1965—2019 年中国夏季分钟降水空间分布与 长期趋势分析*

战云健¹ 鞠晓慧¹ 范邵华¹ 周志刚² 唐国利¹ 任国玉^{3,4} ZHAN Yunjian¹ JU Xiaohui¹ FAN Shaohua¹ ZHOU Zhigang² TANG Guoli¹ REN Guoyu^{3,4}

- 1. 国家气象信息中心, 北京, 100081
- 2. 河南省气象探测数据中心, 郑州, 450003
- 3. 国家气候中心, 北京, 100081
- 4. 中国地质大学环境学院大气科学系, 武汉, 430074
- 1. National Meteorological Information Center, Beijing 100081, China
- 2. Henan Meteorological Observation Data Center, Zhengzhou 450003, China
- 3. National Climate Center, Beijing 100081, China
- 4. Department of Atmospheric Science, School of Environmental Studies, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China 2020-08-27 收稿, 2021-04-08 改回.

战云健, 鞠晓慧, 范邵华, 周志刚, 唐国利, 任国玉. 2021. 1965—2019 年中国夏季分钟降水空间分布与长期趋势分析. 气象学报, 79(4): 598-611

Zhan Yunjian, Ju Xiaohui, Fan Shaohua, Zhou Zhigang, Tang Guoli, Ren Guoyu. 2021. An analysis of minute summer precipitation in China during 1965—2019. *Acta Meteorologica Sinica*, 79(4):598-611

Abstract Short-term heavy precipitation can cause floods and other meteorological disasters. Therefore, revealing its climatological distribution and long-term variation is very important for disaster prevention and mitigation and climate change response. Based on the minute precipitation data collected at 2225 self-recording stations from 1965 to 2004 and 2435 automatic weather stations from 2005 to 2019 in China, the characteristics of climatological distribution and variation of minute precipitation in mainland China are analyzed. Results show that the minute precipitation frequency basically increases from north to south, and the precipitation intensity is smaller in Northwest China and larger in the eastern plains. Maximum precipitation at one-minute and five consecutive minutes mostly occurs in the Inner Mongolia and North China. Maximum precipitation at 10 consecutive minutes and longer as well as annual average maximum precipitation that lasts over different periods mostly occur in the coastal areas of South China. Minimum precipitation indices all are found in southern Xinjiang region. From 1965 to 2004 and from 2005 to 2019, the minute rainfall frequency increased in summer, which is the main reason for the increased national average summer precipitation. Minute precipitation intensity had no obvious trend. Percentage anomalies of annual maximum precipitation in several minutes to one day all increased, among which continuous precipitation over the period of about half an hour increased fastest. Overall, minute precipitation did not tend to become extreme, and the increased extreme precipitation can be mainly attributed to the increase in the duration of heavy rain process.

Key words Minute precipitation, Maximum precipitation, Climate change, Summer, China

摘 要 短时强降水可引起洪涝等气象灾害,揭示其气候分布和长期变化特征对于防灾、减灾和气候变化应对等工作非常重

^{*} 资助课题: "国家气象科学数据中心建设"专项资金、国家重点科技研发计划项目"全球变化及应对"重点专项(2018YFA0605603)。 作者简介: 战云健, 主要从事气象数据和气候变化研究。E-mail: zhanyj@cma.gov.cn 通信作者: 鞠晓慧, 主要从事气象数据研究。E-mail: juxh@cma.gov.cn

要。利用较为完整的中国夏季 1965—2004 年的自记纸(2225 站)以及 2005—2019 年的自动站(2435 站)分钟降水数据,分析了中国大陆分钟降水的空间分布和长期变化特征。结果表明,中国夏季分钟降水频率基本呈现从北到南增加的特征,分钟降水强度在西北地区较小,东部平原地区较大。1 min、连续5 min 最大一次降水量在内蒙古、华北最多,连续 10 min 以上的最大一次降水量和年平均最大降水量在华南沿海地区最多,上述指标的最小值都出现在南疆一带。1965—2004 年以及 2005—2019 年,夏季分钟降水频率都存在增加趋势,是引起中国平均夏季降水量增加的主要原因;分钟降水强度则没有明显趋势性变化。1965—2019 年数分钟到一日的最大降水量距平百分率都显著增加,其中连续半小时左右的最大降水量增加最快。总体来看,中国大陆每分钟的降水并未趋向于极端化,极端降水量的增加可主要归因于暴雨过程持续时间的增加。

关键词 分钟降水,最大降水,气候变化,夏季,中国中图法分类号 P467

1 引 言

降水是与人类活动关系最为密切的气象要素之一,在全球气候变化背景下,近几十年来全球和中国地区的日降水普遍趋向于极端化,洪涝灾害有增多的趋势,带来越来越严重的损失(Easterling, et al, 2000; Zhang, et al, 2007; 翟盘茂等, 2007; Yao, et al, 2008; 杨金虎等, 2008; IPCC, 2013)。短时强降水事件是引起洪涝灾害的主要原因,对中国地区短时强降水事件的气候学以及长期变化趋势特征进行系统性分析,对于制定防灾减灾、适应气候变化对策具有重要的参考价值。

以往对中国地区极端降水的气候和气候变化 研究多用日值降水资料,分析降水日数、日降水强 度、暴雨降水量、暴雨日数等指标(Zhang, et al, 2011)。这些研究发现,中国年平均日降水强度、小 时降水强度、极端降水量等降水指标都是从西北内 陆到东南沿海递增(李建等,2013;任国玉等, 2015a); 20世纪中叶以来, 降水日数明显减少, 极端 降水量在中国大多数区域趋向增大(王颖等, 2006; 翟盘茂等, 2007; 杨金虎等, 2008; Guo, et al, 2014; 任国玉等, 2015b; 景丞等, 2016; 孔锋等, 2017)。 在小时尺度上,有研究(Zhang, et al, 2011; 殷水清 等, 2012; 黄伟等, 2012) 发现中国东北、东南等地 区夏季的小时降水频率、强度和强降水持续时间均 有增加趋势,华北地区小时降水频率有所减少。 Yu 等(2010)发现长江中下游地区日降水量的增加 来源于降水小时数的增加,小时降水强度反而有所降低。

随着时代发展,人们对精细化降水资料的需求与日俱增。当前,对暴雨的定义为日降水量不小于50 mm。然而,日降水量的分配也可能不均匀,短时强降水若集中在一小时甚至几到十几分钟内,相比降水量较为均匀的分配在1 d 或数小时之内的情

形,致灾的可能性极大增加。以往由于分钟级别降水数据匮乏,尚不清楚小时尺度短时强降水的时、空分布和长期变化趋势特征。

中国气象局基于多年数字化工作实践,已经形成了较为准确的从降雨自记纸中提取分钟降雨量数据的技术(王伯民等,2004)。Ju等(2019)基于中国 2253个有自记降水观测的国家级地面气象站(以下简称自记站)的降水自记纸数字化成果,建立了长时间序列的分钟降水数据集,在中国大部分地区强降水事件集中出现的夏季(6—8月),该数据集的自记纸降水数据完整性和准确性都很好。文中利用该数据集,对中国大陆地区夏季分钟降水的气候和气候变化特征进行分析。

2 资料与方法

2.1 资料概述

所用资料为国家气象信息中心提供的中国大陆区域国家级地面气象站分钟降水数据集,2004年之前的数据主要来自自记纸记录仪器(Ju, et al,2019)。1965—2004年中国有自记纸降水记录的台站数量较多,数据完整性较好(Ju, et al,2019),文中主要依据该时期的中国2253个自记站夏季(6—8月)的自记纸分钟降水资料,分析短时强降水事件的气候和气候变化特征。2004年之后自动观测系统逐渐取代了自记纸记录仪器,选用2459个国家级地面自动观测气象站(以下简称自动站)分钟降水资料,分析2005—2019年夏季短时强降水事件的变化特征。

2004年之前的2253个自记站有少数数据完整性较差(Ju, et al, 2019),如某台站某年缺测率过高,统计得到的分钟降水极值数据很可能偏小,会引起分析结论的偏差。文中对所有台站进行了筛选处理,筛选标准如下:若某站某年夏季分钟降雨

的数据量不小于总数据量的 5/6,则该年记为完整记录年,否则为缺测年,缺测年不参与后续计算;如果某台站不存在完整记录年,这个台站被剔除。中国中、东部地区台站密度较高,大多数台站的完整记录年超过 35 a,但河南、湖北、江苏、贵州、福建等省有部分台站完整性稍差;南疆、内蒙古西部、甘肃酒泉等地区台站密度不高,完整记录年普遍少于 30 a;北疆地区台站密度尚可,但也有几个台站完整性差;青海和西藏地区台站完整性相对较好,但青海南部和西藏北部没有可用的台站,最终中国大陆区域内选用 2225站,地理位置见图 1a。2459个自动站中,2005—2019年有数据的台站共2435个,地理位置见图 1b。绝大部分自动站有观

测记录的时段都超过 10 a, 只有青海全部、河南、河北、云南部分台站缺测超过 5 a。

2.2 分析方法

采用的主要统计指标有:分钟降水频率(降水量大于0 mm的分钟数,单位:min);平均分钟降水强度(降水量与分钟降水频率之比,单位:mm/min);年最大分钟降水量(年夏季所有分钟降水数据的最大值,单位:mm);中国气象局(2015)规定的15个时段(5、10、15、20、30、45、60、90、120、180、240、360、540、720、1440 min)年最大降水量(每年夏季全部分钟降水数据按时间顺序排列,从前向后滑动累加对应时段的分钟降水量数据,每年分别取最大值,单位:mm);年15个时段最大降水量的

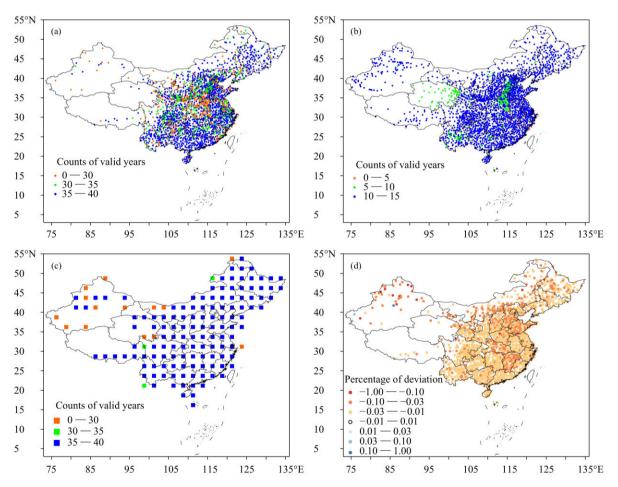


图 1 中国 (a) 2225 个自记站位置及 1965—2004 年有资料的年数 (单位: a), (b) 2435 个自动站位置及 2005—2019 年有资料的年数 (单位: a), (c) 自记站降水观测 2.5° 网格地理分布以及非缺测年数量 (单位: a), (d) 自记站分钟降水数据日统计值与日降水数据的偏差率 (单位: %)

Fig. 1 Geographic distribution and number of valid years for (a) 2225 stations (unit; a), (b) 2435 automatic weather station (unit; a), (c) 2.5° grids in China (unit; a), and (d) percentage of deviation between daily statistics of self-recording paper precipitation data and daily precipitation data (unit; %)

"最大一次"(1965—2004年40个15个时段最大降水量中取最大的一个,单位:mm);"平均最大"降水量(1965—2004年的平均值,单位:mm)。某年某要素距平(原始值减去1965—2004年平均值);距平百分率(距平除以1965—2004年平均值,单位:%)。

中国东、西部台站密度差异很大,为避免中国 西部地区的分钟降水变化被掩盖,采用经纬度网格 面积加权区域平均方法(Jones, 1994)计算各种降 水指标的全国平均序列。首先把研究区域按经纬 度划分为 2.5°的网格, 然后将每个网格里所有站点 的数据做算术平均,得到各网格的值。最后计算所 有网格点的面积加权平均值,获得区域平均的时间 序列。其中,如果区域中某年某网格为空网格,则 该网格不参与计算。所应用的网格以及网格的完 整性如图 1b 所示,中国东部没有空网格, 且绝大部 分网格都有35 a以上的数据;中国西部有一半左右 的空网格,新疆有一些网格只有不到30a的数据。 为便于比较,在计算15个时段最大降水量全国平 均时间序列时,将台站的15个时段最大降水量处 理成距平百分率,再计算区域平均序列。对所有网 格序列以及全国区域平均序列利用线性回归方法 计算序列的变化趋势,采用相关系数(r)检验方法 对趋势进行显著性检验。

由于数据来源不同,自记纸分钟降水数据与已有的逐日降水数据存在一定差异(任芝花等,2007)。图 1d 为全部 2225 站自记纸观测时期的全部分钟降水量日合计值与同时期人工观测日降水量的偏差率,大部分(60.5%)台站的偏差率介于

-1%—-3%,即自记纸分钟降水量的日合计值比现有的日降水量数据小1%到3%。自动站建立之后,自记纸降水仪器停用。分钟以及日降水量数据均来源于自动站,两者之间的差异变为0,但自记纸与自动站分钟降水数据差异较大,时间上不连续(李亚丽等,2011;方怡等,2017)。因此,文中主要分析了自动站业务运行之前(1965—2004年)的夏季分钟降水气候和气候变化特征,同时也分析了近15年(2005—2019年)夏季分钟降水变化特征。

3 结果分析

3.1 1965—2004年夏季中国分钟降水的气候平均特征

1965—2004年平均夏季分钟降雨频率主要呈现出北少南多的特点,但东北北部和东部的山区要显著多于华北和西北地区。中国南方和东北山地每年夏季出现降水的时间均超过6000 min,其中云南西部和南部、四川西部、西藏东南部等地区最多,可超过10000 min。华北大部分地区、东北平原的夏季分钟降水频率在4000—6000 min 不等,西北大部分地区则小于4000 min(图 2a)。年平均夏季分钟降雨强度的分布则基本呈现出从西北到东南逐渐增大的特点,除了新疆西北部和云南西部之外,100°E以西的中国西部地区降水强度多小于0.035 mm/min;甘肃东部、陕西、山西、内蒙古中东部、东北北部和东部山地的降水强度多在0.04—0.055 mm/min;东北平原、四川盆地、云贵高原、湖北中西部、湖南中部、浙闽山地等地区介于0.055—

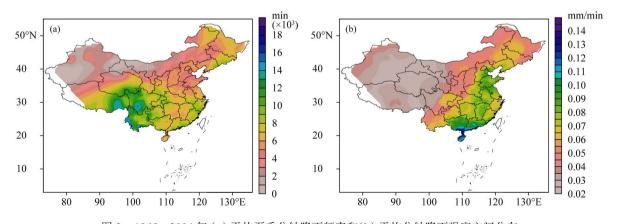


图 2 1965—2004年(a) 平均夏季分钟降雨频率和(b) 平均分钟降雨强度空间分布

Fig. 2 Spatial distributions of (a) minute precipitation frequency and (b) per-minute precipitation intensity averaged for the summers from 1965 to 2004

0.07 mm/min; 其余地区则基本都超过 0.07 mm/min, 其中华南沿海地区的分钟降水强度为中国最高, 超过 0.11 mm/min。分钟降水强度的 0.05 mm/min 线非常接近中国人口分布的黑河一腾冲线, 其大值区与海拔高度的低值区和人口密集区十分吻合(图 2b)。

受观测手段所限,最大1 min 降水量不可能超过10 mm。1965—2004年夏季出现过的最大1 min 降水量的空间分布较不连续,偶然性大,但中国东部地区的分钟降水极值显著多于西部地区。西部大部分地区分钟降雨极值小于2.5 mm,东部大部分地区分钟降雨极值则在3—5 mm。然而,中国范围内分钟降水极值最大的地区为内蒙古中东部,大多在4—7 mm,而不是夏季总降水量最多的华南地区(图 3a)。

最大一次 5 min 降水量的空间分布呈现显著的东多西少特点。100°E以西的大多数地区极端5 min 降水量少于10 mm,东部绝大多数地区大于10 mm。华北平原地区极端5 min 降水量最大,约为20 mm。极端10和30 min 降水量的空间分布都接近于极端5 min 降水量,华北平原仍是降水量最大的区域,极端10 min 降水量大多超过30 mm,30 min 降水量超过50 mm,部分地区分别超过40 mm/(10 min)和80 mm/(30 min)。江淮、江南、华南等区域的极端10 min降水量多在20—30 mm,100°E以西地区基本少于15 mm(图3)。

最大一次 60 min 降水量的小值区也在中国西部地区,超过 80 mm的大值区域主要有 3 个: 华北平原、长江中下游平原、华南地区。其中华北平原和华南部分地区超过 100 mm。极端 1440 min 降水量在中国范围内的分布差异较大,100°E以西大部分地区不足 60 mm,云南、甘肃东部、宁夏、陕西中北部、山西、河北北部高山区、内蒙古中东部、黑龙江、吉林大部分地区的降水量为 60—160 mm,中东部其余省份则多在 200 mm 或更大(高山区域除外)。华南沿海地区最大,可超过 400 mm(图 3)。

1965—2004年平均夏季15个时段最大降水量的空间分布与最大一次降水量存在显著差异,主要呈现出从西北到东南不断增大的特点。年平均夏季最大1、5、10、30、60、1440 min 降水量最小的地区均在南疆、西藏北部、青海中西部、内蒙古西

部、甘肃西部一带,最大的区域则集中在华南沿海地区。对于较短的时段(如1、5 min),东北平原、华北平原、长江中下游平原和华南地区北部的最大降水量年平均值也较高,仅次于华南沿海地区。随着最大降水量统计时段的延长,北方与南方地区的比值降低。东北平原的平均10 min最大降水量为20—26 mm,而华北、江淮、江南等区域则可达到30 mm或更大,黄淮和华南北部超过32 mm。东北地区的平均60 min最大降水量比华北及其以南的平原地区少10 mm以上(图4)。

3.2 1965—2004 年夏季中国分钟降水的气候变 化特征

1965—2004年,中国大部分地区夏季总降水量有增加的趋势,只有华北地区以及云南南部略为减少。分钟降水频率的变化趋势空间分布与夏季总降水量的变化基本一致,华北地区、云南大部分地区、海南东部都存在减少趋势,其中环渤海地区分钟降水频率减少的速率较快,绝对值可达5%/(10 a)或者更大,但未通过0.05显著性水平检验。中国其他地区的分钟降水频率大都增加,其中新疆中部和长江中下游地区增加较快,增加的速率超过5%/(10 a),有一些网格的增加趋势显著。长江以南地区和125°E以东的东北地区的分钟降水强度存在一致的增加趋势;黄河、长江之间大部分地区则趋向于减少。中国范围内分钟降水强度的变化速率绝对值都较小,绝大多数网格都没有超过5%/(10 a)(图5)。

总体来看,中国范围内夏季总降水量与分钟降水频率的时、空变化特征非常一致,分钟降水强度的变化趋势绝对值较小,与夏季总降水量的时、空变化特征完全不同,夏季降水量的变化主要来源于出现降水的分钟数的变化而不是瞬时降水强度的变化,中国东北地区和东南地区的夏季1 min 最大降水量存在较为显著的增大趋势,增大速率多在1%—5%/(10 a)。内蒙古中部地区也存在增大趋势,且增大速率较快,可超过5%/(10 a),但均不显著(图5)。华北、西北、西南大部分地区的夏季1 min 最大降水量没有显著变化。

1965—2004年,中国区域平均夏季降水量整体呈现增大趋势,其中1990—1998年增大速率最快,1999—2004年又显著减少。1965—2004年,中

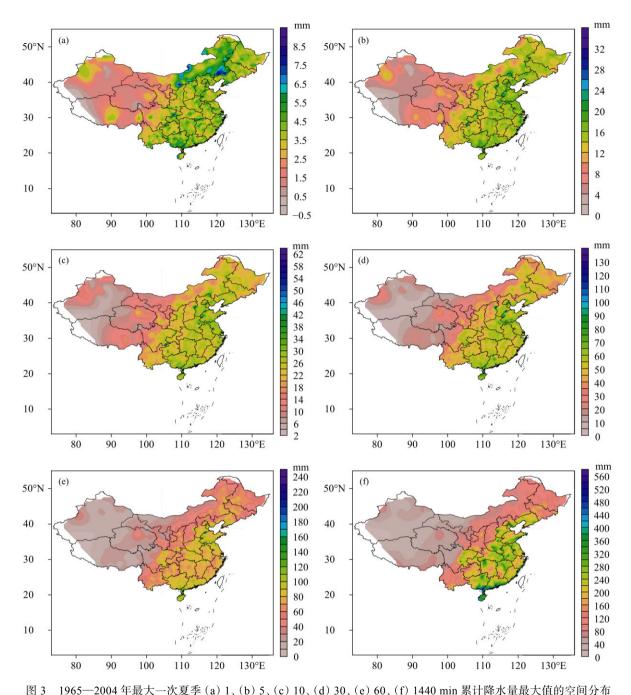


Fig. 3 Spatial distributions of maximum values from 1965 to 2004 of annual maximum precipitation in (a) 1, (b) 5, (c) 10, (d) 30, (e) 60, and (f) 1440 consecutive minutes in summer

国区域平均夏季分钟降水频率的变化趋势与降水量变化一致,即20世纪90年代迅速增多,1999年之后明显减少。1965—2004年,中国平均分钟降水强度没有出现显著变化,虽有年际波动,但年代平均值始终维持在0.06 mm/min。这也说明,1965—2004年中国平均降水量的增加主要来源于分钟降水数的增大(图6)。

自动站观测时期(2005—2019年),中国区域 夏季平均降水量、分钟降水频率、分钟降水强度都 以波动为主,降水量的线性变化很小,分钟降水频 率略有增加,强度有所减小(图6b)。夏季分钟降水 频率变化的空间分布格局仍与夏季总降水量的时 空变化一致,两者都在中国西北、华北、东北中北 部、西南、江南、海南岛等区域增加(图7b)。对比

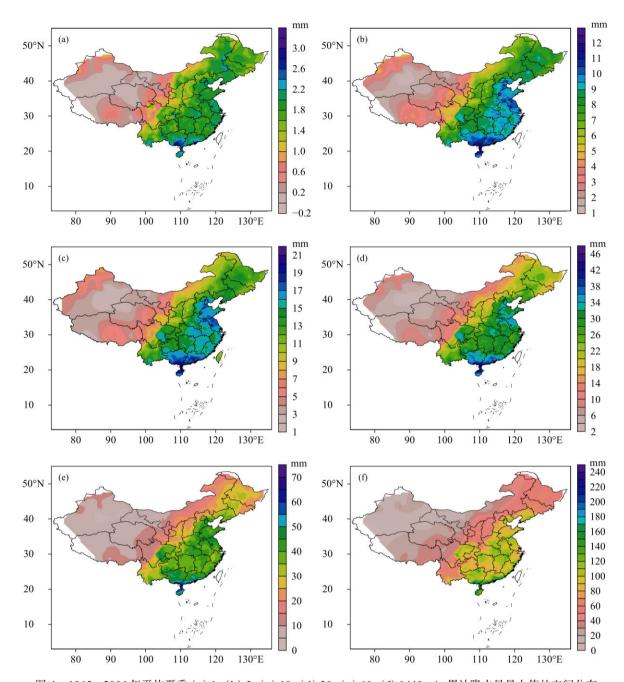


图 4 1965—2004 年平均夏季 (a) 1、(b) 5、(c) 10、(d) 30、(e) 60、(f) 1440 min 累计降水量最大值的空间分布 Fig. 4 Spatial distributions of annual averages from 1965 to 2004 of maximum precipitation in (a) 1, (b) 5, (c) 10, (d) 30, (e) 60, and (f) 1440 consecutive minutes in summer

2005—2019年与1965—2004年,可以发现夏季降水量与分钟降水频率减少的区域明显南移,从环渤海一带移至黄淮、江淮等地区,此外,华南大部分地区出现了一个明显减少的区域。但与1965—2004年一致,绝大多数地区的变化趋势都不显著。

除了江淮之间,100°E以东的大部分地区2005—2019年的分钟降水强度都存在1%/(10 a)以上的增

加趋势,但仅有华北地区的部分网格趋势显著;新疆北部、甘肃北部和西藏西部也主要表现为增加,但新疆南部和西藏中东部地区分钟降水强度显著减小。2005—2019年夏季的最大1 min 降水量的变化趋势与1965—2004年显著不同,呈现出"南增北减"现象,新疆中东部、西北地区东部、内蒙古中西部、黄淮、江淮等存在减少趋势,但均不显著,而

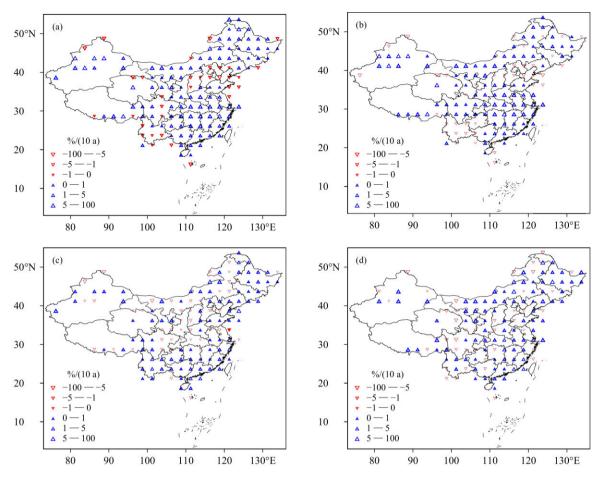


图 5 1965—2004 年夏季平均 (a) 降水量、(b) 分钟降水频率、(c) 分钟降水强度、(d) 1 min 最大降水量的距平百分率 线性变化趋势空间分布(实心三角表示通过显著性水平为 0.05 的检验)

Fig. 5 Spatial distributions of linear trends of percentage anomaly indices of (a) precipitation, (b) minute precipitation frequency, (c) minute precipitation intensity, and (d) maximum 1 min precipitation in the summers from 1965 to 2004 (Filled symbols represent statistically significant trends at 0.05 significance level)

青藏高原大部分地区、云南、华南等区域有增加趋势,其中云南东南部以及广东中东部的增加趋势通过了 0.05 显著性水平检验。

1965—2004年夏季,中国区域平均的15个时段最大降水量距平百分率序列的数值相差不大,每年的差异基本不超过5%,各序列存在明显的年际波动,但在20世纪80—90年代都具有显著的增加趋势。较短历时(60 min 以内)的连续最大降水量增加最快发生在20世纪80年代,较长历时(60 min 以上)的连续最大降水量增加最快发生在20世纪90年代。2005年之后,较短历时的连续最大降水量仍存在显著增加趋势,2016和2018年达到历史最大值;较长历时的连续最大降水量虽有增加趋势,但均不显著(图8,表1)。

从线性变化趋势来看,1965—2004年夏季中国区域平均15个时段最大降水量距平百分率都表现为显著增加,其中,连续45 min、连续30 min和连续20 min最大降水量增加速率最快,均超过了2.30%/(10 a)。连续15 min以及连续60 min及以上时段最大降水量的增加速率介于2.00%—2.30%/(10 a),连续5 min降水量的增加速率相对最小,只有1.743%/(10 a)(表1)。2005—2019年夏季最大降水量距平百分率增加最快的时段是连续15、20、30和10 min,与1965—2004年变化趋势的特征较为一致,但90 min以上的较长时段的最大降水量虽有增加趋势但均不显著。由于年平均夏季分钟降水强度并未有明显增加趋势,近几十年连续最大降水量的增加可以主要归因于不同历时

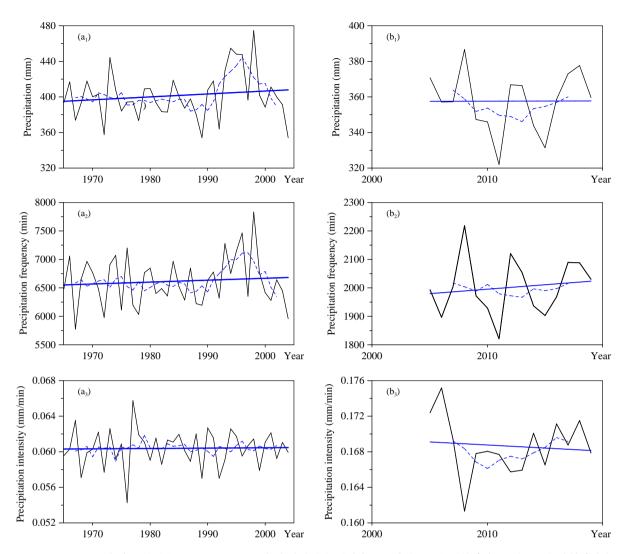


图 6 1965—2004 年自记站 (a) 以及 2005—2019 年自动站 (b) 夏季中国区域 (a₁、b₁) 平均降水量、(a₂、b₂) 分钟降水频率、(a₃、b₃) 分钟降水强度时间序列 (蓝色虚线为 5 a 滑动平均值; 蓝色实线为线性回归趋势)

Fig. 6 Time series of regionally averaged (a_1, b_1) precipitation, (a_2, b_2) minute precipitation frequency, and (a_3, b_3) minute precipitation intensity in the summers from 1965 to 2004 (a) and 2005 to 2019 (b) (Dashed blue lines are five-year moving averages, and solid blue lines are linear trends)

表 1 1965—2019 年夏季中国区域平均 15 个时段最大降水量距平百分率序列的线性 回归趋势(单位: %/(10 a))

Table 1 Linear regression trends shown in the time series of percentage anomaly indices of precipitation in China from 1965 to 2019 (unit: %/(10 a))

统计时段(min)	5	10	15	20	30	45	60	90
1965—2004年变化趋势	1.743	2.122	2.241	2.348	2.376	2.397	2.270	2.221
2005—2019年变化趋势	5.978	7.328	7.606	7.556	7.384	6.789	6.313	5.789
1965—2019年变化趋势	2.500	2.558	2.458	2.430	2.374	2.289	2.173	2.051
统计时段(min)	120	180	240	360	540	720	1440	
1965—2004年变化趋势	2.168	2.058	2.102	2.050	2.000	2.063	2.057	
2005—2019年变化趋势	5.350	4.723	4.271	3.984	3.856	3.800	3.944	
1965—2019年变化趋势	1.988	1.937	1.913	1.865	1.837	1.832	1.873	

注: 表中粗体字代表线性回归趋势通过0.05显著性水平检验。

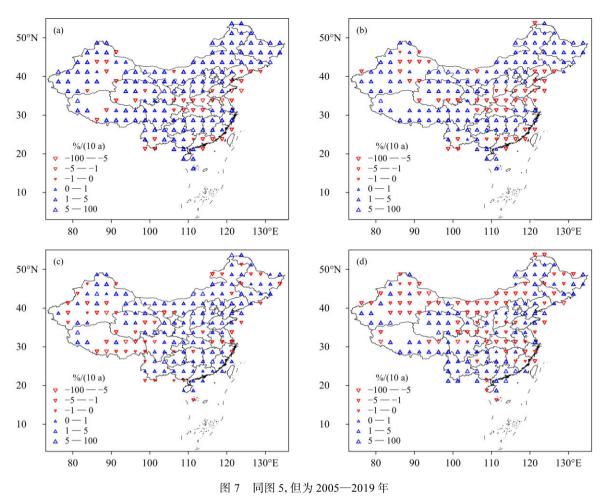


Fig. 7 Same as Fig. 5 but for the period of 2005–2019

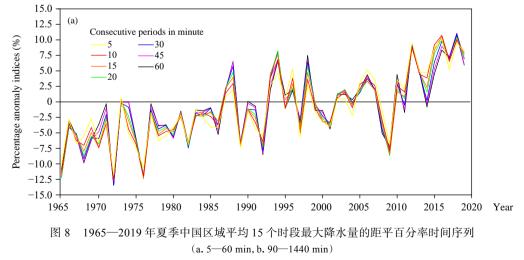


Fig. 8 Time series of regionally averaged percentage anomaly indices of annual maximum 15 consecutive periods in summer from 1965 to 2019 in China (a. 5–60 min, b. 90–1440 min)

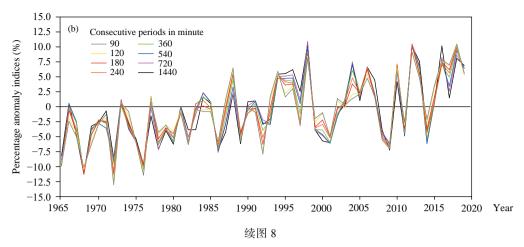


Fig. 8 Continued

强降水过程持续时间的增加,尤其是持续时间 15—45 min 的强降水过程的增加。

4 结论和讨论

利用中国 2225 个自记站和 2435 个自动站的 分钟降水数据,分析了 1965—2019 年分钟降水频率、强度、不同时段最大降水量等指标的空间分布 和长期变化趋势特征,得到以下主要结论:

- (1)1965—2004年,中国平均夏季分钟降水频率从北到南逐渐增多,东北多于华北,山地和高原多于平原。平均夏季分钟降雨强度从西北到东南不断增加,华北平原多于江南的丘陵山地。
- (2)15个时段最大降水量分布都从西北向东南逐渐增大,最小值都在降水量最少的新疆南部、甘肃西北部和内蒙古西部,最大值出现于降水量最多的华南地区;华北平原地区的最大一次降水量多于长江流域。
- (3)1965—2004年,中国大部分区域以及全国平均的夏季降水量和分钟降水频率有一致增加趋势,只有华北、云南南部等少数地区略减少。2005—2019年华北转为增加,减少的区域南移到了黄淮、江淮,华南大部分地区也出现了一致减少趋势。中国范围内分钟降水强度的变化不显著,夏季降水量的变化主要由降水时长变化而不是分钟级强度的变化引起。
- (4)1965—2004年,中国东北、东南、内蒙古中部等地区的夏季1 min 最大降水量存在增加趋势,但 2005—2019年内蒙古大部分地区转为减少。1965—2019年中国平均夏季不同历时最大降水量

的距平百分率都显著增加,其中连续15—45 min 最大降水量增长最快,5、10 min等较短时段以及60 min 以上的较长时段最大降水量也显著增加,但增加速率相对较小。30 min 左右强降水的增加是夏季极端降水事件增加的主要原因。

本研究发现,中国大陆区域内分钟级别降水的 空间分布和长期趋势特征与日级别有一些相似之 处。如年平均分钟降水频率和降水强度的空间分 布与年平均降水日数、日降水强度等的空间分布 (任国玉等, 2015a)较为接近, 华北平原地区分钟级 别降水的极端性也高于江南丘陵地区; 近几十年 来,不同历时最大降水量都存在增加趋势,说明极 端强降水不但更趋向于出现在一日之中,也趋向于 出现在数分钟的时间尺度,是当前中国大陆降水趋 向于极端化的另一个表现形式。然而,1965-2004 年以及2005-2019年夏季中国平均分钟降水强度 未出现增加趋势,降水量的增加主要来源于出现降 水的分钟数的增加,说明强降水量的增加主要来源 于强降水过程的延长而不是瞬时降水强度的增 加。还发现连续 15—45 min 的最大降水量增加最 为明显,可能有一些短时强降水事件的持续时间延 长到了30 min 左右。对于出现这种变化的机理目 前还不清楚,下一步如能应用高精度的雷达、卫星 降水数据,结合数值模拟等方法进行综合分析,则 可以更好地理解暴雨过程演化的原因。

文中所用的分钟降水数据还存在一定缺陷。由于中国各地自记纸以及自动站业务应用年份不同,自记纸观测时段的早期(1965—1980年)以及晚期(2001—2004年)台站缺失情况存在差异。中国

西部地区大部分台站自记纸观测仪器应用时间较晚,早期缺测较多(图 9a);东部的辽宁、江苏等省份的许多台站早在 2001 年即开始应用自动观测系统,缺少了 2001—2004 年的自记纸数据,而西部的新疆、西藏最早在 2005 年才开始有自动站, 2004 年

自记纸降水数据较为完整(表 2, 图 9b)。

由于中国东部和西部地区降水差异巨大,在中国平均序列的早期和晚期所用台站的差异可能导致东、西部权重出现变化,引起对序列趋势估算的偏差。文中所有的经纬度网格面积平均方法减少

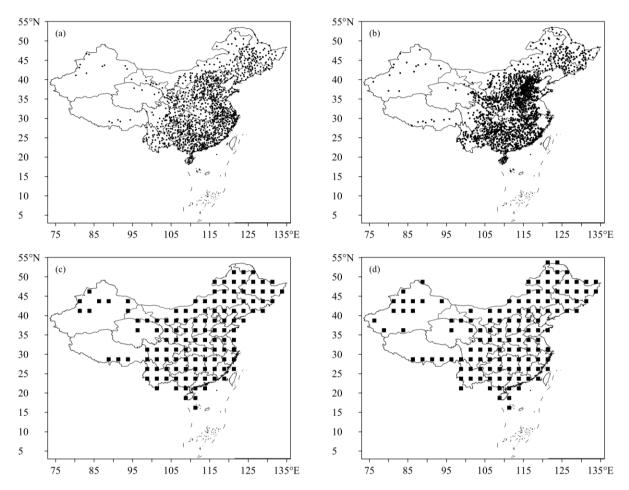


图 9 中国区域平均序列所用 (a. 1965 年, b. 2004 年) 自记降水观测站地理分布及 (c. 1965 年, d. 2004 年) 2.5°网格地理分布 Fig. 9 Geographic distribution of stations in (a. 1965, b. 2004) and 2.5° grids in (c. 1965, d. 2004) used in the regional average time series in China

表 2 中国区域 31 个省/自治区/直辖市启用自动站时间

Table 2 The year when automatic stations were first adopted in 31 provincial-level administrative region in China

省/自治区/直辖市	启用时间	省/自治区/直辖市	启用时间	省/自治区/直辖市	启用时间	省/自治区/直辖市	启用时间
北京	2005	上海	2002	湖北	2002	云南	2004
天津	2005	江苏	2001	湖南	2004	西藏	2005
河北	2005	浙江	2004	广东	2003	甘肃	2004
山西	2004	安徽	2001	广西	2003	陕西	2004
内蒙古	2005	福建	2003	海南	2005	青海	2004
辽宁	2001	江西	2004	四川	2003	宁夏	2004
吉林	2004	山东	2004	重庆	2003	新疆	2005
黑龙江	2005	河南	2004	贵州	2004		

了台站缺测对区域平均序列的影响,1965年(图 9c)与2004年(图 9d)区域平均所用的网格差异明显比台站的差异小得多,只有新疆南部、西藏西南部、辽宁和江苏沿海等区域的部分网格不同。

此外,降雨自记纸迹线提取过程会进行平滑处理(王伯民等,2004),尽管一段时间内的总降水量较为准确,但分钟降水频率很可能会偏多;当前对数据的质量控制主要针对较强的降水(Ju, et al,2019)。这些问题使分钟降水频率的统计存在一定的不确定性。后续需要对不足 0.1 mm/min 的降水数据进行进一步质量控制,进行更准确的统计分析。

除了观测方式的不同之外,分钟降水数据可能会受观测位置变化的影响。已有的研究指出,日降水量的局地性强,时、空分布差异很大(Jamaludin, et al, 2007; Liang, et al, 2012),对一次降水过程,每个分钟降水数据的时、空差异更大,台站迁移很可能引起分钟降水数据的显著差异。而在长时间尺度和大样本统计的条件下,台站迁移对累计降水量、降水强度等统计指标的影响尚无明确的结论,如江志红等(2008)、王秋香等(2012)指出,中国2400个国家级地面气象站之中只有少部分台站的年降水量序列存在不连续。相似地,少量台站观测位置的变化理应不会引起中国平均短时强降水事件长期变化特征的显著差异。

参考文献

- 方怡, 王必强, 成丹等. 2017. 基于分钟数据的自动、人工观测雨量差异分析. 暴雨灾害, 36(3): 281-286. Fang Y, Wang B Q, Cheng D, et al. 2017. The difference between rainfall by automatic recording and manual observation depend on minute data. Torrential Rain Disaster, 36(3): 281-286 (in Chinese)
- 黄伟, 字如聪, 李建. 2012. 1967—2006 年中国东南沿海盛夏降水强度变化特征分析. 气候变化研究进展, 8(3): 164-170. Huang W, Yu R C, Li J. 2012. Analysis of changes in precipitation intensity in later-summer over southeast coast of China in 1967—2006. Progr Inquisit Mutat Climatis, 8(3): 164-170 (in Chinese)
- 江志红, 黄群, 李庆祥. 2008. 近 50 年中国降水序列均一性检验与订正研究. 气候与环境研究, 13(1): 67-74. Jiang Z H, Huang Q, Li Q X. 2008. Study of precipitation series homogeneous adjustment and their correction over China in the last 50 years. Climatic Environ Res, 13(1): 67-74 (in Chinese)
- 景丞, 姜彤, 王艳君等. 2016. 中国区域性极端降水事件及人口经济暴露度研究. 气象学报, 74(4): 572-582. Jing C, Jiang T, Wang Y J, et al. 2016. A study on regional extreme precipitation events and the exposure of

- population and economy in China. Acta Meteor Sinica, 74(4): 572-582 (in Chinese)
- 孔锋, 方建, 吕丽莉等. 2017. 1961-2015 年中国不同强度降雨的变化趋势和 波动特征. 热带地理, 37(4): 473-483. Kong F, Fang J, Lyu L L, et al. 2017. Tendency and fluctuation of different rainfall Intensities in China during 1961-2015. Trop Geogr, 37(4): 473-483 (in Chinese)
- 李建, 宇如聪, 孙溦. 2013. 从小时尺度考察中国中东部极端降水的持续性和季节特征. 气象学报, 71(4): 652-659. Li J, Yu R C, Sun W. 2013. Duration and seasonality of the hourly extreme rainfall in the central-eastern part of China. Acta Meteor Sinica, 71(4): 652-659 (in Chinese)
- 李亚丽, 任芝花, 陈高峰等. 2011. 自记与自动观测降雨量的差异及相关分析. 气象科技, 39(2): 227-230. Li Y L, Ren Z H, Chen G F, et al. 2011. Difference and correlativity analysis between automatic and self-recording observation rainfall. Meteor Sci Technol, 39(2): 227-230 (in Chinese)
- 任国玉, 任玉玉, 战云健等. 2015a. 中国大陆降水时空变异规律: II. 现代变化趋势. 水科学进展, 26(4): 451-465. Ren G Y, Ren Y Y, Zhan Y J, et al. 2015a. Spatial and temporal patterns of precipitation variability over mainland China: II. Recent trends. Adv Water Sci, 26(4): 451-465 (in Chinese)
- 任国玉, 战云健, 任玉玉等. 2015b. 中国大陆降水时空变异规律: I.气候学特征. 水科学进展, 26(3): 299-310. Ren G Y, Zhan Y J, Ren Y Y, et al. 2015b. Spatial and temporal patterns of precipitation variability over mainland China: I. Climatology. Adv Water Sci, 26(3): 299-310 (in Chinese)
- 任芝花, 冯明农, 张洪政等. 2007. 自动与人工观测降雨量的差异及相关性. 应用气象学报, 18(3): 358-364. Ren Z H, Feng M N, Zhang H Z, et al. 2007. The difference and relativity between rainfall by automatic recording and manual observation. J Appl Meteor Sci, 18(3): 358-364 (in Chinese)
- 王伯民, 吕勇平, 张强. 2004. 降水自记纸彩色扫描数字化处理系统. 应用气象学报, 15(6): 737-744. Wang B M, Lu Y P, Zhang Q. 2004. The color scanning digitizing processing system of precipitation autographic record paper. J Appl Meteor Sci, 15(6): 737-744 (in Chinese)
- 王秋香, 李庆祥, 周昊楠等. 2012. 中国降水序列均一性研究及对比分析. 气象, 38(11): 1390-1398. Wang Q X, Li Q X, Zhou H N, et al. 2012. Homogeneity study and comparison analysis on precipitation series over China. Meteor Mon, 38(11): 1390-1398 (in Chinese)
- 王颖, 施能, 顾後强等. 2006. 中国雨日的气候变化. 大气科学, 30(1): 162-170. Wang Y, Shi N, Gu J Q, et al. 2006. Climatic variations of wet days in China. Chinese J Atmos Sci, 30(1): 162-170 (in Chinese)
- 杨金虎, 江志红, 王鵬祥等. 2008. 中国年极端降水事件的时空分布特征. 气候与环境研究, 13(1): 75-83. Yang J H, Jiang Z H, Wang P X, et al. 2008. Temporal and spatial characteristic of extreme precipitation event in China. Climatic Environ Res, 13(1): 75-83 (in Chinese)
- 殷水清, 高歌, 李维京等. 2012. 1961~2004 年海河流域夏季逐时降水变化 趋势. 中国科学: 地球科学, 42(2): 256-266. 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. Sci China Earth Sci, 54(10): 1576-1585
- 翟盘茂, 王萃萃, 李威. 2007. 极端降水事件变化的观测研究. 气候变化研究 进展, 3(3): 144-148. Zhai P M, Wang C C, Li W. 2007. A review on study of change in precipitation extremes. Adv Climate Change Res, 3(3): 144-148 (in Chinese)
- 中国气象局. 2015. 15 个时段年最大降水量数据文件格式: QX/T 286-2015. 北京:气象出版社, 1-5. China Meteorological Administration. 2015. Data file format of annual maximum precipitation in 15 time intervals: QX/T 286-2015. Beijing: China Meteorological Press, 1-5 (in Chinese)
- Easterling D R, Meehl G A, Parmesan C, et al. 2000. Climate extremes: Observations, modeling, and impacts. Science, 289(5487): 2068-2074
- Guo P W, Zhang X K, Zhang S Y, et al. 2014. Decadal variability of extreme precipitation days over Northwest China from 1963 to 2012. J Meteor Res, 28(6): 1099-1113
- IPCC. 2013. Technical summary//Stocker T F, Qin D, Plattner G K, et al. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press
- Jamaludin S, Jemain A A. 2007. Fitting the statistical distributions to the daily rainfall amount in peninsular malaysia. J Teknol, 46(C): 33-48

- Jones P D. 1994. Hemispheric surface air temperature variations: A reanalysis and an update to 1993. J Climate, 7(11): 1794-1802
- Ju X H, Huang S P, Li C J, et al. 2019. Development of a self-recording perminute precipitation dataset for China. J Meteor Res, 33(6): 1157-1167
- Liang L, Zhao L N, Gong Y F, et al. 2012. Probability distribution of summer daily precipitation in the Huaihe basin of China based on Gamma distribution. J Meteor Res, 26(1): 72-84
- Yao C, Yang S, Qian W H, et al. 2008. Regional summer precipitation events in Asia and their changes in the past decades. J Geophys Res: Atmos, 113(D17): D17107
- Yu R C, Li J, Yuan W H, et al. 2010. Changes in characteristics of latesummer precipitation over eastern China in the past 40 years revealed by hourly precipitation data. J Climate, 23(12): 3390-3396
- Zhang H, Zhai P M. 2011. Temporal and spatial characteristics of extreme hourly precipitation over eastern China in the warm season. Adv Atmos Sci. 28(5): 1177
- Zhang X B, Zwiers F W, Hegerl G C, et al. 2007. Detection of human influence on twentieth-century precipitation trends. Nature, 448(7152): 461-465
- Zhang X B, Alexander L, Hegerl G C, et al. 2011. Indices for monitoring changes in extremes based on daily temperature and precipitation data. Wiley Interdiscip Rev, Climate Change, 2(6): 851-870