

王丹, 王爱慧. 2017. 1901~2013 年 GPCC 和 CRU 降水资料在中国大陆的适用性评估 [J]. 气候与环境研究, 22 (4): 446~462. Wang Dan, Wang Aihui. 2017. Applicability assessment of GPCC and CRU precipitation products in China during 1901 to 2013 [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 22 (4): 446~462, doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2016.16122.

1901~2013 年 GPCC 和 CRU 降水资料在 中国大陆的适用性评估

王丹^{1,2} 王爱慧²

¹ 成都信息工程大学大气科学学院, 成都 610225

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 利用 1901~2013 年中国大陆地区的气象台站实测降水资料, 对东英吉利 (East Anglia) 大学气候研究中心 (Climatic Research Unit, CRU) 和全球降水气候中心 (Global Precipitation Climatology Centre, GPCC) 的降水资料分别从季节、年际和年代际尺度上进行了评估。结果表明: 1961~2013 年 CRU 与 GPCC 降水资料均能较准确地描述中国大陆地区的降水特征, 且在东部较西部地区、夏季较冬季与站点实测降水情况更为一致。将中国大陆划分为不同区域并在其季节、年际和年代际时间尺度上通过比较降水偏差绝对值的百分比、均方根误差和相关系数等统计量后发现: CRU 在青藏高原和其它较大的山脉附近与站点实测降水的差别较大, 且年均降水趋势在西北一带的阿尔金山脉、黄土高原、东南地区和长江下游地区, 比实测降水的年均趋势小、甚至出现趋势相反的情况。此外, CRU 降水的年代际变化趋势也偏小。而 GPCC 数据不论是降水量还是降水趋势都更接近实际情况。在 1901~1961 年, 通过与 65 个长期气象观测站点的降水时间序列比较发现, CRU 在 110°E 以西地区与站点观测的降水资料间的差别较大, 而 GPCC 与站点观测资料的吻合较好。最后, 利用 1961~2013 年两套降水资料和站点实测资料分别计算了标准化降水指数 (SPI), 简单分析了中国大陆地区的干旱变化, 发现 GPCC 对旱涝的时空变化特征的描述比 CRU 更接近站点实际观测; 并且 CRU 也没有反映出 1997 年夏季中国地区出现的严重干旱情况, 而 GPCC 较为准确地反映出了这一干旱事件特征。因此, 本文的研究结果认为, 就中国大陆地区长时期降水资料而言, GPCC 的适用性优于 CRU。

关键词 中国区域 观测降水 GPCC (Global Precipitation Climatology Centre) CRU (Climatic Research Unit) 资料评估

文章编号 1006-9585 (2017) 04-0446-17

中图分类号 P426.6

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2016.16122

Applicability Assessment of GPCC and CRU Precipitation Products in China during 1901 to 2013

WANG Dan^{1,2} and WANG Aihui²

¹ School of Atmospheric Sciences, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225

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

Abstract Two gridded precipitation datasets from the Climatic Research Unit (CRU) and the Global Precipitation Climatology Centre (GPCC) are evaluated using the station-observed precipitation over China for the period of

收稿日期 2016-06-20; 网络预出版日期 2017-01-06

作者简介 王丹, 女, 1991 年出生, 硕士研究生, 主要从事气候变化方面的研究。E-mail: wangdan@mail.iap.ac.cn

通讯作者 王爱慧, E-mail: wangaihui@mail.iap.ac.cn

资助项目 国家重点研发计划项目 (2016YFA0602401), 国家自然科学基金项目 (41275110)

Funded by National Key Research Project (Grant 2016YFA0602401), National Natural Science Foundation of China (Grant 41275110)

1901–2013 at the seasonal, annual, and interdecadal time scales, respectively. The main results are: Firstly, for the period of 1961–2013, both CRU and GPCC products are able to describe the temporal–spatial variation of precipitation in China, and both show a better performance in eastern China than in western China and in summer than in winter. On the annual and seasonal time scales, comprehensive comparisons are also performed through analyzing the percentages of absolute deviation, the root-mean-square errors, and the correlation coefficients between two products with the station observations. It is found that the CRU data shows large biases in the Tibetan Plateau and some other areas of large mountains, and the annual precipitation trend derived from CRU data is also smaller than that from station observations over areas such as the Altun Shan Mai, the Loess Plateau, southeastern China, and the lower reaches of the Yangtze River basin, while GPCC data is relatively more consistent with the station observations in both precipitation amount and trend. Secondly, for the period of 1901–1961, in-situ observed precipitation at 65 stations are used to compare with CRU and GPCC products. It is found that CRU shows large deficiencies to the west of 110°E in the arid and semi-arid regions in China, while GPCC agrees well with observations. Finally, the two gridded datasets and station observations for the period of 1961–2013 are used to compute the standardized precipitation index (SPI), which is then used to describe the degree of aridity in China. The results show that the GPCC is closer to the observations than CRU in terms of the dry and wet events variations in China. For instance, GPCC can capture the severe drought in the summer of 1997, but CRU cannot. In summary, this study suggests that GPCC is a better choices compared to CRU for studying the long-term precipitation trend in China.

Keywords China, Station-observation, GPCC (Global Precipitation Climatology Centre), CRU (Climatic Research Unit), Evaluation

1 引言

降水是研究区域和全球气候变化的基本要素之一,也是地表与大气间能量与水循环过程的重要组成部分。在气候变暖的背景下,全球范围内的降水变化存在明显的区域特征 (Trenberth et al., 2003)。近 60 年来,中国大陆地区的降水强度普遍增大 (吴福婷和符淙斌, 2013),降水日数在西部与华南地区增加、华北一带减少,这些变化特征导致较干旱的华北地区愈加干旱,而多雨的华东和华南地区洪涝事件愈加频繁发生 (叶柏生等, 2004)。此外,降水的区域变化特征在不同的时期也表现不一 (李崇银等, 2002),例如,西北地区气候从 19 世纪以来 100 年左右的时间段内一直处于波动性变暖变干的过程,到了 1987 年起则转为暖湿气候特征,降水量持续增加 (施雅风等, 2002, 2003); 华北一带的气候类型从 20 世纪 70 年代后期开始由湿转向干,降水量发生显著减少 (马柱国, 2007)。对降水长期变化的研究需要依赖详实可靠的降水数据,其最主要来源之一是气象台站的观测,而台站通常建立在地势较平坦、气候条件较好的地区,导致台站的空间分布不均,且各站的建站时间不同、数据缺测情况不一等,都给直接利用台站资料进行气候变化研究带

来了很多困难。就中国而言,台站观测主要开始于 1950 年以后,站点集中分布在地势较平坦 (地势高度小于 1000 m)、人口较密集的东部地区。对于中国东部降水特征的研究尚且能够基于站点观测资料进行,得到的研究结果也较有意义 (吕俊梅等, 2014; 金炜昕等, 2015); 也有不少研究站点观测资料对整个中国大陆地区的降水变化特征进行评估 (王英等, 2006; 虞海燕等, 2011; Ma et al., 2015),但评估结果对于青藏高原和西北地区不确定性很大,主要原因是这些地区的观测站点很少、降水资料稀缺。对西北和青藏高原一带气候变化研究来说,除了利用有限测站观测降水数据,通常还配合使用冰川消融数据、径流数据和内陆湖泊水位数据等 (施雅风等, 2002, 2003),或气候模式模拟数据、卫星数据等 (卓嘎等, 2002; 高荣等, 2008; 张杰等, 2008) 来分析研究降水特点。目前,国际上发展了一些格点化观测降水数据用来填补站点观测的降水资料不足 (例如空间分布不均、资料缺测情况不一等) (Yatagai et al., 2009; Harris et al., 2014; Schneider et al., 2014),同时基于中国站点观测资料,国内学者也发展了一些格点化的降水数据,例如,吴佳和高学杰 (2013) 根据全国 2000 余站点资料建立的 CN05.1 格点资料集; 王绍武等 (2000) 基于我国 110°E 以东的 35 个站 1880~1998 年的降水观测记

录和史料建立的一套完整的四季以及年的降水量序列等。这些资料被广泛应用于气候变化、模式评估、气候灾害等方面的研究中(吕俊梅等, 2009; Ma et al., 2009; 吕少宁等, 2011; 蔡榕硕, 2012; 韩振宇和周天军, 2012; 王芬等, 2013)。

英国东英吉利(East Anglia)大学的气候研究中心(Climatic Research Unit, CRU)(Harris et al., 2014)和美国全球降水气候中心(Global Precipitation Climatology Centre, GPCC)(Schneider et al., 2014)的降水资料是当前应用最广泛的两套全球格点化的陆面降水资料,二者都是以全球气象站点观测数据为基础构建,且具有时间序列长(1901~至今)、空间分辨率较高 $[0.5^\circ(\text{纬度})\times 0.5^\circ(\text{经度})]$ 等特点。但由于两套数据所用的站点数据数量和质量不同,以及格点化所用方法不同,使得两套资料对于不同地区的降水特征描述存在一定的差别,而这些差别会直接对使用这些降水资料的研究结果造成很大的影响,例如 Trenberth et al. (2014)利用多种降水数据求得全球的帕尔默干旱指数(Palmer drought severity index, PDSI)发现,20世纪80年代以后各降水数据算得的PDSI发生很大的分歧,其中CRU数据算得的PDSI表现出大幅的增加趋势,并在2000年左右出现正值,与其余数据所得的干旱变化趋势结论相反;在IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change)报告中,利用全球历史气候网(Global Historical Climatology Network, GHCN)、GPCC和CRU降水数据来评估全球多年降水趋势的变化,发现在1951~2010年亚洲东部地区,CRU降水基本为减小趋势,而GPCC在长江中下游及以南地区降水呈增加趋势(IPCC, 2013)。可见,在区域尺度上利用上述全球格点降水数据之前,有必要检验它在该区域的适用性。对GPCC与CRU在中国大陆地区使用的可靠性,已有学者做过一些相关评估,例如,姜贵祥和孙旭光(2016)评估了1951~2010年多个格点化的全球降水资料对我国东部地区(105°E 以东)夏季降水变率特征方面的描述能力,从经验正交函数模态分解、降水的年代际变化特征和降水周期的经向分布等方面分析后发现,GPCC皆与观测结果最为接近;Sun et al. (2014)发现GPCC与CRU在1950之前的年降水量变化有较大差异,且从1962~2010年与中国地区实测降水数据进行相关系数、标准差和偏差等方面的比较表明,GPCC

相较于CRU更适用于中国大陆地区。由于气候变化的研究通常需要使用百年以上长时间序列的资料,因此需要对更长时间序列的资料进行适用性评估,所以本文主要利用113年(1901~2013年)的站点实测降水数据,更细致地从不同的时间尺度和区域范围评估CRU与GPCC降水数据过去一百余年在中国大陆地区的适用性,为今后中国大陆地区的气候变化研究中降水资料的选择提供一个科学可靠的参考依据。

2 资料与方法简介

2.1 参考数据

2.1.1 长期仪器记录降水数据

由美国能源部(DOE)与中国科学院(CAS)联合编辑的中国气象观测资料(Kaiser, 1991),包括两个长期仪器记录的气候数据库,分别为:65个较早(1950年之前)建站的气象台站数据和205个大部分在1950年以后建站的气象台站数据。本文选择建站时间相对较早的65个台站上的气候数据库作为参考数据,该数据中包括气压、气温、降雨量、相对湿度等14个气象变量,各台站的建站时间不尽相同,其中有13个台站在1900年之前建立,其余各台站则是在1900~1960期间陆续开始观测工作的,所有台站的观测记录,均截至1993年。图1给出了65个站点分布地理位置及海拔高度。

2.1.2 CN05.1降水数据

基于中国2400余个地面气象台站的逐日观测资料,吴佳和高学杰(2013)利用距平逼近法(New et al., 2000)构建了一套中国区域的格点化观测数据集。该数据集包括逐月降水、日平均和最高和最低温度等变量,时间长度为1961~2014年,目前有 $1^\circ(\text{纬度})\times 1^\circ(\text{经度})$ 、 $0.5^\circ(\text{纬度})\times 0.5^\circ(\text{经度})$ 和 $0.25^\circ(\text{纬度})\times 0.25^\circ(\text{经度})$ 三种水平空间分辨率版本。该数据涵盖了整个中国大陆区域,且具有较高的空间分辨率,能相对准确地表示各气象变量的实际变化情况(Zhou et al., 2016)。CN05.1也是当前最精确的中国区域格点化近地面气象场资料。本文选择 $0.5^\circ(\text{纬度})\times 0.5^\circ(\text{经度})$ 水平空间分辨率,时间长度在1961~2013的逐月降水资料。

2.2 检验数据

2.2.1 CRU降水数据集

CRU高分辨率格点化数据集是目前全球使用

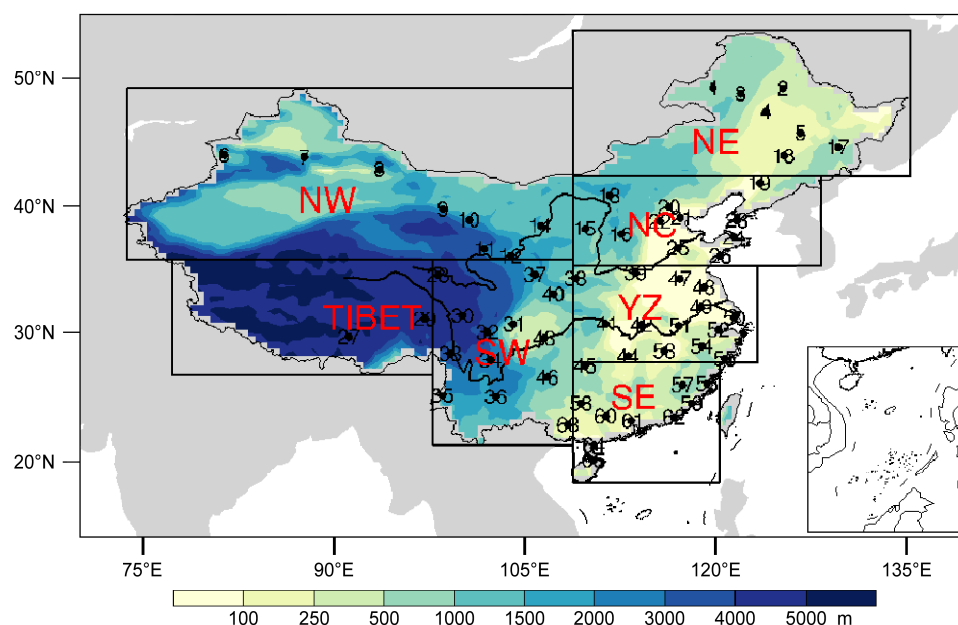


图 1 长期仪器记录的气候数据库中 65 个气象站的分布和地形高度(单位:m)。黑线矩形框将全国分为 7 个区域:西北地区(NW: 35.75°N~49.25°N, 73.75°E~108.75°E)、西南地区(SW: 21.25°N~35.75°N, 97.75°E~108.75°E)、东北地区(NE: 42.25°N~53.75°N, 108.75°E~135.25°E)、华北地区(NC: 35.25°N~42.25°N, 108.75°E~128.75°E)、长江流域(YZ: 27.75°N~35.25°N, 108.75°E~123.25°E)、华南地区(SE: 18.25°N~27.75°N, 108.75°E~120.25°E)、青藏高原地区(TIBET: 26.75°N~35.75°N, 77.25°E~97.75°E)

Fig. 1 Locations of 65 rain gauge stations for long-term observations in the climatic database of China and their elevations (m). The black boxes indicate the seven subregions of China: Northwest China (NW: 35.75°N~49.25°N, 73.75°E~108.75°E), Southwest China (SW: 21.25°N~35.75°N, 97.75°E~108.75°E), Northeast China (NE: 42.25°N~53.75°N, 108.75°E~135.25°E), North China (NC: 35.25°N~42.25°N, 108.75°E~128.75°E), the Yangtze River valley (YZ: 27.75°N~35.25°N, 108.75°E~123.25°E), Southeast China (SE: 18.25°N~27.75°N, 108.75°E~120.25°E), and Qinghai-Tibet Plateau (TIBET: 26.75°N~35.75°N, 77.25°E~97.75°E)

最为广泛的近地面气候数据集之一。该资料首先选择 1961~1990 年的气候平均值计算整个时间段各站点的异常值,通过薄板样条插值法插值异常值到格点,再叠加上气候平均值最终得到格点资料(Harris et al., 2014)。CRU 数据集包含平均温度、温度日较差、降水、霜天和露天频率、水汽压和云量等气候变量。本文使用的 CRU TS v3.23 (CRU Time series version 3.23)是 2015 年 6 月最新发布的版本,数据时间覆盖率为 1901~2014 年,水平分辨率为 0.5° (纬度) $\times 0.5^{\circ}$ (经度),较之前的版本相比,新版本更新了 2014 年的数据,并且增加了一些新站点观测的降水和温度数据。本文选取 CRU TS v3.23 数据集中的月均降水数据,时间覆盖范围为 1901~2013 年。

2.2.2 GPCC 降水数据集

GPCC 降水数据的构建是基于全球大约 85000 个观测站点(其中包括气象观测站点、水文监测站点以及从 CRU、GHCN Vision 2、FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations) 数据

产品收集的站点和一些区域资料集,通过 SPHEREMAP 插值方法得到全球陆地格点化的降水数据集(Becker et al., 2013)。GPCC 降水数据集最大的优势在于它所利用的全球站点数远超过其它同类型的资料集(Schneider et al., 2014),它的水平空间分辨率包括 0.5° (纬度) $\times 0.5^{\circ}$ (经度)、 1.0° (纬度) $\times 1.0^{\circ}$ (经度)和 2.5° (纬度) $\times 2.5^{\circ}$ (经度)三种。本文使用 2015 年发布的最新版本的降水资料 GPCC (Full Data Reanalysis Version 7),水平空间分辨率选择 0.5° (纬度) $\times 0.5^{\circ}$ (经度),时间覆盖率为 1901~2013 年。为了方便叙述,文中将几种资料分别简称为 CRU、GPCC 和 CN05.1,65 个长期记录台站的仪器测量资料简称为 STA。

2.3 方法

本文主要对降水资料之间进行空间偏差、相关系数以及降水量的长期线性变化趋势方面的分析,比较 CRU 和 GPCC 降水资料与参考资料间在季节、年际和年代际时间尺度上的差别。由于受参考资料长度的限制,本文的分析将分为两个时间段进行讨

论: (1) 1961~2013 年, 利用 CN05.1 降水资料, 在不同区域对 CRU 和 GPCC 降水进行评估分析; (2) 1901~1961 年, 利用 65 台站个长期仪器记录资料, 在各个台站上对 CRU 和 GPCC 降水资料进行评估比较。其中, 对于 1901~1961 年的数据比较, 由于站点数量较少且分布稀疏, 所以我们先将格点数据插值到站点, 再在各站点进行资料间的相互比较。在插值方法的选择上, 我们将两类较为常用的插值方法——反距离加权插值法与双线性插值法的插值结果与站点实测值做简单的比较, 发现双线性插值的结果与实测值更为接近, 因而本文选择将格点数据利用双线性插值法插值到各站点。因为 65 个台站的建站时间不同, 资料长短不一, 而且存在很多的缺测值, 所以不能进行完整的季节平均运算, 故本文将每年的 1 月和 7 月的降水值分别代表该年的冬季和夏季; 在 1961~2013 年的数据比较中, CN05.1 为格点资料且时间序列完整, 所以对这个时段的季节分析, 使用的季节降水值分别为各季节的 3 个月份的降水平均值, 例如, 冬季 (12、1 和 2 月, 简称 DJF), 夏季 (6、7 和 8 月, 简称 JJA)。此外, 下文中所出现的区域平均均采用面积加权平均方法计算所得。为了便于区域比较, 本文依据气候变化特征分布, 将中国地区分为图 1 所示 7 个区域 (Ma et al., 2015)。

3 结果分析

3.1 1961~2013 年数据结果分析

3.1.1 降水量的气候态变化比较

图 2 是 1961~2013 年期间 CRU 和 GPCC 分别与 CN05.1 的多年年均和季节平均降水的偏差空间分布图。从图中可以看出, 年际和夏、冬两季的降水偏差通过 t 检验 ($p=0.01$) 的区域主要分布在 105°E 以西和东北的部分地区, 其中在西北地区的昆仑山脉、天山山脉、祁连山脉以及西藏高原东缘地区的多山脉地区, 两套资料与 CN05.01 相比呈显著的负偏差, 在各沙漠或盆地区域两套资料为正偏差, 比较而言, GPCC 的降水偏差值相对较小; 此外, CRU 在青藏高原南部的降水量严重偏高, 与 CN05.1 相差甚远。 105°E 以东区域, 除了在大、小兴安岭降水偏差较为显著以外, 其余地区的降水偏差均未通过 99% 的信度检验, 尤其是在华南长江流域一带, 两套资料与 CN05.1 的偏差百分比均小于

10%。

表 1 分别列出了两套检验资料与 CN05.1 之间的各类统计量: 年均降水量、降水偏差、降水偏差绝对值的百分比、均方根误差和相关系数。在年际尺度上, 以整个中国区域为例, 两套检验资料分别与 CN05.1 的相关系数都较高, 且均方根误差相较于 CN05.1 的年均降水量来说很小, 可认为 CRU、GPCC 与 CN05.1 的降水量之间的相关性较强、空间分布差异较小。以西北、华南地区为例, 综合各类统计量来比较 CRU 和 GPCC 对实际降水的估计能力: CRU 的降水偏差略小于 GPCC, GPCC 的年均降水偏差绝对值的百分比和均方根误差均小于 CRU, 且 GPCC 与 CN05.1 的相关系数大于 CRU 与 CN05.1 的, 这表明 GPCC 与 CN05.1 的空间降水分布较为相近, 但 GPCC 的降水量值略低, 而 CRU 与 CN05.1 在这两个区域的空间一致性不佳, 平均降水偏差相对较小的原因可能是由于 CRU 在有些地区的降水估计偏低, 而在另外一些地区偏高, 通过面积加权平均后抵消了部分正负偏差。同样地, 通过各统计量在其它区域的比较不难发现, 相较于 CRU, GPCC 对中国大陆各地区的降水描述更接近 CN05.1。就 CRU 本身而言, 在华北地区的适用性优于东北地区。季节上, CRU 在夏季的适用性优于冬季 (相关系数在两季都在 0.72 左右, 降水偏差百分比在夏季为 33.99%, 远远小于冬季的 81.64%)。GPCC 对两个季节的降水估计在各区域相对一致, 与 CN05.1 在各区域的相关系数在两个季节比较接近, 降水偏差百分比在冬季 (43.18%) 大于夏季 (25.46%)。综合以上的分析, 两套检验资料在夏季的适用性皆优于冬季, 并且不论季节还是年际尺度, GPCC 都与实际降水特征更接近。

从年均降水距平的长时间序列看 (图略), 检验资料与参考资料在各区域的年均降水距平在 1961~1990 年期间都表现出较好的一致性, 但从 1991 年起, CRU 的降水距平值与 CN05.1 的降水距平值出现明显的偏差, 与 CN05.1 的相关系数也从 0.81 (1961~1990 年) 降到 0.61 (1990~2013 年), GPCC 与 CN05.1 降水值的相关系数则始终稳定在 0.83 左右。CRU 降水资料的质量在 1991 年之后有所下降这一现象在 Trenberth et al. (2014) 利用 CRU、GPCC 和 GHCN 等 6 个全球 ($60^{\circ}\text{S}\sim 75^{\circ}\text{N}$) 陆地降水数据集来分析全球干旱变化特征时也有所体现。

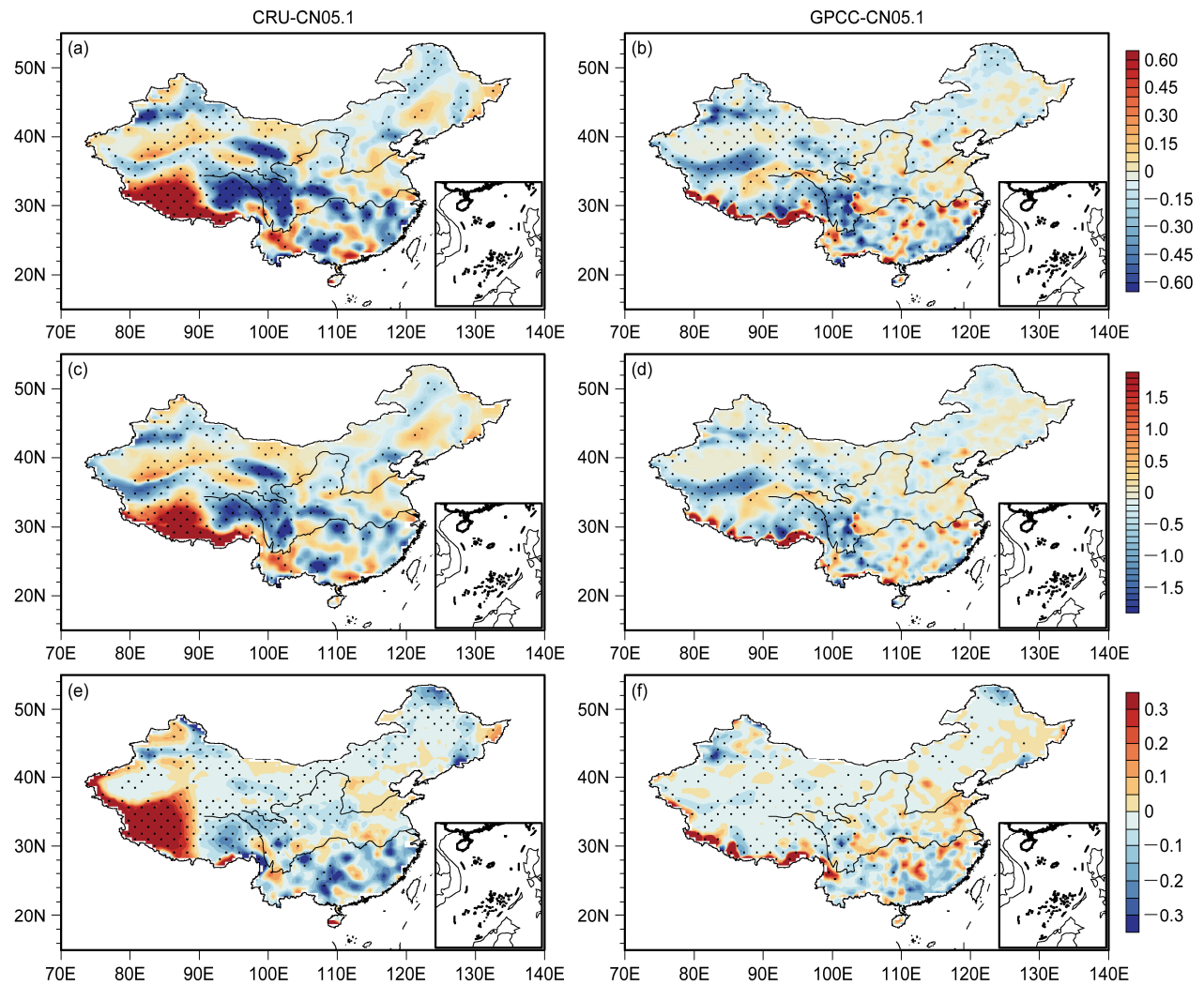


图 2 多年平均 (1961~2013 年) 的 (a、c、e) CRU 与 CN05.1 和 (b、d、f) GPCC 与 CN05.1 降水量的偏差 (单位: mm/d, 黑点表示通过 99% 的显著性检验): (a、b) 年均; (c、d) 夏季平均; (e、f) 冬季平均

Fig. 2 Spatial distributions of long-term (1961–2013) mean precipitation differences (mm/d) (a, c, e) between CRU (Climatic Research Unit) and CN05.1 data and (b, d, f) between GPCC (Global Precipitation Climatology Centre) and CN05.1 data in China: (a, b) Annual; (c, d) summer; (e, f) winter. The black dotted areas indicate the differences pass the 99% confidence level

表 1 区域加权平均的各统计量: CN05.1 的年均降水量、CN05.1 分别与 CRU 和 GPCC 的降水偏差、降水偏差绝对值的百分比、均方根误差和相关系数

Table 1 Statistics of area-weighted averages: CN05.1 annual precipitation, precipitation deviations, percentages of absolute deviation, root-mean-square errors and correlation coefficients between CN05.1 and the two products of CRU and GPCC									
	CN05.1 年降水量/mm d ⁻¹	与 CN05.1 的降水偏差/mm d ⁻¹		与 CN05.1 的降水偏差绝对值的百分比		与 CN05.1 的均方根误差/mm d ⁻¹		与 CN05.1 的相关系数	
		CRU	GPCC	CRU	GPCC	CRU	GPCC	CRU	GPCC
西北地区	0.48	−0.08	−0.12	40.34%	31.89%	0.18	0.15	0.68	0.80
西南地区	2.74	−0.23	−0.12	15.15%	11.01%	0.45	0.33	0.70	0.87
东北地区	1.28	−0.04	−0.06	11.28%	9.67%	0.18	0.14	0.79	0.88
华北地区	1.52	−0.06	−0.03	11.99%	8.72%	0.22	0.16	0.82	0.92
长江流域	3.22	−0.14	−0.03	9.53%	6.61%	0.39	0.26	0.82	0.94
华南地区	4.55	−0.07	−0.13	8.57%	6.86%	0.50	0.37	0.85	0.94
青藏高原地区	1.07	0.29	0.24	67.79%	59.97%	0.65	0.61	0.55	0.62
全国	1.72	−0.04	−0.04	28.84%	23.28%	0.35	0.28	0.72	0.83

New et al. (2000) 指出, CRU 在全球的观测站点总数从 1901~1980 年逐年增加, 但之后站点总数开始减少, 并且在 1990 年代期间站点减少得最严重, 这可能是 CRU 降水数据质量下降的主要原因之一。

3.1.2 降水趋势比较

对降水资料的多年趋势的比较能在一定程度上了解检验资料在气候变化研究中的可靠性。图 3 是 1961~2013 年期间 CN05.1、CRU 和 GPCC 年均和季节平均降水的趋势空间分布图。从图 3a 可看出, 在 1961~2013 年, CN05.1 年均降水空间变化在 100°E 以西地区 (西北、西藏高原地区) 降水呈显著增加趋势, 而在 100°E~110°E 的四川盆地和云贵高原、以及华北地区呈减少趋势。这与已有研究得到的结论相似 (李聪等, 2012; 吴娴等, 2014)。分别对比 CRU、GPCC 与 CN05.1 的年均降水趋势发现 (图 3a、3b、3c), 在青藏高原的冈底斯山脉

以西和东北最北端的漠河一带, 两套检验资料降水趋势皆与 CN05.1 正负相反, 具体表现为: 冈底斯山脉以西检验资料表现为负趋势, 且 GPCC 的负趋势通过显著性检验, 而 CN05.1 为正趋势; 在漠河区域, CRU 与 GPCC 都为显著增加趋势, 但 CN05.1 为显著的减少趋势。除此之外, 在其余地区 GPCC 与 CN05.1 的年降水趋势的空间分布变化一致, 只是趋势强度偏小; 而 CRU 与 CN05.1 趋势依旧存在较明显的差异, 对比图 3a 和图 3b 发现, 尤其是在西北地区的阿尔金山脉、黄土高原、秦岭一带, 以及东南地区与长江下游地区, CRU 与 CN05.1 趋势的空间分布差别较大。此外, 由各区域的年均降水回归系数所表示的趋势变化 (表 2) 可看出, CRU、GPCC 与 CN05.1 在各区域内的降水趋势的正负一致, 而具体降水趋势的大小存在差别。例如, 整个中国大陆区域平均, 三套资料年均降水呈增加趋

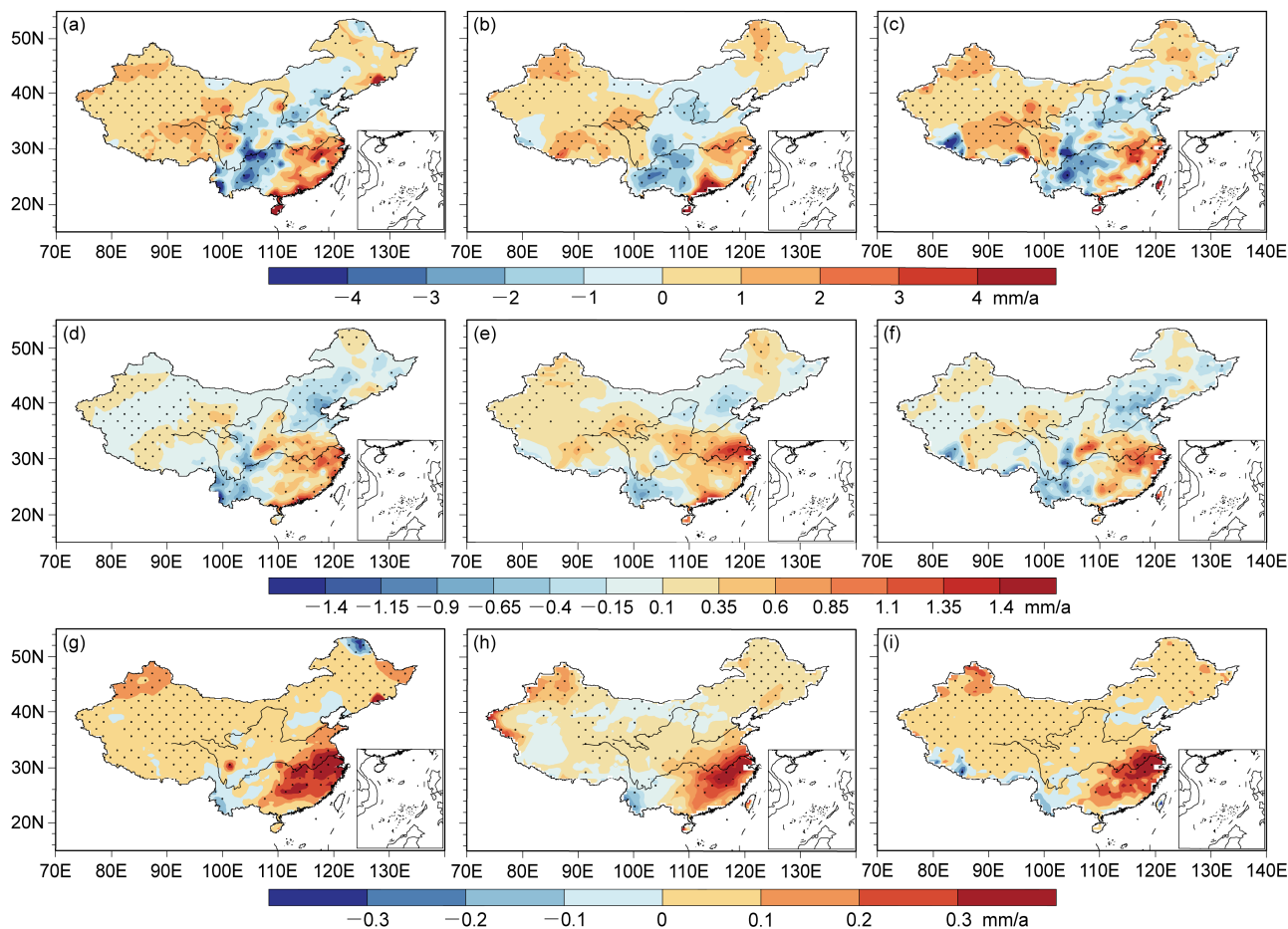


图3 CN05.1 (左)、CRU (中) 和 GPCC (右) 三套降水数据在 1961~2013 年线性趋势 (单位: mm/a, 黑点表示通过 95% 置信检验): (a、b、c) 年均降水; (d、e、f) 夏季平均降水; (g、h、i) 冬季平均降水

Fig. 3 Linear trends of annual mean precipitation (mm/a) during 1961–2013 from CN05.1 (left column), CRU (middle column), and GPCC (right column) data: (a, b, c) Annual; (d, e, f) summer; (g, h, i) winter. The black dots indicate the trends pass the 95% confidence level test

势, 但趋势大小有所不同, 其中 CN05.01 (0.30 mm/a) 增加最快, 而 CRU (0.223 mm/a) 和 GPCC (0.215 mm/a) 增加趋势相当, 但所有的线性趋势值都没有通过 95%的信度检验。上述研究表明, CRU 和 GPCC 均能较好地表现出各区域年均降水的增减, 但对趋势强度的估计有一定偏差。

表 2 CN05.1、CRU、GPCC 三套降水数据的区域面积加权平均的年均降水线性回归系数

Table 2 The area-weighted average of the annual precipitation's linear regression coefficients from CN05.1, CRU, and GPCC data

	区域面积加权平均的年均降水线性回归系数		
	CN05.1	CRU	GPCC
西北地区	0.52	0.38	0.57
西南地区	-0.99	-0.71	-0.80
东北地区	0.25*	0.26*	0.24*
华北地区	-0.22*	-0.50	-0.66
长江流域	0.60*	0.41*	0.40*
华南地区	1.71	1.20	0.97*
青藏高原地区	0.71	0.66	0.58
全国	0.30	0.22	0.22

*表示通过 95%的显著性检验

季节尺度上, CN05.1 全国平均的秋季降水趋势显著减小 (-0.06 mm/a), 冬季则表现为显著增加趋势 (0.06 mm/a), 李聪等 (2012) 利用中国 503 站的降水资料分析 1951~2009 年季节的区域降水的年代际变化特征亦表明, 近 60 年来各地区在秋季降水偏少趋势显著且冬季降水趋于增加。图 3 是夏季和冬季的降水趋势分布图。夏季, 在华北、内蒙、西南和黄土高原一带表现为显著的降水减少趋势, 以华北地区减少趋势最大 (-0.18 mm/a), 其次为西南地区 (-0.16 mm/a), 而长江和黄河之间的华北平原、长江中下游以及华南的南岭一带, 降水表现为较强的增加趋势 (图 3d), 区域平均的趋势强度均为 0.47 mm/a 。对比两套检验资料分别与参考资料的夏季降水趋势空间图发现, GPCC (图 3f) 较为准确地描述中国夏季降水趋势的空间分布, 而 CRU (图 3e) 则没能表现出中国大部分地区夏季降水的减少趋势, 尤其是在云南一带和华北地区, CRU 降水趋势强度明显偏弱, 在长江中下游流域对降水趋势大小的估计又偏强, 而对四川盆地及附近的大凉山地区、塔里木盆地一带, 估计为弱的降水增加趋势, 与 CN05.1 正好相反。冬季 (图 3g), CN05.1 降水在中国大陆大部分区域呈增加趋势, 仅

在云南及边境处、东北漠河以及河北山西很小的区域呈弱的减少趋势, 其中, 增加趋势最显著的区域在长江下游和华南南岭一带。GPCC 除了在漠河一带和青藏高原南缘地区的趋势与 CN05.1 不同外, 其余地区都较好地反映出冬季降水趋势的空间分布; CRU 与实际降水的差异较大, 尤其在 100°E 以西的地区与 CN05.1 的趋势有较明显的不同, 在 100°E 以东地区的降水趋势值又偏弱。

图 4 是三套降水数据年代际降水趋势图。如图所示, 20 世纪 90 年代以前, 中国地区为负的年代际变化趋势。尤其在 20 世纪 70 年代降水减少最快 (-1.42 mm/a), 其主要原因与 20 世纪 70 年代北太平洋年代际振荡位相转变、强度减弱有关 (Wang, 2001)。20 世纪 90 年代以后整个中国区域的平均降水呈增长趋势, 但均未通过 95%的置信检验。从不同区域的降水趋势来看, 西北和西南地区的降水趋势呈现明显相反的年代际变化特征, 即西北为降水减少则同一时期西南为降水增加, 反之亦然。华北和东北地区两地、长江流域和华南地区两地的降水年代际趋势正负变化一致, 皆存在 10~20 年的时间变化。CRU 与 GPCC 基本描述出降水趋势的年代际变化特征, 但 20 世纪 90 年代以后 (图 4d-4e), CRU 与实际降水变化趋势开始出现明显差异, 尤其是在西南地区 20 余年来持续的降水增加趋势, 与实际降水变化不符, 其余区域也存在明显的偏高或偏低的误差。相比较而言, GPCC 在大多数区域降水趋势与实际降水情况较为接近, 仅在青藏高原一带与 CN05.1 的降水相差较大。由于青藏高原地区地形起伏较大且观测站点极少, CN05.1 能否准确代表当地的降水情况也存在疑问 (吴佳和高学杰, 2013), 而 GPCC 的基础站点涵盖全球各地, 在青藏高原周边国家的基础站点也许对青藏高原降水数据的插值效果起到积极作用, 所以各类降水数据在该地的应用都应格外谨慎。总体而言, GPCC 相对于 CRU 对区域的降水趋势更为可靠。

3.2 1901~1961 年数据结果分析

3.2.1 降水相关系数和标准差的比较

图 5 为 1901~1961 年多年的年均和季节平均降水的泰勒图, 其中 REF 线表示检验资料与参考资料的标准差之比为 1 的线。泰勒图能将资料间的相关系数、标准差和以一个清晰简明的图形展示, 从而更直观地比较检验值与参考值间的异同 (Taylor, 2001)。由图 5a 可见 CRU、GPCC 与 STA 的年均降

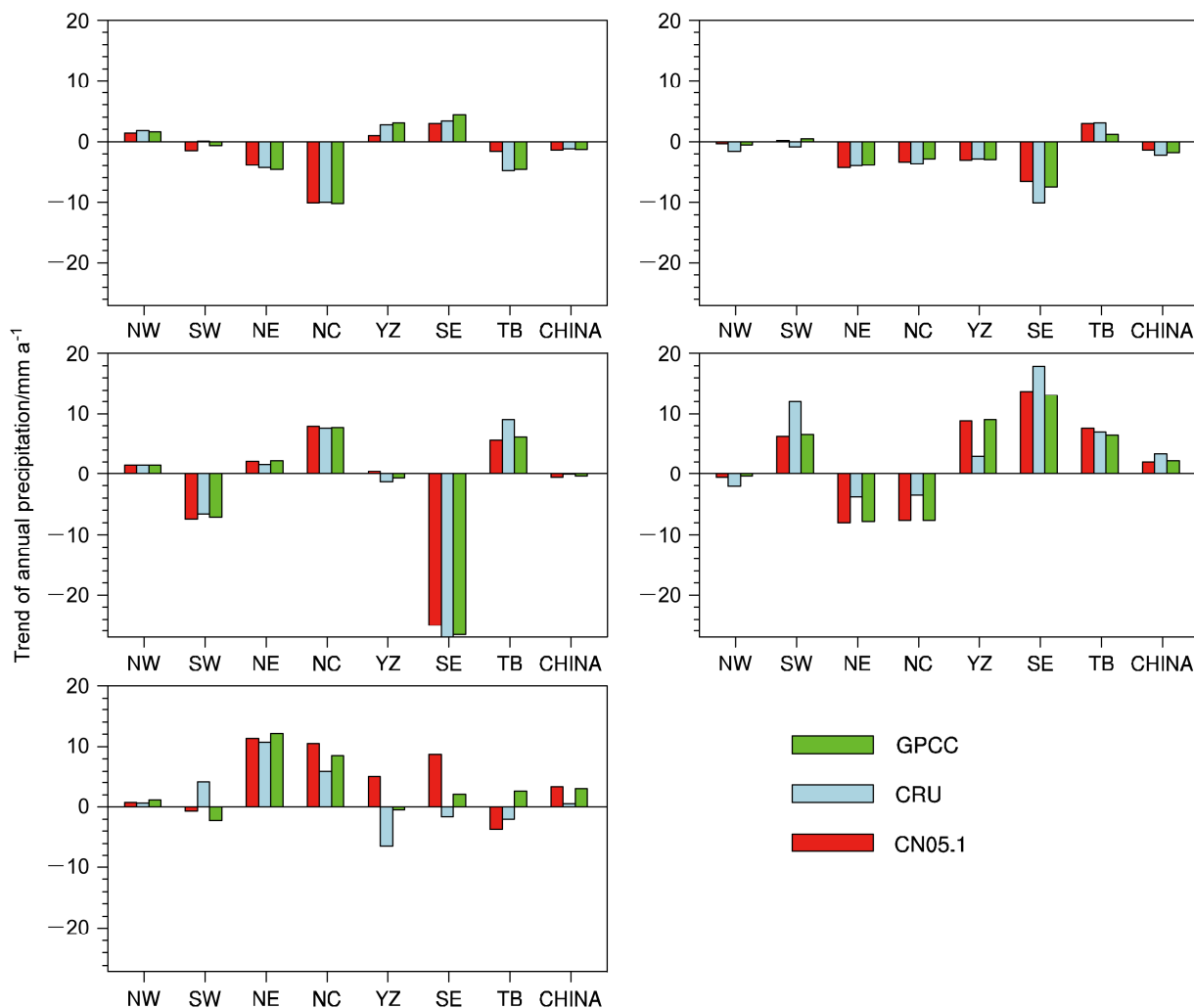


图4 1961~2013年CN05.1、CRU、GPCC三套数据年降水量在不同地区 and 不同年代的线性趋势(单位: mm/a): (a) 1961~1970年; (b) 1971~1980年; (c) 1981~1990年; (d) 1991~2000年; (e) 2001~2013年

Fig. 4 Annual precipitation trends (mm/a) from CN05.1, CRU, and GPCC data over different regions in each decade for 1961~2013: (a) 1961~1970; (b) 1971~1980; (c) 1981~1990; (d) 1991~2000; (e) 2001~2013

雨量的相关系数集中分布在 0.75~0.95, 标准差之比大部分处于 REF 线之内, 其中(结合图 1 观察站点序列号的地理分布)在西北、西南地区的站点, GPCC 与 STA 的标准差之比平均为 1.7, CRU 与 STA 的标准差之比平均为 0.6, 表明在西南、西北地区 GPCC 的标准差普遍比 STA 的大, CRU 的标准差普遍小于 STA 的, 说明 GPCC 的降水变化振幅大于实际降水变化振幅, 而 CRU 又与实际降水变化振幅偏小; 在 110°E 以东的东北、华北、长江流域和华南地区, 两套检验资料与参考资料间的平均标准差之比皆小于且接近于 1 (其中 GPCC 与 STA 的平均标准差之比分别为东北地区: 0.92, 华北地区: 0.85, 长江流域: 0.89, 华南地区: 0.96; CRU 与

STA 的标准差之比分别为东北地区: 0.83, 华北地区: 0.76, 长江流域: 0.79, 华南地区: 0.89, GPCC 与 STA 的标准差更相近。总的来说, 两套检验资料(尤其是 CRU)与 STA 的年均降水之间相差较明显。

季节上, 冬季(图 5b) GPCC 的点大部分集中在 REF 线上, 表明 GPCC 在大部分站点与 STA 的标准差较接近、变化幅度基本一致, 且它们之间的相关系数在各个站点基本都大于 0.9, 大部分站点的相关系数大于 0.95; 而 CRU 的点分布零散, 大部分点的标准差之比小于 1.0, 与 STA 的相关系数主要集中在 0.7~0.9 和 0.95~0.99 这两个区域内, 结合图 1 观察 CRU 各站点所处位置, 发现距 REF 据点较远且相关系数较低的站点基本分布在西北、

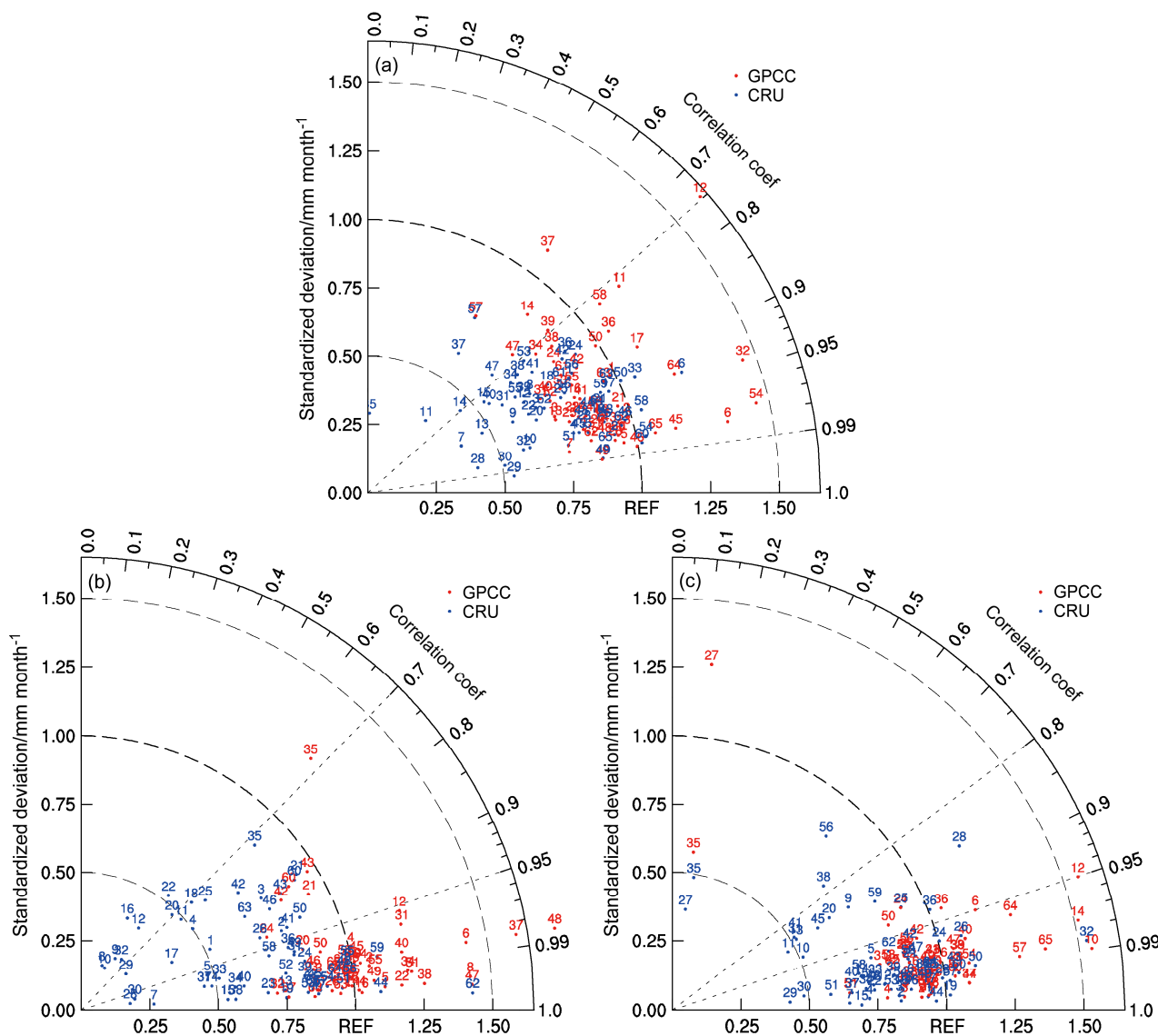


图5 检验资料(CRU和GPCC)与参考资料在65个站点上多年平均(1901~1961年)降水量的泰勒图:(a)年平均;(b)冬季;(c)夏季

Fig. 5 Taylor diagrams for long term (1901–1961) averaged precipitation at 65 rain gauge stations: (a) Annual; (b) winter; (c) summer

东北一带的干旱半干旱区和西南、青藏高原一带的多山地区。而 GPCC 在各站点的降水估计都与 STA 相近,仅在西北和西藏地区与 STA 的标准差相差较大,其余地区基本反映出冬季降水的实际情况。夏季降水的泰勒图中(图 5c),相比冬季各点都较集中分布在 REF 线附近,CRU 与 STA 在各站点的相关系数基本处在 0.8 内,标准差普遍小于 STA 的标准差,GPCC 与 STA 各站点的相关系数集中在 0.9 以上,各站点的标准差之比接近于 1。可见两套检验资料对实际降水的振幅变化估计能力在夏季和冬季相当、但相关系数在夏季普遍优于冬季,且 GPCC 相较于 CRU 而言更适用于中国地区。

3.2.2 降水的长时间序列比较

本文还比较了各站点 STA 与 CRU、GPCC 的年均降水距平在 1901~1961 年的时间序列,这里仅列出了华北地区 5 个站点的年均降水距平时间序列图(图 6)作为示例。CRU 与 GPCC 对各站的实际年均降水普遍存在偏低估计,相较而言,GPCC 的年均降水量与实际的年均降水量更为接近,在所有 65 个站点中,也有相似结果。同时发现,呼和浩特和榆林站在 1916 年之前 CRU 的距平值为 0,对比所有的 65 个站点降水距平的时间序列图可发现,在西北、西南、青藏地区的站点上,CRU 也都有超过 30 年距平值为 0 的现象,这是由 CRU 处理

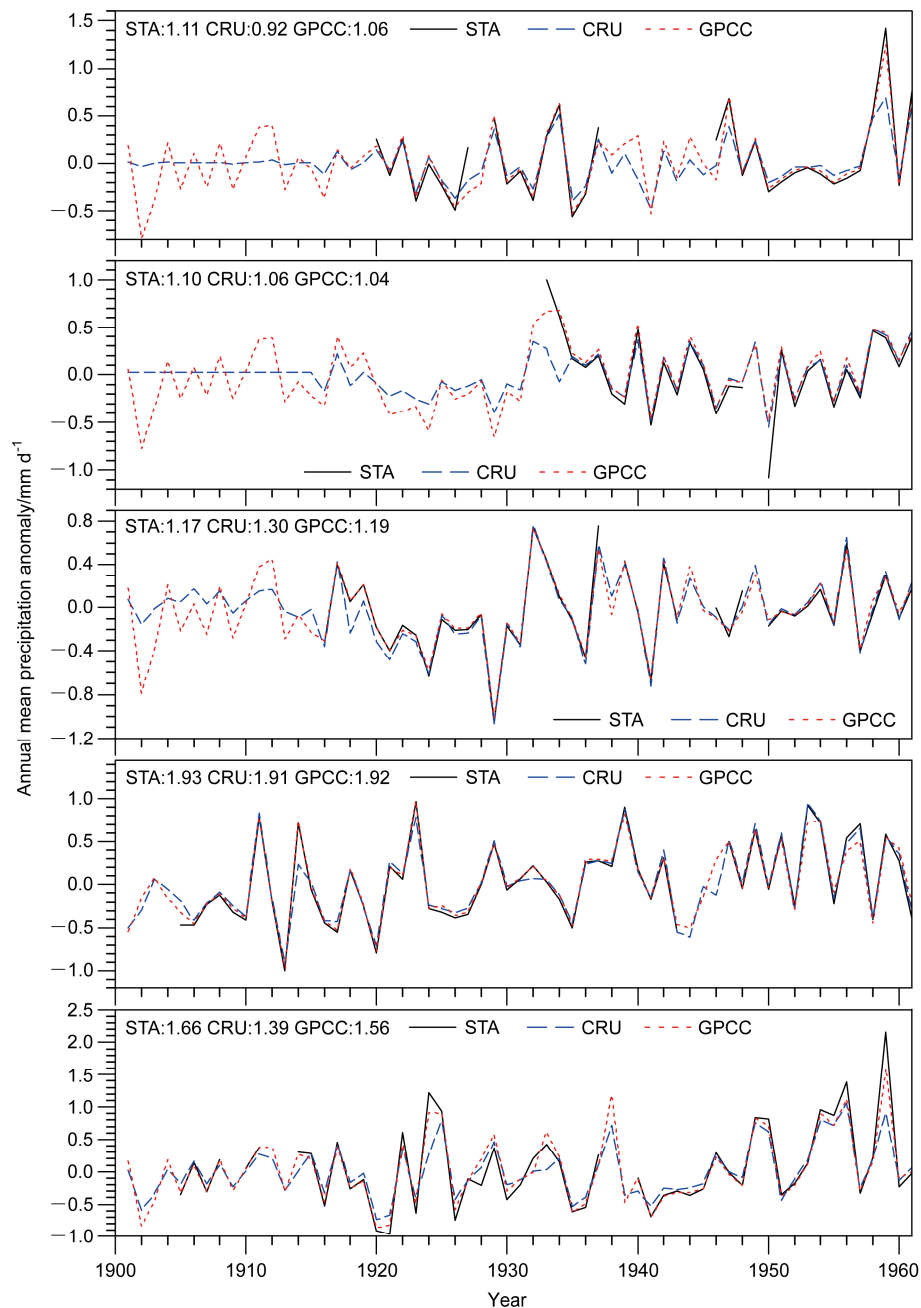


图6 华北地区5个站点年均降水量距平(单位: mm/d)的时间序列: (a) 呼和浩特(13号站); (b) 榆林(15号站); (c) 太原(16号站); (d) 沈阳(19号站); (e) 北京(20号站)。图的左上角标明三类降水资料的多年年均降水量

Fig. 6 Time series of annual mean precipitation anomaly (mm/d) at five stations in Northeast China: (a) Huhehaote station (No.13); (b) Yulin station (No.15); (c) Taiyuan station (No.16); (d) Shenyang station (No.19); (e) Beijing station (No.20). The long term annual mean precipitation derived from the three datasets are also shown in the upper left corner of each panel

数据使用的数学方法造成的, 在这些地区缺乏早年的数据观测值, CRU 利用 1961~1990 的气候平均值作为实际降水值, 所以该处的降水异常值为 0 (Harris et al., 2014)。相比之下, GPCC 的年均降水距平在早年缺少观测资料的情况下, 也随时间做着合理的振幅变化, 这可能是由于 GPCC 更为复杂

的插值方法和较多基础原始资料的影响。在华南、长江流域和东北地区, CRU、GPCC 与 STA 较一致, 相关系数普遍超过 0.96, 甚至接近 1, 可能是由于这些地区站点密集、观测时间较早、缺测值少等原因, 同时, 其中的一些站点已经直接用于 CRU 和 GPCC 的原始资料中。

综合泰勒图和各站点年均降水距平的时间序列图的判断,我们认为在 1901~1961 年,GPCC 对西北、西南、西藏地区和华北的干旱半干旱区的降水估计与实际降水更为接近,在东南、长江流域、东北等东部南部地区,GPCC 与 CRU 都能很好地描述该区域的降水特征,可见 CRU 对降水估计的好坏区域性较强,GPCC 在各区域的降水估计相当,并且 GPCC 在各站点的降水量也更接近测站的观测。这里我们对 1901~1961 年间在青藏高原地区两套检验资料的适用性保留意见,因为 STA 在青藏高原仅有 2 个站点(拉萨和昌都),观测记录时间较晚(分别是 1935 年和 1954 年),且缺测记录较多,无法代表青藏高原地区的降水情况,所以降水资料在青藏高原地区的应用应格外注意。

4 标准化降水指数比较

标准化降水指数(Standardized Precipitation Index, SPI)是常用的一种干旱指数,它只需使用降水资料就可比较各区域干湿变化特征,且计算方便、可靠(McKee et al., 1995; Trenberth et al., 2014)。本文利用 1961~2013 年 CN05.1、CRU 和 GPCC 的月平均降水分别计算了中国大陆区域的 SPI。图 7 分别为 CN05.1 在 3 个月时间尺度的 SPI 趋势变化图(图 7a)和 CRU、GPCC 分别与 CN05.1 的 SPI 趋势的偏差分布图(图 7b、7c),反映了区域内的干湿变化。如图 7a 所示,在我国 100°E 以西的西北地区 and 长江中下游一带 SPI 呈增加趋势,100°E~115°E 的西南、华北地区 SPI 为减少趋势,表明 53 年来,西北、长江中下游地区的气候在逐渐增湿,其中以祁连山脉一带增湿最快,而西南一带以及华北地区的气候表现为缓慢变干,华南一带的 SPI 基本不变;由图 7b、7c 所示,检验资料与参考资料的 SPI 趋势相差较大的地区主要在西北、四川盆地,其中 CRU 在西北大部分地区 and 青藏高原、GPCC 在青藏高原南缘的冈底斯山脉以西地区对干湿趋势的估计存在较大的偏差。此外,CRU(图 7b)对燕山以北地区的 SPI 趋势估计也与实际趋势差异明显。在长江流域和华南一带,两套检验资料的 SPI 趋势与实际相差较小。因此,除青藏高原地区外,GPCC 的 SPI 与实际 SPI 的趋势变化较为一致,CRU 在较多地区与实际 SPI 的趋势变化存在差异。

此外,本文以一个干旱事件为例进一步比较检

验资料的适用性。1997 年中国地区出现了非常严重的夏旱,持续时间长且范围较广(赵从兰等, 1998; 白虎志等, 1999)。图 8a 反映了在 1997 年夏季中国地区出现的非常严重的干旱事件,其中在河北、山西、陕西、宁夏和甘肃等地区 SPI 小于 -2,属于极端干旱的情况,西北、东北部分地区的干旱半干旱地带,处于 SPI 为 -1.5~-0.5 不同程度的干旱状况;而华南以南一带 SPI 为正,南岭以南地区 SPI 达到 2,较为潮湿,表明该处降水较多。将 CRU、GPCC 的 SPI 分别减去 CN05.1 的 SPI 发现,CRU 的 SPI 与 CN05.1 的 SPI 差异明显(图 8b),没有表现出在邛崃山脉一带、两河源头的干旱现象,而在天山山脉、巴丹吉林沙漠地区、黄河入海口地区的干旱又有偏高估计,对东南沿海一带的变潮湿现象也估计不足,不能较好地表现出我国在 1997 年夏季发生的干旱现象。而 GPCC 与 CN05.1 相比(图 8c),它们的 SPI 空间分布差异较小,基本能准确地表现出 1997 年夏季中国大陆地区的干湿分布状况。

5 结论

本文以 1901~2013 年中国大陆的站点观测降水数据为参考,从季节、年际和年代际时间尺度上分析了两个全球陆地月平均降水资料(CRU 和 GPCC)在中国大陆地区的适用性,结果表明:

(1) 1961~2013 年,CRU 与 GPCC 都能较准确地描述中国大陆地区的降水量特征,且东部较西部、夏季较冬季与站点观测降水更为一致。在季节和年际尺度上,通过计算的降水偏差绝对值的百分比、相关系数、均方根误差等统计量的比较发现,CRU 在青藏高原以及西北地区的沙漠盆地较实际降水偏大,在较大的山脉附近(比如天山山脉、阿尔卑斯山脉)又低于实际降水情况,且年均降水趋势在西北一带的阿尔金山脉、黄土高原以及东南地区、长江下游一带比站点实测的降水变化偏小或出现量值符号相反的情况,此外,CRU 在各区域的年代际降水趋势也普遍偏小;GPCC 不论是降水量还是对降水趋势都更接近于实际情况;时间序列上,CRU 在 1991 年后与 CN05.1 出现明显偏差,相关系数由 1991 年之前的 0.81 突降到 1991 年后的 0.61;而 GPCC 对除了在一些气象站点分布极少、不确定因素较大的地区(例如:青藏高原地区)与 CN05.1 的降水情况相差较大外,皆能较准确估计中国大陆

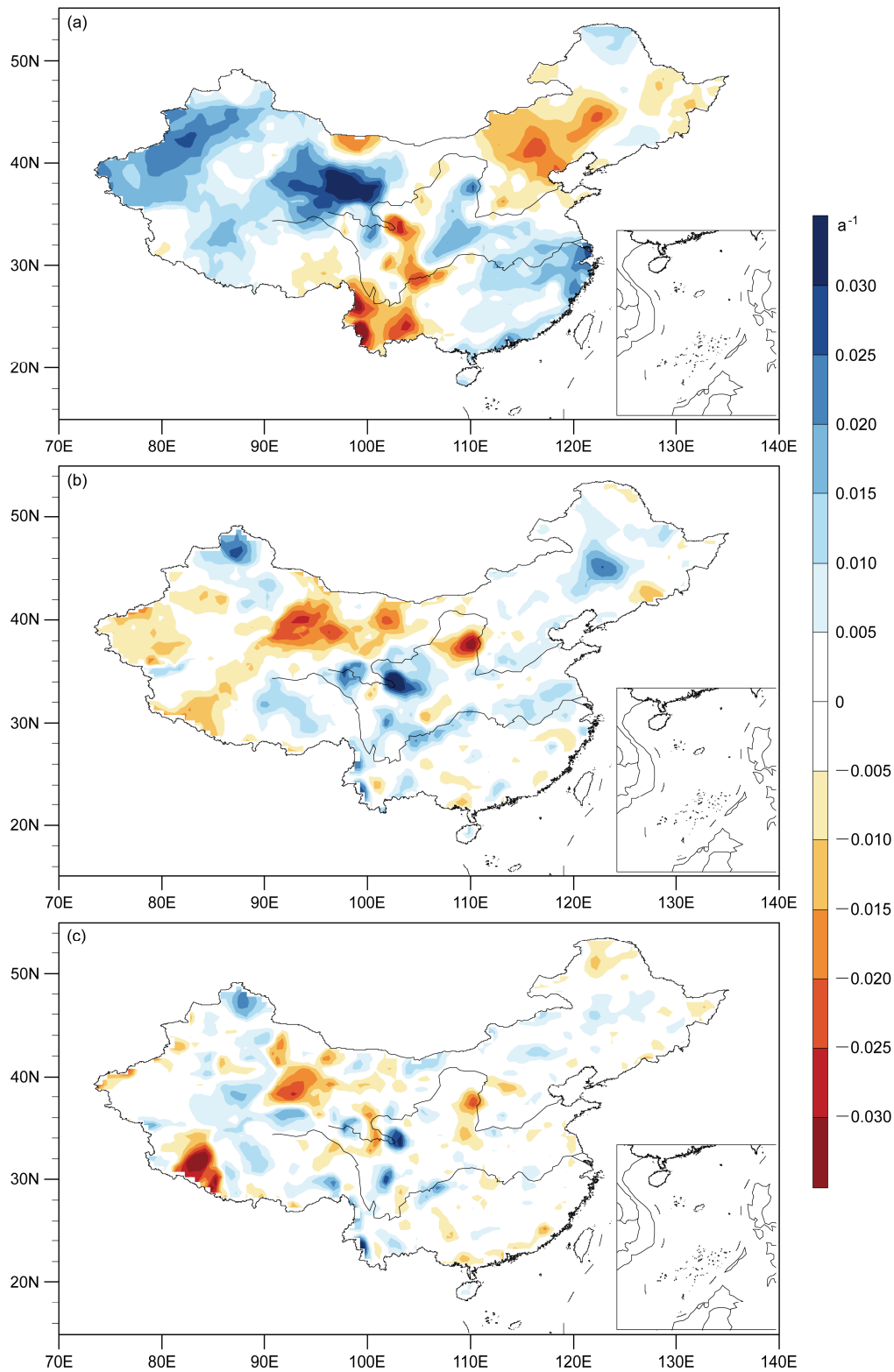


图 7 1961~2013 年 (时间尺度为 3 月) (a) CN05.1 月平均降水计算的 SPI 的线性趋势分布以及 (b) CRU 计算的 SPI 线性趋势、(c) GPCC 计算的 SPI 线性趋势分别与 CN05.1 的计算的 SPI 线性趋势的偏差的空间分布

Fig. 7 (a) Linear trends of SPI (Standardized Precipitation Index) at 3-month time scale in China from 1961 to 2013 based on CN05.1 data, and differences in the SPI trends between (b) CRU and CN05.1 data, (c) GPCC and CN05.1 data

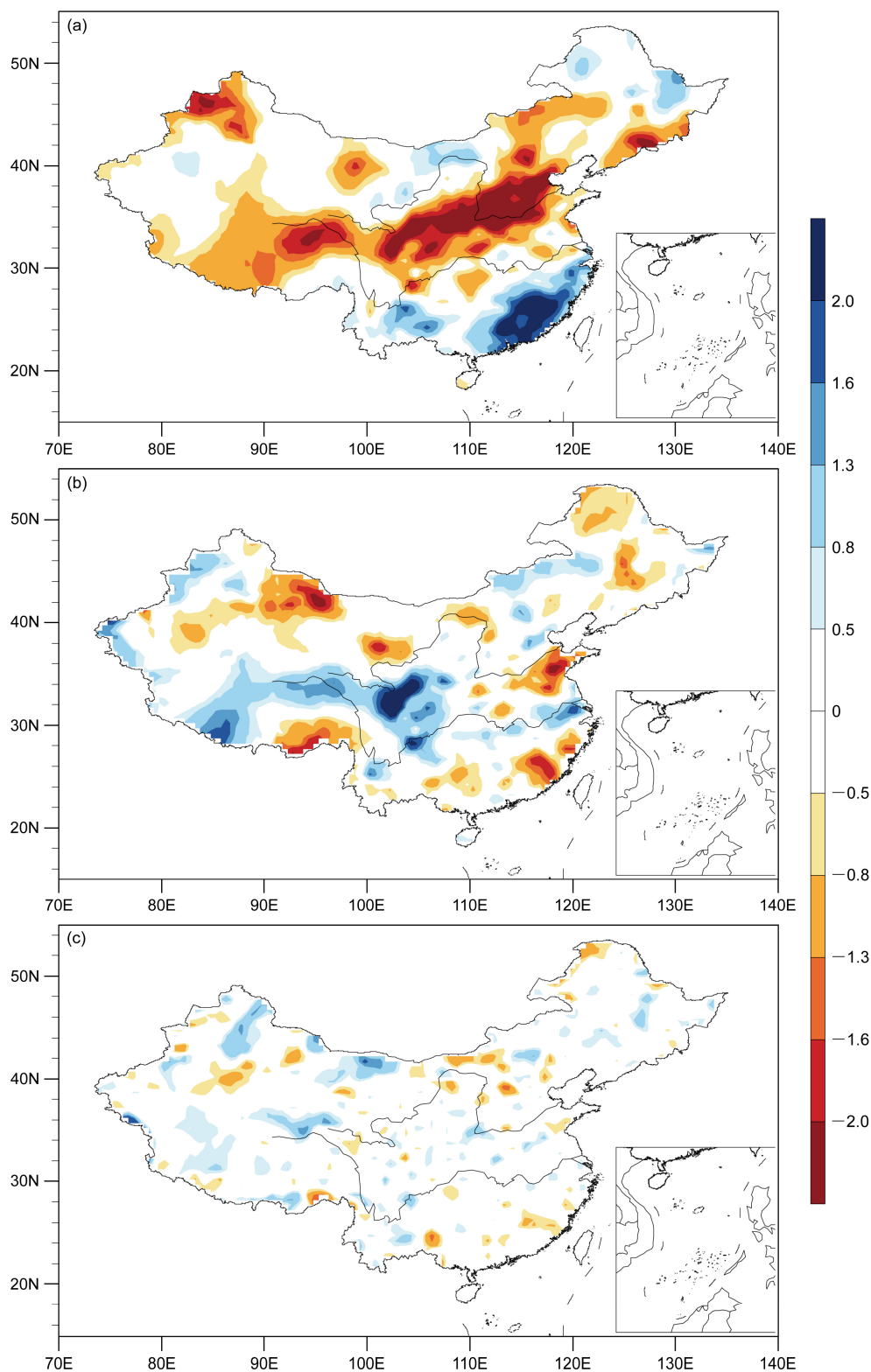


图8 1997年8月(时间尺度为3月)(a) CN05.1 月平均降水计算的标准降水指数 SPI 以及 (b) CRU 计算的 SPI、(c) GPCC 计算的 SPI 与 CN05.1 的月平均降水计算的 SPI 的偏差的空间分布

Fig. 8 (a) SPI (3-month time scale) based on CN05.1 data, and the differences of CPI (b) between CN05.1 and CRU data and (c) between CN05.1 and GPCC data in August 1997

各区域的降水情况。

(2) 1901~1961 年, 通过与 65 个长期气象观测站点的降水资料时间序列比较发现, CRU 在西北、东北一带的干旱区和西南一带的多山地区与实际降水量间的差异较大(降水标准差与实际的降水标准差相比偏小, 不能表现出当地降水的时间变化特征, 且与实际降水的相关系数也偏小); GPCC 在各站点的降水标准差普遍与实际更接近、相关系数也更大, 能较好地反映出区域内降水的实际变化特点; 100°E 以东的长江中下游、东南一带, GPCC 与 CRU 降水估计的能力相当, 都能较好地与该区域内各站点的观测降水量相匹配, 其中 GPCC 随时间的变化振幅更接近实测。

(3) 利用 1961~2013 年两套降水资料和站点实测资料分别计算中国大陆地区的 SPI, 通过与实际干旱变化情况的比较简单分析 CRU 与 GPCC 在中国大陆地区对气候变化研究的适用性, 发现检验资料与参考资料的 SPI 趋势相差较大的地区主要在西北、四川盆地。其中 GPCC 对干旱的描述比 CRU 更为接近观测值, CRU 对干旱变化趋势的估计较差, 并且没能反映出 1997 年夏季中国地区出现的严重干旱情况, 而 GPCC 较准确地表现出了这一干旱事件。

综上, 本文认为 GPCC 相比于 CRU 能更好地表征中国大陆地区整体和区域的降水变化特征, 在对中国大陆地区长时期降水资料的选择上, GPCC 降水数据产品较为可靠。但由于参考资料的局限性, 本文建议在青藏高原地区的对于 GPCC 应用应注意其不确定性。

致谢 感谢高学杰研究员提供的 CN05.1 观测数据, 同时感谢两位审稿人对于文章提出的宝贵意见和建议。

参考文献 (References)

- 白虎志, 谢金南, 王宝灵, 等. 1999. 1997 年甘肃省特大干旱事件的诊断分析 [J]. 高原气象, 18 (1): 55–62. Bai Zhihu, Xie Jinnan, Wang Baoling, et al. 1999. Diagnosis analysis of serious drought event of 1997 in Gansu [J]. Plateau Meteorology, 18 (1): 55–62, doi: 10.3321/j.issn: 1000-0534.1999.01.007.
- Becker A, Finger P, Meyer-Christoffer A, et al. 2013. 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 System Science Data Discussions, 5 (2): 921–998, doi: 10.5194/essdd-5-921-2012.
- 蔡榕硕, 谭红建, 黄荣辉. 2012. 中国东部夏季降水年际变化与东中国海及邻近海域海温异常的关系 [J]. 大气科学, 36 (1): 35–46. Cai Rongshuo, Tan Hongjian, Huang Ronghui. 2012. The relationship between interannual variations of summer precipitation in eastern China and the SST anomalies in the East China Sea and its adjacent seas [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 36 (1): 35–46, doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.2012.01.04.
- 高荣, 董文杰, 韦志刚. 2008. 西北干旱区感热异常对中国夏季降水影响的模拟 [J]. 高原气象, 27 (2): 320–324. Gao Rong, Dong Wenjie, Wei Zhigang. 2008. Numerical simulation of the impact of abnormality of sensible heat flux in northwest arid zone on precipitation in China [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 27 (2): 320–324.
- 韩振宇, 周天军. 2012. APHRODITE 高分辨率逐日降水资料在中国大陆地区的适用性 [J]. 大气科学, 36 (2): 361–373. Han Zhenyu, Zhou Tianjun. 2012. Assessing the quality of APHRODITE high-resolution daily precipitation dataset over contiguous China [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 36 (2): 361–373, doi: 10.3878/j.issn. 1006-9895.2011.11043.
- Harris I, Jones P D, Osborn T J, et al. 2014. Updated high-resolution grids of monthly climatic observations-the CRU TS3.10 dataset [J]. International Journal of Climatology, 34 (3): 623–642, doi: 10.1002/joc.3711.
- IPCC. 2013. Climate Change 2013: The Scientific Basis [M]. Stocker T F, Qin D, Plattner G-K, et al., Eds. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press, 44.
- 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.
- 姜贵祥, 孙旭光. 2016. 格点降水资料在中国东部夏季降水变率研究中的适用性 [J]. 气象科学, 36 (4): 448–456. Jiang Guixiang, Sun Xuguang. 2016. Application of grid precipitation datasets in summer precipitation variability over East China [J]. Journal of the Meteorological Sciences (in Chinese), 36 (4): 448–456, doi: 10.3969/2015jms.0021.
- Kaiser D P. 1991. Two Long-Term Instrumental Climatic Data bases of the People's Republic of China [J]. Environmental Policy Collection, doi: 10.3334/CDIAC/cli.ndp039.
- 李聪, 肖子牛, 张晓玲. 2012. 近 60 年中国不同区域降水的气候变化特征 [J]. 气象, 38 (4): 419–424. Li Cong, Xiao Ziniu, Zhang Xiaoling. 2012. Climatic characteristics of precipitation in various regions of China for the past 60 years [J]. Meteorological Monthly, 38 (4): 419–424, doi: 10.7519/j.issn.1000-0526.2012.4.005.
- 李崇银, 朱锦红, 孙照渤. 2002. 年代际气候变化研究 [J]. 气候与环境研究, 7 (2): 209–219. Li Congyin, Zhu Jinhong, Sun Zhaobo. 2002. The study interdecadal climate variation [J]. Climatic and Environmental Research, 7 (2): 209–219, doi: 10.3969/j.issn.1006-9585.2002.02.008.
- 吕俊梅, 据建华, 江剑民. 2009. 近一百年中国东部区域降水的年代际跃变 [J]. 大气科学, 33 (3): 524–536. Lü Junmei, Ju Jianhua, Jiang Jianmin. 2009. Interdecadal regime shifts of regional precipitation over eastern China during the last 100 years [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 33 (3): 524–536, doi: 10.3878/j.issn.

- 1006-9895.2009.03.10.
- 吕俊梅, 祝从文, 琚建华, 等. 2014. 近百年中国东部夏季降水年代际变化特征及其原因 [J]. 大气科学, 38 (4): 782–794. Lü Junmei, Zhu Congwen, Ju Jianhua, et al. 2014. Interdecadal variability in summer precipitation over East China during the past 100 years and its possible causes [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 38 (4): 782–794, doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.1401.13227.
- 吕少宁, 文军, 刘蓉. 2011. 中国大陆地区不同降水资料的适用性及其应用潜力 [J]. 高原气象, 30 (3): 628–640. Lü Shaoning, Wen Jun, Liu Rong. 2011. Applicability and potential of the different precipitation data in mainland China [J]. Plateau Meteorology, 30 (3): 628–640.
- 马柱国. 2007. 华北干旱化趋势及转折性变化与太平洋年代际振荡的关系 [J]. 科学通报, 52 (10): 1199–1206. Ma Zhuguo. 2007. The interdecadal trend and shift of dry/wet over the central part of North China and their relationship to the Pacific Decadal Oscillation (PDO) [J]. Chinese Science Bulletin, 52 (15): 2130–2139, doi: 10.3321/j.issn:0023-074X.2007.10.018.
- Ma L J, Zhang T J, Frauenfeld O W, et al. 2009. Evaluation of precipitation from the ERA-40, NCEP-1, and NCEP-2 reanalyses and CMAP-1, CMAP-2, and GPCP-2 with ground-based measurements in China [J]. J. Geophys. Res., 114 (D9): D09105, doi: 10.1029/2008JD011178.
- Ma S M, Zhou T J, Dai A G, et al. 2015. Observed changes in the distributions of daily precipitation frequency and amount over China from 1960 to 2013 [J]. J. Climate, 28: 6960–6978, doi: 10.1175/JCLI-D-15-0011.1.
- McKee T B, Doesken N J, Kleist J. 1995. Drought monitoring with multiple time scales [C]//Proceedings of the Ninth Conference on Applied Climatology. Dallas TX: American Meteorological Society, 233–236.
- New M, Hulme M, Jones P. 2000. Representing twentieth-century space-time climate variability. Part II: Development of 1901–96 monthly grids of terrestrial surface climate [J]. J. Climate, 13: 2217–2238, doi: 10.1175/1520-0442(2000)013<2217:RTCSTC>2.0.CO;2.
- 施雅风, 沈永平, 胡汝骥. 2002. 西北气候由暖干向暖湿转型的信号、影响和前景初步探讨 [J]. 冰川冻土, 24 (3): 219–226. Shi Yafeng, Shen Yongping, Hu Ruji. 2002. Preliminary study on signal, impact and foreground of climatic shift from warm-dry to warm-humid in Northwest China [J]. Journal of Glaciology and Geocryology (in Chinese), 24 (3): 219–226, doi: 10.3969/j.issn.1000-0240.2002.03.001.
- 施雅风, 沈永平, 李栋梁, 等. 2003. 中国西北气候由暖干向暖湿转型的特征和趋势探讨 [J]. 第四纪研究, 23 (2): 152–164. Shi Yafeng, Shen Yongping, Li Dongliang, et al. 2003. Discussion on the present climate change from warm-dry to warm-wet in Northwest China [J]. Quaternary Sciences (in Chinese), 23 (2): 152–164, doi: 10.3321/j.issn:1001-7410.2003.02.005.
- Schneider U, Becker A, Finger P, et al. 2014. GPCC's new land surface precipitation climatology based on quality-controlled in situ data and its role in quantifying the global water cycle [J]. Theor. Appl. Climatol., 115: 15–40, doi: 10.1007/s00704-013-0860-x.
- Sun Q H, Miao C Y, Duan Q Y, et al. 2014. Would the 'real' observed dataset stand up? A critical examination of eight observed gridded climate datasets for China [J]. Environmental Research Letters, 9(1): 015001, doi: 10.1088/1748-9326/9/1/015001.
- Taylor K E. 2001. Summarizing multiple aspects of model performance in a single diagram [J]. J. Geophys. Res., 106 (D7): 7183–7192, doi: 10.1029/2000JD900719.
- Trenberth K E, Dai A G, Rasmussen R M, et al. 2003. The changing character of precipitation [J]. Bulle. Amer. Meteor. Soc., 84: 1205–1217, doi: 10.1175/BAMS-84-9-1205.
- Trenberth K E, Dai A G, Van Der Schrier G, et al. 2014. Global warming and changes in drought [J]. Nature Climate Change, 4: 17–22, doi: 10.1038/nclimate2067.
- 王芬, 曹杰, 李腹广, 等. 2013. 多套格点降水资料在云南及周边地区的对比 [J]. 应用气象学报, 24 (4): 472–483. Wang Fen, Cao Jie, Li Fuguang, et al. 2013. Datasets and rain gauge precipitation over Yunnan and the surrounding areas [J]. Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese), 24 (4): 472–483, doi: 10.3969/j.issn.1001-7313.2013.04.010.
- 王英, 曹明奎, 陶波, 等. 2006. 全球气候变化背景下中国降水量空间格局的变化特征 [J]. 地理研究, 25 (6): 1031–1040. Wang Ying, Cao Mingkui, Tao Bo, et al. 2006. The characteristics of spatio-temporal patterns in precipitation in China under the background of global climate change [J]. Geographical Research (in Chinese), 25 (6): 1031–1040, doi: 10.3321/j.issn:1000-0585.2006.06.010.
- 王绍武, 龚道溢, 叶瑾琳, 等. 2000. 1880 年以来中国东部四季降水量序列及其变率 [J]. 地理学报, 55 (3): 281–293. Wang Shaowu, Gong Daoyi, Ye Jinlin, et al. 2000. Seasonal precipitation series of eastern China since 1880 and the variability [J]. Acta Geographica Sinica (in Chinese), 55 (3): 281–293, doi: 10.3321/j.issn:0375-5444.2000.03.004.
- 吴福婷, 符淙斌. 2013. 全球变暖背景下不同空间尺度降水谱的变化 [J]. 科学通报, 58 (8): 664–673. Wu Futing, Fu Congbin. 2013. Change of precipitation intensity spectra at different spatial scales under warming conditions [J]. Chinese Science Bulletin (in Chinese), 58 (12): 1385–1394, doi: 10.1007/s11434-013-5699-0.
- 吴佳, 高学杰. 2013. 一套格点化的中国区域逐日观测资料及与其它资料的对比 [J]. 地球物理学报, 56 (4): 1102–1111. Wu Jia, Gao Xuejie. 2013. A gridded daily observation dataset over China region and comparison with the other datasets [J]. Chinese Journal of Geophysics (in Chinese), 56 (4): 1102–1111, doi: 10.6038/cjg20130406.
- 吴炯, 黄伟, 陈发虎. 2014. 1951–2012 年中国大陆 $0.025^{\circ} \times 0.025^{\circ}$ 高分辨率月气温和降水量格点数据集的建立及其初步应用 [J]. 兰州大学学报 (自然科学版), 50 (2): 213–220. Wu Xian, Huang Wei, Chen Fahu. 2014. Construction and application of monthly air temperature and precipitation gridded datasets with high resolution ($0.025^{\circ} \times 0.025^{\circ}$) over China during 1951–2012 [J]. Journal of Lanzhou University (Natural Sciences), 50 (2): 213–220.
- Wang H J. 2001. The weakening of the Asian monsoon circulation after the end of 1970's [J]. Advances in Atmospheric Sciences, 18: 376–386, doi: 10.1007/BF02919316.
- 叶柏生, 李翀, 杨大庆, 等. 2004. 我国过去 50 a 来降水变化趋势及其对水资源的影 (I): 年系列 [J]. 冰川冻土, 26 (5): 587–594. Ye Baisheng, Li Chong, Yang Daqing, et al. 2004. Variation trend of precipitation and its impact on water resources in China during last 50 Years (I): annual variation [J]. Journal of Glaciology and Geocryology (in Chinese), 26 (5): 587–594, doi: 10.3969/j.issn.1000-0240.2004.05.013.
- 虞海燕, 刘树华, 赵娜, 等. 2011. 1951–2009 年中国不同区域气温和降

- 水量变化特征 [J]. 气象与环境学报, 27 (4): 1–11. Yu Haiyan, Liu Shuhua, Zhao Na, et al. 2011. Characteristics of air temperature and precipitation in different regions of China from 1951 to 2009 [J]. Journal of Meteorology and Environment (in Chinese), 27 (4): 1–11, doi: 10.3969/j.issn.1673-503X.2011.04.001.
- Yatagai A, Arakawa O, Kamiguchi K, et al. 2009. A 44-year daily gridded precipitation dataset for Asia based on a dense network of rain gauges[J]. SOLA, 5 (1): 137–140, doi: 10.2151/sola.2009-035.
- 赵从兰, 刘厚赞, 谭志华. 1998. 1997 年夏季华北特大干旱及其成因 [J]. 大气科学学报, 21 (3): 440–445. Zhao Conglan, Liu Houzan, Tan Zhihua. 1998. Exceptional summer drought in northern china in 1997 and its contributing factors [J]. Transactions of Atmospheric Sciences, 21 (3): 440–445.
- 张杰, 李栋梁, 王文. 2008. 夏季风期间青藏高原地形对降水的影响 [J]. 地理科学, 28 (2): 235–240. Zhang Jie, Li Dongliang, Wang Wen. 2008. Influence of terrain on precipitation in Qinghai–Tibet Plateau during summer monsoon [J]. Scientia Geographica Sinica (in Chinese), 28 (2): 235–240, doi: 10.3969/j.issn.1000-0690.2008.02.019.
- 卓嘎, 徐祥德, 陈联寿. 2002. 青藏高原夏季降水的水汽分布特征 [J]. 气象科学, 22 (1): 1–8. Zhuo Ga, Xu Xiangde, Chen Lianshou. 2002. Water feature of summer precipitation on Tibetan Plateau [J]. Scientia Meteorologica Sinica, 22 (1): 1–8, doi: 10.3969/j.issn.1009-0827.2002. 01.001.
- Zhou B T, Xu Y, Wu J, et al. 2016. Changes in temperature and precipitation extreme indices over China: Analysis of a high-resolution grid dataset [J]. International Journal of Climatology, 36: 1051–1066, doi: 10.1002/joc.4400.