金炜昕, 李维京, 孙丞虎, 等. 2015. 夏季中国中东部不同历时降水时空分布特征 [J]. 气候与环境研究, 20 (4): 465−476. Jin Weixin, Li Weijing, Sun Chenghu, et al. 2015. Spatiotemporal characteristics of summer precipitation with different durations in central East China [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 20 (4): 465−476, doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2015.14268.

夏季中国中东部不同历时降水时空分布特征

金炜昕[1,2] 李维京[2] 孙丞虎[2] 左金清[2]

1 北京市气候中心，北京 100089

2 中国气象局气候研究开放实验室，北京 100081

摘 要 利用 1961～2012 年台站逐时降水资料，分析了夏季中国中东部不同历时降水的主要气候分布和长期变化特征，为深入认识其时空变化规律和形成机理奠定基础。分析结果表明，降水事件的平均历时由南向北呈“短—长—短”分布型，华南和北方地区以 6 h 以下的短历时降水为主；而中部地区（28°N～37°N）6 h 以上长历时降水占总降水量 60%以上。随着降水历时的增加，小雨事件（0.1～1.0 mm/h）的发生概率降低，中雨事件（1.1～10.0 mm/h）的发生概率升高；大雨、暴雨事件（＞10.0 mm/h）更易出现在 35°N 以南历时偏短的降水事件中。1961～2012 年，中国中东部总降水量呈“南升北降”的趋势分布，夏季南方大部分地区降水强度、时数和事件数均呈上升趋势；而北方地区降水时数和事件数显著减少，不过降水强度呈增强趋势。中东部降水历时总体呈上升趋势，尤其以我国长江与黄河之间的中部地区变化最为显著。同时，该地区短历时（1～6 h）降水无显著的年代际转折，长历时（＞6 h）降水的年代际增加是 20 世纪 70 年代末至 20 世纪 90 年代初降水增多的主要原因。20 世纪 90 年代初期以来，南方地区降水的年代际增多则是长、短降水共同作用的结果，但超过 6 h 降水的影响范围更广，且影响中心较短历时降水偏北。

关键词 小时降水 降水强度 降水历时 线性趋势 年代际变化

文章编号 1006-9585（2015）04-0465-12 **中图分类号** P467 **文献标识码** A

doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2015.14268

Spatiotemporal Characteristics of Summer Precipitation with Different Durations in Central East China

JIN Weixin[1,2], LI Weijing[2], SUN Chenghu[2], and ZUO Jinqing[2]

1 *Beijing Municipal Climate Center*, *Beijing* 100089

2 *Laboratory for Climate Studies*, *China Meteorological Administration*, *Beijing* 100081

Abstract Based on the dataset of hourly rain gauge records in central East China for the period 1961–2012, the spatiotemporal characteristics of summer rainfall events in terms of their durations are analyzed. The results show that the rainfall duration exhibits a short–long–short meridional pattern in central East China, i.e., short-duration rainfall events (1–6 h) prevail in southern and northern China, whereas long-duration rainfall events (＞6 h) contribute more than 60% to the total rainfall in the region between about 28°N and 37°N. As the duration increases, the occurrence of light rainfall events with intensity weaker than 1 mm/h decreases, while the occurrence of moderate rainfall events with intensify

收稿日期 2014-12-14；**网络预出版日期** 2015-05-05

资助项目 国家重点基础研究发展计划项目 2013CB430203、2012CB955901，公益性行业（气象）科研专项 GYHY201406018、GYHY201306033，国家自然科学基金项目 41205058

作者简介 金炜昕，男，1990 年出生，硕士，主要从事短期气候预测研究，E-mail: jinwx@outlook.com

通讯作者 李维京，研究员，主要从事短期气候预测研究，E-mail: liwj@cma.gov.cn

between 1.1 mm/h and 10.0 mm/h increases. Rainfall events with intensity stronger than 10.0 mm/h tend to be characterized by relatively short duration in the region south of about 35°N. The total summer rainfall amount increases in southern China due to the increasing trends of both intensity and occurrence, and decreases in northern China with decreasing occurrence but increasing intensity. The rainfall duration generally shows an increasing trend in central East China, especially in the region between the Yangtze River and Yellow River. The significant increase of total rainfall amount in this region from the late 1970s to early 1990s is mainly attributed to the increase of long-duration rainfall amount, while no obvious interdecadal abrupt change is detected in the short-duration rainfall amount. The significant increase of total rainfall amount in southern China after the early 1990s is related to both the increase of long-duration and short-duration rainfall amount, but the impact of the former is more wide-ranging and northward.

Keywords Hourly rainfall, Rainfall intensity, Rainfall duration, Linear trend, Interdecadal change

1 引言

中国中东部地区夏季降水受到中低纬季风环流和中高纬冷空气活动的共同影响，具有显著的时空变化特征。在空间分布上，夏季平均降水量由华南向西北方向递减，东南沿海为我国降水最为丰沛的区域，夏季平均降水量超过 500 mm；而在华北、东北等北方地区，夏季平均降水量在 400 mm 以下。在时间分布上，中东部雨带位置具有显著的年代际变化特征。如 Ding et al.（2008）发现，近 60 年来夏季降水空间分布由经向的“正—负—正”分布型向偶极型转变。同时，伴随着中东部降水在 1978 年前后和 1992 年前后发生的两次年代际转折，多雨带逐步向南方移动（Gong and Ho，2002；周连童和黄荣辉，2003；孙林海和陈兴芳，2004；Wang et al.，2004；Wu et al.，2010）。从 20 世纪后 50 年至 21 世纪初，中东部降水量的变化趋势主要表现为“南涝北旱”格局，即长江中下游降水量明显增多，而黄河流域至华北一带降水量有所减少（任国玉等，2000；Hu et al.，2003；Tu et al.，2010）。而且，极端降水的变化趋势与累积降水基本一致（Zhai et al.，2005）。Song et al.（2011）进一步指出，南方地区雨季（5～9 月）降水强度呈增强趋势，且 11～50 mm 和大于 50 mm 的降水日数均呈上升趋势；而北方地区降水量的减少主要与雨日的减少有关。

由于地面观测资料的限制，以上研究都局限于关注基于日或月平均资料所得到的夏季中国中东部降水的时空演变特征。然而，暴雨洪涝等灾害往往与短时间内的极端降水有关。且从长期变化的角度看，气候变暖背景下短时强降水的增加速率可能大于日极端降水的增加速率（Yin et al.，2011）。有研究指出，逐时强降水的时空分布与洪涝灾害数据有很好的对应关系（Hitchens et al.，2013）。时间分辨率更高的逐时资料能够提供降水强度、持续时长、日变化等统计特征，因此对深入了解降水（尤其是极端降水）的时空变化规律具有极其重要的意义（Trenberth，1998；Trenberth et al.，2003）。

另一方面，降水历时也是衡量降水时空变化的重要因素，不同历时降水可能是不同时间尺度天气系统的影响结果。因此，研究不同历时降水的基本时空分布特征和变化规律，有助于认识不同时间尺度降水的影响因子与形成机理。近年来，国内一些学者采用逐时资料研究了夏季中国中东部降水的时空分布，并指出了降水历时的重要性。Yu et al.（2007）将中国东部地区暖季（5～9 月）降水区分为长历时（＞6 h）和短历时（1～3 h）两类，发现不同地区长、短历时降水比率的空间分布差异很大，并推测不同历时降水的产生可能源于不同的物理机制。Li et al.（2008）针对北京地区逐时降水的分析表明，降水日变化在午后的峰值主要由短历时降水引起，这可能与太阳辐射加热密切相关；而发生于凌晨的降水峰值则主要是由长历时降水构成。Yuan et al.（2010）进一步指出，长历时（>6 h）降水带的季节内移动与季风雨带相似，达到峰值的日期与季风降水相近；而在季风降水减弱后短历时降水（1～6 h）逐渐达到峰值，且多发生于临近热带的低纬地区。由此推测，长历时降水可能与大尺度锋面系统有关，而短历时降水常由台风或其它中小尺度对流系统造成，这也为不同历时降水的划分提供了理论依据。

基于逐时资料，还有一些学者研究了夏季中国中东部不同历时降水的长期变化趋势。Yin et al.

（2011）分析了海河流域夏季小时降水的长期变化特征，发现长、短历时降水量均呈减少趋势，但短历时降水量占总降水比重增加，且雨强呈增加趋势，这可能与对流层上下层热力差异加剧有关。Yu et al.（2010）对夏季长江中下游地区逐时降水的分析发现，该区域降水量虽呈增多趋势，但小时降水强度有所减弱，这与前人基于逐日资料所得到的结论（Li et al.，2008）有所不同。Yu et al.（2010）还指出，虽然长江中下游地区小时降水强度略下降，但降水事件历时却是增长的，使得日降水量增多，进而导致日降水强度的增大。Li et al.（2011）对比研究了华北和长江中下游地区长、短历时降水的变化，指出近 50 年来“北旱”主要与长历时降水的减少有关，“南涝”则是由长历时降水和短历时降水的共同增加造成的。

由此可见，不同历时降水往往具有明显不同的时空分布特征，将降水按历时区分开研究，不仅可以从新的角度探讨夏季中国中东部降水特征，还为降水的机理研究带来了新的思路。逐时降水资料的使用则为此提供了有利的数据基础。然而，目前已有的研究仍主要着眼于不同历时降水空间分布、日变化等的气候态特征及其与大气环流的联系等方面的分析（Li et al.，2008；Yin et al.，2009；Yuan et al.，2010）。在不同历时降水的长期演变特征分析方面，已有研究仅初步探讨了其线性变化趋势，且空间上仅局限于长江中下游或海河流域等局部地区（Yu et al.，2010；Li et al.，2011；Yin et al.，2011）。但对于中国整个中东部而言，夏季不同历时降水的主要时空分布特征有何差异？不同历时降水对中东部夏季雨带的年代际变化是否具有不同影响？目前我们对这些问题仍不十分清楚。本文采用了序列较长（52 年），空间范围较大（覆盖中国 100°E 以东地区）的逐时降水资料进行气候研究，并将降水事件按历时进行更细致的划分，从降水量、历时、强度等多方面入手，研究中国中东部 1961～2012 年不同历时降水的平均状态及长期演变特征，从而为深入了解夏季中国中东部不同历时降水的时空分布规律以及形成机理奠定基础。

2 资料与方法

本文所用降水资料为中国国家级地面气象站逐小时降水数据集，该资料由中国气象局气象信息中心提供并经过质量控制。受资料限制，本文的研究范围取为中国中东部（100°E 以东）地区，研究时段取为 1961～2012 年夏季（6～8 月）。为避免缺测数据的影响，计算了每站每年夏季的数据缺测率，将缺测率大于 5%的年份定义为缺测年，并剔除了缺测年超过 1 年的站点。最终我们选取了 510 站作为研究对象，空间分布及台站海拔高度如图 1 所示。

本文将降水量≥0.1 mm 的时次定义为降水小时；降水时数为累积降水小时数。为研究不同历时降水事件的时空变化特征，本文首先识别并统计了各站的降水事件。参照前人方法（Yu et al.，2007；Yin et al.，2011），以 2 h 为界限划分两次降水事件，即当一次降水过程连续 2 h 没有降水时，判断该事件结束，从而降水事件中可能存在不连续的无降水时次。降水历时即为事件从第一个降水小时至最后一个降水小时经过的总时数。降水事件数为夏季降水事件的累积个数。降水事件的强度定义为平均每小时的降水量，即用一次降水事件的总降水量除以该次事件的历时，得到该次降水事件的降水强度。

在研究降水长期特征时，采用最小二乘法计算线性趋势，并通过 Kendall’s tau 方法（Yue et al.，2002）对趋势进行显著性检验。通过滑动 t 方法对时间序列进行年代际突变点检测。

3 不同历时降水气候分布特征

3.1 不同历时降水的空间分布特征

图 2 给出了 1961～2012 夏季中国中东部平均累积降水时数、累积降水事件数和事件平均历时的空间分布。可以看出，降水时数（图 2a）与降水事件数（图 2b）的空间分布具有一定的相似性，总体都呈现南多北少的特征。其中，内蒙古西部及河套西部地区平均每年夏季降水时数低于 60 h，降水事件少于 30 次。而西南地区夏季降水最为频繁，降水时数（事件数）的最大值超过 480 h（100 次），这可能与青藏高原、云贵高原和四川盆地等复杂地形的影响有关。降水时数与事件数略有区别的是，降水时数由北向南呈递增，这与降水日数的气候平均分布（符娇兰等，2008）相似；但在降水事件数的空间分布上，黄河中下游附近存在一个低值中心。图 2c 显示，平均降水历时由北向南呈现出经向“短—长—短”的空间分布特征，明显不同于

降水时数和事件数的分布形态。华北—东北地区和华南地区的平均降水历时偏短，其中内蒙古北部降水历时最短，平均在 3.3 h 以下。而位于长江与黄河之间的地区平均降水历时偏长，最大值超过 5.4 h。

为更细致地分析夏季中国中东部不同历时降水空间分布的差异，按历时长短将降水事件划分为以下 5 类：历时 1～6 h、7～12 h、13～18 h、19～24 h 及＞24 h 的降水事件，并分别给出了这 5 类降水事件所贡献的降水量占总量的百分率（图 3）。由图可知，总体上历时越长的降水事件对累积降水量的贡献百分率越低。历时为 1～6 h 的降水事件对总降水量的贡献率最高（图 3a），其空间分布由北向南呈经向“高—低—高”型，与降水事件平均历时的空间分布（图 2c）恰好相反。华北—东北及西南南部至华南西部一带 1～6 h 降水量较大，最高可超过总降水量的 60%；长江、黄河流域 1～6 h 降水量较小，最低在 28%以下。对于历时超过 6 h 的降水事件，其对总降水量的贡献率的大值中心位于中东部长江与黄河之间地区，且随着历时的增长而向东移动（图 3b–3e）。7～12 h 降水事件所贡献的降水百分率纬向差异明显，110°E 以西（东）地区偏高（低）（图 b）。13～18 h 降水事件对总降水量贡献率的空间分布（图 3c）与 1～6 h 的几乎相反。历时在 19 h 以上的降水事件主要发生在南方，而在北方及中西部非常罕见（图 3d、3e）。特别是历时超过 24 h 的降水事件，在江南东部以及秦岭南部的汉水流域等地区仍贡献总降水量的 20%以上，即在夏季该地区有 1/5 的降水是由历时超过 1 d 的长历时降水事件所贡献的。

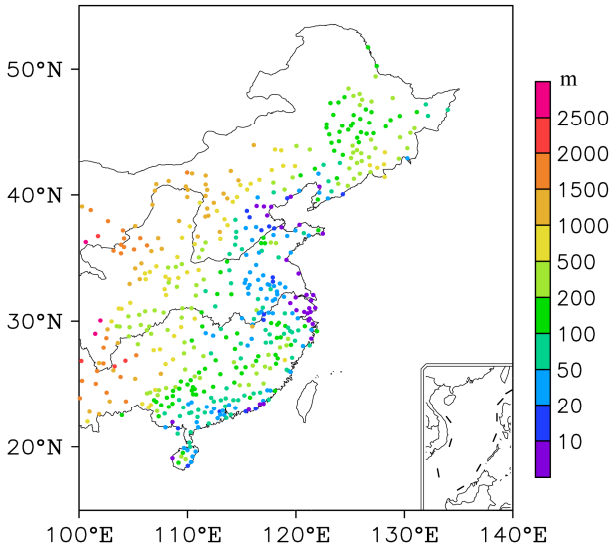

图 1 中国中东部 510 站地理分布（站点颜色表示测站海拔高度）

Fig. 1 Distribution of the 510 stations in central East China (colors indicate altitude)

不同历时的降水事件数和时数占总量百分率空间分布特征与图 3 类似（图略）。综上所述，夏季中国华北－东北和华南地区的降水历时偏短，长江与黄河之间地区降水历时偏长。华北－东北、西南南部和华南中西部以 1～6 h 短历时降水为主；中西部 7～18 h 降水事件明显多于其它地区，6 h 以下和 19 h 以上降水相对较少；长江中下游、东南沿海以 6 h 以上降水为主，且 19 h 以上降水主要集中于该区域。

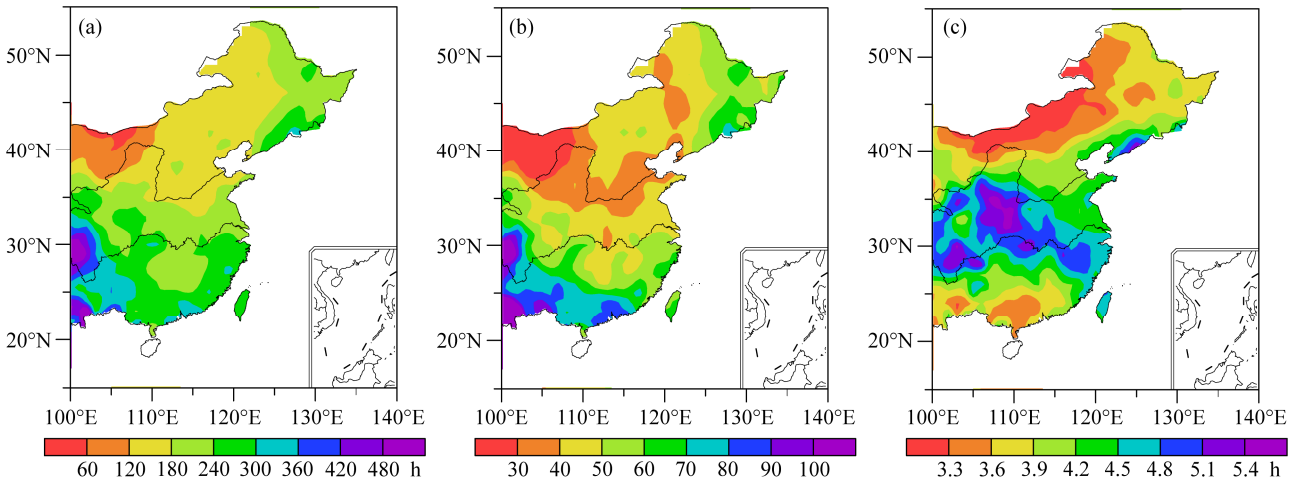

图 2 1961～2012 年夏季中国中东部降水事件的气候统计特征：（a）累积时数；（b）累积事件数；（c）平均历时

Fig. 2 Climatic statistics of summer precipitation in central East China averaged between 1961 and 2012: (a) Accumulative hours; (b) accumulative occurrence; (c) mean duration

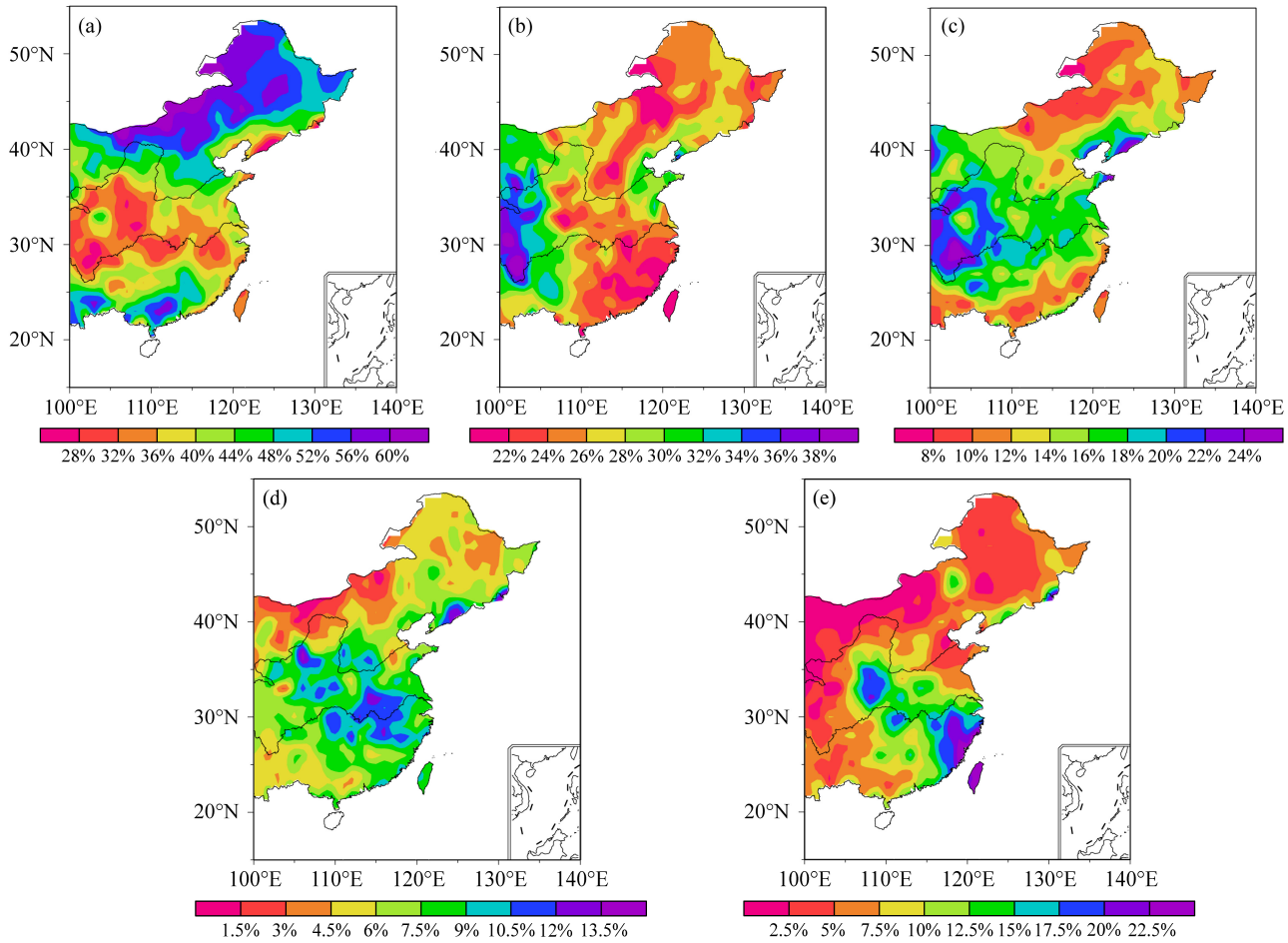

图 3　不同历时降水事件所贡献降水量占总降水量的百分率的空间分布：（a）1～6 h；（b）7～12 h；（c）13～18 h；（d）19～24 h；（e）＞24 h

Fig. 3　Percentage contribution of rainfall amount in terms of their duration: (a) 1–6 h; (b) 7–12 h; (c) 13–18 h; (d) 19–24 h; (e) ＞24 h

3.2　降水历时与降水强度的关系

一次降水事件对总降水量的贡献不仅与其历时长短有关，还受降水强度的影响。考虑到不同历时降水事件强度可能也不同，研究历时与强度间的关系，可以更全面地揭示中国中东部不同历时降水的气候特征。为方便研究，本文按平均强度将降水事件分为不同类别。Zhang and Zhai（2011）认为，20 mm/h 是划分强、弱降水的合理标准；公颖等（2011）以 10 mm/h 为标准识别极端降水事件；而 Yang et al.（2013）则发现，1 mm/h 以下的降水更容易出现在短历时降水中，与 1 mm/h 以上降水有所区别。综合考虑前人研究和夏季中国中东部降水特征，这里按事件的平均强度将降水事件划分为小雨（0.1～1.0 mm/h）、中雨（1.1～10.0 mm/h）、大雨（10.1～20.0 mm/h）和暴雨（＞20.0 mm/h）四类。需要说明的是，目前通过逐时平均强度对降水事件进行分类的标准仍无其他研究，其合理性需要在未来的工作中进一步证明。图 4、5 分别给出了夏季中国中东部地区不同纬度地区（取 100°E～120°E 平均），不同强度的降水事件所贡献的事件数和降水量的百分率随事件历时的变化。由于历时超过 24 h 的降水事件较为罕见，这里将其合并。

比较图 4a–4d 发现，在不同历时降水事件中，小雨和中雨强度事件所贡献的事件数占总数的百分率之和均超过 95%，表明事件强度>10 mm/h 的发生概率非常低。对于小雨强度事件（图 4a），其所占百分率随事件历时增长而递减。历时 3 h 以下的事件中，小雨事件最高占 70%以上。同时，纬度越高，小雨强度事件所占百分率越高；且降水事件的历时越长，其纬向差异也越大。如历时 18 h 以上事件中，小雨强度事件在北方地区仍占 40%左右，而在华南地区则仅占 20%以下。中雨强度事件更多存在于较长历时的降水事件中，其分布特征恰好与小雨相反（图 4b）。在 6 h 以下的短历时事件

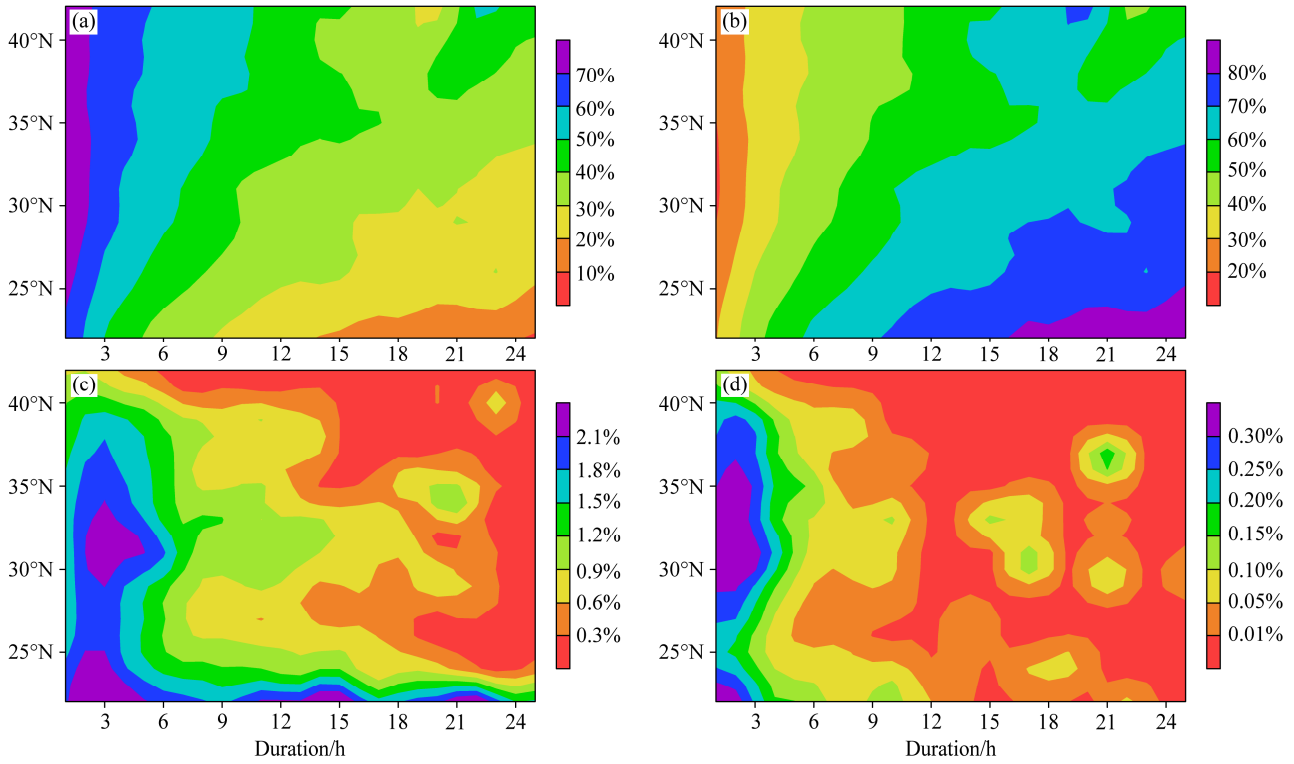

图 4 不同强度降水事件占总事件数的百分率随降水历时和纬度的变化：（a）0.1～1.0 mm/h；（b）1.1～10.0 mm/h；（c）10.1～20.0 mm/h；（d）＞20.0 mm/h

Fig. 4 Percentage contribution of occurrence in terms of different precipitation intensities as a function of duration and latitude: (a) 0.1–1.0 mm/h; (b) 1.1–10.0 mm/h; (c) 10.1–20.0 mm/h; (d) ＞20.0 mm/h

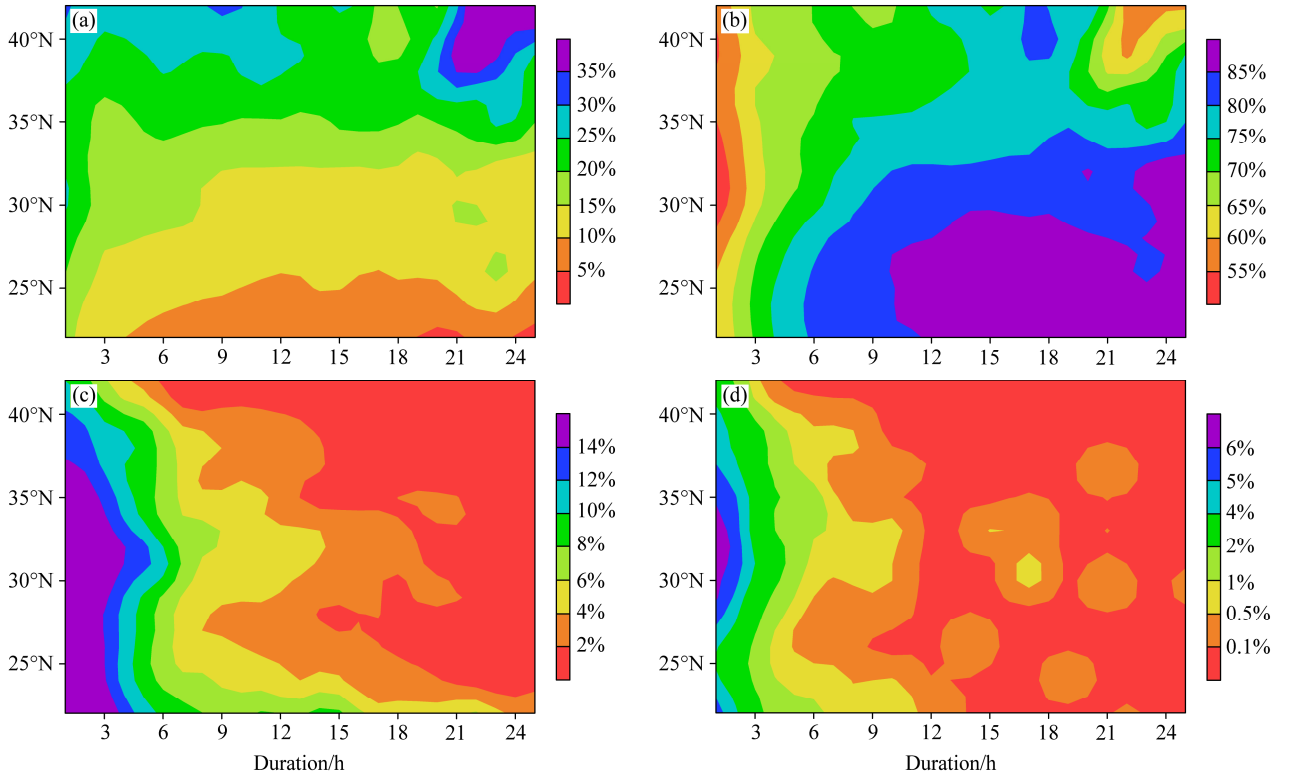

图 5 同图 4，但为不同强度降水事件所贡献降水量占总降水量的百分率

Fig. 5 Same as Fig. 4, but for the percentage contribution of rainfall amount in terms of different precipitation intensities

中，中雨事件仅占 20%～50%。而对于历时 18 h 以上的降水事件，北方（华南）地区 50%（80%）以上为中雨强度事件。大雨和暴雨强度事件主要由 6 h 以下的短历时降水构成，且多发生于 35°N 以南地区（图 4c–4d）。在长江中下游和华南地区，大雨、暴雨强度事件所占百分率在历时 3 h 事件中达到峰值（分别为约 2%和约 0.3%），之后随历时增加而下降，仅华南沿海发生长历时大雨强度事件的可能性维持在 2%左右。

图 5 给出了不同强度的降水事件所贡献降水量的百分率随历时的变化。由图可见，小雨强度事件贡献降水量所占百分率随历时的变化并不明显，但由于南方地区降水强度较大，因而纬向差异仍然较大（图 5a）。且由于小雨强度偏低，其贡献率明显小于中雨（图 5b）。中雨强度事件降水量所占百分率分布在各历时、各纬度均高于其它强度事件。与图 4b 类似，中雨强度事件降水量所占百分率随历时增长而增加。尤其对于 30°N 以南地区，12 h 以上事件中，有 85%以上的降水量由中雨强度事件构成。而强度在 10 mm/h 以上的降水事件虽然很少发生，但由于其降水强度偏大，所贡献的降水量不容忽视（图 5c、5d）。历时越短，大、暴雨强度事件降水量所占百分率越高，最大值分别为约 14%和 6%。

结合图 4、图 5 还可以看出，大雨强度事件数及其降水量所占百分率随降水历时的变化特征与暴雨强度事件非常相似。且前文提到，平均强度超过 10 mm/h 的事件所占比例小于 5%，具有极端性强的特点。因此，10 mm/h 可以成为定义夏季中国中东部强降水事件阈值的标准。短历时降水中，尽管 1.0 mm/h 以下的小雨强度事件较多，但极端性强的大雨、暴雨所占百分率也高于长历时降水。这表明极端降水并非更易由长历时降水造成，历时较短的事件中，大雨和暴雨可能具有更高的极端性，这可能与短历时降水中对流性降水较多有关（Yuan et al.，2010）。

4 不同历时降水长期变化特征

为了进一步分析不同历时降水的长期变化趋势，图 6 给出了夏季中国中东部各降水统计量的线性趋势分布和显著性检验结果。其中，利用每 10 年增加（减少）值与气候平均值之比表示增加（减少）的速率。如图 6a 所示，夏季中国中东部总降水量在 1961～2012 年大致呈“南增北减”的趋势分布。黄河以南的季风区夏季总降水量有所增加，尤其是长江中下游及华南西部部分站点上升趋势显著。华北、东北及 110°E 以西部分地区总降水量呈一致的下降趋势，只是其变化趋势未能通过 0.05 显著性检验。在降水量一致增加的南方沿海地区，降水强度的变化与总降水量一致，均呈上升趋势（图 6b）。长江中上游站点总降水量虽然增加，但强度多呈下降趋势。华北地区和西南地区虽然降水量有所减少，但降水强度多呈上升趋势，部分站点降水强度显著上升。Yu et al.（2010）曾给出类似的结论，但其结果显示华北和西南地区降水强度变化更加显著，这可能是其研究对象（7～8 月）和研究时段（1966～2005 年）与本文略有不同所造成的。

夏季中国中东部降水时数（图 6c）和降水事件数（图 6d）的变化趋势分布总体与总降水量类似，显著上升的站点集中于长江与黄河之间及江南地区，而显著下降的站点则分布于华北北部和西南地区。结合图 6a–6d 可知，中国东部和华南沿海地区总降水量的上升趋势是由于降水强度、时数和事件数的同时增加所引起的；北方和西南地区时数和事件数则与降水强度呈反向变化，导致总降水量略有减少。另外，降水时数线性趋势的空间分布（图 6c）与降水事件数（图 6d）在长江和黄河中上游地区存在较大差异，在其他地区较为接近。由于降水时数由降水事件数和事件平均历时决定，本文接下来进一步分析了降水历时的线性趋势分布。

整体而言，夏季中国中东部各站点降水事件平均历时以上升趋势为主（图 6e），尤其是长江与黄河之间多个站点上升趋势显著，仅华北地区北部站点历时呈较一致的下降趋势。值得注意的是，降水历时变化显著站点集中的区域恰好对应中东部降水事件历时气候平均值较长的长江与黄河之间一带，而华北北部降水历时则略有减少，这表明降水历时“短—长—短”型的空间差异将更加明显。

为进一步考察不同历时降水的变化特征，仍将降水事件按历时分类，分析了其线性变化趋势的空间分布特征。因为中东部各站历时超过 6 h 的降水事件数仅占总数的 30%以下，对于单站而言，若仍按前文将历时按每 6 h 分类，将会存在大量年份未发生 7～12 h、13～18 h、19～24 h 或超过 24 h 的降水事件，导致线性趋势分布无明显区域特征，或

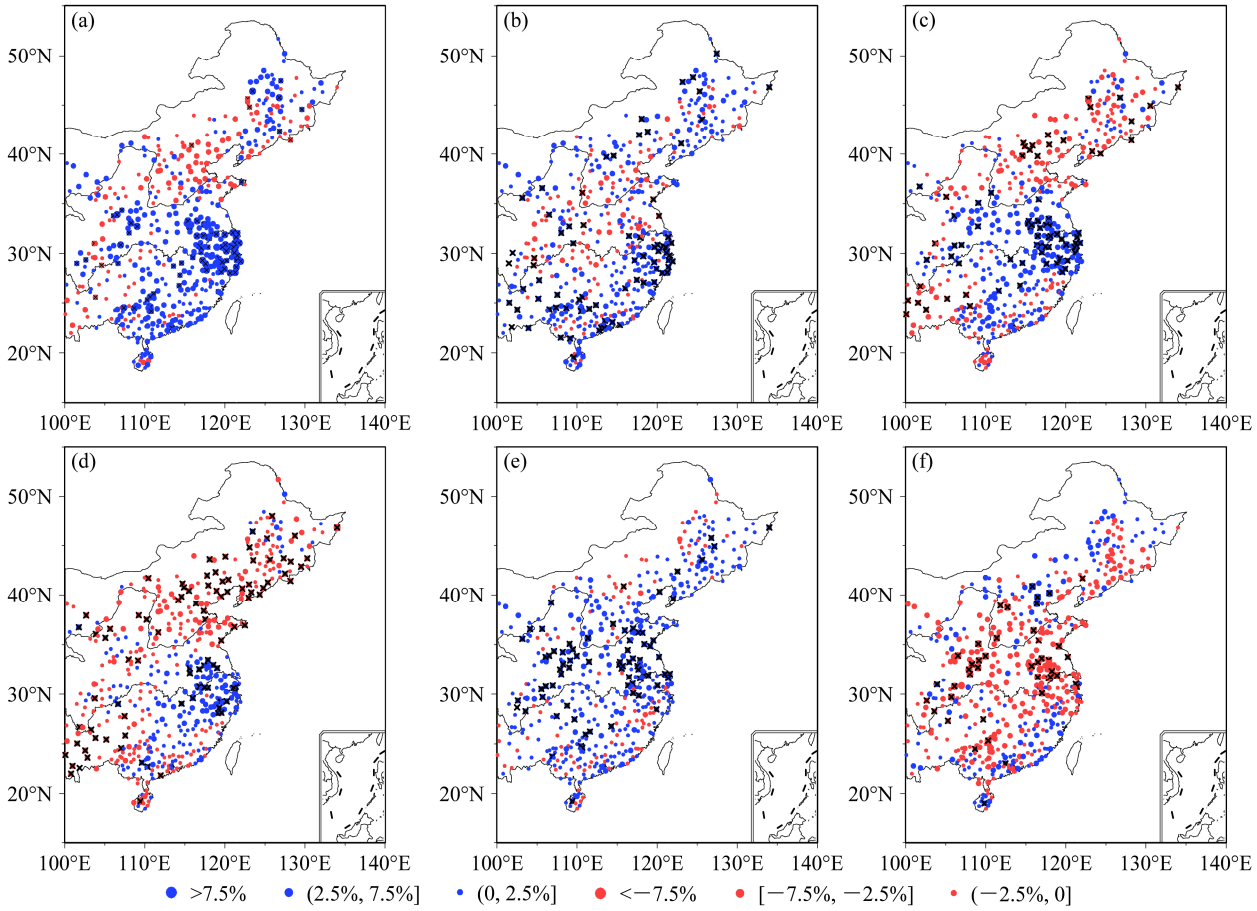

图 6 夏季中国中东部各降水统计量线性趋势的空间分布（“×”表示趋势达到 0.05 显著性水平）：（a）总降水量；（b）降水强度；（c）降水时数；（d）降水事件数；（e）降水历时；（f）1～6 h 降水事件所贡献降水量占总降水量百分率

Fig. 6 Linear trend of summer precipitation statistics in central East China (crosses indicate statistical significance at the 95% confidence level): (a) Total rainfall amount; (b) intensity; (c) hours; (d) occurrence; (e) rainfall duration; (f) percentage contribution of 1–6 h rainfall amount

时间序列的变化不具有统计意义。另一方面，1～6 h 短历时降水多为对流性降水；而超过 6 h 的长历时降水事件在空间分布（图 3）和日变化、季节内变化等诸多方面具有类似的特征，多为大尺度锋面降水（Yu et al.，2007；Yuan et al.，2010）。因此，下文将大于 6 h 的降水事件合并为一类。图 6f 给出了 1～6 h 短历时降水事件所贡献降水量占总量百分率的线性趋势空间分布。由图可知，长江与黄河之间地区 1～6 h 短历时降水事件贡献降水量所占百分率呈显著下降趋势，验证了图 6e 的结果。

进一步选取降水历时变化最显著，且变化趋势相对一致的长江与黄河之间地区（28°N～37°N，100°E 以东）为研究对象，对不同历时降水的长期演变特征做深入分析。统计结果表明，该区域内约 86%的站（167 站）降水历时呈不同程度的上升趋势，其中约 29%的站（57 站）上升趋势通过 0.05 显著性检验，达到中东部显著站点总数（75 站）的 76%左右。图 7a–7c 分别给出了夏季该地区总降水量及短历时（1～6 h）和长历时（>6 h）降水量的历年变化及其年代际分量和线性趋势。可以看到，夏季长江与黄河之间地区总降水量（图 7a）显著上升，约为 2.9% (10 a)$^{-1}$，并达到 0.01 的显著性水平。短历时事件所贡献降水量的变化趋势很弱（图 7b）0.4% (10 a)$^{-1}$；而长历时降水事件所贡献降水量的上升趋势非常显著（图 7c），达到 4.4% (10 a)$^{-1}$。可见，夏季该地区总降水量的增加趋势主要是受长历时降水增多影响，这与该区域在 1961～2012 年降水事件的平均历时有所增长（图 6e）相一致。与此同时，我们还对序列的年代际突变分别进行了滑动 t 检验（图 7d–7f）。从图中可以看出，长江与黄河之间地区总降水量在 1961～2012 年存在显著的突变点（图 7d）。与总降水不同，短历时降水在近 50

年并不存在显著的突变点（图 7e）。而长历时降水的突变特征与总降水非常相似（图 7f），主要体现为从 20 世纪 70 年代后期开始明显增多，突变点达到 0.05 的显著性水平。由此可见，对于包含江淮流域在内的中国中东部长江与黄河之间地区而言，长历时降水对总降水的年代际变化和线性演变趋势起主导作用，不过短历时降水对总降水的年代际变化可能也存在一定贡献（见图 8）。

上述分析表明，长历时和短历时降水对夏季中国中东部降水的年代际转折可能有着不同的作用。由于夏季中东部降水在 1978 年前后和 1992 年前后的年代际转折点已被许多研究确认（Gong and Ho，2002；Ding et al.，2008；Wu et al.，2010；Liu et al.，2011），因此本文将 1961～2012 年整个时段划分为 1961～1978 年、1979～1992 年和 1993～2012 年 3 个阶段，并分别计算了各时段夏季降水量的距平百分率，结果如图 8 所示。可以看到，1～6 h 短历时降水距平分布在 1961～1978 年间由南向北呈

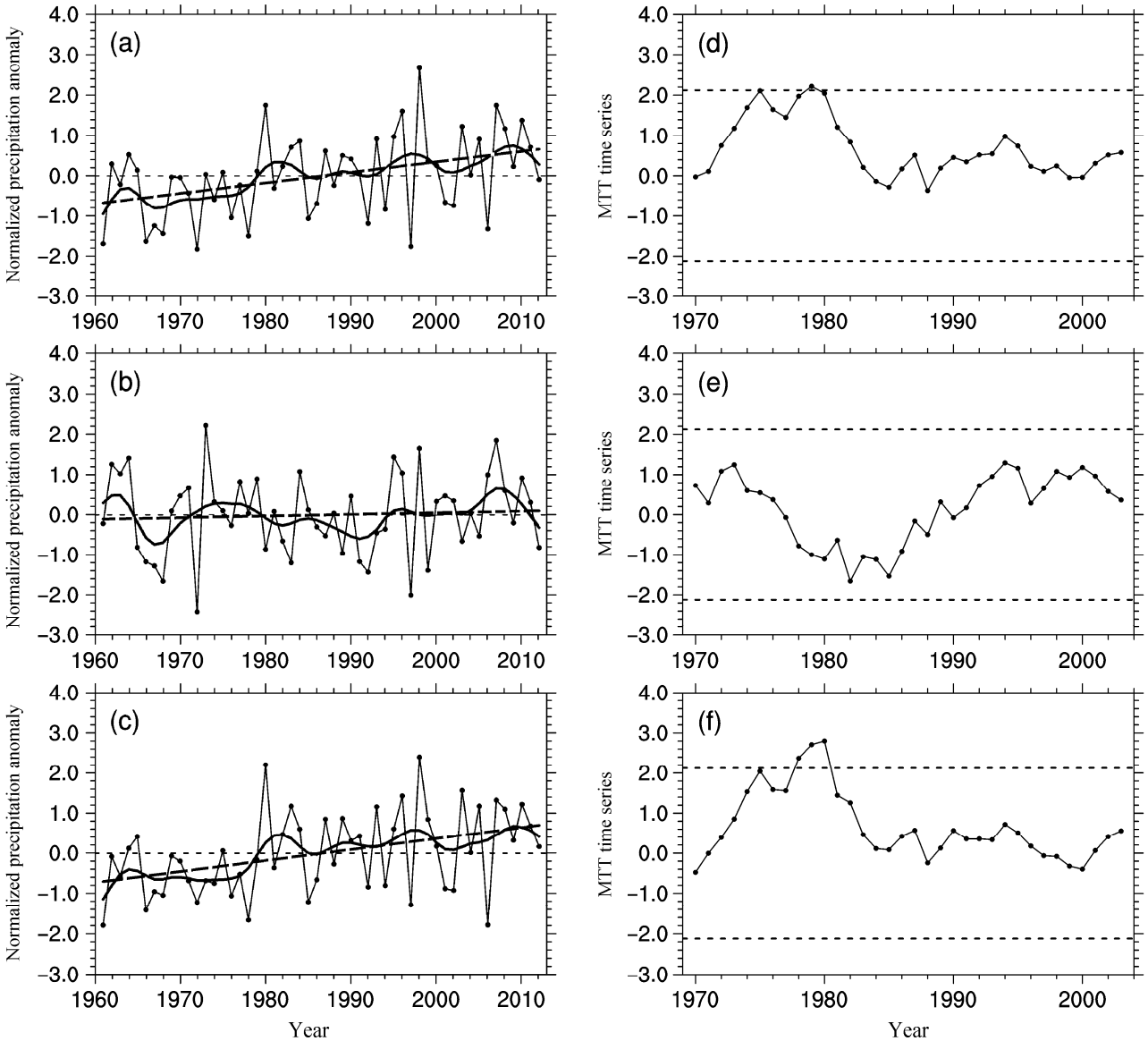

图 7　1961～2012 年夏季长江与黄河之间地区区域平均降水量的标准化距平序列（左列）及对应的 MTT 突变检验序列（右列）：（a、d）总降水量；（b、e）1～6 h 事件所贡献的降水量；（c、f）＞6 h 事件所贡献的降水量。（a−c）中粗实线为 9 年低通滤波分量，粗虚线为线性趋势项；（d−f）中虚线表示 0.05 显著性水平

Fig. 7　Normalized time series of summer precipitation anomalies (left column) and the corresponding moving *t*-test time series (right column) in the region between the Yangtze River and Yellow River during 1961–2012: (a, d) Total rainfall amount; (b, e) 1–6 h rainfall amount; (c, f) ＞6 h rainfall amount. Heavy lines and heavey dashed lines in (a−c) represent the 9-year low-pass filtered component and the linear trend, respectively. The dashed lines in (d−f) indicate statistical significance at the 95% confidence level

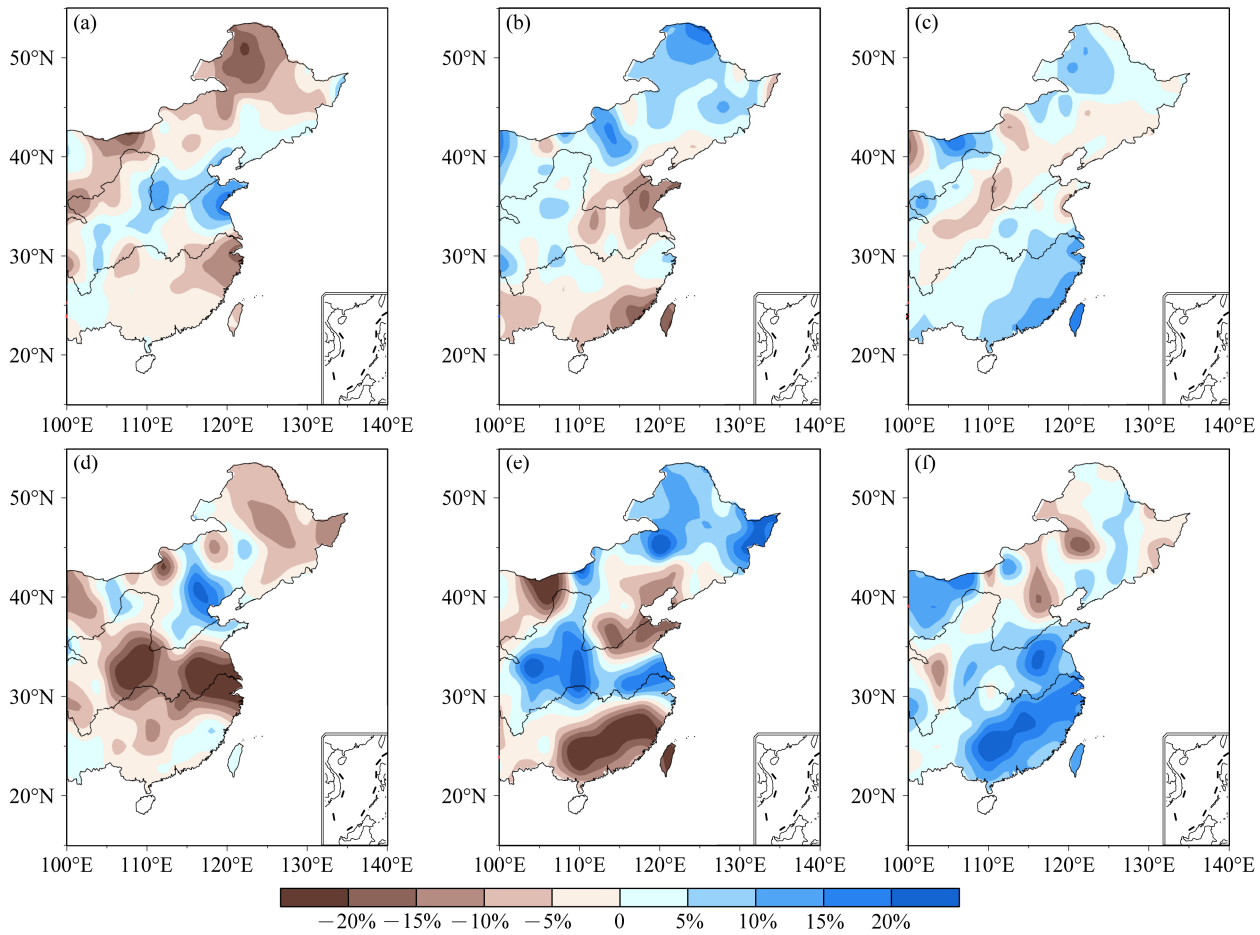

图 8 1961～1978 年（左）、1979～1992 年（中）、1993～2012 年（右）夏季中国中东部不同历时降水距平百分率：（a、b、c）1～6 h；（d、e、f）＞6 h

Fig. 8 Percentage of summer precipitation anomalies in central East China in terms of different durations during 1961–1978 (left), 1979–1992 (middle), and 1993–2012 (right) : (a, b, c) 1–6 h; (d, e, f) ＞6 h

“负—正—负”型（图 8a），正距平中心主要位于黄淮流域，负距平中心则位于江南地区；1979～1992 年，短历时降水距平由南向北呈“负—正—负—正”型（图 8b）；20 世纪 90 年代之后，主要表现为南方降水一致增多特征（图 8c）。对于 6 h 以上的长历时降水，在 1961～1978 年，正距平中心位于华北北部，与短历时降水相比位置偏北；华中至长江中下游一带降水偏少。与短历时降水有明显区别的是，长江与黄河之间地区长历时降水在 1979 年后由一致偏少转为一致偏多，这与前文的结论相符。1992 年后，中东部长历时和短历时降水距平的空间分布相似，均表现为偶极型（图 8c、8f），这说明 1992 年南方降水的年代际转折在短历时和长历时降水上都有体现，只是长历时降水的突增范围更广，且中心位置偏北。

与前人的类似研究（Ding et al.，2008）相比较可以发现，短历时和长历时降水均可体现出近几十年来中国中东部夏季雨带由北向南移动的年代际变化特征，但长历时降水在不同时段的距平场分布更接近总降水的变化，这说明夏季降水的年代际变化可能主要是由长历时降水控制。事实上，曾有学者计算了 1961～2001 年海河流域 7～8 月长历时降水量与东亚季风指数的关系，发现两者的相关系数高达 0.63（Yin et al.，2011）。不过，夏季中国中东部长历时和短历时降水与大尺度环流的关系仍需在另文进行深入研究。

5 总结与讨论

利用 1961～2012 年中国中东部 510 站逐时降

水资料，从气候态和长期变化趋势两个方面，分析了该区域夏季不同历时降水事件的主要时空变化特征。本文主要结论如下：

（1）夏季中国中东部地区降水累积时数和事件数呈南多北少的空间分布特征，最大值位于西南地区，最小值位于内蒙古西部。降水事件平均历时由南向北呈“短—长—短”分布，华南、华北和东北地区以短历时降水（1～6 h）为主，占累积总降水量的 60%以上；长江与黄河之间地区长历时降水（＞6 h）偏多，占累积降水量的比率可高达 70%左右。对于长历时降水事件，其发生位置随历时增大而东移。中西部 7～18 h 降水事件明显偏多，历时 24 h 以上的降水事件则主要发生于汉水流域至江南东部一带。

（2）将夏季中国中东部降水事件按强度划分为小雨（0.1～1.0 mm/h）、中雨（1.1～10.0 mm/h）、大雨（10.1～20.0 mm/h）和暴雨（>20.0 mm/h）四类，并对比分析了不同纬度这四类降水的发生概率和降水贡献率随历时的变化特征。结果表明，北方（南方）地区小雨（中雨）事件偏多，且降水历时和降水强度之间存在密切的联系。随着降水历时的增加，小雨（中雨）事件的出现概率减小（增大）。大雨、暴雨强度事件主要发生在 35°N 以南地区，所占百分率在历时 3 h 以下的事件中最高，表明强度在 10 mm/h 以上的极端降水事件历时往往偏短。

（3）1961～2012 年，夏季中国中东部总降水量呈“南增北减”的趋势分布。其中，长江中下游地区总降水量的增多由降水强度、时数和事件数的增大共同造成；北方和西南地区降水强度呈增强趋势，这些地区总降水量的减少与降水时数及事件数的减少有关。夏季中国中东部各站降水历时以上升趋势为主，仅华北北部有所下降。同时，上升趋势显著的站点多集中于长历时降水偏多的我国长江与黄河之间地区，该地区短历时降水所占百分率显著下降，表明降水历时的区域差异进一步增大。

（4）夏季中国中东部不同历时降水对总降水的趋势和年代际变化有不同的影响。在 20 世纪 60 年代至 70 年代末，短历时降水多雨带位于黄淮流域，长历时降水多雨带则位于华北和华南。长历时降水的显著增加是我国长江与黄河之间地区 20 世纪 70 年代末至 90 年代初降水突增的主要原因，而短历时降水没有明显的年代际突变。20 世纪 90 年代初期以来，南方短历时和长历时降水均发生突增，只是长历时降水的影响范围更广，且其最大值中心较短历时降水偏北。

部分研究针对逐时降水年代际变化特征的可能成因进行了分析。如有研究表明，中等强度的降水与地表气温呈反相关关系。在全球变暖背景下，华北和南方沿海地区地表气温升高，并通过影响大气相对湿度和云量，导致中等强度的降水减少；而中部地区气温下降，中等强度的降水有所增加（Yu and Li，2012）。Yin et al.（2011）研究发现，华北地区地表气温升高，对流层中上层气温下降，导致上下层热力差异加剧，这可能是华北短时对流性降水增加、降水历时缩短的主要原因。然而，对于整个中东部而言，各区域降水历时的变化并不一致，大部分区域历时普遍增大的原因仍不清楚。由于不同地区夏季降水的历时特征有所不同，且不同历时降水具有不同的年际、年代际变化特征，因此在分析降水时空变化的成因时，将不同历时降水区分开讨论，可能达到更好的效果。这些问题都需要在未来做进一步研究。

参考文献（References）

Ding Y H, Wang Z Y, Sun Y. 2008. Inter-decadal variation of the summer precipitation in East China and its association with decreasing Asian summer monsoon. Part I: Observed evidences [J]. International Journal of Climatology, 28 (9): 1139–1161, doi: 10.1002/joc.1615.

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.

Gong D Y, Ho C H. 2002. Shift in the summer rainfall over the Yangtze River valley in the late 1970s [J]. Geophys. Res. Lett., 29 (10): 78-1–78-4, doi: 10.1029/2001GL014523.

公颖, 陈力强, 隋明. 2011. 2001～2010 年辽宁区域性暴雨阶段性特征分析 [J]. 气象与环境学报, 27 (6): 14–19. Gong Ying, Chen Liqiang, Sui Ming. 2011. Temporal distribution character of regional heavy rain from 2001 to 2010 in Liaoning province [J]. Journal of Meteorology and Environment (in Chinese), 27 (6): 14–19.

Hitchens N M, Brooks H E, Schumacher R S. 2013. Spatial and temporal characteristics of heavy hourly rainfall in the United States [J]. Mon. Wea. Rev., 141 (12): 4564–4575, doi: 10.1175/MWR-D-12-00297.1.

Hu Z Z, Yang S, Wu R G. 2003. Long-term climate variations in China and global warming signals [J]. J. Geophys. Res., 108 (D19): 4614, doi: 10.1029/2003JD003651.

Li J, Yu R C, Wang J J. 2008. Diurnal variations of summer precipitation in Beijing [J]. Chinese Science Bulletin, 53 (12): 1933–1936, doi: 10.1007/s11434-008-0195-7.

Li J, Yu R C, Yuan W H, et al. 2011. Changes in duration-related characteristics of late-summer precipitation over eastern China in the past 40 years [J]. J. Climate, 24 (21): 5683–5690, doi: 10.1175/JCLI-D-11-00009.1.

Liu Y, Huang G, Huang R H. 2011. Inter-decadal variability of summer rainfall in Eastern China detected by the Lepage test [J]. Theor. Appl. Climatol., 106 (3–4): 481–488, doi: 10.1007/s00704-011-0442-8.

任国玉, 吴虹, 陈正洪. 2000. 我国降水变化趋势的空间特征 [J]. 应用气象学报, 11 (3): 322–330. Ren Guoyu, Wu Hong, Chen Zhenghong. 2000. Spatial patterns of change trend in rainfall of China [J]. Quarterly Journal of Applied Meteorology (in Chinese), 11 (3): 322–330.

Song Y L, Achberger C, Linderholm H W. 2011. Rain-season trends in precipitation and their effect in different climate regions of China during 1961–2008 [J]. Environmental Research Letters, 6 (3): 034025, doi: 10.1088/1748-9326/6/3/034025.

孙林海, 陈兴芳. 2004. 南涝北旱的年代气候特点和形成条件 [J]. 应用气象学报, 14 (6): 641–647. Sun Linhai, Chen Xingfang. 2004. Decade climate characters and formation condition of flooding in south and drought in north in China [J]. Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese), 14 (6): 641–647.

Trenberth K E. 1998. Atmospheric moisture residence times and cycling: Implications for rainfall rates and climate change [J]. Climatic Change, 39 (4): 667–694, doi: 10.1023/A:1005319109110.

Trenberth K E, Dai A G, Rasmussen R M, et al. 2003. The changing character of precipitation [J]. Bull. Amer. Meteor. Soc., 84 (9): 1205–1217, doi: 10.1175/BAMS-84-9-1205.

Tu K, Yan Z W, Dong W J. 2010. Climatic jumps in precipitation and extremes in drying North China during 1954–2006 [J]. J. Meteor. Soc. Japan, 88 (1): 29–42, doi: 10.2151/jmsj.2010-103.

Wang S W, Zhu J H, Cai J N. 2004. Interdecadal variability of temperature and precipitation in China since 1880 [J]. Advances in Atmospheric Sciences, 21 (3): 307–313, doi: 10.1007/BF02915560.

Wu R G, Wen Z P, Yang S, et al. 2010. An interdecadal change in southern China summer rainfall around 1992/93 [J]. J. Climate, 23 (9): 2389–2403, doi: 10.1175/2009JCLI3336.1.

Yang P, Ren G Y, Hou W, et al. 2013. Spatial and diurnal characteristics of summer rainfall over Beijing municipality based on a high-density AWS dataset [J]. International Journal of Climatology, 33 (13): 2769–2780, doi: 10.1002/joc.3622.

Yin S Q, Chen D L, Xie Y. 2009. Diurnal variations of precipitation during the warm season over China [J]. International Journal of Climatology, 29 (8): 1154–1170, doi: 10.1002/joc.1758.

Yin S Q, Gao G, Li W J, et al. 2011. Long-term precipitation change by hourly data in Haihe River basin during 1961–2004 [J]. Science China Earth Sciences, 54 (10): 1576–1585, doi: 10.1007/s11430-011-4232-z.

Yu R C, Li J. 2012. Hourly rainfall changes in response to surface air temperature over eastern contiguous China [J]. J. Climate, 25 (19): 6851-6861, doi: 10.1175/JCLI-D-11-00656.1

Yu R C, Xu Y P, Zhou T J, et al. 2007. Relation between rainfall duration and diurnal variation in the warm season precipitation over central eastern China [J]. Geophys. Res. Lett., 34 (13): L13703, doi: 10.1029/2007GL030315.

Yu R C, Li J, Yuan W H, et al. 2010. Changes in characteristics of late-summer precipitation over eastern China in the past 40 years revealed by hourly precipitation data [J]. J. Climate, 23 (12): 3390–3396, doi: 10.1175/2010JCLI3454.1.

Yuan W H, Yu R C, Chen H M, et al. 2010. Subseasonal characteristics of diurnal variation in summer monsoon rainfall over central eastern China [J]. J. Climate, 23 (24): 6684–6695, doi: 10.1175/2010JCLI3805.1.

Yue S, Pilon P, Cavadias G. 2002 Power of the Mann–Kendall and Spearman's rho tests for detecting monotonic trends in hydrological series [J]. Hydrol. 259: 254–271, doi: 10.1016/S0022-1694(01)00594-7.

Zhai P M, Zhang X B, Wan H, et al. 2005. Trends in total precipitation and frequency of daily precipitation extremes over China [J]. J. Climate, 18 (7): 1096–1108, doi: 10.1175/JCLI-3318.1.

Zhang H, Zhai P M. 2011. Temporal and spatial characteristics of extreme hourly precipitation over eastern China in the warm season [J]. Advances in Atmospheric Sciences, 18 (5): 1177–1183, doi: 10.1007/s00376-011-0020-0.

周连童, 黄荣辉. 2003. 关于我国夏季气候年代际变化特征及其可能成因的研究 [J]. 气候与环境研究, 8 (3): 274–290. Zhou Liantong, Huang Ronghui. 2003. Research on the characteristics of interdecadal variability of summer climate in China and its possible cause [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 8 (3): 274–290.