

李正泉,宋丽莉,梁卓然,等,2018. 杭州市降水特征及极端降水趋势预估[J]. 气象,44(6):781-789.

杭州市降水特征及极端降水趋势预估^{*}

李正泉^{1,2} 宋丽莉² 梁卓然³ 王 阔¹ 刘善峰⁴

1 浙江省气候中心,杭州 310017

2 中国气象局公共气象服务中心,北京 100081

3 杭州市气象局,杭州 310008

4 国网河南省电力公司电力科学研究院,郑州 450052

提 要: 利用国家气候观象台杭州站百年降水观测数据和 CMIP5 模式模拟预估数据,分析了杭州市降水长期变化特征,采用累积概率分布函数转换方式(CDF-T),降尺度预估了未来气候情景下杭州极端降水发生趋势。结果表明:杭州市年降水量在百年时序(1907—2015年)上无显著性增加或减小趋势,1980年后春季降水明显下降,下降速率约 $32.1 \text{ mm} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$,冬季降水显著增加,增加速率约 $35.4 \text{ mm} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ 。1988—2015年的3和6h及日降水的各重现期降水量均较1961—1987年有所增大,1961—1987年的100年一遇日最大降水已演变为1988—2015年的50年一遇甚至是20年一遇。CMIP5模式降水的降尺度分析表明,2020—2039年杭州市日极端降水强度将可能会进一步加强,2020—2039年日降水的R95值和R99p值均较现气候期(1981—2010年)有所提高,超R95p和超R99p的极端降水发生日数分别为11.08和2.24 $\text{d} \cdot \text{a}^{-1}$,分别较现气候期平均值增加了3.52和0.69 $\text{d} \cdot \text{a}^{-1}$ 。

关键词: 降水,长期变化,CFD-T降尺度,趋势预估,杭州

中图分类号: P456

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2018.06.006

Precipitation Characteristics and Projection of Extreme Precipitation Trend in Hangzhou City

LI Zhengquan^{1,2} SONG Lili² LIANG Zhuoran³ WANG Kuo¹ LIU Shanfeng⁴

1 Zhejiang Climate Centre, Hangzhou 310017

2 CMA Public Meteorological Service Centre, Beijing 100081

3 Hangzhou Meteorological Bureau, Hangzhou 310008

4 Power Science Research Institute of State Grid Henan Electric Power Company, Zhengzhou 450052

Abstract: Based on the observational precipitation data from Hangzhou Climate Observatory and the simulated precipitation data of the global climate model CMIP5, the long-term trends of precipitation variation in Hangzhou City are investigated. Moreover, the risks of extreme precipitation in Hangzhou City under future climate scenarios are estimated by using a downscaling method that adopts the cumulative distribution function transform (CDF-T). The results show that there is no significantly increasing or decreasing trend in centennial precipitation series (1907—2015) at Hangzhou Climate Observatory, but the precipitation in spring obviously decreases with a rate of $32.1 \text{ mm} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ and the winter precipitation significantly increases with a rate of $35.4 \text{ mm} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ during 1980—2015. The extreme precipitation in Hangzhou City has been intensifying, which can be interpreted by that the maximum values of 3 h, 6 h and daily

^{*} 浙江省公益技术研究社会发展项目(2015C33055)、国家电网公司重大基础前瞻科技项目(SG20141187)和浙江省气象科技重点项目(2015ZD09)共同资助

2016年10月25日收稿; 2017年8月10日收修定稿

第一作者:李正泉,主要从事气候变化与生态研究. Email: lzq110119@163.com

通信作者:宋丽莉,主要从事工程气象研究. Email: songll@cma.gov.cn

precipitation have been increased and the return periods of extreme precipitation have been shortened. During the period from 1988 to 2015, the values of the 3 h, 6 h and daily precipitation of each return periods are higher than that of the period from 1961 to 1987. An extreme daily precipitation whose probability is once in 100 years during 1961—1987 has become an event with probability once in 50 years or once in 20 years during 1988—2015. The CDF-T downscaling analysis of simulated precipitation of the CMIP5 models indicates that the occurrence probability of extreme precipitation in Hangzhou City during 2020—2039 might increase under all of the RCPs future climate scenarios. In the period from 2020 to 2039, the occurrence probability of the extreme precipitation over R95p and R99p in Hangzhou City will be $11.08 \text{ d} \cdot \text{a}^{-1}$ and $2.24 \text{ d} \cdot \text{a}^{-1}$ respectively. Compared with the average values of current climate, the occurrence probability of the over R95p and R99p is increased by $3.52 \text{ d} \cdot \text{a}^{-1}$ and $0.69 \text{ d} \cdot \text{a}^{-1}$, respectively.

Key words: precipitation, long-term variation, CDF-T downscaling, trend projection, Hangzhou City

引言

降水变化对自然生态与社会经济有着重要影响,全球气候变暖加剧了区域降水时空分配不均和局部区域极端降水事件多发(Becker et al, 2012; Field et al, 2012; Stocker et al, 2013; Westra et al, 2013)。长年代降水资料显示我国西北、江淮及东部沿海的年降水量在增加,华北及华中地区的年降水量在减少,区域间的降水变化差异明显(张一驰等, 2011; 李庆祥等, 2012; 孙秀博等, 2012)。近几十年极端降水事件在我国呈多发态势,尤其是在西北、东南沿海和长江中下游等地区,不仅极端降水发生频率增多且降水强度也在增强(Zhai et al, 2005; 陈冬冬和戴永久, 2009; 杨玮和程智, 2015)。极端降水的变化与年降水变化相类似,也存在着明显的区域性差异(任国玉等, 2010)。国家和大区域的降水研究着重于揭示宏观尺度的降水特征,受限于站点分布不均或空间分辨率偏低,较难详尽地反映各区域内部的降水差异问题(Becker et al, 2012; Russo and Sterl, 2012; 韩乐琼等, 2014)。对于市(县)级水资源管理及洪涝灾害防治而言,大尺度区域的研究结果尚难满足这一需求,仍需依据当地降水资料,开展本地化的降水研究。

近些年,小尺度站位观测的降水研究已出现较多,如上海(房国良等, 2012)、拉萨(尼玛吉等, 2014)和雅安(周秋雪等, 2016)的降水量长年代分析以及北京(朱龙腾等, 2012)、兰州(杨瑜峰等, 2009)与广东(伍红雨等, 2017)的极端降水趋势分析等。但大多数小尺度研究仅是限于1951年以后的降水观测资料,百年时间尺度的降水序列分析较少;另一方

面,有关小尺度极端降水的未来趋势预估研究(尤其是中小城市)也相对较为缺乏。目前,城市防洪排涝基础设施的建设标准多是基于当地的重现期雨量指标进行设计,而重现期雨量的估算是以历史降水观测数据作为基础(植石群, 2013; 中华人民共和国水利部, 2014)。Field et al (2012)和Westra et al (2013)研究指出受气候变化影响,部分区域的极端降水强度增强、重现期雨量增大,日最大降水量的重现期在缩短。受气候变化和城市化双重影响,近年来极端降水引发的城市内涝问题日益凸显(尹占娥和许世远, 2012; 白莹莹等, 2013; 王伟武等, 2015)。研究未来气候情景下本地区极端降水的发生趋势,在城市防洪排涝基础设施的设计建设中,考虑因气候变化引起的极端降水增量,将有助于减少未来极端降水的致灾风险。

本文基于国家气候观测台杭州站百年降水观测数据和CMIP5 (Coupled Model Inter-comparison Project Phase 5)气候模式的模拟数据,开展杭州市降水变化的长期特征分析,并采用累积概率分布函数转换(cumulative distribution function-transform, CDF-T)降尺度方式,预估分析杭州极端降水未来发生趋势,旨为当地水资源管理和城市暴雨灾害防治等提供科学参考,亦望能为其他城市在该方面的相关研究提供一种借鉴方法。

1 资料与方法

1.1 资料来源

使用的降水观测资料为杭州站1907—2015年的逐月降水数据、1961—2015年的逐日和逐时降水

数据。逐月数据用于年季降水的百年趋势分析,逐日和逐时数据用于不同历时极端降水的强度变化分析。杭州站是国内为数不多的国家气候观测台,在 1907 年开始连续降水观测,1949 年以前站址有 2 次变迁,迁址变动均在现址(30.23°N、120.17°E,海拔 43.2 m)的 20 km 范围之内且海拔无明显变化。考虑 1949 年以前城市化进程弱、降水观测环境变化甚微,故不对降水数据作进一步的迁站处理。在 1907—2015 年(共 109 年)观测期间,降水数据有 5 个年份缺失,均发生在 1951 年以前,以上海徐家汇站和福州站为参考站,选用多元线性回归方式对缺失降水数据进行插补。

未来气候情景极端降水预估分析中所使用的模式逐日降水资料,来源于 IPCC 第五次评估报告中 CMIP5 的 8 个气候模式,分别为 BCC、CCSM4、CSIRO-MK、EC-EARTH、GFDL-ESM2G、IPSL-CM5A、MRI-CGCM 和 NorESM1-M。选取各模式 1976—2005 年试验期的降水数据作为 CDF-T 降尺度分析的训练数据和效果检验数据,使用 2020—2100 年各模式 RCP2.6、RCP4.5 和 RCP8.5 三种未来情景的降水预估数据,开展未来气候情景下杭州市极端降水的降尺度预估分析。

1.2 极值降水概率拟合

极值分布函数是研究随机极端事件概率分布的统计方法,气象与水文的相关研究通常运用广义极值分布(GEV)、对数正态(log-normal)和皮尔森Ⅲ(Pearson Ⅲ)等进行拟合历史降水和径流的极值概率分布,估算不同重现期最大值(毛慧琴等,2004;杜鸿等,2012)。近年来,卡帕分布(Kappa)、威布尔分布(Weibull)和韦克比分布(Wakeby)等函数也得到了广泛运用(夏军等,2012)。极值分布函数的参数估算有多种方式,有研究表明,当样本量较少时,最小二乘法(LSE)对尺度参数估算结果较差,最大似然法(MLE)和矩法(MOM)均不能给出参数估算的解析表达,而概率权重法(PWM)和 L 矩法(LME)较为适合少样本的参数估算(姜彤等,2008)。为了能够详细地描述杭州市极值降水的分布特征,本文选用 GEV、Pearson Ⅲ 和 Weibull 三种极值分布函数,分别对杭州市极值降水序列进行拟合,极值分布函数的参数估算选用 LME 方法,各分布函数的拟合效果采用柯尔莫洛夫-斯米尔诺夫(K-S)方式进行检验。

1.3 模式降水站位降尺度

CMIP5 气候模式提供的大尺度气候预估数据,极大增强了人们对全球气候变化的认知能力,但有些气候模式空间分辨率较粗,难以满足中小区域气候变化研究需求。通常做法是采用降尺度方式,先将模式预估的大尺度变量信息转化为局地变量信息后,再开展相关研究。本文采用 CDF-T 降尺度方式,将 CMIP5 气候模式降水降尺度转化为杭州站点位降水。

CDF-T 降尺度方式由 Michelangeli et al(2009)提出,从分位数匹配法发展而成,其基本假设是:存在一个函数 T ,可将大尺度气候变量的累积概率分布转化成为局地尺度变量的累积概率分布。记为:

$$T[F_{Gh}(x)] = F_{Sh}(x) \quad (1)$$

式中, $F_{Sh}(x)$ 代表历史期气象站观测降水的累积概率分布函数(CDF), $F_{Gh}(x)$ 代表历史期 CMIP5 气候模式降水的 CDF。以 $F_{Gh}^{-1}(u)$ 代替 x ,式(1)可变为:

$$T(u) = F_{Sh}[F_{Gh}^{-1}(u)] \quad (2)$$

式中, u 的取值范围为 0~1。假定历史期的 $F_{Gh}(x)$ 与 $F_{Sh}(x)$ 转换函数关系 $T(u)$ 在未来依然成立,那么式(3)就可换写成式(4)的形式。

$$F_{Sf}(x) = T[F_{Gf}(x)] \quad (3)$$

$$F_{Sf}(x) = F_{Sh}\{F_{Gf}^{-1}[F_{Gf}(x)]\} \quad (4)$$

式中, $F_{Sf}(x)$ 代表气象站未来降水的 CDF, $F_{Gf}(x)$ 代表 CMIP5 未来预估降水的 CDF。

文中以 1976—1995 年作为 CDF-T 降尺度训练期,1996—2005 年为 CDF-T 降尺度效果检验期,利用训练期所获得的降尺度函数 $T(u)$,将 CMIP5 气候模式的预估降水降尺度至杭州观测站点。

2 降水长期变化特征

2.1 年季降水

由杭州站 1907—2015 年百年降水序列分析可知:杭州年降水量变化范围在 949 mm(2003 年)至 2356 mm(1954 年),年降水在百年时间序列上并无显著性的增加或减小趋势,但存在较明显的阶段性变化特征(图 1)。20 世纪初期至中期(1907—1953 年),杭州年降水量虽有波动变化但整体趋势较为平稳,之后经历了 1954—1967 年的快速下降和 1967—1973 年的快速上升后,在 20 世纪 80 年代初

至 20 世纪末(1981—2000 年)又维持在一个新的相对稳定期;进入 21 世纪后,2003 年降水量突然降至历史最低值,之后降水量开始在近十几年内(2003—2015 年)逐渐增加。

1907—2015 年杭州春夏两季的降水量变化趋势较弱,秋季降水呈减少、冬季降水略有增加,但未通过 0.05 显著性水平检验(图 2)。1980 年以后,春季降水开始呈现明显线性下降趋势[图 2a 下降速率约为 $32.1 \text{ mm} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$,通过 0.05 显著性水平检验],冬季降水呈现显著线性增加趋势[图 2d 增加速率约为 $35.4 \text{ mm} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$,通过 0.01 显著性水平检验],春季降水的减少可能会对未来农业产生潜在影响。

2.2 日最大降水

选取杭州站各年的日降水最大值,建立 1961—2015 年日最大降水序列。采用 LME 参数估算法,使用 GEV、Peason III 和 Weibull 三种极值分布函数,对 1961—1987 和 1988—2015 年两个气候期的日最大降水序列分别进行拟合,1961—1987 年日最

大降水累积概率分布的函数拟合结果见图 3a, 1988—2015 年的拟合结果见图 3b。从图 3 中可看出:GEV、Peason III 和 Weibull 三种分布函数都能够较为准确地描述出两个气候期杭州站日最大降水累积概率的分布规律,均通过了 0.05 显著性水平的 K-S 检验,但相比较而言,GEV 分布函数的拟合效果,更优于 Peason III 与 Weibull 分布函数。

根据 LME 方法估算的极值分布函数参数值,计算杭州站 1961—1987 和 1988—2015 年的各重现期日最大降水量(表 1)。三种分布函数的估算结果均显示 1988—2015 年的重现期日最大降水量比 1961—1987 年有所增加。以 GEV 分布函数为例,50 年一遇日最大降水由 1961—1987 年的 185 mm,上升到 1988—2015 年的 207 mm;100 年一遇的日最大降水由 1961—1987 年的 212 mm,上升到 1988—2015 年的 233 mm。Peason III 与 Weibull 分布函数的估算结果表明,1961—1987 年的 100 年一遇日最大降水,已变为 1988—2015 年的 50 年一遇甚至是 20 年一遇。

表 1 杭州站 1961—1987 年与 1988—2015 年重现期日最大降水估算(单位:mm)

Table 1 Estimation of maximum daily rainfall (unit:mm) of return periods at Hangzhou Station during 1961—1987 and 1988—2015

重现期	5 年一遇		10 年一遇		20 年一遇		50 年一遇		100 年一遇	
	CP- I	CP- II	CP- I	CP- II	CP- I	CP- II	CP- I	CP- II	CP- I	CP- II
GEV	107	125	129	149	152	173	185	207	212	233
Peason III	111	128	126	149	142	167	160	189	173	205
Weibull	116	135	132	157	146	174	161	194	171	207

注:CP- I 和 CP- II 分别表示 1961—1987 和 1988—2015 年两个气候时段。

Note: CP- I and CP- II represent two climatic periods that are 1961—1987 and 1988—2015, respectively.

2.3 小时最大降水

与日最大降水的分析方法类似,采用 LME 参数估算法,使用 GEV、Peason III 和 Weibull 三种极值分布函数,分别对杭州站 1961—1987 和 1988—2015 年两个气候时段的 1、3 和 6 h 最大降水的累积概率分布进行拟合(均通过 0.05 显著性水平的 K-S 检验),并依据各分布函数的参数估算值,计算 1、3 和 6 h 降水的各重现期最大降水量(图 4)。从图 4 可看出,气候变化对杭州市不同历时(1、3 和 6 h)最大降水的影响存在着一定差异,对于 1 h 最大降水,GEV、Peason III 和 Weibull 三种极值函数估算的 1988—2015 年的各重现期降水量,均比它们 1961—

1987 年的估算值有所降低(图 4a),但对于 3 和 6 h 最大降水的各重现期降水量的估算,三种极值函数 1988—2015 年的估算值均高于它们 1961—1987 年的估算结果(图 4b 和 4c);即是说,相比于 1961—1987 年,杭州市 1988—2015 年 1 h 降水的各重现期降水量有所减小,但 3 和 6 h 降水的各重现期降水量与日最大降水类似,均是在有所增大。

3 极端降水降尺度预估

利用 1976—1995 年杭州站观测的逐日降水数据和同时期 CMIP5 气候模式的逐日降水数据(模式降水取自于模式格点数据在杭州站点位上的双线性

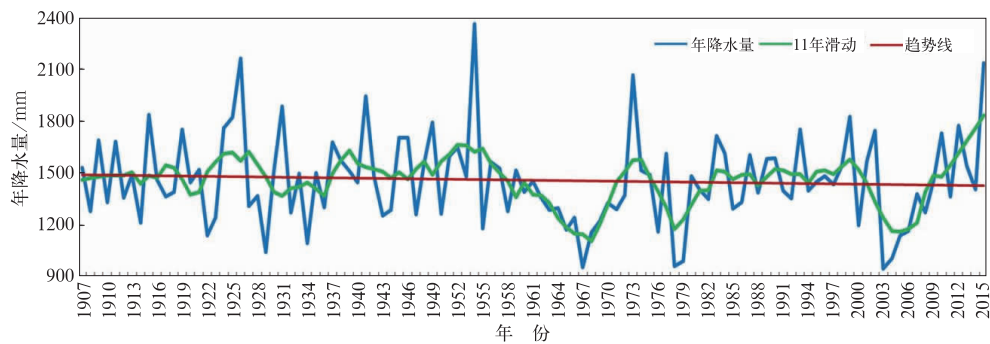


图 1 1907—2015 年杭州站年降水百年变化趋势

Fig. 1 Annual variation trend of centennial precipitation at Hangzhou Station during 1907–2015

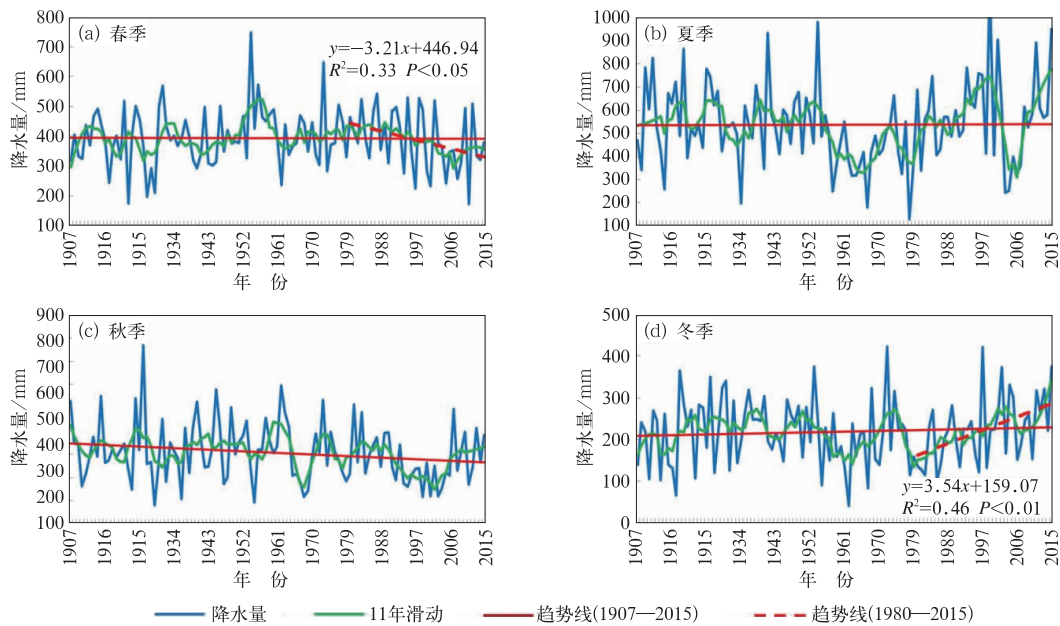


图 2 1907—2015 年杭州站季节降水百年变化趋势

Fig. 2 Seasonal variation trends of centennial precipitation at Hangzhou Station during 1907–2015

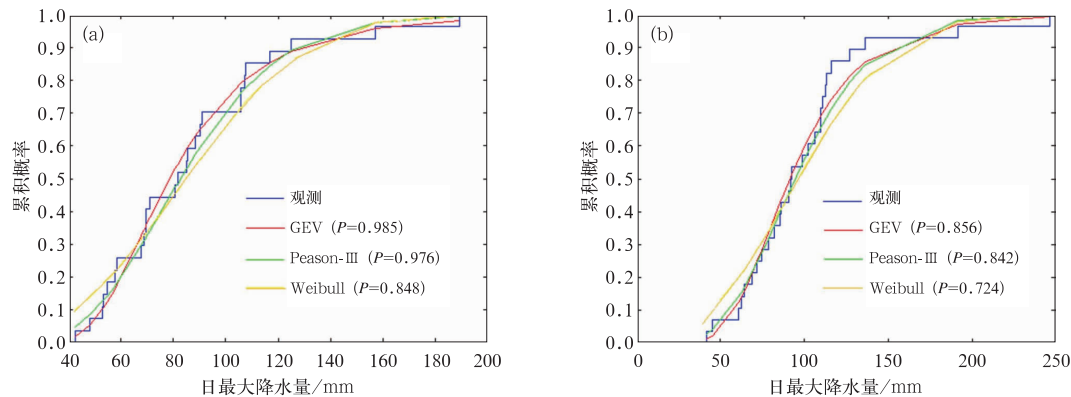


图 3 杭州站日最大降水累积概率分布和极值函数拟合

(a)1961—1987 年,(b)1988—2015 年

Fig. 3 Cumulative probability distribution and extremal function fitting of maximum daily rainfall at Hangzhou Station

(a)1961—1987,(b)1988—2015

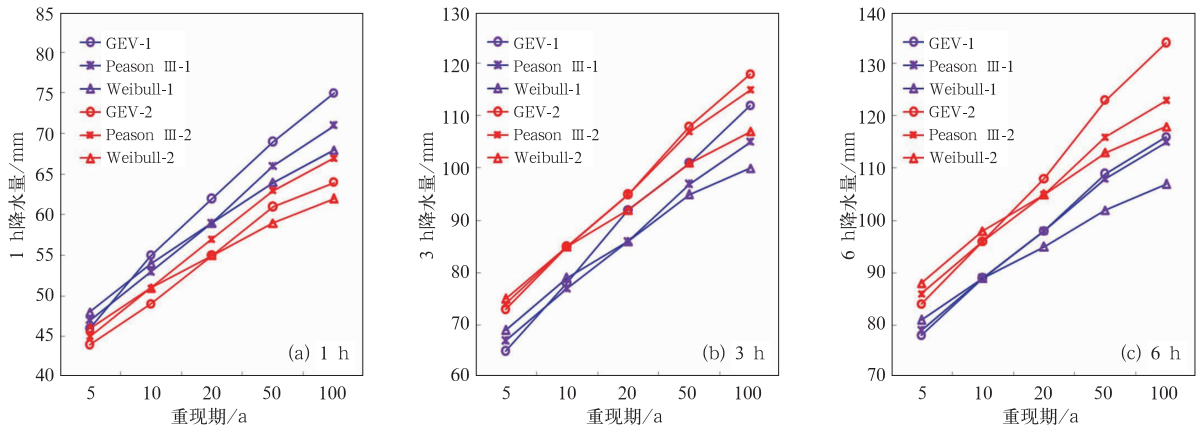


图 4 杭州站 1961—1987 和 1988—2015 年不同历时降水的重现期降水量对比分析
(GEV-1、Peason III-1 和 Weibull-1 为 1961—1987 年的估算值;GEV-2、Peason III-2 和 Weibull-2 为 1988—2015 年的估算值)

Fig. 4 Comparison of return-period rainfall of different duration precipitations
at Hangzhou Station during 1961—1987 and 1988—2015

(GEV-1, Peason III-1 and Weibull-1 for 1961—1987; GEV-2, Peason III-2 and Weibull-2 for 1988—2015)

内插值),按 1.3 节方式构建出由气候模式大尺度降水数据向站位小尺度降水数据转化的 CDF-T 降尺度关系,使用 1996—2005 年的观测降水对 CDF-T 的降尺度效果进行检验,进而降尺度分析 2020—2100 年杭州极端降水的未来发生趋势。

3.1 CDF-T 降尺度效果检验

将 8 个 CMIP5 气候模式 (BCC、CCSM4、CSIRO-MK、EC-EARTH、GFDL-ESM2G、IPSL-CM5A、MRI-CGCM 和 NorESM1-M) 1996—2005 年的原模式逐日降水和 CDF-T 降尺度的逐日降水,分别与杭州站的观测降水作比较,利用双样本 K-S 检验,分析降尺度前后模式降水与观测降水的关系。模式降水与观测降水的 K-S 检验统计量 D_n 值列于表 2, D_n 值越小说明两组降水数据的概率分布越接

近, D_n 的计算表达式见式(5)。

$$D_n = \max |F_{\text{mod}}(x_i) - F_{\text{obs}}(x_i)| \quad (5)$$

式中, $F_{\text{mod}}(x_i)$ 与 $F_{\text{obs}}(x_i)$ 分别代表降水量为 x_i 时的模式降水累积概率和观测降水累积概率。

由表 2 可知,降尺度前的原模式降水与观测降水两者的 K-S 检验 D_n 值,8 个模式均高于 0.250,未能通过 0.1 显著性水平检验;经 CDF-T 降尺度后,模式降水与观测降水的 K-S 检验 D_n 值明显减小,都在 0.06 以下(均通过 0.05 显著性水平检验),且 5 个模式 (BCC、CCSM4、GFDL-ESM2G、IPSL-CM5A 和 NorESM1-M) 的 D_n 值在 0.03 以下。以 NorESM1-M 模式降水数据的降尺度结果为例(降尺度前后模式与观测的日降水累积概率分布,图 5)可看出,经 CDF-T 降尺度后,模式降水的累积概率分布更加接近杭州观测站的站位降水观测。

表 2 降尺度前后模式降水与观测降水的 K-S 检验统计量 D_n 值

Table 2 D_n values of K-S test between observed and model precipitation before and after the CDF-T downscaling								
类型	BCC	CCSM4	CSIRO-MK	EC-EARTH	GFDL-ESM2G	IPSL-CM5A	MRI-CGCM	NorESM1-M
原模式	0.274	0.280	0.269	0.281	0.281	0.280	0.283	0.278
CDF-T	0.025	0.028	0.051	0.053	0.021	0.021	0.032	0.022

为进一步验证 CDF-T 的降尺度效果,本文再次分析了 8 个气候模式的降水数据在降尺度前后,它们 1996—2015 年的日降水 95%分位值和 99%分位值(记为 R95p 和 R99p,下同)与杭州站同期日降水分位值的差异。图 6 显示:降尺度前,原模式 R95p 和 R99p 的降水量明显低于站位观测,两者相差为

74%~85%;经 CDF-T 降尺度后,各模式 R95p 和 R99p 的降水量与站位观测十分接近,尤其是 IPSL-CM5A、BCC 和 NorESM1-M 三个模式,它们与站位观测值的相差均不足 3%。总的来说,经过降尺度后的模式降水,无论是降水的累积概率分布还是 R95p 与 R99p 的降水量,均较原模式数据有明显改

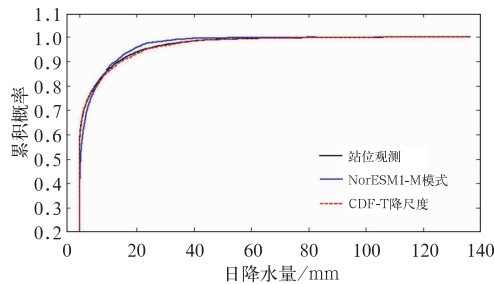


图 5 1996—2005 年日降水累积概率分布
Fig. 5 Cumulative probability distribution of daily precipitation during 1996—2005

善,这表明 CDF-T 降尺度方式在杭州站点位上具备良好的降尺度转化能力。

从降水量的年际变化来看(图 7),经 CDF-T 降尺度转化后, BCC、IPSL-CM5A 和 NorESM1-M 的年降水与杭州站观测降水(黑色点线)的变化步调基本相似,尽管它们年际间的降水增降幅度不一,但在各年份上均表现出了与观测降水一致性的上升和下降趋势。相比于其他 5 个模式, BCC、IPSL-CM5A 和 NorESM1-M 的年降水变化与观测降水更为接近。8 个模式 1996—2005 年的年降水平均绝对误差在 133 ~ 217 mm, 约为观测降水年平均值的 9 % ~ 16 %, NorESM1-M、GFDL-ESM2G 和

EC-EARTH 模式的年降水平均绝对误差相对较小,依次为 133.2、141.1 和 146.9 mm,分别约为观测降水年平均值的 9.6 %、10.2 %和 10.6 %。NorESM1-M 模式的年降水变化趋势和量值,均与观测降水较为相近,其在杭州站点的 CDF-T 降尺度效果,相对来说要优于其他几个气候模式。

3.2 极端降水未来趋势分析

通过对 8 个 CMIP5 气候模式三种 RCP 情景共 24 组日降水预估数据的 CDF-T 降尺度转化,获得杭州站点位 2020—2100 年的逐日降水预估数据,统计历史时期和未来时期各气候时段的 R95p 和 R99p 日降水值,分析杭州市极端降水的强度变化。由表 3 可知,在 1961—2010 年期间,杭州观测站 R95p 和 R99p 的日降水值在逐步增大,极端降水的发生强度在不断增强,在 2020—2039 年期间,杭州极端降水的发生强度将可能会进一步加强,该时期三种 RCP 情景的 R95p 和 R99p 日降水值均高于历史观测(1961—2010 年)和历史模拟(1976—2005 年)的统计值,尤其是 RCP8.5 情景,其 R95p 和 R99p 日降水值的增加幅度最大,分别比现气候期(1981—2010 年)增加了 6.7 和 8.9 mm。

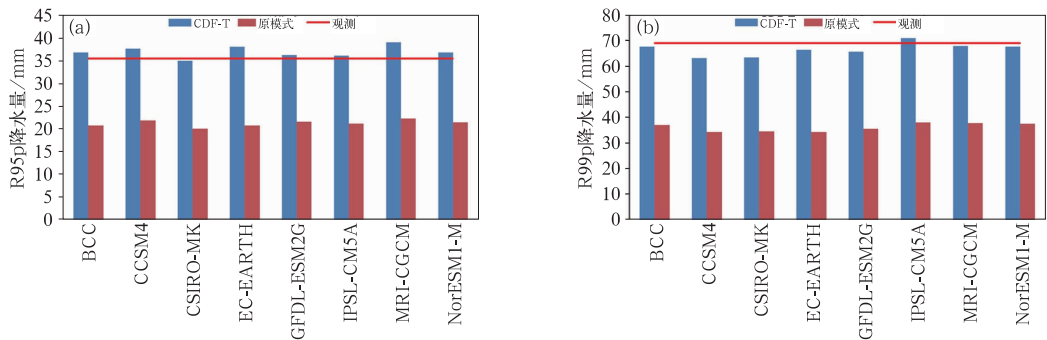


图 6 1996—2005 年观测降水与模式降水 R95p(a)和 R99p(b)降水量
Fig. 6 The R95p (a) and R99p (b) values of observed and model precipitation during 1996—2005

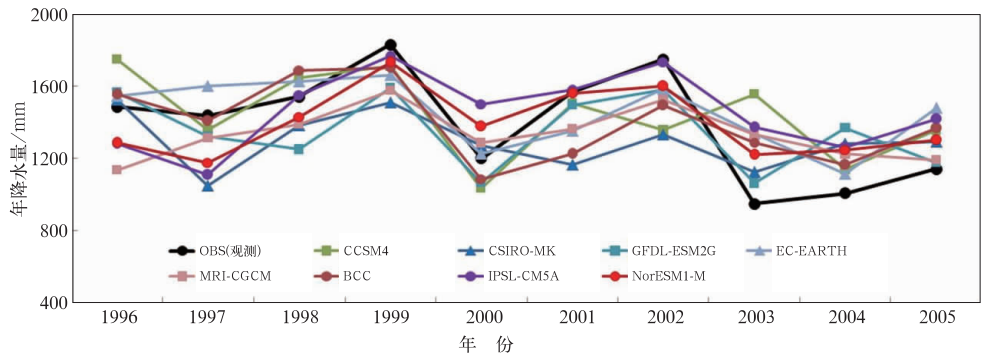


图 7 1996—2005 年观测与降尺度模拟年降水量对比分析
Fig. 7 Comparison of observed and downscaling simulated annual precipitation during 1996—2005

表 3 杭州站历史观测与未来预估 R95p 及 R99p 日降水值(单位:mm)

时期	历史观测			历史模拟	未来预估				
	1961—1990	1971—2000	1981—2010	1976—2005	情景	2020—2039	2040—2059	2060—2079	2080—2099
R95p	32.9	36.8	39.0	38.5	RCP2.6	42.3	37.6	37.3	39.4
					RCP4.5	41.5	39.2	37.8	40.7
					RCP8.5	45.7	40.1	38.1	41.2
R99p	63.6	70.7	75.2	74.1	RCP2.6	81.6	71.1	75.7	76.4
					RCP4.5	82.4	73.3	77.1	79.2
					RCP8.5	84.1	73.9	77.6	79.6

注:历史模拟期以及各 RCP 情景期的 R95p 值和 R99p 值均为 8 个模式的平均值。

Note: R95p and R99p values of the RCP scenario and the historical simulation are the means of the results from the 8 CMIP5 models.

以现气候期(1981—2010 年)的 R95p 和 R99p 日降水值(39.0 和 75.2 mm,表 3)作为极端强降水阈值,进一步统计分析杭州站现气候期和未来气候时段超 R95p 及超 R99p 的降水天数,并以现气候期超 R95p 和超 R99p 的降水天数(分别为 7.56 和 1.55 d·a⁻¹)作为参考值,对比分析未来气候情景下杭州极端降水的发生趋势。8 个 CMIP5 气候模式三种 RCP 情景的降尺度分析结果共同显示:2020—2039 年杭州市极端降水的发生概率将可能比现气候期有所加大(图 8)。

在 2020—2039 年这一时段,所有模式情景的超 R95p 降水日数均高于现气候期的 7.56 d·a⁻¹,介于 9.74~12.96 d·a⁻¹,平均值为 11.08 d·a⁻¹(图 8a);超 R99p 的降水日数介于 1.54~3.02 d·a⁻¹,平均值为 2.24 d·a⁻¹,除 1 组模式情景的数据外,其他 23 组数据的超 R99p 降水日数都高于现气候期的 1.55 d·a⁻¹(图 8b)。在 2040—2059 年和 2060—2079 年,杭州市极端降水的发生概率与现气候期水平相比,可能会略有降低或基本持平,24 组

数据的超 R95p 和 R99p 的降水日数值分别分散在现气候期 7.56 和 1.55 d·a⁻¹ 的参考线上下;2080—2099 年杭州市极端降水的发生概率较 2060—2079 年有所提高,超 R95p 和 R99p 的发生概率也均可能会高于现气候期水平(图 8)。

RCP2.6、RCP4.5 和 RCP8.5 三种情景对杭州日极端降水的影响有所不同。在 RCP8.5 情景下,杭州极端降水的发生强度及发生概率相对较高,而在 RCP2.6 情景下,极端降水的发生强度及发生概率相对较低。如:未来时期各气候时段的 R95p 和 R99p 的日降水值估算(表 3),RCP8.5 的估算值最高,其次是 RCP4.5,RCP2.6 的估算值总体最低。再者,从图 8 中可看出,RCP8.5 情景下杭州超 R95p 和 R99p 的降水日数在 2020—2039、2040—2059 和 2080—2099 年,均明显高于 RCP2.6 的预估值,也相对高于 RCP4.5 的预估值,RCP2.6 的预估值总体处于最低位(2020—2039 年超 R95p 降水日数的预估结果除外)。

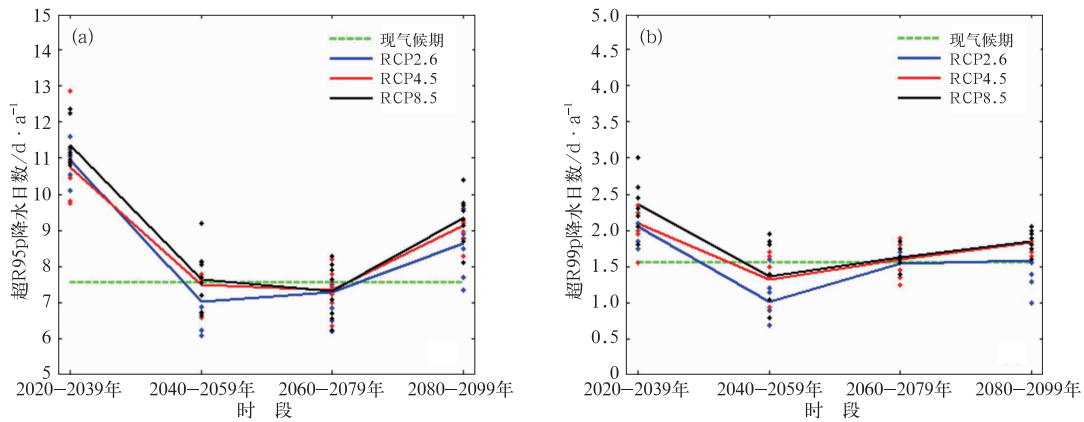


图 8 未来气候情景下杭州市极端降水预估分析

(1 个标记点代表 1 个模式预估值,标记点颜色表示不同 RCP 情景,标记线表示同一种 RCP 情景下 8 个模式的预估值)

Fig. 8 Projections of extreme precipitation in Hangzhou City in future climate scenarios

(One dot represents one model's projection result, colored dots represent different RCP scenarios, and line represents the means of the 8 models' results under the same RCP scenario)

4 结 论

使用国家气候观象台杭州站 1907—2015 年的观测降水数据和 8 个 CMIP5 气候模式的模拟降水数据,分析了杭州市年季降水量的长期变化和不同历时极端降水的变化特征,并采用 CDF-T 降尺度方式对极端降水未来趋势进行了降尺度预估,得出以下几点结论:

(1)近百年杭州市年降水总体趋势变化较弱,但存在较明显的阶段性变化。在 1980—2015 年,春季降水明显减少,下降速率约为 $32.1 \text{ mm} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$;冬季降水显著增加,增加速率约为 $35.4 \text{ mm} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ 。

(2)受气候变化影响,杭州市 3 和 6 h 及日最大降水的各重现期降水量在增大,极端降水的重现期在缩短。1988—2015 年 3 和 6 h 降水的各重现期降水量均比 1961—1987 年偏高,1961—1987 年的 100 年一遇日最大降水量,已变为 1988—2015 年的 50 年一遇甚至是 20 年一遇。

(3)CDF-T 降尺度方式适合大尺度模式降水在杭州观测站点位上的降尺度转化,经 CDF-T 降尺度后,模式降水的累积概率分布及百分位降水量,均较原模式数据有明显改善。NorESM1-M 模式的年降水降尺度效果相对优于其他 7 个气候模式。

(4)在未来气候情景,2020—2039 年杭州市极端降水的发生强度和概率将可能比现气候期有所加大,2040—2059 和 2060—2079 年较现气候期略有降低或基本持平,2080—2099 年又有可能高于现气候期水平。三种 RCP 情景中,RCP8.5 情景的杭州极端降水发生强度及发生概率相对较高,RCP2.6 情景的发生强度及概率相对较低。

参考文献

- 白莹莹,张焱,何泽能,等,2013. 城市化进程对重庆都市圈降水空间分布的影响[J]. 气象,39(5):592-599.
- 陈冬冬,戴永久,2009. 近五十年我国西北地区降水强度变化特征[J]. 大气科学,33(5):923-935.
- 杜鸿,夏军,曾思栋,等,2012. 淮河流域极端径流的时空变化规律及统计模拟[J]. 地理学报,67(3):398-409.
- 房国良,高原,徐连军,等,2012. 上海市降雨变化与灾害性降雨特征分析[J]. 长江流域资源与环境,21(10):1270-1273.
- 韩乐琼,韩哲,李双林,2014. 不同代表性浓度路径(RCPs)下 21 世纪长江中下游强降水预估[J]. 大气科学学报,37(5):529-540.
- 姜彤,苏布达,Marco G,2008. 长江流域降水极值的变化趋势[J]. 水科学进展,19(5):650-655.
- 李庆祥,彭嘉栋,沈艳,2012. 1900—2009 年中国均一化逐月降水数

- 据集研制[J]. 地理学报,67(3):301-311.
- 毛慧琴,杜尧东,宋丽莉,2004. 广州短历时降水极值概率分布模型研究[J]. 气象,30(10):3-6.
- 尼玛吉,杨勇,次珍,等,2014. 1981—2010 年拉萨市降水特征分析[J]. 中国农学通报,30(17):262-266.
- 任国玉,封国林,严中伟,2010. 中国极端气候变化观测研究回顾与展望[J]. 气候与环境研究,15(4):337-353.
- 孙秀博,李清泉,魏敏,2012. 1960—2009 年中国年降水量的年际及年代际变化特征[J]. 气象,38(12):1464-1472.
- 王伟武,汪琴,林晖,等,2015. 中国城市内涝研究综述及展望[J]. 城市问题,(10):24-28.
- 伍红雨,李春梅,刘蔚琴,2017. 1961—2014 年广东小时强降水的变化特征[J]. 气象,43(3):305-314.
- 夏军,余敦先,杜鸿,2012. 气候变化影响下极端水文事件的多变量统计模型研究[J]. 气候变化研究进展,8(6):397-402.
- 杨玮,程智,2015. 近 53 年江淮流域梅汛期极端降水变化特征[J]. 气象,41(9):1126-1133.
- 杨瑜峰,江灏,赵红岩,等,2009. 兰州雨量谱的气候变化与极端化趋势[J]. 冰川冻土,31(2):328-333.
- 尹占娥,许世远,2012. 城市自然灾害风险评估研究[M]. 北京:科学出版社:1-9.
- 张一驰,吴凯,于静洁,等,2011. 华北地区 1951—2009 年气温、降水变化特征[J]. 自然资源学报,26(11):1930-1941.
- 植石群,2013. 暴雨强度公式编制技术指南[M]. 北京:中国气象局:6-12.
- 中华人民共和国水利部,2014. GB50201-2014 防洪标准[M]. 北京:中国计划出版社:63-67.
- 周秋雪,李跃清,蒋兴文,等,2016. “雅安天漏”降水变化气候特征的分析[J]. 自然资源学报,31(2):343-353.
- 朱龙腾,陈远生,燕然然,等,2012. 1951 年至 2010 年北京市降水和气温的变化特征[J]. 资源科学,34(7):1289-1297.
- Becker A, Finger P, Meyer-Christoffer A, et al, 2012. A description of the global land-surface precipitation data products of the global precipitation climatology centre with sample applications including centennial (trend) analysis from 1901-present[J]. Earth Syst Sci Data, 5(2):921-998.
- Field C B, Barros V, Stocker T F, 2012. Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation[M]. Cambridge: Cambridge University Press:7-14.
- Michelangeli P A, Vrac M, Loukos H, 2009. Probabilistic downscaling approaches: application to wind cumulative distribution functions[J]. Geophys Res Lett, 36(11):L11708.
- Russo S, Sterl A, 2012. Global changes in seasonal means and extremes of precipitation from daily climate model data[J]. J Geophys Res, 117(D1):D01108.
- Stocker T F, Qin D, Plattner G K, et al, 2013. Climate Change 2013: The Physical Science Basis[M]. Cambridge: Cambridge University Press:211-214.
- Westra S, Alexander L, Zwiers F, 2013. Global increasing trends in annual maximum daily precipitation[J]. J Climate, 26(11):3904-3918.
- Zhai Panmao, Zhang Xuebin, Wan Hui, et al, 2005. Trends in total precipitation and frequency of daily precipitation extremes over China[J]. J Climate, 18(7):1096-1108.