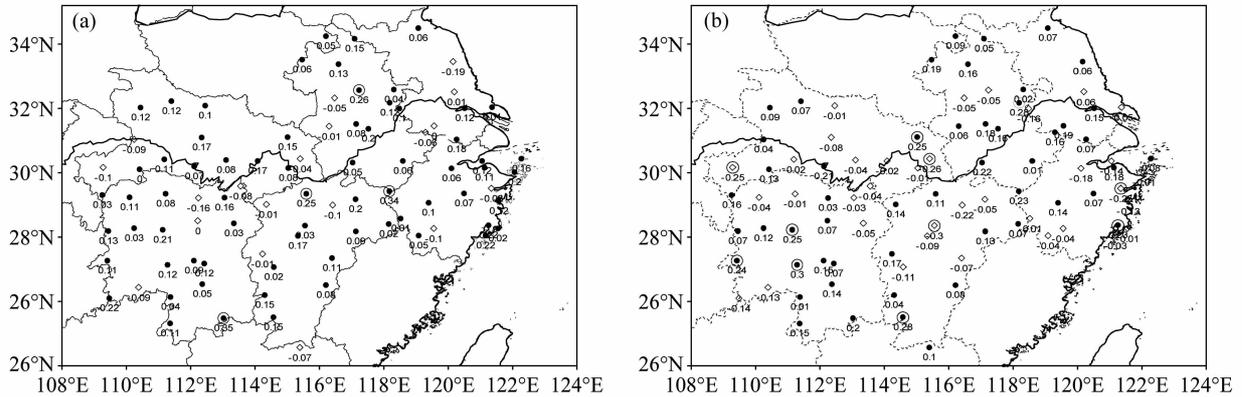


图 10 长江中下游汛期 (a) 暴雨量和 (b) 暴雨强度气候趋势 (空心菱形代表趋势系数 <0 , 实心圆代表趋势系数 ≥ 0 , 空心圆代表通过 90% 信度检验的区域)

Fig. 10 The climatic trends of the rainstorm (a) amount and (b) intensity (hollow diamonds <0 , solid circles ≥ 0). The hollow circles are above 90% confidence level

长趋势, 其中 6 站通过显著性检验; 36 站呈现减弱趋势, 其中有 4 站通过了显著性检验。整体上, 安徽、湖南暴雨强度增强趋势最显著, 个别站点增长趋势系数达到 0.3, 对应气候倾向值为 $5.74 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ 。另外还存在一些趋势系数大于 0.25 增长显著的站点。而近 50 年来, 一直位于暴雨大值中心江西北部的部分站点的强度却呈现出显著减弱的趋势。

从趋势分布形势看到, 长江中下游绝大部分地区无论是暴雨量、频次还是强度都呈现了增长的趋势, 尽管通过显著性检验的站点并不是很多。江苏、安徽北部站点的暴雨量、频次和强度也都表现出了增长趋势, 与上述年代际分析一致。

5 结论

利用长江中下游地区 1960~2008 年逐日降水量, 研究了该区域近 50 年来暴雨的变化特征, 得到以下几点主要结论:

(1) 气候场分布上, 汛期暴雨量对降水总量贡献大, 其分布与降水量分布基本吻合, 最大值中心位于江西北部、安徽南部, 与主汛期 (6、7 月) 暴雨的空间分布相似。而汛期的最小值区则由主汛期 (6、7 月) 分布区域湖北西北部、江苏南部和浙江东部, 转移至湖北西北部以及湖南、江西南部。总体上, 汛期暴雨量表现为南多北少, 而暴雨强度呈现北强南弱的分布形式。暴雨量、

频次、强度季节变化显著, 区域差异明显。春季由于雨带影响, 暴雨量、频次大值区位于江南, 夏季开始北抬, 秋季全区雨量、频次减弱, 大值仅出现在浙江沿海。暴雨强度春季较小, 夏季长江以北强度达到最大, 秋季浙江沿海暴雨强度最明显。

(2) 该区暴雨量、频次、存有准两年及 6~8 年的年际变化, 暴雨强度则存有 6~8 年的年际变化。从年代际尺度看, 在时间域上, 存在准 12~14 年的周期变化。具体地, 暴雨量在 20 世纪 60、70 年代相对平稳; 80 年代暴雨量开始逐步增加, 到了 90 年代, 暴雨量增多最为明显为高值期; 进入 21 世纪后的近 10 年, 暴雨量有所减少。这一结果与主汛期 (6~8 月) 的年代际变化分析结果是一致的, 都在 90 年代表现最为明显。空间域上: 暴雨量的大值中心在上世纪各个年代维持稳定, 但是在近十年其范围和数值有向长江以北尤其是安徽、江苏北部呈现扩大趋势, 而暴雨强度在整个长江以北地区呈现增强的形势。

(3) 从长期趋势看, 长江中下游汛期暴雨量、频次呈现较大范围增加的趋势, 而暴雨强度也呈现了一定程度的增长趋势。

通过对长江中下游汛期暴雨的变化特征统计分析看到: 进入 21 世纪后, 长江中下游总的暴雨量、暴雨频次减少, 但江苏北部和安徽北部的暴雨量、频次和强度却都在逐步增强。这些特征与雨带向淮河流域移动有着必然联系。趋势分析也

反映出安徽、江苏北部暴雨呈现增长的趋势。这是本文揭示的新事实。

值得指出的是, 本文没有区分导致暴雨趋势变化的天气系统的演变, 即只是一个统计分析。与暴雨趋势变化有关的物理过程本文没有分析。此外, 江浙沿海一带的暴雨很多与台风登陆有关, 而登陆本身台风强度、路径和个数的年代际变化是一个不清楚、值得研究的课题。这些都是今后的任务。

参考文献 (References)

- 鲍名, 黄荣辉. 2006. 近 40 年我国暴雨的年代际变化特征 [J]. 大气科学, 30 (6): 1057 - 1067. Bao Ming, Huang Ronghui. 2006. Characteristics of the interdecadal variations of heavy rain over China in the last 40 years [J]. Chinese Journal of Atmospheric Science (in Chinese), 30 (6): 1057 - 1067.
- 陈敏, 郑永光, 陶祖钰. 1999. 近 50 年 (1949~1996) 西北太平洋热带气旋气候特征的再分析 [J]. 热带气象学报, 15 (1): 10 - 16. Chen Min, Zheng Yongguang, Tao Zuyu. 1996. An analysis on the tropical cyclones' climatic feature in the western North Pacific for 1949 - 1996 [J]. Journal of Tropical Meteorology (in Chinese), 15 (1): 10 - 16.
- 丁一汇. 1998. 陶诗言先生与中国暴雨 [C] // 中国科学院大气物理研究所. 东亚季风和中国暴雨—庆贺陶诗言先生八十华诞集. 北京: 气象出版社, 137 - 141. Ding Yihui. 1998. Professor Tao Shiyan and Torrential rain in China [C] // East Asian Monsoon and Torrential Rain in China. Edited by Institute of Atmosphere Physics, Chinese Academy of Sciences (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 137 - 141.
- 黄丹青, 钱永甫. 2007. Community Climate Model 3 模拟夏季极端降水的初步分析 [J]. 南京大学学报 (自然科学版), 43 (3): 238 - 247. Wang Danqing, Qian Yongfu. 2007. The elementary analysis of summer extreme precipitation events simulated by community climate model 3 [J]. Journal of Nanjing University (Natural Science) (in Chinese), 43 (3): 238 - 247.
- 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.
- 李吉顺, 冯强, 王昂生. 1996. 我国暴雨洪涝灾害的危险性评估 [M] // 台风、暴雨预报报警系统和减灾研究. 北京: 气象出版社. Li Jishun, Feng Qiang, Wang Angsheng. 1996. The Dangerous Evaluating of Severe Rain and Flood Disaster in China [M] (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press.
- 骆承政, 乐嘉祥. 1996. 中国大洪水—灾害性洪水述要 [M]. 北京: 中国书店出版社, 1 - 434. Luo Chengzheng, Le Jiaxiang. 1996. The Flood Disasters in China [M] (in Chinese). Beijing: China Bookstore, 1 - 434.
- 毛文书, 王谦谦, 王永忠, 等. 2006. 近 50 a 江淮梅雨期暴雨的区域特征 [J]. 南京气象学院学报, 29 (1): 33 - 40. Mao Wenshu, Wang Qianqian, Wang Yongzhong, et al. 2006. Regional features of the torrential-rain of the Meiyu period in the Changjiang - Huaihe Region [J]. Journal of Nanjing Institute of Meteorology (in Chinese), 29 (1): 33 - 40.
- Matsumoto J, Takahashi K. 1999. Regional differences of daily rainfall characteristics in East Asian summer monsoon season [J]. Geographical review of Japan, 72B: 193 - 201.
- 平凡, 罗哲贤, 琚建华. 2006. 长江流域汛期降水年代际和年际尺度变化影响因子的差异 [J]. 科学通报, 51 (1): 104 - 109. Ping Fan, Luo Zhexian, Ju Jianhua. 2006. Differences between dynamics factors for interannual and decadal variations of rainfall over the Yangtze River valley during flood seasons [J]. Chinese Science Bulletin (in Chinese), 51 (8): 994 - 999.
- 施能, 陈家其, 屠其璞. 1995. 中国近 100 年来 4 个年代的气候变化特征 [J]. 气象学报, 53 (4): 431 - 439. Shi Neng, Chen Jiaqi, Tu Qipu. 1995. 4-Phase climate change features in the last 100 years over China [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 53 (4): 431 - 439.
- 司东, 丁一汇, 柳艳菊. 2010. 中国梅雨雨带年代际尺度上的北移及其原因 [J]. 科学通报, 55 (1): 68 - 73. Si Dong, Ding Yihui, Liu Yanju. 2009. Decadal northward shift of the Meiyu belt and the possible cause [J]. Chinese Science Bulletin (in Chinese), 54 (24): 4242 - 4748.
- Tao Shiyan, Ding Yihui. 1981. Observational evidence of the influence of the Qinghai - Xizang (Tibet) Plateau on the occurrence of heavy rain and severe convective storms in China [J]. Bulletin of American Meteorological Society, 62 (1): 23 - 30.
- 魏风英. 2007. 现代气候统计诊断与预测技术 [M]. 北京: 气象出版社, 61 - 66. Wei Fengying. Modern Climatic Statistical Diagnosis and Prediction [M] (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 61 - 66.
- 杨宏青, 陈正洪, 石燕, 等. 2005. 长江流域近 40 年强降水的变化趋势 [J]. 气象, 31 (3): 66 - 68. Yang Hongqing, Chen Zhenghong, Shi Yan, et al. 2005. Change trends of heavy rainfall events for last 40 years in the Changjiang valley [J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 31 (3): 66 - 68.
- 俞燎霓, 雷媛, 陈晓春, 等. 2007. 近 58 a 年来影响和登陆浙江的热带气旋统计特征分析 [J]. 台湾海峡, 26 (2): 213 - 219. Yu Liaoni, Lei Yuan, Chen Xiaochun, et al. 2007. Statistical analysis on the tropical cyclones affected and landfalled on Zhejiang in recent 58 years [J]. Journal of Oceanography in Taiwan Strait (in Chinese), 26 (2): 213 - 219.
- 张建敏, 高敏, 陈峪. 2001. 长江流域洪涝气候背景和致灾因子分析 [J]. 资源科学, 23 (3): 73 - 77. Zhang Jianmin, Gao Min, Chen Yu. 2001. Climate background of flooding and waterlog-

- ging and disaste inducing factors of the Yangtze valley [J]. Resources Science (in Chinese), 23 (3): 73-77.
- 张庆云, 陶诗言, 张顺利. 2002. 夏季长江流域暴雨洪涝灾害的天气气候条件 [J]. 大气科学, 27 (6): 1018-1030. Zhang Qingyun, Tao Shiyang, Zhang Shunli. 2002. The persistent heavy rainfall over the Yangtze River valley and its associations with the circulations over East Asian during summer [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 27 (6): 1018-1030.
- 张顺利, 陶诗言, 张庆云, 等. 2001. 1998 年夏季中国暴雨洪涝灾害的气象水文特征 [J]. 应用气象学报, 12 (4): 442-457. Zhang Shunli, Tao Shiyang, Zhang Qingyun, et al. 2001. Meteorological and hydrological characteristics of severe flooding in China during the summer of 1998 [J]. Quarterly Journal of Applied Meteorology (in Chinese), 12 (4): 442-457.
- 张小玲, 陶诗言, 卫捷. 2006. 20 世纪长江流域 3 次全流域灾害性洪水事件的气象成因分析 [J]. 气候与环境研究, 11 (6): 669-682. Zhang Xiaoling, Tao Shiyang, Wei Jie. 2006. An analysis on the basin-wide catastrophic floods in the Yangtze River during the 20th century [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 11 (6): 669-682.
- 张文, 寿绍文, 杨金虎. 2007. 长江中下游地区汛期极端降水量的异常特征分析 [J]. 气象, 33 (3): 61-67. Zhang Wen, Shou Shaowen, Yang Jinhua. 2007. Analysis of anomaly characteristics of extreme precipitation in flood season in the mid-lower reaches of the Yangtze River [J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 33 (3): 61-67.
- 赵勇, 钱永甫. 2008. 夏季江淮流域暴雨的特征及与旱涝的关系 [J]. 南京大学学报 (自然科学版), 44 (3): 237-249. Zhao Yong, Qian Yongfu. 2008. Characteristics of the severe rain and its relation to flood and drought in the Changjiang and Huaihe areas in summer [J]. Journal of Nanjing University (Natural Science) (in Chinese), 44 (3): 237-249.
- 朱宵峰, 钱永甫, 宁亮, 等. 2008. 长江下游地区汛期暴雨气候特征分析 [J]. 热带气象学报, 24 (2): 136-146. Zhu Xiaofeng, Qian Yongfu, Ning Liang, et al. 2008. An analysis on the climatic features of the rainfall of rain storms in the rainy season in the lower reaches of Yangtze River [J]. Journal of Tropical Meteorology (in Chinese), 24 (2): 136-146.