

1961—2016年中国昼夜降水变化的时空格局

邓海军^{1,2,3}, 郭斌⁴, 曹永强⁵, 陈忠升⁶, 张余庆⁷,
陈兴伟^{1,2,3}, 高路^{1,2,3}, 陈莹^{1,2,3}, 刘梅冰^{1,2,3}

(1. 福建师范大学地理科学学院, 福州 350007; 2. 福建师范大学福建省陆地灾害监测评估工程技术研究中心, 福州 350007; 3. 福建师范大学湿润亚热带山地生态国家重点实验室培育基地, 福州 350007; 4. 山东科技大学测绘学院, 青岛 266590; 5. 辽宁师范大学地理科学学院, 大连 116029; 6. 西华师范大学国土资源学院, 南充 637002; 7. 淮阴师范学院城市与环境学院, 淮安 223300)

摘要: 全球气候变暖背景下中国降水量变化的区域差异显著。基于1961—2016年期间, 全国763个观测台站白昼和夜间的降水观测数据, 分别从昼夜降水量、降水日数、降水强度以及对总降水量的贡献率等四个方面, 解读中国九大流域昼夜降水变化的时空格局。结果表明: ①昼夜降水量变化的流域差异显著, 可归纳为四种类型: 昼夜同增型、昼夜同减型、昼增夜减型和昼减夜增型。②流域总降水量变化与昼夜降水量密切相关。淮河流域降水量减少是由白昼降水量(-0.72 mm/a)减少所致, 而黄河流域降水量减少则是由夜间降水量(-0.21 mm/a)减少所致。③干旱区、半干旱区及半湿润区的流域, 昼夜大雨的雨量要高于昼夜暴雨; 湿润区的流域, 则表现为昼夜暴雨的雨量要高于昼夜大雨, 尤其是珠江流域和东南诸河流域。④从全国尺度来看, 白昼大雨、夜间大雨和暴雨对总降水量的贡献率超过10%, 而白昼暴雨的贡献率约10%。湿润区流域昼夜暴雨对总降水量的贡献率高于昼夜大雨对总降水量的贡献率, 而干旱区-半干旱区流域则相反。研究结果有助于深化认识全球变暖对区域日降水循环的影响。

关键词: 昼夜降水; 降雨日数; 降雨强度; 时空差异; 中国

DOI: 10.11821/dlyj020200100

1 引言

降水是地-气系统之间物质和能量交换的媒介^[1], 全球变暖背景下的降水量变化与升温密切相关^[2,3]。基于克劳修斯-克拉珀龙方程(Clausius-Clapeyron equation)可知, 大气水汽含量增加与近地表升温的关系大致为7.5%/K^[4], 由此引起的热力学变化会导致极端降水事件的增加^[5-7]。研究表明, 从全球尺度来看平均气温每升高1℃, 日极端降水量将会增加5.2%^[8]。另外, 全球尺度的年均降水量变化的区域差异显著^[9-12]。

全球变暖背景下, 中国不同区域的年均降水量变化的差异显著。西北干旱区自20世纪80年代以来呈暖湿化趋势^[13]。东南和华南地区降水量呈增加趋势, 而华北地区、东北地区及西南地区的降水量呈递减趋势^[14,15]。同时, 大部分区域的降雨日数呈递减趋势^[16]。日降水的季节变化差异显著^[17], 表现为冬春季节降水量呈增加趋势, 夏秋季节降水量呈

收稿日期: 2020-02-17; 修订日期: 2020-04-04

基金项目: 国家自然科学基金项目(41807159, 41877167); 福建省教育厅中青年教师教育科研项目(JT180067)

作者简介: 邓海军(1987-), 男, 湖南隆回人, 博士, 副研究员, 硕士生导师, 研究方向为山区气候水文过程及流域水循环。E-mail: denghj@fjnu.edu.cn

通讯作者: 曹永强(1972-), 男, 内蒙古丰镇人, 教授, 博士生导师, 主要从事资源环境与灾害方面研究。

E-mail: caoyongqiang@lnnu.edu.cn

递减趋势^[18]。此外,不同区域的昼夜降水量变化特征各异,例如,华北地区的夏季降水量减少由夏季白昼降水减少所致^[19],而淮河流域降水量变化与夜间降水量变化密切相关^[20]。昼夜降水量变化是精化解读全球气候变化背景下降水量变化的重要内容。表1结果显示,当前的研究成果多集中于局部区域(例如,某一个流域)和某一方面内容(例如,昼夜降水量或降水强度),缺乏对全国尺度的昼夜降水变化特征的详细研究。

表1 基于站点数据的中国昼夜降水量变化研究

Tab. 1 The study on daytime and nighttime precipitation changes based on station data in China

区域	时间序列	主要结论	文献来源
淮河流域	1961—2009年	昼夜降水总体呈北少南多分布;不同季节和不同强度等级降水昼夜差异显著。	[20]
西南地区	1961—2016年	昼夜降水均呈递减趋势,其变化与大气环流因子变化密切相关。	[21]
华北地区	1960—2014年	由东南向西北递减;夏季昼降水的显著减少是华北地区降水减少的主要原因之一。	[19]
西北干旱区	1961—2005年	昼、夜降水量均呈显著增加趋势;降水量增加的主要由降水日数的增多所致。	[22]
青藏高原	1961—2006年	大部分地区年均和季节的夜雨率均呈减少趋势,冬半年除外;昼雨天数大部分地区年、季都呈增多趋势。	[23]

因此,本文基于1961—2016年期间全国763个台站的观测资料,从流域尺度来研究中国昼夜降水变化,详细分析1961—2016年期间全国九大流域的昼夜降水量、降水日数、降水强度及昼夜降水对总降水量贡献,以期更好的解读全球气候变暖背景下中国昼夜降水量的变化特征。

2 研究区域、数据与方法

2.1 研究区域

文中的九大流域,是指黄河流域、长江流域、珠江流域、海河流域、淮河流域、松花江-辽河流域、东南诸河流域、西南诸河流域、内陆河流域。其中内陆河流域,亦称为西北诸河流域(图1)。这九大流域具有区域代表性,九大流域边界的矢量数据由中国科学院资源环境科学数据中心提供(<http://www.resdc.cn/data.aspx?DATAID=141>)。九大流域的多年平均的日降水量、白昼降水、夜间降水及干湿条件等信息详见表2。

2.2 数据与方法

日降水量数据由国家气象信息数据中心(<http://data.cma.cn/site/index.html>)提供的《中国地面气候资料日值数据集(V3.0)》。该数据集通过严格的数据质量控制^[24],是目前研究中国降水量变化

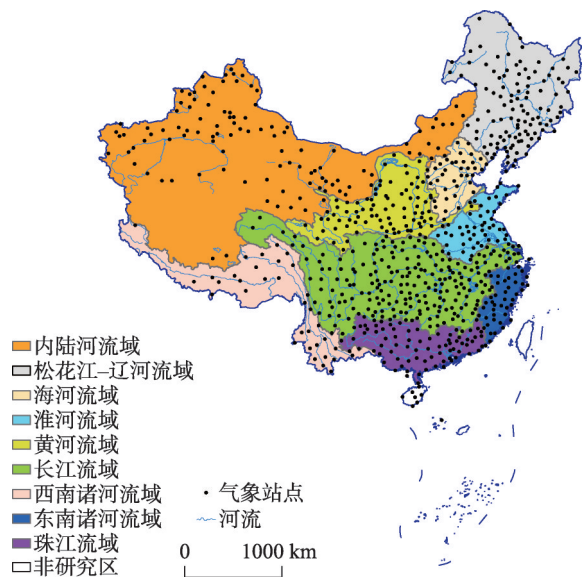


图1 研究区域气象观测站点

Fig. 1 Study area and meteorological stations of China

注:此图基于国家自然资源部标准地图服务系统的标准地图(审图号:GS(2020)4619号)绘制,底图无修改。

表2 九大流域多年平均的降水和干湿状况

Tab. 2 Average annual precipitation and arid/humid conditions in the nine river basins of China

流域	年均白昼降水(mm)	年均夜间降水(mm)	年均总降水(mm)	干湿条件
内陆河流域	66.8	66.2	133.0	干旱区
松花江-辽河流域	282.5	257.7	540.2	湿润-半湿润区
海河流域	247.0	255.2	502.2	半湿润区
淮河流域	408.9	435.2	844.1	湿润区
珠江流域	837.0	741.4	1578.4	湿润区
东南诸河流域	842.4	755.1	1597.5	湿润区
西南诸河流域	347.3	463.8	811.1	湿润区
长江流域	522.5	633.3	1156.1	湿润区
黄河流域	219.0	230.9	449.9	半湿润-半干旱区

最可靠的数据集之一。文中选取1961—2016年时间序列完整的763个站点,日降水量记录为北京时间的3个时段:20:00—20:00、20:00—08:00、08:00—20:00。

文中将20:00—20:00降水视为全天降水量,即日降水;20:00—08:00降水视为夜晚降水量,即夜间降水;08:00—20:00降水视为白天降水量,即白昼降水。依据各时段的数据,分别计算了各个站点的年和季节的日降水、白昼降水量和夜间降水量。在此基础上,根据三均值法(式1)计算各个流域的降水量。

$$\bar{x} = Q1 \times 0.25 + Q2 \times 0.5 + Q3 \times 0.25 \quad (1)$$

式中: x 为平均降水量(mm); $Q1$ 、 $Q2$ 、 $Q3$ 分别表示降水数据矩阵的下四分位、中位数、上四分位,该方法的详细描述请见Deng等^[25]。

降水日数(即雨日数),根据国家气象信息数据中心降水量的计量方法,即单位时间内(20:00—20:00)降水量0.1 mm以上被视为发生降水。因此,雨日数为20:00—20:00降水量0.1 mm以上的天数,夜间雨日数即20:00—08:00降水量0.1 mm以上的天数,白昼雨日数即08:00—20:00降水量0.1 mm以上的天数。

降水强度,即单位时间内的降水量。文中定义了两个降水强度指数分别为大雨和暴雨,而暴雨则包括大暴雨和特大暴雨。根据中国气象局发布的《降水量等级》给出的标准:大雨,即12小时降水量为15.0~29.9 mm或24小时降水量为25.0~49.9 mm;暴雨,即12小时降水量为30 mm以上或24小时降水量50.0 mm以上。文中主要分析了全国九大流域白昼和夜间的大雨和暴雨变化特征。在此基础上,为分析白昼大雨、白昼暴雨、夜间大雨及夜间暴雨的年降水量对年总降水量的贡献率大小,文中计算了年均的昼夜大雨和暴雨对年总降水量的贡献率。同时,也分析了不同年代昼夜降水量对总水量的贡献率。

文中的日降水、白昼降水、夜间降水等变量的趋势分析方法均采用Mann-Kendall非参数检验方法^[26]。同时,趋势率的估计采用Sen's估计^[27]。

3 结果分析

3.1 昼夜降水量变化的时空特征

1961—2016年期间,日降水量的空间变化特征(图2a)表现为,东南地区(包括长江流域的中下游、东南诸河流域及珠江流域的东部地区)和西北地区(内陆河流域)的降水量呈增加趋势,且东南地区的增加趋势要大于西北地区。这一结果与以往的研究结

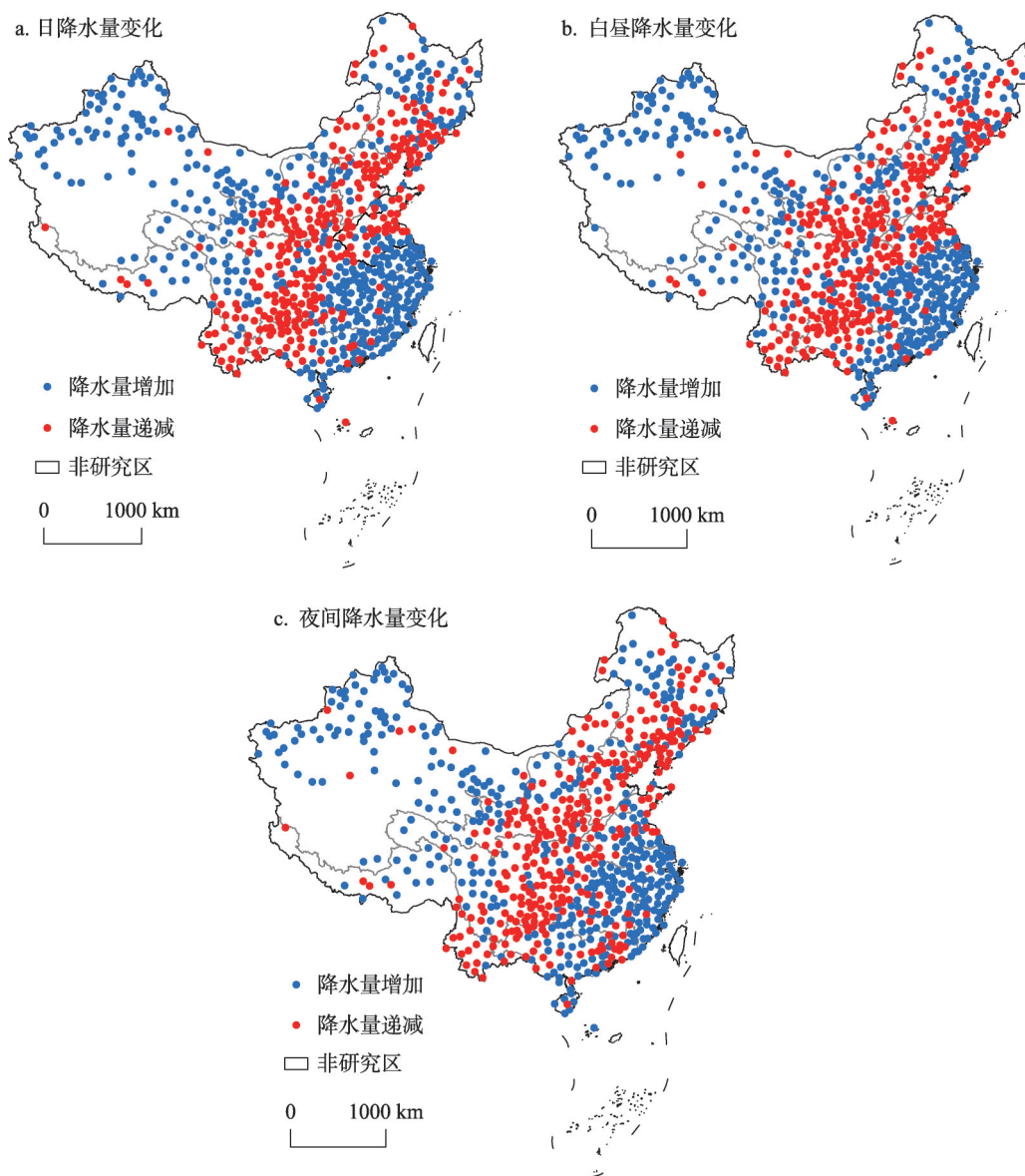


图2 1961—2016年中国不同时段降水量的空间变化结果

Fig. 2 Spatial pattern of precipitation variations in China from 1961 to 2016

注：此图基于国家自然资源部标准地图服务系统的标准地图（审图号：GS(2020)4619号）绘制，底图无修改。

果一致^[14]。但是，从西南地区到东北地区的日降水量以递减趋势为主（图2a）。白昼降水（图2b）和夜间降水（图2c）的空间变化特征与日降水（图2a）的空间变化特征一致。

昼夜降水量变化的流域差异显著，同时流域内的差异亦显著（表3）。全国九大流域中，白昼降水量呈增加趋势的流域有4个，依次是东南诸河流域（2.4 mm/a）、珠江流域（0.86 mm/a）、内陆河流域（0.39 mm/a）及西南诸河流域（0.28 mm/a）。白昼降水量呈递减趋势的流域有2个，分别是淮河流域（-0.72 mm/a）和海河流域（-0.41 mm/a）。另外，松花江-辽河流域、长江流域及黄河流域的白昼降水量变化不明显。昼夜降水量变化趋势标准差是用来衡量流域内的昼夜降水变化差异（表3）。白昼降水量变化的流域内差

表3 1961—2016年九大流域白昼和夜间降水量变化结果

Tab. 3 Daytime and nighttime precipitation changes in the nine river basins of China during 1961-2016

流域名称	白昼降水量趋势 (mm/a)	白昼降水量 趋势标准差	夜间降水量趋势 (mm/a)	夜间降水量 趋势标准差	流域内站 点个数
内陆河流域	0.39	0.39	0.30	0.36	109
海河流域	-0.41	0.74	-0.32	0.63	37
淮河流域	-0.72	0.98	0.14	1.03	46
珠江流域	0.86	1.92	0.20	1.57	73
松花江-辽河流域	0.01	0.52	-0.15	0.58	110
东南诸河流域	2.40	0.88	2.06	1.05	36
西南诸河流域	0.28	0.89	-0.15	0.78	34
长江流域	-0.004	1.24	0.07	1.37	212
黄河流域	-0.09	0.53	-0.21	0.53	85

异较为明显的流域为长江流域（标准差=1.24）和珠江流域（标准差=1.92）。夜间降水量呈增加趋势的流域有5个，依次为东南诸河流域（2.06 mm/a）、内陆河流域（0.3 mm/a）、珠江流域（0.2 mm/a）、淮河流域（0.14 mm/a）及长江流域（0.07 mm/a）。其他4个流域的夜间降水量均呈递减趋势，海河流域的递减趋势最大（-0.32 mm/a）。同样，珠江流域（标准差=1.57）和长江流域（标准差=1.37）也是夜间降水量变化流域内差异最大的两个流域。

因此，中国昼夜降水量变化的流域差异可归纳为四种类型：昼夜同增型，包括内陆河流域、珠江流域及东南诸河流域；昼夜同减型，包括海河流域和黄河流域；昼增夜减型，包括松花江-辽河流域和西南诸河流域；昼减夜增型，包括淮河流域和长江流域。

全国尺度的年平均白昼和夜间降水量的变化不明显，但白昼和夜间的雨日数呈显著的递减趋势（图3）。图3a和3b结果表明，1961年以来，白昼和夜间的降雨频率呈显著下降趋势，递减速率分别为0.1 day/a（ $P=0.005$ ）和0.3 day/a（ $P=0.000$ ）。昼夜雨日数的减少反映了昼夜降水频率的降低，但白昼（-0.072 mm/a）和夜间（0.073 mm/a）降雨量的变化并不显著（图3c和图3d）。这一结果可以说明文章研究时段内中国白昼和夜间的降雨强度有所增强，但需要进一步深入分析。

3.2 昼夜极端降水的变化特征

1961—2016年期间，全国尺度的昼夜大雨和暴雨的雨日数变化不明显（图4a和图4b），但白昼暴雨的降雨量（0.14 mm/a，图4c）和夜间暴雨的降雨量（0.22 mm/a，图4d）呈增加趋势。图4结果也表明，夜间大雨和暴雨的降雨量增加趋势要大于白昼大雨和暴雨的降雨量增加趋势。暴雨的雨日数或降雨频率的变化不明显，但暴雨的降雨量的增加趋势较大，因此，需要从区域角度分析昼夜极端降水的变化特征。

从流域尺度来看，干旱区、半干旱区及半湿润区的流域，多年平均的白昼大雨和夜间大雨的雨日数和雨量都要高于白昼暴雨和夜间暴雨。而湿润区的流域，多年平均的白昼暴雨和夜间暴雨的雨量要高于多年平均的白昼大雨和夜间大雨，但是雨日数要少于白昼大雨和夜间暴雨，尤其是珠江流域和东南诸河流域。1961年以来，湿润区的流域昼夜大雨和暴雨的雨日数和降雨量呈增加趋势，而干旱半干旱区的流域变化不明显，甚至呈递减趋势。图5a结果表明，东南诸河流域的白昼大雨的降雨量（0.7 mm/a）和雨日数（0.03 day/a）都呈增加趋势，珠江流域也呈微弱增加趋势，其他流域都无变化。白昼暴雨的降雨量和雨日数都呈增加趋势的流域为东南诸河流域（1.4 mm/a和0.03 day/a）和珠

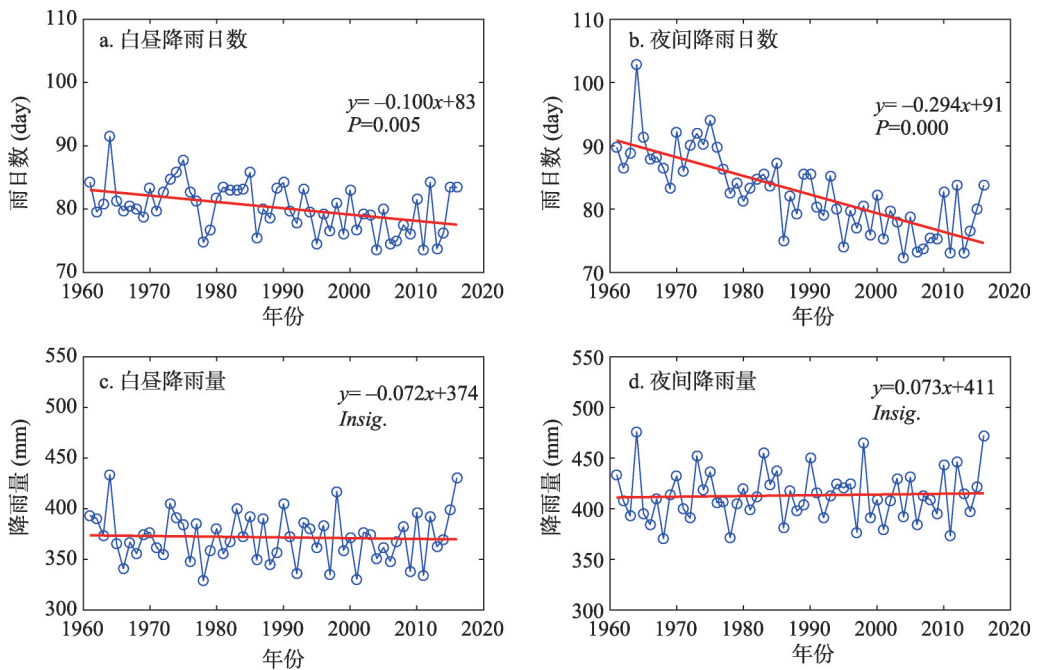


图3 1961—2016年全国昼夜降雨日数和降雨量变化

Fig. 3 The changes in frequency and amount of precipitation in daytime and nighttime over China from 1961 to 2016; (a) and (b) are frequency of precipitation in daytime and nighttime, respectively; (c) and (d) are amount of precipitation in daytime and nighttime, respectively

江流域 (0.9 mm/a 和 0.02 day/a)，而海河流域的白昼暴雨的降雨量和雨日数都呈递减趋势，长江流域和淮河流域的白昼暴雨的雨日数都无明显变化，但这两个流域白昼暴雨的降雨量变化呈相反趋势 (图 5b)。夜间大雨的降雨量和雨日数变化特征与白昼大雨的变化类似，除了珠江流域和东南诸河流域都呈增加趋势外，其他流域都无明显变化 (图 5c)。夜间暴雨的降雨量和雨日数增加最大的流域亦为东南诸河流域，分别为 1.1 mm/a 和 0.02 day/a，其次是长江流域和珠江流域 (图 5d)。海河流域夜间暴雨的雨日数无变化，但是暴雨量呈微弱递减趋势，而淮河流域夜间暴雨的降雨量变化恰好海河流域相反。总体来说，1961 年以来昼夜极端降水的降雨量和雨日数变化呈显著的流域差异，东南诸河流域和珠江流域的昼夜大雨的降雨量和雨日数都呈增加趋势。

3.3 昼夜极端降水对总降水量的贡献率

湿润区流域的年均昼夜暴雨雨量对总降水量的贡献率大于昼夜大雨对总降水量的贡献率，而干旱区-半干旱区流域则相反 (图 6)。从全国尺度来看，白昼大雨、夜间大雨和暴雨对总降水量的贡献率超过 10%，而白昼暴雨的贡献率接近 10%。这表明全国年总降水量中有 40% 的降水以大雨或暴雨形式降落，湿润区的流域超过了 50%，而干旱区流域却不足 30%。内陆河流域，昼夜极端降水对年总降水量的贡献率较低，因为干旱区的年降水量少，昼夜大雨和暴雨发生的频率低。松花江-辽河流域和黄河流域都是白昼大雨和夜间大雨的雨量对总降水量的贡献率要高于白昼暴雨和夜间暴雨，但松花江-辽河流域的白昼暴雨和夜间暴雨的贡献率接近 10%。海河流域的夜间暴雨雨量对总降水量的贡献率超过 15%，要高于其他极端降水的贡献率。西南诸河流域的夜间大雨雨量对总降水量的贡献率 (14%) 远高于其他极端降水的贡献率 (5%)。淮河流域的白昼暴雨和夜间暴

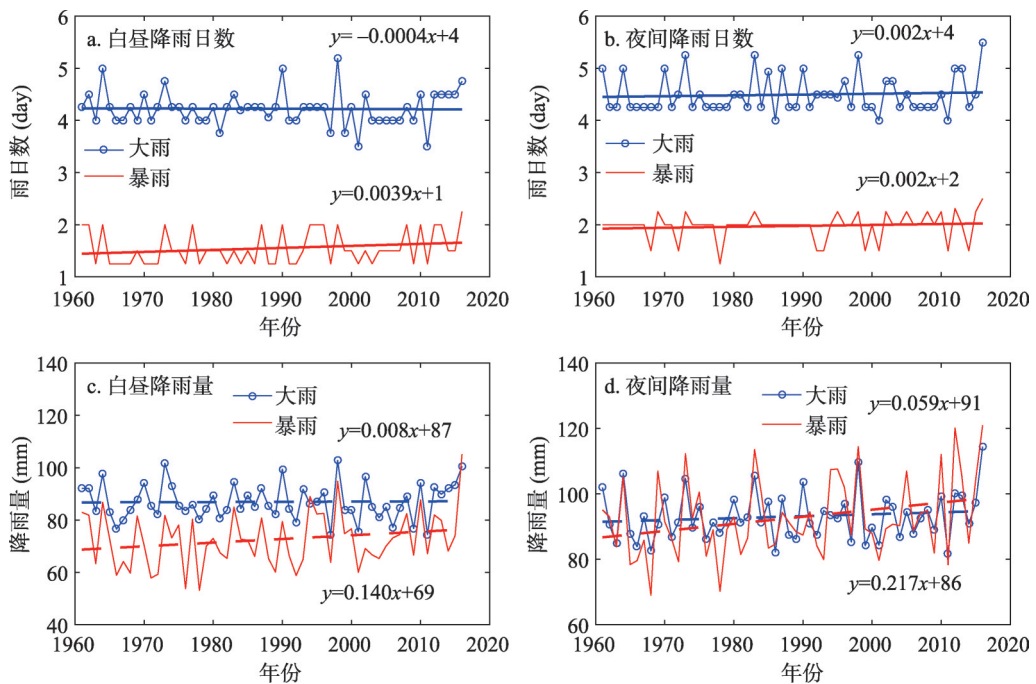


图4 1961—2016年全国昼夜大雨和暴雨的雨量和雨日数变化

Fig. 4 The changes of daytime and nighttime extremes precipitation (including heavy rain and torrential rain) in China from 1961 to 2016; (a) and (b) are frequencies of daytime and nighttime extreme precipitation, respectively; (c) and (d) are amount of daytime and nighttime extreme precipitation, respectively

雨对总降水量的贡献率要显著高于白昼大雨和夜间大雨的贡献率,同时,夜间暴雨的贡献率(20%)要高于白昼暴雨的贡献率(16%)。同样,珠江流域亦是白昼暴雨和夜间暴雨的贡献率(均为19%)要显著高于白昼大雨和夜间大雨的贡献率。东南诸河流域白昼大雨和暴雨的贡献率略高于白昼暴雨和夜间暴雨的贡献率。长江流域的夜间暴雨的贡献率要明显高于其他极端降水的贡献率。因此,湿润区流域的暴雨雨量对总降水量的贡献率要高于大雨的贡献率,而干旱区-半旱区的流域则相反。

图7结果表明,从全国尺度来看,不同年代的昼夜大雨和暴雨雨量对总降水量的贡献率比较稳定,但流域尺度的分析结果则显示这种贡献率的区域差异显著。内陆河流域,白昼大雨和夜间大雨的贡献率呈增加趋势,白昼大雨的贡献率从20世纪60年代的4%增加到21世纪初的5%,夜间大雨的贡献率从4%增加到6%。昼夜暴雨的贡献率不同年代间的差异不大。海河流域,白昼大雨的贡献率呈增加趋势,但白昼暴雨和夜间暴雨的贡献率随年代呈递减趋势。淮河流域,白昼大雨的贡献率随年代呈先增加后递减的趋势,但夜间大雨的贡献率随年代呈先递减后增加的趋势;白昼暴雨的贡献率随年代呈递减趋势,但夜间暴雨的贡献率则呈增加趋势。珠江流域,昼夜大雨和暴雨的贡献率都随年代呈增加趋势。松花江-辽河流域,白昼大雨的贡献率随年代呈先增加后递减的趋势,而白昼暴雨和夜间大雨和暴雨的贡献率都呈递减趋势。东南诸河流域,白昼和夜间大雨的贡献率随年代呈增加趋势,而白昼和夜间暴雨的贡献率都随年代先递减后增加趋势。西南诸河流域,白昼大雨、白昼暴雨及夜间暴雨对总降水量的贡献率随年代呈微弱增加趋势,而夜间暴雨对总降水量的贡献率在14%左右,但随年代呈微弱递减趋势。长江流域,白昼大雨和夜间大雨对总降水量的贡献率随年代的无明显变化,但白昼暴雨和夜间

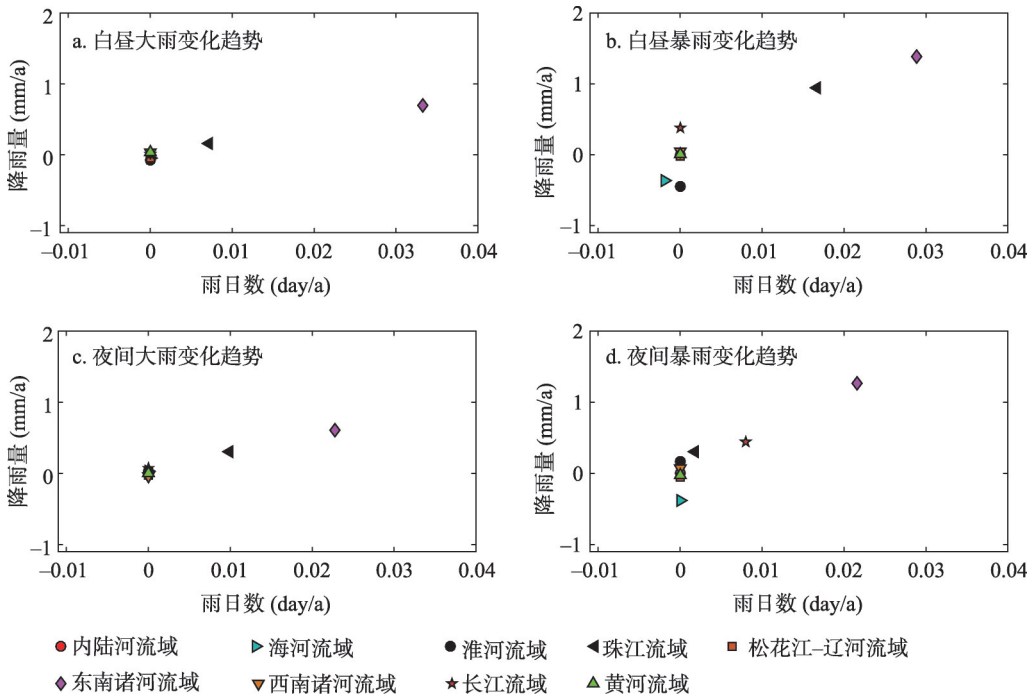


图5 1961—2016年九大流域昼夜大雨和暴雨的降雨量和雨日数的变化趋势

Fig. 5 The changes in the frequencies (day) and amounts (mm) of daytime and nighttime extremes precipitation (heavy rain and torrential rain) in the nine river basins of China from 1961 to 2016. (a) and (b) are the heavy rain and torrential rain of daytime, (c) and (d) are the heavy rain and torrential rain of nighttime

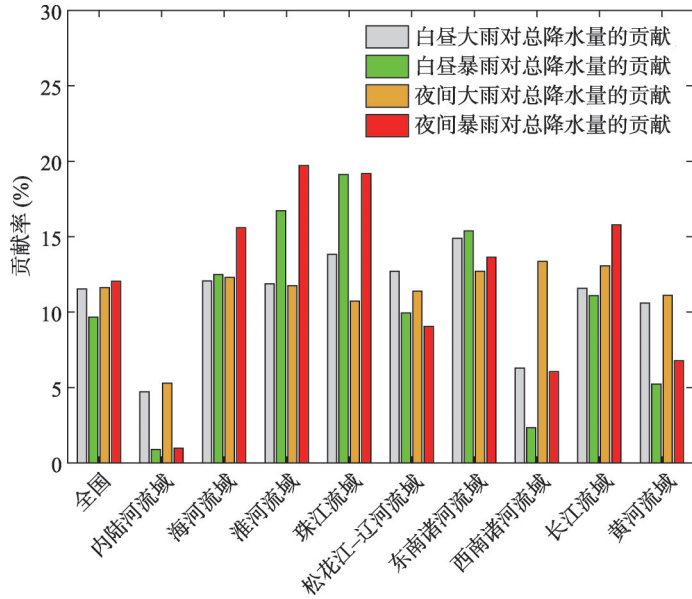


图6 1961—2016年期间九大流域的年均昼夜大雨和暴雨对年总降水量的贡献率

Fig. 6 The contributions of annual daytime and nighttime heavy rain and torrential rain to annual precipitation in the nine river basins of China during 1961-2016

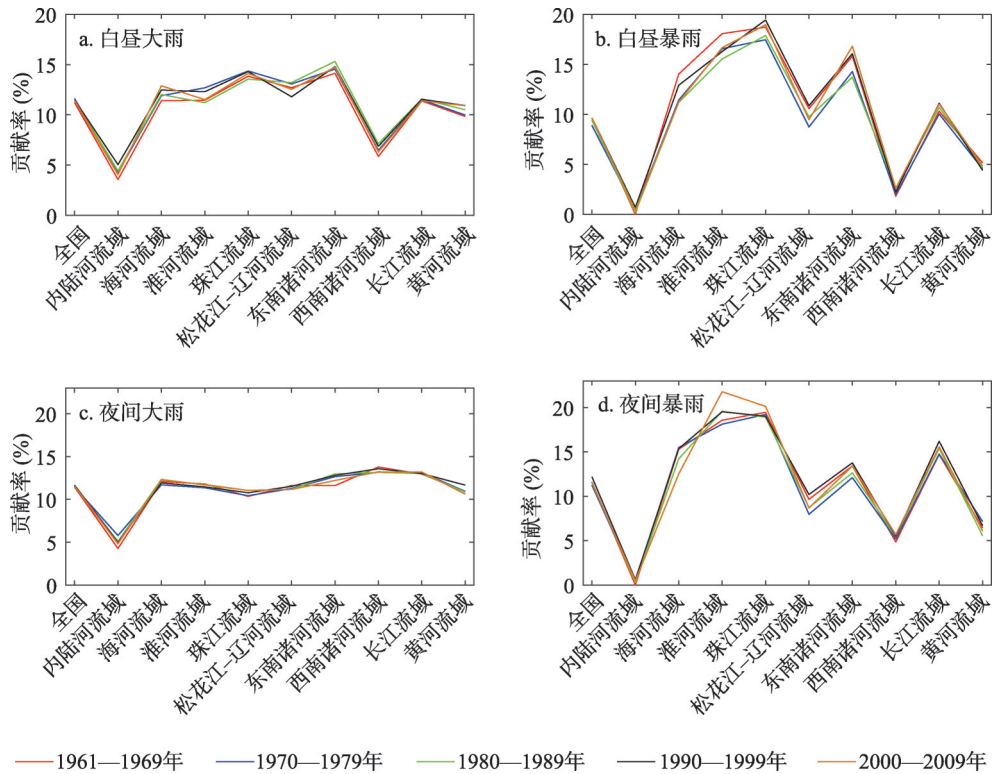


图7 九大流域不同年代年均昼夜大雨和暴雨对年总降水量的贡献率

Fig. 7 The contributions of annual daytime and nighttime heavy rain and torrential rain to annual precipitation in the nine river basins of China in different periods. (a) represents the contribution of daytime heavy rain, (b) represents the contribution of daytime torrential rain, (c) represents the contribution of nighttime heavy rain, and (d) represents the contribution of nighttime torrential rain

暴雨的贡献率则随年代呈增加趋势。黄河流域，白昼大雨对总降水量的贡献率随年代呈增加趋势，夜间大雨的贡献率则随年代呈递减趋势，而白昼暴雨和夜间暴雨的贡献率变化不明显。

4 结论与讨论

4.1 结论

(1) 1961年以来，全国年均降水量变化不明显，但空间差异显著，具体表现为：东南部（包括长江流域的中下游、东南诸河流域及珠江流域的东部地区）和西北地区（内陆河流域）的降水量呈增加趋势，且东南部的增加趋势（4.0~6.0 mm/a）要大于西北地区（2.0~4.0 mm/a）；自东北地区到西南地区的降水量以递减趋势为主（-4.0~-2.0 mm/a）。

(2) 昼夜降水量变化的流域间差异显著，同时流域内的差异亦显著。九大流域昼夜降水量变化特征可归纳为四种类型：昼夜同增型，例如内陆河流域、珠江流域及东南诸河流域；昼夜同减型，例如海河流域和黄河流域；昼增夜减型，例如松花江-辽河流域和西南诸河流域；昼减夜增型，例如淮河流域和长江流域。昼夜降水量变化流域内差异最大的长江流域和珠江流域。长江流域观测站点的白昼和夜间降水量变化的标准差分别为1.24和1.37；珠江流域观测站点的白昼和夜间降水量变化的标准差达1.92和1.57。

(3) 湿润区的流域昼夜大雨和暴雨的雨日数和降雨量呈增加趋势, 而干旱半干旱区的流域变化不明显, 甚至呈递减趋势。东南诸河流域的白昼大雨的降雨量(1 mm/a)和雨日数(0.03 day/a)都呈增加趋势, 珠江流域也呈微弱增加趋势, 其他流域都无变化。

(4) 全国尺度来看, 白昼大雨、夜间大雨和暴雨对总降水量的贡献率超过10%, 而白昼暴雨的贡献率接近10%。具体表现为, 湿润区流域的年均的昼夜暴雨雨量对总降水量的贡献率大于昼夜大雨对总降水量的贡献率, 而干旱区-半干旱区流域则相反。

(5) 不同年代的昼夜大雨和暴雨雨量对总降水量的贡献率比较稳定, 但流域尺度的分析结果则显示这种贡献率的流域差异显著。例如, 内陆河流域, 白昼大雨和夜间大雨的贡献率呈增加趋势。西南诸河流域, 白昼大雨、白昼暴雨及夜间暴雨对总降水量的贡献率随年代呈微弱增加趋势, 而夜间暴雨对总降水量的贡献率在14%左右, 但呈微弱递减趋势。

4.2 讨论

1961年以来, 干旱区和湿润区的流域的降水量均呈增加趋势, 而位于气候过渡区域的流域的降水大多数呈递减趋势, 例如, 淮河流域^[28,29]。图5和表1结果表明, 1961年以来昼夜极端降水的降雨量和雨日数变化呈显著的流域差异, 东南诸流域和珠江流域的昼夜大雨的降雨量和雨日数都呈增加趋势。珠江流域和东南诸流域的昼夜暴雨降雨量要高于昼夜大雨, 与这两个流域受热带气旋活动的影响较为频繁有关^[30]。另外, 西南地区夜间降水量增加和华南地区白昼降水量增加的成因和机制分析将是本研究下一步工作的重点。

致谢: 真诚感谢匿名评审专家在论文评审中所付出的时间和精力, 评审专家对本文图表完善和结果分析方面的修改意见, 使本文获益匪浅。

参考文献(References)

- [1] Trenberth K E, Dai Aiguo, Rasmussen R M, et al. The changing character of precipitation. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2003, 84(9): 1205-1218.
- [2] Alexander L V, Zhang X, Peterson T C, et al. Global observed changes in daily climate extremes of temperature and precipitation. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2006, 111, D05109.
- [3] Trenberth K E, Shea D J. Relationships between precipitation and surface temperature. *Geophysical Research Letters*, 2005, 32, L14703.
- [4] Frei C, Christoph S, Daniel L, et al. Heavy precipitation processes in a warmer climate. *Geophysical Research Letters*, 1998, 25(9): 1431-1434.
- [5] Dai Aiguo, Trenberth K E, Karl T R. Global variations in droughts and wet spells: 1900-1995. *Geophysical Research Letters*, 1998, 25(17): 3367-3370.
- [6] Emori S, Brown S J. Dynamic and thermodynamic changes in mean and extreme precipitation under changed climate. *Geophysical Research Letters*, 2005, 32, L17706.
- [7] Tandon N F, Zhang X, Sobel A H. Understanding the dynamics of future changes in extreme precipitation intensity. *Geophysical Research Letters*, 2018, 45(6): 2870-2878.
- [8] Zhang Xuebin, Wan Hui, Zwiers F W, et al. Attributing intensification of precipitation extremes to human influence. *Geophysical Research Letters*, 2013, 40(19): 5252-5257.
- [9] Sun Fubao, Roderick M L, Farquhar G D. Changes in the variability of global land precipitation. *Geophysical Research Letters*, 2012, 39, L19402.
- [10] Wang Bin, Ding Qinghua. Changes in global monsoon precipitation over the past 56 years. *Geophysical Research Letters*, 2006, 33, L06711.
- [11] Swanson K L, Sugihara G, Tsonis A A. Long-term natural variability and 20th century climate change. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2009, 106(38): 16120.

- [12] Sun Fubao, Roderick M L, Farquhar G D. Rainfall statistics, stationarity, and climate change. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2018, 115(10): 2305.
- [13] Shi Yafeng, Shen Yongping, Kang Ersi, et al. Recent and future climate change in Northwest China. *Climatic Change*, 2007, 80(3): 379-393.
- [14] 翟盘茂, 邹旭恺. 1951—2003年中国气温和降水变化及其对干旱的影响. *气候变化研究进展*, 2005, 1(1): 16-18. [Zhai Panmao, Zou Xukai. Changes in temperature and precipitation and their impacts on drought in China during 1951-2003. *Advances in Climate Change Research*, 2005, 1(1): 16-18.]
- [15] Ma Shuangmei, Zhou Tianjun, Dai Aiguo, et al. Observed changes in the distributions of daily precipitation frequency and amount over China from 1960 to 2013. *Journal of Climate*, 2015, 28(17): 6960-6978.
- [16] Guo Jianping, Su Tianning, Chen Dandan, et al. Declining summertime local-scale precipitation frequency over China and the United States, 1981-2012: The disparate roles of aerosols. *Geophysical Research Letters*, 2019, 46.
- [17] 宇如聪, 李建, 陈吴明, 等. 中国大陆降水日变化研究进展. *气象学报*, 2014, 72(5): 948-968. [Yu Rucong, Li Jian, Chen Haoming, et al. Progress in studies of the precipitation diurnal variation over contiguous China. *Acta Meteorologica Sinica*, 2014, 72(5): 948-968.]
- [18] Tian Qing, Prange M, Merkel U. Precipitation and temperature changes in the major Chinese river basins during 1957-2013 and links to sea surface temperature. *Journal of Hydrology*, 2016, 536: 208-221.
- [19] 贾艳青, 张勃, 张耀, 等. 中国华北地区昼夜降水时空变化特征. *地理与地理信息科学*, 2016, 32(5): 103-109. [Jia Yanqing, Zhang Bo, Zhang Yao, et al. Characteristics of spatio-temporal variation of day and night precipitation in North China. *Geography and Geo-Information Science*, 2016, 32(5): 103-109.]
- [20] 王胜, 谢五三, 唐为安, 等. 1961—2009年淮河流域昼夜降水变化特征. *生态学杂志*, 2011, 30(12): 2881-2887. [Wang Sheng, Xie Wusan, Tang Weian, et al. Change characteristics of day and night precipitation in Huaihe River Basin in 1961-2009. *Chinese Journal of Ecology*, 2011, 30(12): 2881-2887.]
- [21] Cheng Q, Gao L, Zuo X, et al. Statistical analyses of spatial and temporal variabilities in total, daytime, and nighttime precipitation indices and of extreme dry/wet association with large-scale circulations of Southwest China, 1961-2016. *Atmospheric Research*, 2019, 219: 166-182.
- [22] 韩云环, 马柱国, 杨庆, 等. 增暖背景下新疆昼夜降水的变化特征. *气候与环境研究*, 2014, 19(6): 763-772. [Han Yunhuan, Ma Zhuguo, Yang Qing, et al. Changing characteristics of daytime and nighttime precipitation in Xinjiang under global warming. *Climatic and Environmental Research*, 2014, 19(6): 763-772.]
- [23] 张核真, 唐小萍, 普布卓玛. 近46年西藏高原昼夜降水变化趋势. *气象科技*, 2010, 38(2): 205-208. [Zhang Hezhen, Tang Xiaoping, Pubuzhuoma. Trends of day/night precipitation in tibet platea in recent 46 years. *Meteorological Science and Technology*, 2010, 38(2): 205-208.]
- [24] Feng Song, Hu Qi, Qian Weihong. Quality control of daily meteorological data in China, 1951-2000: A new dataset. *International Journal of Climatology*, 2004, 24(7): 853-870.
- [25] Deng Haijun, Pepin N C, Chen Yaning. Changes of snowfall under warming in the Tibetan Plateau. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2017, 122(14): 7323-7341.
- [26] Hirsch R M, Slack J R. A nonparametric trend test for seasonal data with serial dependence. *Water Resources Research*, 1984, 20(60): 727-732.
- [27] Sen P K. Estimates of the regression coefficient based on kendall's tau. *Journal of the American Statistical Association*, 1968, 63(324): 1379-1389.
- [28] 王怀军, 潘莹莹, 陈忠升. 1960—2014年淮河流域极端气温和降水时空变化特征. *地理科学*, 2017, 37(12): 1900-1908. [Wang Huaijun, Pan Yingying, Chen Zhongsheng. Spatial and temporal patterns of temperature and precipitation extremes in the Huaihe River Basin, China in 1960-2014. *Scientia Geographica Sinica*, 2017, 37(12): 1900-1908.]
- [29] 萧凌波, 方修琦, 张学珍. 19世纪后半叶至20世纪初叶梅雨带位置的初步推断. *地理科学*, 2008, 28(3): 385-389. [Xiao Lingbo, Fang Xiuqi, Zhang Xuezhen. Location of rainbelt of Meiyu during second half of the 19th century to early 20th century. *Scientia Geographica Sinica*, 2008, 28(3): 385-389.]
- [30] Gu Xihui, Zhang Qiang, Singh V P, et al. Nonstationarity in timing of extreme precipitation across China and impact of tropical cyclones. *Global and Planetary Change*, 2017, 149: 153-165.

Spatial and temporal patterns of daytime and nighttime precipitation in China during 1961–2016

DENG Haijun^{1,2,3}, GUO Bin⁴, CAO Yongqiang⁵, CHEN Zhongsheng⁶,
ZHANG Yuqing⁷, CHEN Xingwei^{1,2,3}, GAO Lu^{1,2,3}, CHEN Ying^{1,2,3}, LIU Meibing^{1,2,3}

(1. College of Geographical Sciences, Fujian Normal University, Fuzhou 350007, China; 2. Fujian Provincial Engineering Research Center for Monitoring and Assessing Terrestrial Disasters, Fujian Normal University, Fuzhou 350007, China; 3. State Key Laboratory for Subtropical Mountain Ecology of the Ministry of Science and Technology and Fujian Province, Fujian Normal University, Fuzhou 350007, China; 4. College of Geomatics, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, Shandong, China; 5. School of Geographical Sciences, Liaoning Normal University, Dalian 116029, Liaoning, China; 6. College of Land and Resources, China West Normal University, Nanchong 637002, Sichuan, China; 7. School of Urban and Environmental Science, Huaiyin Normal University, Huai'an 223300, Jiangsu, China)

Abstract: There are significant regional differences in precipitation changes in China under global warming during the past half-century. In this study, based on 763 observation stations daytime and nighttime precipitation data to examine the precipitation amounts, precipitation frequency, precipitation intensity, and contribution of daytime and nighttime precipitation to the total precipitation, then to appreciate the spatial and temporal patterns of daytime and nighttime precipitation in China from 1961 to 2016. Results indicated that: (1) There are significant differences between nine river basins of daytime and nighttime precipitation. And the changes patterns can be summarized into four types: daytime and nighttime co-increasing, daytime and nighttime co-decreasing, daytime increasing and nighttime decreasing, and daytime decreasing and nighttime increasing. (2) The change of the total precipitation is closely related to the day and night precipitation. The decrease in daily precipitation in the Huaihe River Basin is due to daytime precipitation decrease (-0.72 mm/a), while the decrease in precipitation in the middle and upper reaches of the Yangtze River Basin is due to the nighttime precipitation decrease (-0.21 mm/a). (3) Daytime and nighttime heavy rain amount is higher than torrential rain in the arid, semi-arid, and semi-humid regions, but in the humid river basin, the torrential rain amount is higher than heavy rain, especially the Pearl River Basin and Southeast River Basins. (4) The contribution of daytime heavy rain, nighttime heavy rain and torrential rain to annual total precipitation exceeds 10%, while the contribution of daytime torrential rain to annual total precipitation is roughly 10%. At the same time, the contribution of daytime and nighttime torrential rain to the annual precipitation is higher than that of daytime and nighttime heavy rain in the humid river basins, while the arid and semi-arid regions demonstrate the opposite. Therefore, the results are helpful to understanding of the impacts of global warming on regional daily precipitation cycles in China.

Keywords: daytime and nighttime precipitation; precipitation days; extreme precipitation; spatiotemporal differences; China