

全球地面降水月值历史数据集研制^{*1}

杨 溯 徐文慧 许 艳 李庆祥
YANG Su Xu Wenhui Xu Yan Li Qingxiang

国家气象信息中心,北京,100081

National Meteorological Information Center, Beijing 100081, China

2015-06-05 收稿,2016-01-11 改回.

杨溯,徐文慧,许艳,李庆祥. 2016. 全球地面降水月值历史数据集研制. 气象学报, 74(2):259-270

Yang Su, Xu Wenhui, Xu Yan, Li Qixiang. 2016. Development of a global historic monthly mean precipitation dataset. *Acta Meteorologica Sinica*, 74(2):259-270

Abstract Global historic precipitation dataset is the base for climate and water cycle research. There have been several global historic land surface precipitation datasets developed by international data centers such as NCDC (National Climatic Data Center), ECA&D (European Climate Assessment & Dataset) project team, and Met Office etc., but so far there are no such datasets developed by any research institute in China. In addition, each dataset has its own focus of study region, and the existing global precipitation datasets only contain sparse observational stations over China, which may result in uncertainties in East Asian precipitation studies. In order to take into account comprehensive historic information, users might need to employ two or more datasets. However, the non-uniform data formats, data units, station ids and so on add extra difficulties for users to exploit these datasets. For this reason, a complete historic precipitation dataset that takes advantages of various datasets has been developed and produced in the National Meteorological Information Center (NMIC) of China. Precipitation observations from 12 sources are aggregated, and the data formats, data units, station ids are uniformed. Duplicated stations with the same identifications are identified with duplicated observations removed. Consistency test, correlation coefficient test, significance t -test at the 95% confidence level, and significance F -test at the 95% confidence level are conducted first to ensure the data reliability. Only those datasets that satisfy all the above four criteria are integrated to produce the China Meteorological Administration (CMA) Global Precipitation (CGP) historic precipitation dataset version 1.0. It contains observations at 31 thousand stations with 1.87×10^7 data records, among which 4152 time series of precipitation are longer than 100 a. This dataset plays a critical role in climate research due to its advantages in large data volume and high station network density compared to other datasets. Using PMT (Penalized Maximal t -test) method, significant Inhomogeneity has been detected in historic precipitation datasets at 340 stations. The ratio method is then applied to effectively remove these remarkable change points. Global precipitation analysis based on CGP v1.0 shows that rainfall has been increasing during the period of 1901 to 2013 with an increasing rate 3.52 ± 0.5 mm/(10 a), slightly higher than that in the NCDC data. Analysis also reveals distinguished long-term changing trends at different latitude zones.

Key words Global Precipitation, Observation, historic data

摘 要 全球降水历史数据是开展气候、水循环等研究的基础。收集整理全球 12 个数据源降水历史月值资料,通过站号、站名甄别不同数据源中相同台站,对 344 个通过相关系数、一致率、均值 t 检验、方差 F 检验的台站多源资料进行拼接,尽可能多地融合各套数据产品优势,最终形成全球降水历史月值数据集(CMA Global Precipitation V1.0, CGP)。数据集重点解决当前

* 资助课题:公益性行业气象科研专项(GYHY201206012、GYHY201406016)、中国气象局气候变化专项(CCSF201338)。

作者简介:杨溯,主要从事历史资料处理和气候变化研究。E-mail: yangsu@cma.gov.cn

通信作者:李庆祥,主要从事气象数据和气候变化研究。E-mail: liqx@cma.gov.cn

国际数据产品在东亚地区站点稀少、同时应用多套数据应用门槛较高等问题。数据集收录 3.1 万个台站共计 1.87×10^7 组月降水记录, 4152 个台站序列长度达百年。与美国大气海洋局(NOAA)的全球降水数据集(GHCN-M V2.0)对比,CGP 新增 1 万个站点、 0.5×10^7 组有效观测记录和 1030 条百年序列,其中 141 条百年序列通过多源整合技术获取。CGP 的站点和数据量优势主要体现在东亚、东欧、西伯利亚等站点稀疏地区。基于 CGP 分析的全球降水时空特征与国际同类产品的结果较一致。新增的数据虽然没有改变全球降水分布的总体特征,但对区域性的百年降水变化检测有一定影响。基于 CGP 的全球降水百年序列结果显示,20 世纪前半叶全球降水量偏小,近 20 年是 1900 年以来全球降水量最大的时期,各纬度带、各个国家或地区的降水长期变化趋势呈现显著的差异。

关键词 全球, 降水, 台站历史数据

中图法分类号 P468.0+24

1 引言

降水量是描述气候变化、水循环、大气环流研究的最重要物理量之一(IPCC, 2013; 丁一汇, 2010; 秦大河等, 2007; 翟盘茂等, 2007)。雨量计是应用最广泛、历史最悠久的降水量观测手段,是卫星、雷达遥感等新一代降水产品最重要的输入和验证对象,在多元降水融合技术开发、卫星遥感定标、气候模式评估等领域的作用无可替代(Ropelewski, et al, 1984; Hulme, 1991, 1992; Rudolf, 1993; Schneider, 1993; Xie, et al, 1997; Janowiak, et al, 1998; Kummerow, et al, 1998; Adler, et al, 2003; Zhou, et al, 2014; 宇婧婧等, 2015)。

国际上一些研究机构投入了大量研究力量,已经研制了较为成熟的全球或区域降水数据产品,最长序列超过 200 a(Peterson, et al, 1997; Tank, et al, 2002; Auer, et al, 2007),100 a 尺度的降水序列已为 IPCC 等(IPCC, 2013)所介绍(Vose, et al, 1992; Mitchell, et al, 2005; Smith, et al, 2012; Becker, et al, 2013)。美国国家气候数据中心(NC-DC)研发的全球历史气候数据集(Global Historical Climatology Network-Monthly, GHCN-M v2.0, 以下简称为 GHCN)(Peterson, et al, 1997)是目前收录站点数量最多、时空范围覆盖最广的全球降水数据产品,被广泛应用于气候变化及全球水循环研究领域。欧洲气候评估数据产品(European Climate Assessment & Dataset, ECA)(Tank, et al, 2002)收录了欧洲地区 10211 个台站,是欧洲台站数最多的数据产品。高寒地区地面气候序列(Historical Instrumental Climatological Surface Time Series of the Greater Alpine Region, HISTALP)(Auer, et al, 2005, 2007)收录了欧洲高海拔地区的历史资料,尽管其台站数量少于 GHCN 和 ECA,但其数据

完整性(缺测率小于 5%)和百年尺度序列是其他数据集无法比拟的。

虽然由于降水的时空不均匀性,长年代降水站点数量又非常稀少,百年尺度的降水研究存在一定的难度,中国专家仍然通过研究取得了一些成果(屠其璞, 1987; 翟盘茂等, 1999, 2005; 李庆祥等, 2002a; 陈隆勋等, 2004),但中国对于全球降水的分析研究,则主要是依赖于国际上的数据产品(李庆祥等, 2002b; 施能等, 2004; 施晓晖等, 2008)。随着中国对全球气候监测和诊断研究及业务工作的不断深入,对全球降水资料的需求日益迫切。而已有的全球降水资料在研究及业务应用中存在诸多问题:(1)在中国及亚洲区域资料稀少,导致东亚季风关键区域降水信息不完整;(2)更新速度较为滞后,给业务应用带来了极大的不便;(3)缺乏高质量的全球降水数据产品,导致长期降水变化事实监测检测研究中缺乏自主性,在相关领域无法发出权威声音。因此,非常有必要发展一套中国自主研发的全球降水数据产品,以服务天气气候及其相关领域科研和业务不断增长的数据需求。

本研究在目前全球多个来源降水数据集的基础上,经过系统整合、质量控制、订正和再加工,建立一套站点数量尽可能多,质量尽可能高,时效性尽可能强的全球降水历史数据产品,为大气科学、地球科学领域研究、业务和服务工作提供数据支撑。

2 数据集研制

2.1 数据源

表 1 为收集的全球降水数据集,共有 12 个数据源。

GHCN 降水(Peterson, et al, 1997)共收录 20590 个台站数据,最早台站降水量观测始于 1697 年。所有数据经过源数据检验、极值检验、时间与空

间一致性以及和季节变化检验四个方面质量控制。

HISTALP(Auer, et al, 2007)收录了 162 个高寒地区(43°—49°N, 4°—19°E, 0—3500 m)月气温、气压、降水量数据,最早的资料始于 19 世纪 80 年代,所有数据均经过质量控制、均一性检验和订正。

ECA (Tank, et al, 2002)融合了欧洲地区 62 个国家 10211 个台站资料。目前发布 7361 个站点

的资料,最早降水数据始于 1781 年,所有数据均经过质量控制和均一性检验。

USHCN(U. S. Historical Climatology Network)(Menne, et al, 2009; Quinlan, et al, 1987)包含 1221 个美国本土站及 46 个阿拉斯加站。最早观测记录始于 1799 年,资料经过内部一致性、重复值检验、空间一致性和气候阈值检验。

表 1 降水历史数据源
Table 1 CGP data sources list

序号	降水数据	数据来源	站点范围/数量	时间范围	质量控制	均一化
1	GHCN-M	数据共享	全球/20590 站	1697—2014 年	是	否
2	USHCN	数据共享	美国/1218 站	1799—2013 年	是	否
3	HISTALP	数据共享	欧洲高寒地区/163 站	1800—2013 年	是	是
4	ECA	数据共享	欧洲/7360 站	1781—2013 年	是	否
5	俄罗斯	数据共享	俄罗斯/519 站	1966—2013 年	是	否
6	CPC	双边交换	全球/14027 站	1977—2006 年	是	否
7	日本	数据共享	日本/157 站	1873—2014 年	是	否
8	澳大利亚	数据共享	澳大利亚/307 站	1863—2010 年	是	否
9	韩国	双边交换	韩国/地面站 76 个 自动站 650 个	1904—2007 年	是	否
10	加拿大	双边交换	加拿大/463 站	1840—2013 年	是	否
11	越南	双边交换	越南/44 站	1961—2011 年	是	否
12	中国	中国气象局	基准基本站 825 个	1900—2014 年	是	是

此外,中国、日本、加拿大、澳大利亚、俄罗斯等多个国家气象部门也发布了高质量的降水数据产品。这些国家数据集在区域范围内的站点密度、序列长度、数据完整性以及数据质量方面往往优于上述数据产品。但文中用到的资料中仅 HISTALP 与中国降水资料进行了均一化(杨溯等, 2014)。

2.2 多源数据整合

2.2.1 重复站甄别

首先进行台站信息整理,根据台站信息完整性排序,建立初步检索表。筛选具有 WMO 站号的台站进行查重,由此得到过渡检索表。对其进行站名遍历查重,与待检站周围 1°内,对站名分子段逐一比对,记录相同字段数量,相同字段数量最多的站判定为相同站,最终得到最终站表。

2.2.2 数据源优先级原则

气象台站不可避免存在仪器换型、观测环境等变化,这些记录仅保存在本国(区域)气象部门,它们是开展历史资料质量控制和均一性诊断最重要的依据。从历史沿革分析,将全球、区域、国家数据机构发布的数据质量依次排序(由低到高)。同时兼顾资

料的完整性和时间长度,当数据量存在明显优势时,选取数据量更大的数据源(数据量差异大于 30 月)。

2.2.3 多源数据对比融合

类似于 ECA,对一致程度高的不同数据源进行融合。为保证判断结果可靠,设置一致率、相关系数、95%显著性均值 t 检验、95%显著性方差 F 检验 4 步综合判断,仅对满足上述 4 个条件的数据源进行融合,融合遵循基础数据源筛选原则。对融合后的降水序列进行断点检验,以消除不当融合的几率。

(1) 一致率检验

一致率 P 定义为

$$\delta_j = |R_j^a - R_j^b| \quad (1)$$

$$\epsilon_j = \min\left(\frac{\delta_j}{R_j^a}, \frac{\delta_j}{R_j^b}\right) \quad (2)$$

$$f_{lag_j} = \begin{cases} 1, \delta_j \leq 1 \text{ mm 或 } \epsilon_j \leq 15\% \\ 0, \delta_j > 1 \text{ mm 且 } \epsilon_j > 15\% \end{cases} \quad (3)$$

$$P = \frac{\sum_{j=1}^n f_{lag_j}}{n} \quad (4)$$

式中,上标 a、b 分别代表来自两个数据源的降水资料,下标 j 代表第 j 个月, δ_j 为绝对误差, ϵ_j 为最小

相对误差。当 $\epsilon_j \leq 15\%$ 或 $\delta_j \leq 1 \text{ mm}$ 时,认为两组数据一致, f_{lag_j} 赋值为 1, 统计数据重合时期 f_{lag_j} 为 1 的百分比即为一致率。当一致率大于 85%, 通过检验。

(2) 相关系数检验

年降水量相关系数用于对比两组资料的年际变化趋势是否一致, 当相关系数大于 0.7, 通过检验。

(3) 均值 t 检验

95% 显著性检验判定两组资料均值不存在显著差异, 通过本步检验。在 t 检验前采用立方根的方法对降水量进行了正态化转换。

(4) 方差 F 检验

95% 显著性检验判定两组资料方差不存在显著差异, 通过检验。

(5) 融合序列断点检验

记录融合的时间点为可疑断点, 采用 PMT (Pe-

nalized maximal t) 检验 (Wang, et al, 2007)。当检验结果显示, 融合前后序列均值存在显著差异, 且邻近站无此特征, 则认为融合不可信。最终有 268 个站可融合, 其中 25 个采用 3 个数据源进行融合, 其余使用 2 个数据源进行融合。

以 ABISKO 站为例, 该站有 GHCN 和 ECA 两个数据源 (图 1)。GHCN 与 ECA 分别自 1913 和 1961 年有降水记录, 至 2001 和 2011 年终止, 序列长达 89 和 51 a, 且有 41 a 重合记录。计算两者相关系数和一致率分别为 0.998 和 0.97, 并通过 95% 的 t 检验和 F 检验, 表明该站在两个数据源的数据可以进行融合。

根据优先级, 以 GHCN 为基础数据源, ECA 作为补充, 最终获得 ABISKO 站 1913—2011 年降水资料, 时间序列长度 99 a, 其中, 1913—2001 年数据源自 GHCN, 2001—2011 年数据源自 ECA。

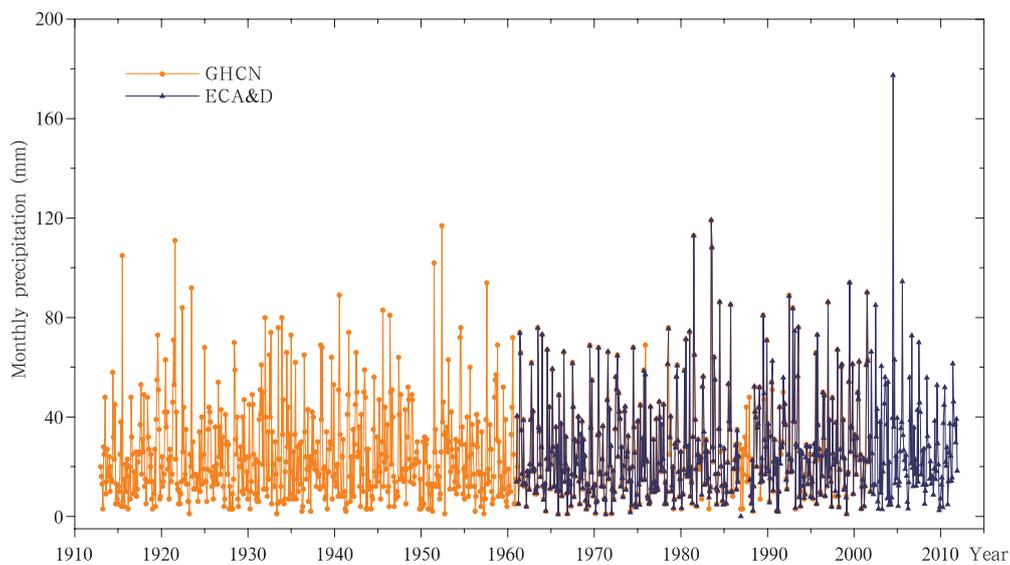


图 1 ABISKO 站降水月序列拼接

Fig. 1 Integrated time series of monthly precipitation at ABISKO

2.3 数据质量评估与保障

2.3.1 质量控制

类似于 GHCN, 对整合后数据集进行两步质量控制。

(1) 气候异常值检验。各站点历年月降水量 (立方根) 超过 3 倍标准差的认为是可能异常值, 共计 11 万条记录未通过检验;

(2) 空间一致性检验。其检验的标准为

$$|Z_i - \overline{Z_{ij}}| > 5\sigma_{ij} \quad (5)$$

式中, Z_i 为目标站经立方根预处理后的标准化降水量, Z_{ij} 为目标站 500 km 内邻近站 (最多 20 个) 的标准化降水量, $\overline{Z_{ij}}$ 为邻近站标准化降水量的平均, σ_{ij} 为邻近站标准化降水量的标准差。结果显示有 3.6 万条记录异常, 占总数据量的 0.19%。

2.3.2 非均一性问题处理

通过数学检验、专家诊断的主、客观两方面检验

和处理,检验对象为 1.88 万个时间序列大于 30 a 的台站。首先计算台站间年值序列(取立方根)相关系数,选出待检站周围 300 km 半径内相关系数大于 0.7 的邻近站,挑选时间序列重合期最大 3 个用于构建参考序列。当周围邻近站不满足上述条件,逐步放宽筛选标准直至 500 km。采用相关系数权重平均算法(WAA)(李庆祥, 2011),其计算式为

$$\bar{y}_j = \frac{\sum_{i=1}^n \rho_{i,j}^2 y_{i,j}}{\sum_{i=1}^n \rho_{i,j}^2} \quad (6)$$

式中,下标 i, j 分别代表第 i 个邻近站和第 j 年, n 为邻近站个数, ρ 为年降水量相关系数, y 为邻近站降水量, \bar{y} 为参考序列降水量。

均一性检验选用 PMT 方法(Wang, et al,

2007),断点置信度设为 95%,保留统计意义显著且与邻近站对比异常的结果。最终确认 272 个台站降水时间序列存在显著非均一问题,共计 323 个断点。图 2 为 2 个存在显著非均一问题的台站个例,黑色曲线为年降水量时间序列。图 2a 为 Nenastnaja 站,数据源于 ECA。1955 年前该站年平均降水量为 760 mm,1955 年后降水量增大 1 倍,为 1589 mm,曲线在 1955 年有异常“跳跃”,周围邻近站无此特征,且统计结果显著,可以判定该站降水气候序列不均一。图 2b 为 Morehead City 2 WNW 站,数据源自 USHCN。该站 1949—1965 年降水量异常低,仅为历史平均降水量(1305 mm)的 69.5%,持续时间超过 15 a。根据统计结果和邻近站对比,可以判定该站在 1949—1965 年存在非均一性问题。

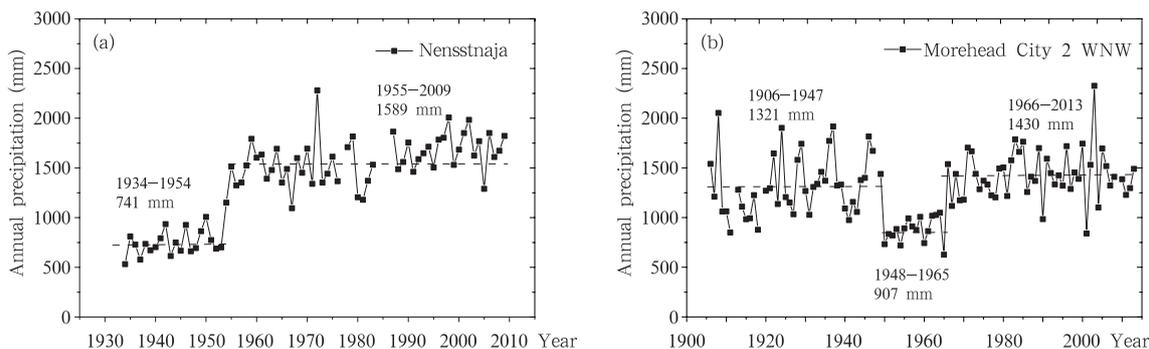


图 2 非均一年降水序列个例(a. Nenastnaja 站, b. Morehead City 2 WNW 站)
Fig. 2 Time series of inhomogeneous annual precipitation series at two stations
(a. Nenastnaja station, b. Morehead City 2 WNW station)

3 数据集概况

通过台站数年际变化、空间分布等方面与 GH-CN 的对比,评估本数据集(CMA Global Precipitation V1.0,CGP)的基本情况。

3.1 台站空间分布

图 3 为 CGP 与 GH-CN 降水历史数据集站点空间分布。至 2014 年 7 月,CGP 数据集收录了 31446 条台站月降水历史序列,数据量大于 50 a 的站点数达到 13471 个,不少于 70 和 100 a 的站点数为 7112 和 4152 个。同期 GH-CN 数据集收录 20590 条台站月降水历史序列,数据量大于 50 a 的台站有 8939 个,其中,不少于 70 和 100 a 的站点数分别为 5438 和 3129 个。CGP 数据集在站点数量、长时间序列

数量上有一定优势。空间分布上,CGP 在中国、欧洲、东北亚地区的站点密度、序列长度较 GH-CN 有大幅度提升,南美南部新加入的台站资料量较少,但一定程度上填补了某些地区的空白。

3.2 台站数量

从 GH-CN、CGP 全球降水历史数据集台站数随时间变化(图 4)可以看出,CGP 数据集在 1900—1970 年全球台站数量在快速增长;1970—1990 年台站数量一直维持在 20000 站以上,是近百年最高水平;1990 年后,台站数快速下降,至 2010 年全球台站数仅为 8000 个左右。就各区域来看,欧洲、亚洲、非洲、南美区域的台站数量最大值均出现在 20 世纪 60 至 90 年代,之后快速下降,至 2010 年欧洲地区台站仍保持约 4000 个,亚洲地区下降值约 1500

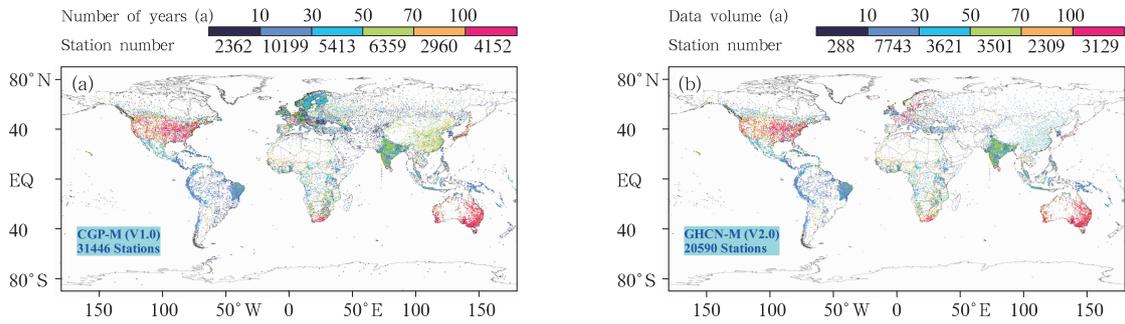


图3 CGP(a)与GHCN(b)降水历史月值数据集站点空间分布

Fig. 3 Distribution of observational stations for CGP(a) and GHCN(b) precipitation datasets

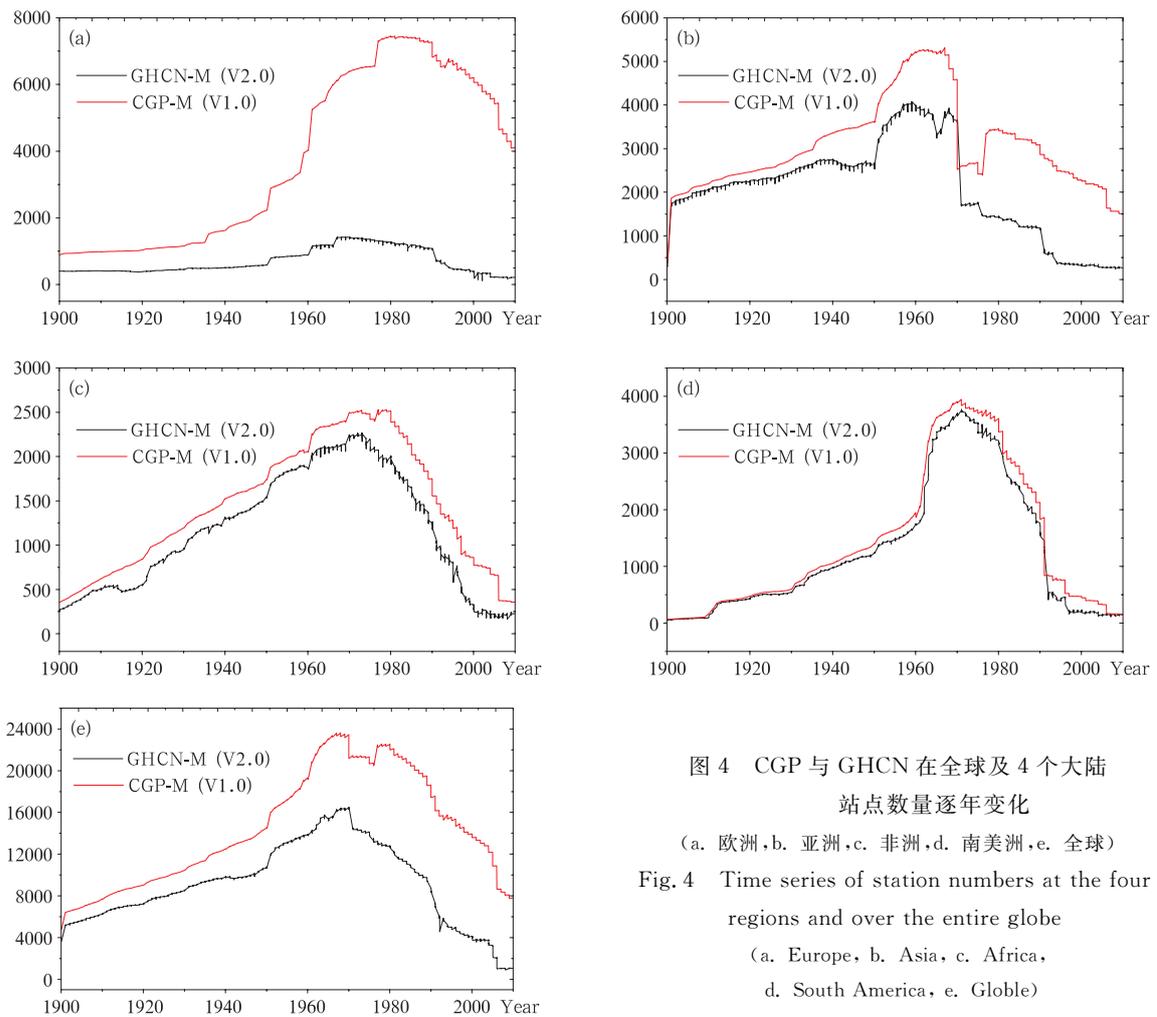


图4 CGP与GHCN在全球及4个大陆
站点数量逐年变化

(a. 欧洲, b. 亚洲, c. 非洲, d. 南美洲, e. 全球)

Fig. 4 Time series of station numbers at the four regions and over the entire globe

(a. Europe, b. Asia, c. Africa, d. South America, e. Globe)

个,非洲和南美地区台站数量不足300个。与GHCN比较,20世纪初两套降水数据集台站数量差异很小,此后CGP数据集台站数量优势逐渐显现。1977—2005年,CGP较GHCN台站数量多7000余个,1992年差异达到最大(11244个)。CGP数据集的台站数量优势集中在欧洲、亚洲地区;1960—2000

年,欧洲地区台站数量始终保持在5000个以上,较GHCN约多4000个,2000年后CGP台站数量逐渐下降,但较GHCN仍有很大优势;20世纪40至70年代,CGP在亚洲区域的站点数较GHCN约多1000个,1970年在该区域可获取的台站数据快速下降,CGP台站数量维持在1500—3000个,GHCN在

2010 年仅剩 300 个左右。两套数据集在 南美、非洲地区台站数量均较少,尤其在 2010 年,台站数量已不足 300 个,这与当地可获取的数据源较少有关。

3.3 站点空间均匀程度分布

从 CGP 和 GHCN 降水数据集在 1900、1950、1990、2010 年全球 $5^{\circ} \times 5^{\circ}$ 网格内台站数量(图 5)可以看出,1900 年两套数据集台站分布较一致,北美、西欧、澳洲地区台站密度较高,其他地区少有网格覆

盖,CGP 在欧洲、日本区域的网格数略多。1950 年,除东欧、西伯利亚、巴尔干半岛地区外 GHCN 基本都有网格覆盖,CGP 填补了 GHCN 在东欧、西伯利亚地区的空白,中国台站密度优势明显。1990 年两套数据集网格均可覆盖全球大陆,CGP 在网格内台站数量上有较大优势,欧亚大陆、加拿大尤为明显,CHCN 和 CGP 大于 5 个的网格比例分别为 44.6% 和 56.0%。2010 年两套数据产品网格覆

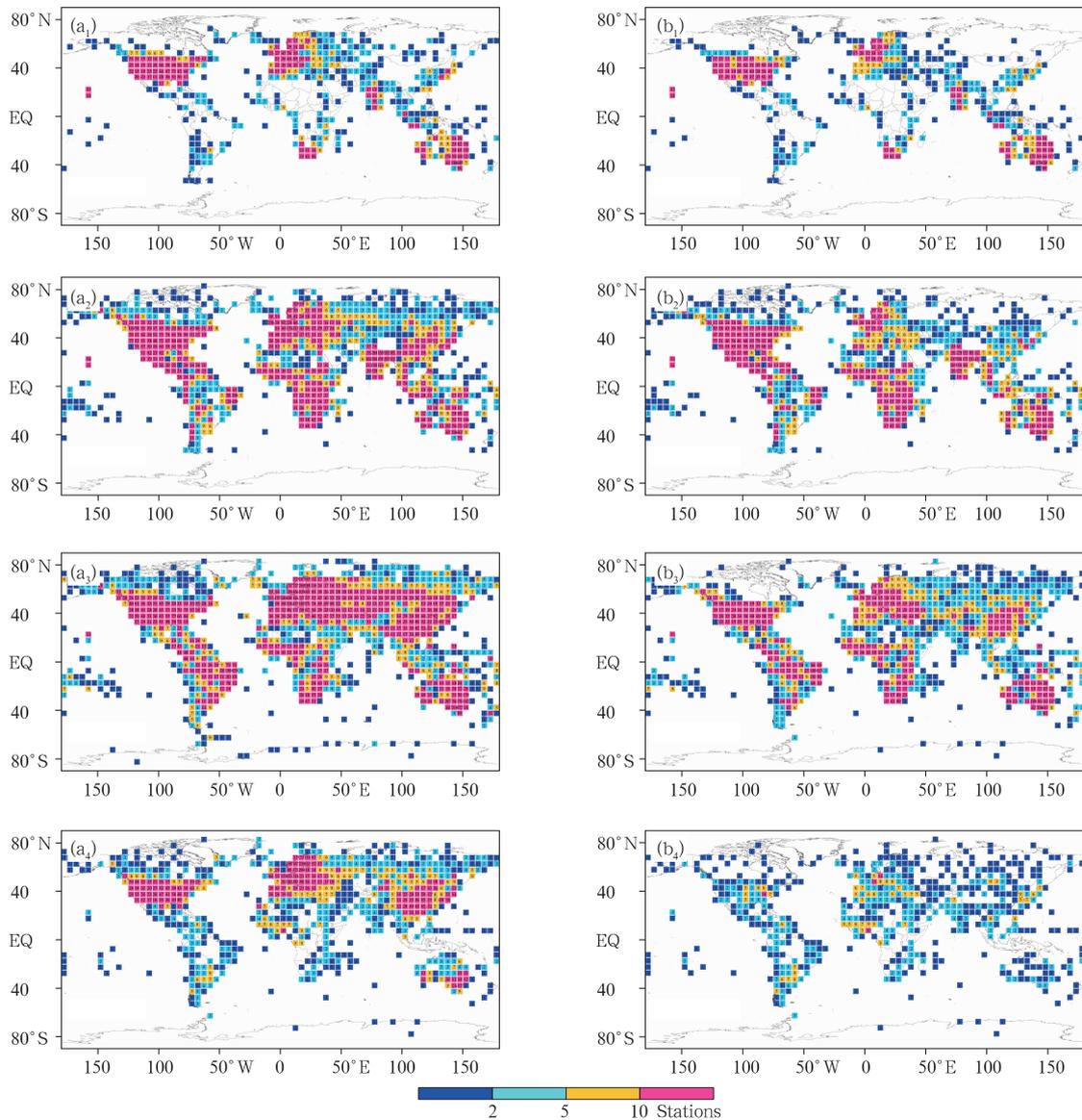


图 5 CGP(a)与 GHCN(b)降水历史数据集 $5^{\circ} \times 5^{\circ}$ 网格内台站数空间分布

(a₁, b₁. 1900 年, a₂, b₂. 1950 年, a₃, b₃. 1990 年, a₄, b₄. 2010 年)

Fig. 5 Station number in global $5^{\circ} \times 5^{\circ}$ grids CGP(a) and GHCN(b)

(a₁ and b₁. 1900, a₂ and b₂. 1950, a₃ and b₃. 1990, a₄ and b₄. 2010)

盖面积均显著下降,GHCN 减少尤为严重,东欧、西伯利亚、中国西北及青藏高原、南美中部、加拿大、澳大利亚中部均为空白,网格内台站数较少,仅 9.5% 网格内具备至少 5 个台站,此时 CGP 在南美中部、非洲中部、南部也出现空白,但欧亚大陆、北美、澳大利亚大部分地区有网格覆盖,35.7% 的网格内台站数量超过 5 个。

4 数据的初步分析

4.1 全球降水分布特征

全球陆地站点年降水量标准气候值(1961—1990)空间分布(图 6)显示,CGP 与 GHCN 的结果高度一致,CGP 在东欧、西北亚、西伯利亚、地中海地区可以得到更多的台站气候值,填补了 GHCN 在这些区域的空缺。从降水气候值的全球空间分布来看,东亚的雨量由南向北逐渐减少,西北地区是中国

降水量最小的区域。北美的降水主要集中在东部大西洋沿岸,降水量由西向东逐渐减少,太平洋东岸有一条狭长的南北向雨带。欧洲,降水的空间分布较为均匀,西欧,尤其是大西洋沿岸雨量相对较大,年降水量随着向欧亚大陆深入逐渐减少。非洲北部常年干旱,几乎所有站点的年降水量都不足 100 mm,而在非洲中部赤道地区降水量充沛,年降水量在 800 mm 以上,非洲南部有显著的东西部差异,其西部大西洋沿岸地区降水稀少,年降水量不足 200 mm,而东部印度洋沿岸地区年降水量可超过 600 mm。澳大利亚降水量亦呈现东部高、西部低的空间特征,西部太平洋沿岸全年雨量在 600 mm 以上,而东部印度洋沿岸年降水量不足 400 mm,中南部是整个澳大利亚大陆最干旱的地区,年降水量不足 100 mm。

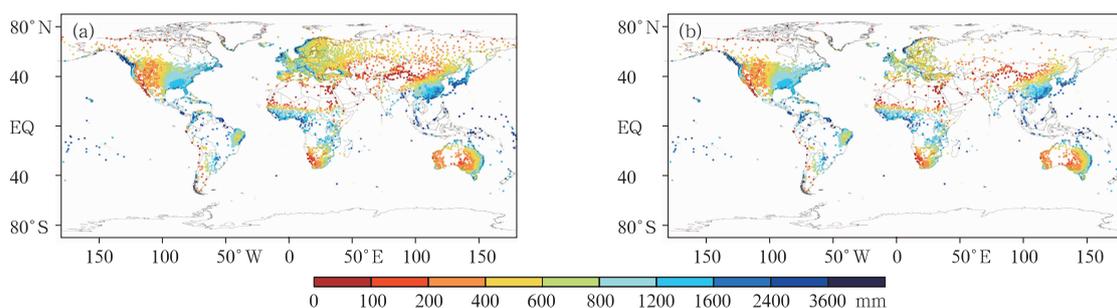


图 6 CGP(a)与 GHCN(b)全球陆地站点年降水量气候值空间分布(1961—1990)

Fig. 6 Global precipitation climatology based on data from CGP (a) and GHCN (b) (1961–1990)

4.2 全球降水变化时间特征

IPCC AR5 指出,全球百年降水变化趋势存在较大的不确定性(IPCC, 2013),1901—2008 年 GHCN 以显著增多为主,GPCCv6 则正好相反,而其他如 CRU、Smith 等则以非显著性减少为主。文中采用气候距平值法(Climatic Anomaly Method, CAM)(Jones, 1994)计算了全球、区域降水时间序列。为尽可能让更多的台站可以计算距平序列,取各台站 1961—1990 年气候标准值计算距平,仅挑选年降水量数据至少 20 个,每 10 a 中至少具有 4 个年值的台站进行计算,这样计算了 1900—2014 年全球及各纬度带的降水变化序列(图 7)。

从全球年值距平序列图上看,1950 年前几乎都是负距平,1995 年后转为全是正距平,表明 20 世纪

前半叶全球降水量较少,近 20 年是 1900 年以来全球降水量最多的时期,1901—2013 年线性趋势为 $3.52 \pm 0.5 \text{ mm}/(10 \text{ a})$,1951—2013 年为 $1.67 \pm 1.37 \text{ mm}/(10 \text{ a})$ 。各纬度带的降水长期变化趋势差异显著: $30^\circ\text{--}60^\circ\text{N}$ 的降水量在 20 世纪 30 年代前略为下降,此后趋势反转,60 年代前一直为负距平,此后略有上升,1901—2013 年线性趋势为 $5.23 \pm 0.52 \text{ mm}/(10 \text{ a})$,1951—2013 年为 $5.51 \pm 0.94 \text{ mm}/(10 \text{ a})$; $30^\circ\text{S--}30^\circ\text{N}$ 在 20 世纪 90 年代之前线性趋势不明显,但此后明显上升,1901—2013 年总线性趋势为 $2.15 \pm 1.12 \text{ mm}/(10 \text{ a})$,1951—2013 年为 $-0.52 \pm 3.01 \text{ mm}/(10 \text{ a})$; $30^\circ\text{--}60^\circ\text{S}$ 在 20 世纪 70 年代距平值在 0 值上下波动,几乎没有年代际变化,1970 年后开始持续下降,1901—2013 年线性

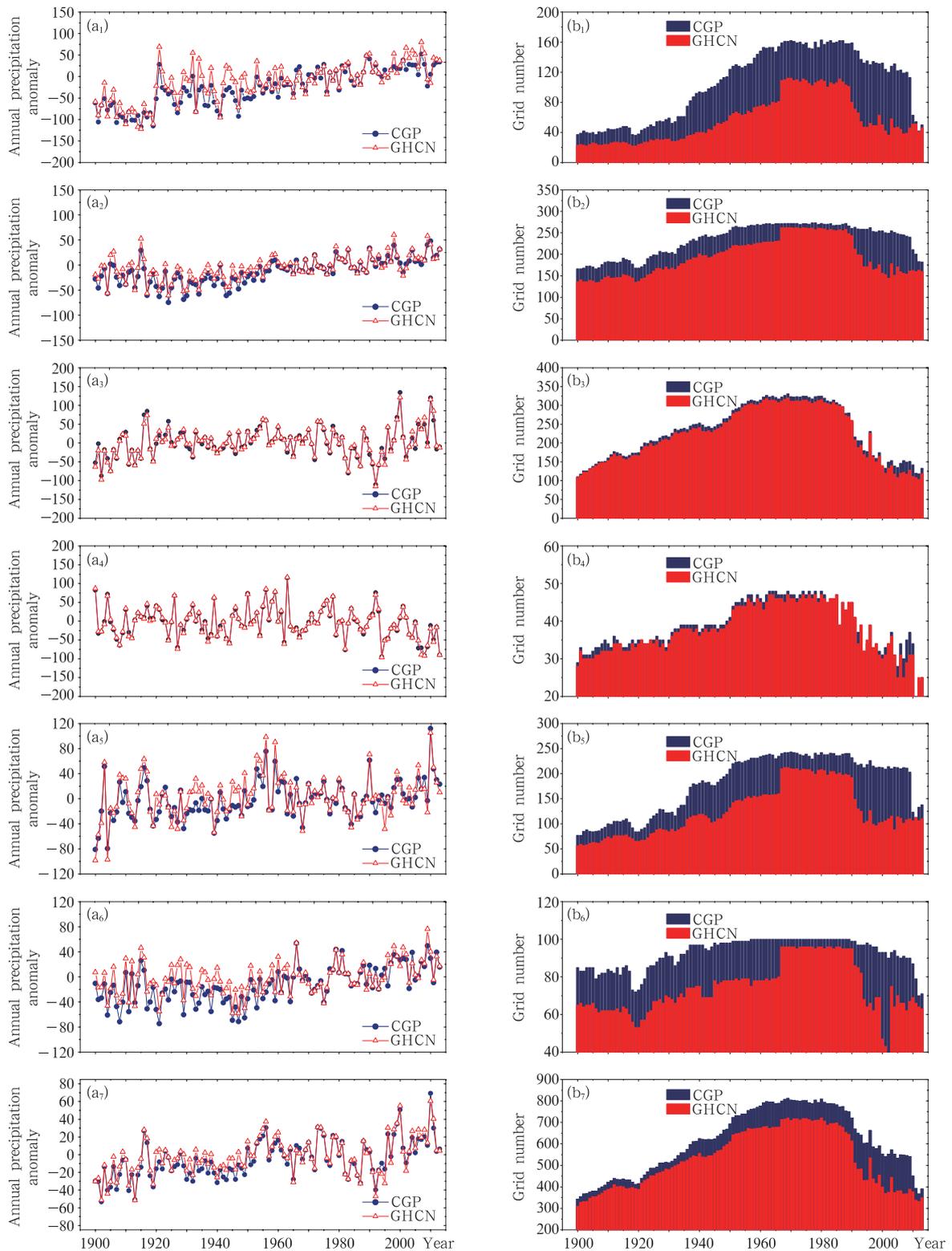


图7 1900—2013年全球年降水量距平序列(a)及计算所用格点数据量(b)

(a₁、b₁. 60°—90°N, a₂、b₂. 30°—60°N, a₃、b₃. 30°S—30°N, a₄、b₄. 60°—30°S, a₅、b₅. Asia, a₆、b₆. Europe, a₇、b₇. Global)

Fig. 7 Annual precipitation anomalies averaged over land areas for four latitudinal bands and the globe mean based on five global precipitation data sets relative to the 1961—1990 climatology (a) and the grid number used in the time series calculation for each region (b) (a₁ and b₁. 60°—90°N, a₂ and b₂. 30°—60°N, a₃ and b₃. 30°S—30°N, a₄ and b₄. 60°—30°S, a₅ and b₅. Asia, a₆ and b₆. Europe, a₇ and b₇. Global)

趋势为 $-2.15 \pm 1.14 \text{ mm}/(10 \text{ a})$, 1951—2013 年为 $-10.5 \pm 2.74 \text{ mm}/(10 \text{ a})$; $60^\circ\text{--}90^\circ \text{N}$ 地区在 1920—1950 年降水量持续减少, 之后开始增加直至最近, 值得一提的是 20 世纪 20 年代时间序列出现异常跳跃, 可能与站点数量显著变化有关, 也不排除数据集中仍然存在一定非均一问题, 所以文中没有计算该纬度带降水变化的长期趋势。

从各个纬度带看, CGP 与 GHCN 得到的全球降水时间序列基本一致, 尤其是低纬度地区和南半球的距平曲线几乎完全重合, 北半球中高纬度地区的总体趋势一致, 但在 1960 年前 CGP 的距平值略低于 GHCN, 导致 CGP 的长期变化趋势明显高于 GHCN ($2.77 \pm 1.90 \text{ mm}/(10 \text{ a})$, 1901—2008 年; $-2.77 \pm 3.92 \text{ mm}/(10 \text{ a})$, 1951—2008 年, 尤其是 1951 年以来趋势反转使人印象深刻。相对于 GHCN, CGP 的数据量优势主要集中在北半球中高纬度地区, 赤道和南半球 CGP 仅略高于 GHCN。数据量的差异与距平序列吻合程度一致, 表明数据量的差异可能是造成 CGP 距平序列略低于 GHCN 的主要原因。从图 7 中还可以看到, 20 世纪 60 年代中期 GHCN 在亚洲和欧洲地区的网格数激增, 90 年代后又迅速减少, 而 CGP 的网格数变化较为平缓。CGP 和 GHCN 计算得到的亚洲和欧洲地区降水时间序列具有非常相近的年代际特征, 但在 20 世纪 60 年代之前 CGP 距平值一直低于 GHCN。由此认为, 欧亚地区新增的站点数据虽然没有改变地区降水分布的总体特征, 但使区域百年降水变化速率有所增大。

5 小结与展望

基于收集整理的全球多个降水数据源, 经过系统的整理、融合、质量控制、订正、分析, 形成一套整合的全球 1900—2014 年月降水气候数据集——CGP。该数据集与目前美国 NOAA 研发的最完整的全球数据集 (GHCN-M V2.0) 对比, 新增约 1 万个站点、 5×10^6 组有效记录和 1030 条百年尺度的站点序列, 其中 141 条百年序列通过多来源资料融合或整合获得。从区域分布特点来看, 这种站点和数据量的优势主要体现在东亚、东欧、西伯利亚等站点稀疏地区。

虽然 CGP 数据集中新增的站点数据没有改变全球降水分布及其各纬度带降水变化的总体格局,

但对区域性百年尺度降水变化的检测精度有一定的提高; 特别是对全球近百年降水量的长期变化趋势检测结果表明: 1900—2014 年全球年降水量呈现显著的增长趋势, 这个结果同 GHCN 一致 (但趋势值比 GHCN 更高), 而同 GPCC 数据集正好相反, 也同时反衬出 GPCC 数据集、CRU 降水数据集, Smith 等 (2012) 等数据集在百年尺度降水长期趋势检测方面的不足之处。

应该指出的是, 目前该数据集还存在相当的不足。下一步研发团队将从以下四方面进一步完善该数据产品:

(1) 进一步强化降水气候序列的均一性研究与订正处理。目前的数据集中, 台站的密度存在差距, 给均一性检验的参考序列的选取带来了一定困难; 此外, 高纬度固态降水的观测长期存在着较大的不确定性等均给数据集中气候序列的精度带来相当的干扰; 而目前对此的处理能力存在明显不足。

(2) 降水是不连续变量, 具有极大的时空变率, 简单的网格化算法不能简单地应用于降水。特别是近年以来, 卫星气候数据产品的引入, 能否提高全球降水数据的精度, 在此基础上进一步研发融合和再加工产品, 将是下一步研究的内容。

(3) 通过国际数据交换, 收集了加拿大、越南、CPC 等数据机构的区域历史数据, 但南美、非洲地区资料“空窗”问题仍然存在。下一步将重点关注蒙古、巴西、阿根廷、印度、南非等此前资料稀少国家的数据库, 以获得更多准实时的全球数据。

(4) 目前通过全球通信系统 (GTS), 并结合各数据中心数据发布情况实施准实时追踪、下载实现数据更新, 但数据量仍然较为有限。如何获取更多的实时 (准实时) 资料来源, 实现快速更新, 真正形成一套高实效、高质量的全球基准降水数据产品, 还有很长的路要走。

致谢: 英国东安吉利尔大学气候研究中心 (CRU) 的 Philip Jones 教授在 2015 年访问中国国家气象信息中心期间给予了很多建议, 谨致诚挚谢意。

参考文献

- 陈隆勋, 周秀曦, 李维亮等. 2004. 中国近 80 年来气候变化特征及其形成机制. 气象学报, 62(5): 634-646. Chen L X, Zhou X J, Li W L, et al. 2004. Characteristics of the climate change and its formation mechanism in china in last 80 years. Acta Meteorologica Sinica, 62(5): 634-646 (in Chinese)

- 丁一汇. 2010. 气候变化. 北京: 气象出版社, 437pp. Ding Y H. 2010. Climate Change. Beijing: China Meteorological Press, 437pp (in Chinese)
- 李庆祥. 2011. 气候资料均一性研究导论. 北京: 气象出版社. Li Q X. 2011. Introductory Study of Historic Climate Data Homogeneity. Beijing: China Meteorological Press (in Chinese)
- 李庆祥, 刘小宁, 李小泉. 2002a. 近半世纪华北干旱化趋势研究. 自然灾害学报, 11(3): 50-56. Li Q X, Liu X N, Li X Q. 2002a. Drought trend in North China in recent half century. J Nat Dis, 11(3): 50-56 (in Chinese)
- 李庆祥, 屠其璞. 2002b. 近百年北半球陆面及中国年降水的区域特征与相关分析. 南京气象学院学报, 25(1): 92-99. Li Q X, Tu Q P. 2002b. The regional characters of annual precipitation in northern hemisphere land-surface and China and their correlation. J Nanjing Inst Meteor, 25(1): 92-99 (in Chinese)
- 秦大河, 陈振林, 罗勇等. 2007. 气候变化科学的最新认知. 气候变化研究进展, 3(2): 63-73. Qin D H, Chen Z L, Luo Y, et al. 2007. Updated understanding of climate change sciences. Adv Climate Change Res, 3(2): 63-73 (in Chinese)
- 施能, 陈绿文, 封国林等. 2004. 1920—2000 年全球陆地降水气候特征与变化. 高原气象, 23(4): 435-443. Shi N, Chen L W, Feng G L, et al. 2004. Climate characters and changes in global land precipitation field from 1920 to 2000. Plateau Meteor, 23(4): 435-443 (in Chinese)
- 施晓晖, 徐祥德. 2008. 1951—2002 年全球陆地气温和降水的年代际趋势转折特征. 自然科学进展, 18(9): 1016-1026. Shi X H, Xu X D. 2008. Global land temperature and precipitation trend reversal during 1951—2002. Progr Nat Sci, 18(9): 1016-1026 (in Chinese)
- 屠其璞. 1987. 近百年来我国降水量的变化. 南京气象学院学报, 10(2): 177-187. Tu Q P. 1987. Variation of precipitation over China in the past 100 years. J Nanjing Inst Meteor, 10(2): 177-187 (in Chinese)
- 杨溯, 李庆祥. 2014. 中国降水量序列均一性分析方法及数据集更新完善. 气候变化研究进展, 10(4): 276-281. Yang S, Li Q X. 2014. Improvement in homogeneity analysis method and update of China precipitation data. Progr Inquisit Mutat Climat, 10(4): 276-281 (in Chinese)
- 宇婧婧, 沈艳, 潘畅等. 2015. 中国区域逐日融合降水数据集与国际降水产品的对比评估. 气象学报, 73(2): 394-410. Yu J J, Shen Y, Pan Y, et al. 2015. Comparative assessment between the daily merged precipitation dataset over China and the world's popular counterparts. Acta Meteor Sinica, 73(2): 394-410 (in Chinese)
- 翟盘茂, 任福民, 张强. 1999. 中国降水极值变化趋势检测. 气象学报, 57(2): 208-216. Zhai P M, Ren F M, Zhang Q. 1999. Detection of trends in China's precipitation extremes. Acta Meteor Sinica, 57(2): 208-216 (in Chinese)
- 翟盘茂, 邹旭恺. 2005. 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, 1(1): 15-18. Zhai P M, Zou X K. 2005. Changes in temperature and precipitation and their impacts on drought in China during 1951—2003. Adv Climate Change Res, 1(1): 15-18 (in Chinese)
- 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)
- Adler R F, Huffman G J, Chang A, et al. 2003. The version 2 global precipitation climatology project (GPCP) monthly precipitation analysis (1979-present). J Hydrometeor, 4(6): 1147-1167
- Auer I, Böhm R, Jurkovic A, et al. 2005. A new instrumental precipitation dataset in the greater alpine region for the period 1800—2002. Int J Climatol, 25(2): 139-166
- Auer I, Böhm R, Jurkovic A, et al. 2007. HISTALP-historical instrumental climatological surface time series of the Greater Alpine Region. Int J Climatol, 27(1): 17-46
- Becker 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. Earth Syst Sci Data, 5: 71-99
- Hulme M. 1991. An intercomparison of model and observed global precipitation climatologies. Geophys Res Lett, 18(9): 1715-1718
- Hulme M. 1992. A 1951—80 global land precipitation climatology for the evaluation of general circulation models. Climate Dyn, 7(2): 57-72
- IPCC. 2013. The Physical Science Basis; Working Group I Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press
- Janowiak J E, Gruber A, Kondragunta C R, et al. 1998. A comparison of the NCEP-NCAR reanalysis precipitation and the GPCP rain gauge-satellite combined dataset with observational error considerations. J Climate, 11(11): 2960-2979
- Jones P D. 1994. Hemispheric surface air temperature variations: A reanalysis and update to 1993. J Climate, 7(11): 1794-1802
- Kummerow C, Barnes W, Kozu T, et al. 1998. The Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) sensor package. J Atmos Oceanic Technol, 15(3): 809-817
- Menne M J, Williams C N, Vose R S. 2009. The United States historical climatology network monthly temperature data-version 2. Bull Amer Meteor Soc, 90(7): 993-1007
- Mitchell T D, Jones P D. 2005. An improved method of constructing a database of monthly climate observations and associated high-resolution grids. Int J Climatol, 25: 693-712
- Peterson T C, Vose R S. 1997. An overview of the Global Historical Climatology Network temperature database. Bull Amer Meteor Soc, 78(12): 2837-2849
- Quinlan F T, Karl T R, Williams C N Jr. 1987. United States His-

- tological Climatology Network (HCN) Serial Temperature and Precipitation Data. Oak Ridge National Laboratory, U. S. , Department of Energy, Oak Ridge, Tennessee; Carbon Dioxide Information Analysis Center
- Ropelewski C F, Janowiak J E, Halpert M S. 1984. The Climate Anomaly Monitoring System (CAMS). Washington D C, USA: CAC/ NWS/ NOAA
- Rudolf B. 1993. Management and analysis of precipitation data on a routine basis// International WMO/IAHS/ETH Symposium on Precipitation and Evaporation. Bratislava: WMO, 20-24
- Schneider U. 1993. The GPCP quality-control system for gauge-measured precipitation data// Report of a GEWEX Workshop " Analysis Methods of Precipitation on a Global Scale". Koblenz, Germany: WMO, A5-A7
- Smith T M, Arkin P A, Ren L, et al. 2012. Improved reconstruction of global precipitation since 1900. *J Atmos Ocean. Technol.*, 29: 1505-1517
- Tank A M G K, Wijngaard J B, Können G P, et al. 2002. Daily dataset of 20th-century surface air temperature and precipitation series for the European Climate Assessment. *Int J Climatol*, 22 (12): 1441-1453
- Vose, R S. 1992. The Global Historical Climatology Network: Long-Term Monthly Temperature, Precipitation, Sea Level Pressure, and Station Pressure Data. Carbon Dioxide Information Analysis Center. Available to the public from N. T. I. S. , 1v
- Wang X L, Wen Q H, Wu Y H. 2007. Penalized maximal t test for detecting undocumented mean change in climate data series. *J Appl Meteor Climatol*, 46(6): 916-931
- Xie P P, Arkin P A. 1997. Global precipitation: A 17-year monthly analysis based on gauge observations, satellite estimates, and numerical model outputs. *Bull Amer Meteor Soc*, 78 (11): 2539-2558
- Zhou T J, Chen X L, Dong L, et al. 2014. Chinese contribution to CMIP5: An overview of five Chinese models' performances. *J Meteor Res*, 28(4): 481-509