

1991 ~ 2020年中国地面气候值数据集研制

赵煜飞 廖捷 张强 陈杰 龚玺 石岩 石明远 杨笛 范邵华 周学东 曹丽娟 胡开喜

Development of China Ground Climate Normal Value Dataset from 1991 to 2020

ZHAO Yufei LIAO Jie ZHANG Qiang CHEN Jie GONG Xi SHI Yan SHI Mingyuan YANG Di FAN Shaohua ZHOU Xuedong CAO Lijuan HU Kaixi

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9895.2204.22010>

您可能感兴趣的其他文章 Articles you may be interested in

近60年中国日降水量分区及气候特征

Climate Regionalization and Characteristics of Daily Precipitation in China in Recent 60 Years

大气科学. 2017, 41(5): 933 <https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9895.1703.16169>

基于国际大气化学—气候模式比较计划模式数据评估未来气候变化对中国东部气溶胶浓度的影响

Impact of Climate Change on Aerosol Concentrations in Eastern China Based on Atmospheric Chemistry and Climate Model Intercomparison Project (ACCMIP) Datasets

大气科学. 2017, 41(4): 739 <https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9895.1612.16218>

1956~2012年浙闽登陆热带气旋降水精细化观测统计分析

Statistical Analysis of Accurate Observations of Tropical Cyclone Precipitation in Zhejiang and Fujian Provinces from 1956 to 2012

大气科学. 2018, 42(1): 16 <https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9895.1705.16253>

基于京津冀高密度地面观测网络的大气污染物浓度地面观测代表性误差估计

Estimation of Representative Errors of Surface Observations of Air Pollutant Concentrations Based on High-Density Observation Network over Beijing-Tianjin-Hebei Region

大气科学. 2019, 43(2): 277 <https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9895.1804.17267>

降尺度方法在东亚气候预测中的应用

Application of Downscaling Methods in the East Asian Climate Prediction

大气科学. 2018, 42(4): 806 <https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9895.1801.17266>

基于多源陆面通量数据相融合的新资料及其在中国夏季风影响过渡区的应用

New Dataset Based on Multi-Source Land Surface Flux Data and Its Application in the East Asian Summer Monsoon Boundary Area

大气科学. 2020, 44(6): 1224 <https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9895.2005.19192>



关注微信公众号，获得更多资讯信息



赵煜飞, 廖捷, 张强, 等. 2024. 1991~2020 年中国地面气候值数据集研制 [J]. 大气科学, 48(2): 555-571. ZHAO Yufei, LIAO Jie, ZHANG Qiang, et al. 2024. Development of China Ground Climate Normal Value Dataset from 1991 to 2020 [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 48(2): 555-571. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2204.22010

1991~2020 年中国地面气候值数据集研制

赵煜飞¹ 廖捷¹ 张强¹ 陈杰¹ 龚玺¹ 石岩¹ 石明远¹ 杨笛¹
范邵华¹ 周学东² 曹丽娟¹ 胡开喜¹

¹ 国家气象信息中心, 北京 100081

² 江苏省气候中心, 南京 210041

摘要 基于国家气象信息中心归档的中国地面观测数据, 研制了 1991~2020 年中国地面气候值数据集。数据集研制期间, 对 1991 年以来的地面台站观测数据集元数据进行了系统的质量检查和核实订正。在基于站址迁移信息对所有要素进行了分段处理基础上, 基于非均一性检验结果完成了气温序列的分段处理。依据人工、自动观测调整信息完成了能见度观测数据分段处理, 提供了一套与当前能见度观测方式一致、代表性更好的气候背景场。采用傅里叶级数理论对气温、降水累年日值序列进行了谐波处理, 在体现气象变量季节性转换的同时, 避免了日与日之间的异常突变特征, 具有更好的气候代表性。最终建立的 1991~2020 年中国地面气候值数据集提供了中国 2438 个站点的气温、降水、气压、风向风速、相对湿度、水汽压、云、天气现象、能见度、蒸发、积雪、地温、冻土、日照共 14 个要素的气候背景信息, 为天气气候业务提供了数据支撑。

关键词 地面观测 统计 标准气候值 均一性 谐波处理

文章编号 1006-9895(2024)02-0555-17

中图分类号 P467

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2204.22010

Development of China Ground Climate Normal Value Dataset from 1991 to 2020

ZHAO Yufei¹, LIAO Jie¹, ZHANG Qiang¹, CHEN Jie¹, GONG Xi¹, SHI Yan¹, SHI Mingyuan¹,
YANG Di¹, FAN Shaohua¹, ZHOU Xuedong², CAO Lijuan¹, and HU Kaixi¹

¹ National Meteorological Information Centre, Beijing 100081

² Jiangsu Provincial Climate Centre, Nanjing 210041

Abstract Based on surface observation data archived by the National Meteorological Information Centre, a dataset of the 1991–2020 China climate normals is developed. For the development of the dataset, the metadata of the observation data since 1991 is systematically checked, verified, and revised. All elements are segmented using the station location migration information, and the segmented processing of the temperature series is completed based on the heterogeneity test results. The segmented processing of visibility observation data is completed using manual and automatic observation and adjustment information. The segmented processing of visibility observation data is completed, providing a better

收稿日期 2022-01-12; 网络预出版日期 2022-07-13

作者简介 赵煜飞, 女, 1979 年出生, 博士、正高级工程师, 主要从事气象数据集研制工作。E-mail: 12163176@qq.com

通讯作者 廖捷, E-mail: liaoj@cma.gov.cn

资助项目 国家自然科学基金重大项目 42090033, 中国气象局创新发展专项 CXFZ2022J050, 中国气象局青年创新团队 CMA2023QN08

Funded by Major Program of the National Natural Science Foundation of China (Grant 42090033), Innovation and Development Special Project of China Meteorological Administration (Grant CXFZ2022J050), Youth Innovation Team of China Meteorological Administration (Grant CMA2023QN08)

representative climate background field consistent with the current visibility observation method. The Fourier series theory is used to deal with the harmonics of the annual daily value series of temperature and precipitation, reflects the seasonal transformation of meteorological variables, and avoids abnormal mutation characteristics. The 1991–2020 China climate normals provide the climate background information of 14 elements, i.e., temperature, precipitation, air pressure, wind direction and speed, relative humidity, water vapor pressure, cloud, weather phenomenon, visibility, evaporation, snow, ground temperature, frozen soil, and sunshine, of 2438 stations in China and data support for weather and climate research.

Keywords Surface observation, Statistics, Climate normals, Homogeneity, Harmonic processing

1 引言

全球气候变化问题日益引起各国政府、科技界和公众的关注,气候变化是自然因素和人类活动共同作用的结果(丁一汇和王会军, 2016)。“气候标准值”一词最早出现在 1840 年 Dove 关于全球气温变化的专著中(Landsberg, 1955)。标准气候值描述了异常条件甚至极端情况允许发生的背景状态,可以用来决定种植什么作物,长途旅行要带什么衣服,在哪里和什么时候安排户外婚礼等(Arguez et al., 2012a)。标准气候值是应对气候变化重要科学数据之一,为科学地揭示我国近代气候变化事实、客观认识气候变化规律和应对气候变化的决策提供数据支撑。标准气候值作为最常用的气候平均状态被学者用来分析中国地表气温年平均距平变化序列、北半球温度变化与石笋记录的亚洲季风降水变化关系、全球变暖趋势、极端降水事件等(World Meteorological Organization, 2007; 周鑫等, 2010; 王绍武等, 2014; 刘璐等, 2015; 丁一汇和王会军, 2016; Lu et al., 2021)。标准气候值还可为提高中国在国际气候变化研究领域的话语权,抵御和适应气候风险、合理开发利用气候资源等提供坚实的数据支撑;可作为特定地点在近期最有可能经历的天气气候事件的预报因子及气候观测变化的稳定基准(WMO, 2011, 2017)。

1872 年,世界气象组织(World Meteorological Organization, WMO)的前身国际气象组织(International Meteorological Organization, IMO)建议标准气候值初始阶段时间段定为 1901~1930 年,各成员国以 30 年为间隔,提供标准气候值(Guttman, 1989; World Meteorological Organization, 2007),由于 30 年的长度已经足够来消除年变化影响(WMO, 1989),建议各国以此长度为标准,为政府部门提供气候标准值。2015 年,第十七次世界气象大会(WMO, 2015)批准了对气候平均值定

义的一系列修改。其中最重要的修改是将标准气候值定义为 0 尾数年份的最近 30 年期(如 1971~2000 年、1981~2010 年),而不是像以前那样的非重叠的 30 年期(如 1931~1960 年、1961~1990 年)(Arguez and Vose, 2011)。然而,1961~1990 年气候标准值仍然作为长期气候变化评估的标准基准。

我国已开展 4 次地面气候值研制工作,即 1951~1980 年、1961~1990 年、1971~2000 年和 1981~2010 年(李庆祥, 2018),气候值产品已在气候变化业务科研得到广泛应用(李晓燕等, 2005; 张永强等, 2013),并参加了国际交换。1961~1990 年标准气候值的统计站数仅为 647 个站,1971~2000 年气候值的站数增加至 722 站,这两次气候值研制的数据库均为国家基本、基准站的纸质报表数字化资料。1981~2010 年的气候值站数增加到 2414 个,这主要得益于 2012 年前后,完成了 2400 余个国家级地面气象站数字化资料的检测、核查、补录与订正,形成了一套完整性较好的基础数据作为数据库(任芝花等, 2015)。1981~2010 年气候值包含气温、降水、气压、风向风速、水汽压、相对湿度、云、天气现象、能见度、蒸发、积雪、地温、冻土、日照和草面温度共 15 类要素的统计产品。

2021 年,中国气象局开展 1991~2020 年中国地面气候值研制。该气候值产品将取代 1981~2010 年气候值,来客观地反映各气象观测站点的气候特征和观测水平。1991~2020 年中国地面气象观测要素气候值包含了全国 2438 个站的气温、降水、气压、风向风速、水汽压、相对湿度、云、天气现象、能见度、蒸发、积雪、地温、冻土、日照等 14 类要素(由于需求和应用较少,本次气候值不包括草面温度)的平均值、总量值、极值、日数、频率、最长连续日数和止日等共 6 类统计产品。本文给出上述气候值产品的数据库、统计方法和评估结果,供使用者参考使用。

2 数据

1991~2020 年中国地面气候值数据集研制采用的数据源为国家气象信息中心归档的中国地面气象站的观测数据。2011 年, 国家气象信息中心对 1951~2010 年 2400 余个地面站气温、气压、降水、湿度、日照等 19 类要素的定时观测资料和日极值资料中由数字化引起的系统性问题(例如数字化遗漏、整段拷贝等问题)进行质量检测、质量控制和错误数据的更正, 形成高质量的地面基础资料集(任芝花等, 2012)。本次气候值研制采用了这套资料集中的 1991~2010 年地面日值数据。2011~2020 年的数据来源于各台站上报的地面月报数据文件(A 文件)里的日值数据, 该日值数据经过三级质量控制, 具有较好的准确性(任芝花等, 2015)。

由于观测调整, 一些地面气象站在 90 年代的观测任务发生变更, 导致 A 文件存在缺失。1991~2020 年标准气候值数据集研制过程中, 对 1991~2020 年的 A 文件的完整性进行了详细梳理, 针对存在数据缺失的 187 个站点, 完成了缺失数据的核实和补充, 补充的 A 文件共计 865 个站月, 数据的完整性进一步提升。此外, 在数据集研制过程中发现部分 A 文件存在格式错误, 开展了错误数据的订正工作。台湾地区的基础数据源主要包括

两部分: (1) 信息中心研制的全球地面基础数据集; (2) 国际通信系统业务收集的地面原始观测资料。上述数据在制作过程中, 对数据源进行了质量控制, 对其中连续观测时间序列不足 5 年的数据进行了剔除。而以上两种数据源中降水要素缺测率较高、质量问题较多。因此, 降水数据以中国台湾地区气象局网站(<http://www.cwb.gov.tw>[2022-03-01])发布的 24 小时降水数据为基础数据源。经评估, 台湾地区基础数据源中, 气温要素实有率 99.2%, 正确率 99.8%; 露点温度实有率 98.4%, 正确率 99.8%; 气压实有率 95.0%, 正确率 80.4%; 风实有率 98.6%, 正确率 95.9%; 降水数据来源与以上要素不同, 实有率和正确率均为 100%。

3 统计方法

3.1 统计项目及精度

中国地面气象观测要素 1991~2020 年气候值共包括气温、降水等 14 类要素(各要素统计项目及精度见表 1)的平均值、总量值、极值、日数、频率、最长连续日数和止日、稳定通过各界限温度起止日及起止日间积温、降水量、日照时数等共 7 类统计项目。研制气候值的统计方法遵循了国家标准《地面标准气候值统计方法》(中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局和中国国家标准化委员会, 2017)及《WMO 气候平均值的计算指南》

表 1 1991~2020 年中国地面标准气候值统计项目

Table 1 Statistical items of the 1991–2020 China ground standard climate normals

要素	统计项目	精度和单位
气温	年(月、旬、候)平均气温	0.1°C
	年(月)平均气温平均差、标准差和累年最大正、负距平	
	气温年较差	
	年(月)平均最高气温	
	年(月)平均最低气温	
	日最低气温	
	日最高气温	
	日平均气温	
	年(月)极端最高气温及出现日期	
	年(月)极端最低气温及出现日期	
	年(月)采暖度日($\leq 18.0^{\circ}\text{C}$)和制冷度日($\geq 26.0^{\circ}\text{C}$)	
	降水	
日降水量		
年(月、旬)降水量平均差、相对平均差、标准差、相对标准差和累年最大正、负距平百分率		
年(月)最大日降水量及出现日期		
年(月)各级日降水量(≥ 0.1 、 ≥ 10.0 、 ≥ 25.0 、 ≥ 50.0 mm)日数		

表 1 (续)

要素	统计项目	精度和单位
气压	年(月)平均本站气压	0.1 hPa
	年(月)平均本站气压的平均差、标准差和累年最大正、负距平	
风向风速	年(月)最多风向及频率	16方位
	年(月)平均风速	0.1 m s ⁻¹
	年(月)平均最大风速	
	日平均风速	
水汽压	年(月)平均水汽压	hPa
	年(月)平均水汽压的平均差、标准差和最大正、负距平	
相对湿度	日平均相对湿度	
	年(月)平均相对湿度	
云	年(月)平均总云量	成
	年(月)平均低云量	
	年(月)日平均总云量<2.0成(晴天)日数	
天气现象	年(月)日平均总云量>8.0成(阴天)日数	
	年(月)冰雹日数	
	年(月)大风日数	
	年(月)沙尘暴日数	
	年(月)雾日数	
	年(月)霜日数	
	年(月)降雪日数	
	年(月)积雪日数	
能见度	年(月)各级能见度(<10 km、<1 km)出现频率	
蒸发	年(月、旬)蒸发量(小型蒸发器、大型蒸发器)	0.1mm
积雪	年(月)最大积雪深度及出现日期	cm
地温	年(月)平均地面温度	0.1°C
	年(月)平均最高地面温度	
	年(月)平均最低地面温度	
	年(月)极端最高地面温度及出现日期	
	年(月)极端最低地面温度及出现日期	
	年(月)平均5、10、15、20、40 cm地温	
冻土	年(月)最大冻土深度及出现日期	cm
日照	年(月、旬)日照时数	0.1 h
	日照时数(日值)	
	年(月、旬)日照百分率	

(WMO, 2017)。

3.2 历年平均值

地面月报数据文件提供了站点观测的日值数据, 是 1991~2020 年中国地面气候值的基础数据源。根据中国气象局《地面气象观测规范》(中国气象局, 2003), 日平均值一般由四次定时值(北京时间 02、08、14、20 时)平均求得。在计算历年候、旬、月、年平均时, 一候中各日值缺测 2 个及以上时, 候平均为缺测; 一旬中各日值缺测 3 个及以

上时, 旬平均为缺测; 一月中缺测 7 天以上, 月平均为缺测; 一年中各月值缺测 1 个及以上时, 年平均为缺测。

其中, 月值的缺测定义与《WMO 气候平均值计算指南》(WMO, 2017) 有所不同, WMO 规定一月中各日值缺测 11 个及以上, 或连续缺测 5 个及以上时, 月平均为缺测, 这是充分考虑到全球不同地区观测完整性制定的。而近 40 余年以来, 我国地面气象观测站完整性较高, 因此 1981~2010

年的中国地面气候标准值采用的即为“一月中缺测 7 天以上, 月平均为缺测”。为了保证与 1981~2010 年中国地面气候标准值统计方法一致性, 在 1991~2020 年月平均缺测的统计中, 仍旧使用“一月中缺测 7 天以上, 月平均为缺测”方法。以气温为例, 缺测 7 天以上的站月数占比为 0.2752%, 缺测 11 个及以上的站月数占比为 0.2746%, 缺测定义的差异仅对 0.0006% 的站月有影响。此外, 在进行月值统计时, 如一月中某定时值缺测 7 次或以上时, 该月按缺测处理。总量值、极值、日数、频率等 6 类统计项目的缺测定义参见国家标准《地面标准气候值统计方法》。

3.3 标准气候值、临时气候值与参考气候值

在计算 30 年的气候平均值时, 采用了 WMO (2017) 提出的标准, 对计算 30 年的年平均值, 以及某月(旬、候)的 30 年平均值时, 只要平均期(即 1991~2020 年)有 80% 的年份有有效值, 即计算该月(旬、候)的标准气候值; 当不符合该条件时, 如在标准气候值统计的相应年期间, 如存在连续 10 年以上的有效数据, 则统计相应年期间有效数据的平均值, 视为临时气候值。1991~2020 年的中国地面气候值数据集中, 95% 的站点提供了标准气候值。标准气候值和临时气候值对应的站点分布见图 1。

2013 年前后, 我国能见度观测由人工观测改

为自动观测。研究表明, 自动观测能见度与人工之间存在明显的系统偏差(刘宁微等, 2012; 王瑞等, 2015), 两者比例约为在 0.75 左右。受视程、天气现象等多重因素影响, 不同站点自动与人工观测的系统偏差也有所不同, 针对全国 2400 多站的能见度均一性订正数据集尚未发布。为此, 增加了自动观测能见度的参考气候值统计, 即当自动观测能见度时间大于等于 7 年时, 基于自动观测能见度的数据统计年(月)各级能见度(<10 km、<1 km)出现频率, 这可为当前能见度监测评估提供一套与当前观测方式一致、代表性更好的气候背景场。

1991~2020 年中国气候值数据集提供了气温、降水、风、湿度、日照时数的日气候值。日气候值由历年该日的日值统计获得。按照国际上的做法(Arguez et al., 2012b), 闰年每年只取前 365 天(称为日历日, Calendar day), 使得每年的总天数相等。在应用中, 若需用闰年 2 月 29 日的日气候值, 可采用 2 月 28 日和 3 月 1 日的日气候值的平均值替代。统计日标准气候值所需的有效数据量与月标准气候值一致。当不满足标准气候值统计条件时, 仅当具有连续 20 年以上历年日值数据, 才提供日临时气候值。此外, 结合实际需求, 如存在连续 7 年及以上但不够 10 年的有效数据, 补充提供自动观测能见度与气温日值的参考气候值。

通过简单的对 30 年某日的日值进行累年平均

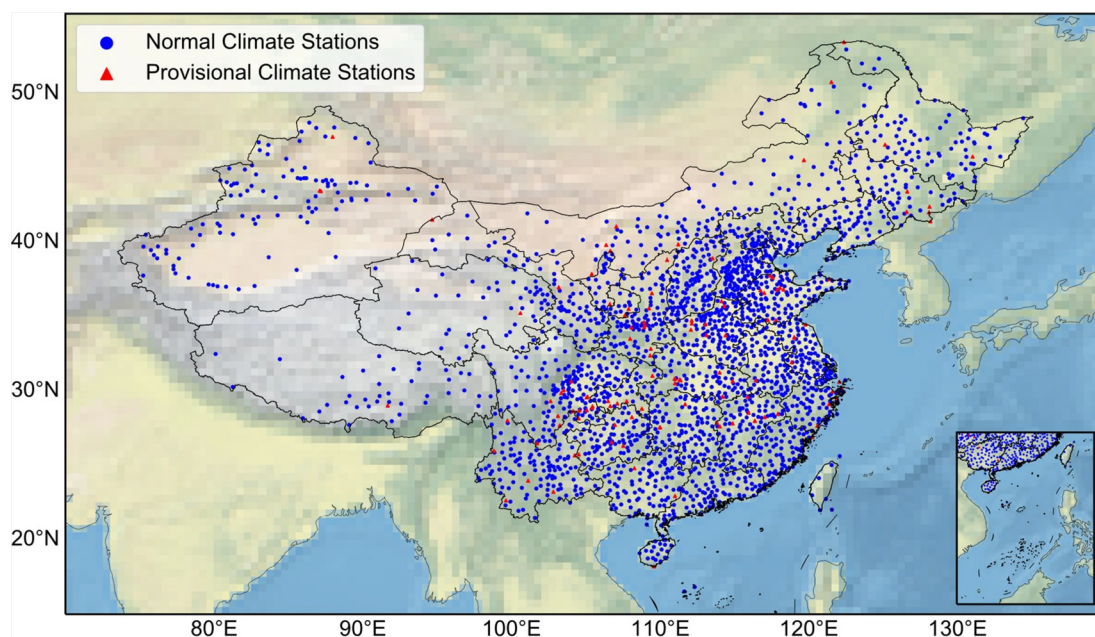


图 1 1991~2020 年中国地面标准气候值和临时气候值站点空间分布。

Fig. 1 Locations of 1991–2020 China ground standard climate normals and provisional normals stations.

X_t (如 1991 年 1 月 1 日、1992 年 1 月 1 日、……、2020 年 1 月 1 日的日降水量, $t=1, 2, 3, \dots, 365$) 计算得到的日气候值通常包含了要素日际变化的高频噪音。如果某日数据存在缺失, 这种影响会加剧 (Arguez and Applequist, 2013)。为了减少这种高频噪声, 可根据傅里叶级数理论, 对通过算数平均得到的累年日值序列 X_t 用多个不同周期的简谐波的形式表示, 分析得到序列变化规律。

序列 X_t 可展开成傅立叶级数, 取 M 个叠加得到谐波处理后的序列 $f(t)$:

$$f(t) = a_0 + \sum_{k=1}^M [a_k \cos(\omega_k t) + b_k \sin(\omega_k t)], \quad (1)$$

$$\omega_k = \frac{2\pi k}{N}, \quad (2)$$

$$a_0 = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N X_t, \quad (3)$$

$$a_k = \frac{2}{N} \sum_{t=1}^N X_t \cos \frac{2\pi k(t-1)}{N}, \quad (4)$$

$$b_k = \frac{2}{N} \sum_{t=1}^N X_t \sin \frac{2\pi k(t-1)}{N}, \quad (5)$$

其中, $f(t)$ 为谐波处理后时间序列的第 t 个日气候值。 N 为样本数, t 的取值范围为 1 到 $N=365$ 。 M 小于 $N/2$ 。 M 越小, 序列越光滑, 但拟合误差越大; M 越大, 越逼近与原序列; M 取适当的数值, 在减少高频噪音的同时又能使拟合误差较小。考虑到台站日气候值应与月气候值相匹配这一约束条件, 在进行谐波截断时, 选取截取波数为 7 波及以下、且其计算所得的日气候值资料的月气候值与各站月气候值数据最接近的波数。

表 2 给出云南昌宁与内蒙乌拉特前旗滤波处理前后累年日值序列计算的累年月值相对于该站月气候值的标准差。截断波数从 1 到 7 时, 昌宁站的日平均、最高和最低气温误差随阶段波数增加而减小, 至 $M=7$ 时达最低值。与之不同, 乌拉特前旗的日平均气温、最高和最低气温误差最小时对应的阶段波数分别为 4 和 5。谐波处理后两个站日气候值计算的月值序列与月气候值更为接近。谐波处理前日际气温变化明显, 而经过谐波处理后日际气温更加连续, 日平均气温的峰值分布更加合理 (图 2)。评估表明, 当截断波数取 7 波数及以下时, 96.4%

表 2 谐波处理前后 1991~2020 年累年气温日值序列误差

Table 2 Error of the annual temperature daily value series from 1991 to 2020 before and after harmonic processing

		X_t	$f(t)$						
			$M=1$	$M=2$	$M=3$	$M=4$	$M=5$	$M=6$	$M=7$
昌宁(站号: 56843)	Tave	0.13	4.65	0.84	0.36	0.18	0.14	0.10	0.07*
	Tmax	0.09	3.07	1.05	0.18	0.17	0.10	0.08	0.07*
	Tmin	0.12	6.34	0.68	0.51	0.21	0.16	0.14	0.09*
乌拉特前旗(站号: 53433)	Tave	0.13	12.18	1.24	0.44	0.09*	0.09	0.13	0.14
	Tmax	0.12	12.30	1.61	0.49	0.16	0.11*	0.12	0.11
	Tmin	0.12	11.78	1.10	0.56	0.14	0.12*	0.15	0.15

注: Tave为平均气温; Tmax为最高气温; Tmin为最低气温, *代表某个站某个要素截断波数从1到7时序列误差达到最小。

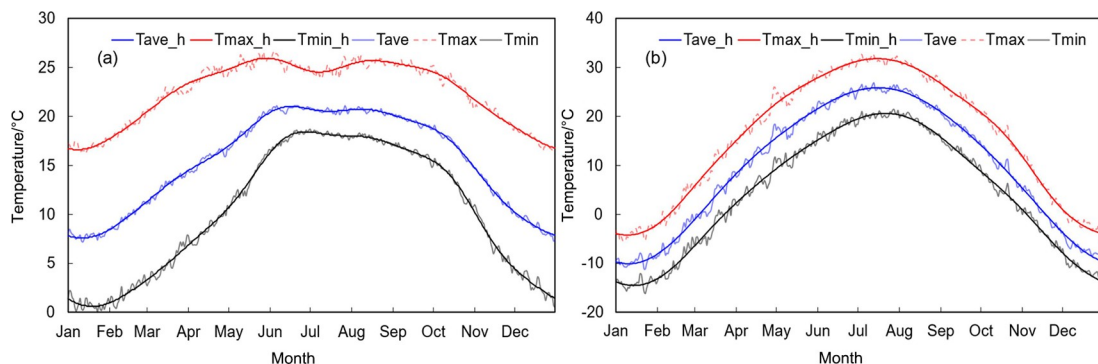


图 2 (a) 云南昌宁与 (b) 内蒙乌拉特前旗谐波处理前 (Tave、Tmax、Tmin) 后 (Tave_h、Tmax_h、Tmin_h) 的 1991~2020 年累年气温日值序列。

Fig. 2 Daily temperature before (Tave, Tmax, Tmin) and after (Tave_h, Tmax_h, Tmin_h) harmonic treatment from 1991 to 2020 in (a) Changning, Yunnan and (b) Wulatqian Banner, Inner Mongolia.

的站点的平均气温日气候值误差小于原序列, 其余站点的误差与原序列相比增加均不超过 0.04°C 。总的来说, 经过谐波处理后, 统计得到的日气候值在体现气象变量季节性转换的同时, 又避免了日与日之间的异常突变特征, 具有更好的气候代表性。该方法也被应用于降水和日照的日气候值统计。

Xie et al. (2007) 在研制东亚地区日降水产品时, 对 1978~1997 年的日降水量进行 20 年累年平均得到的 365 个日历日时间序列进行谐波处理, 建立了各站点的日降水气候值。考虑到 1981~2010 年中国地面气候值数据集提供的降水日气候值未经谐波处理, 为适应不同应用需求, 在 1991~2020 年中国地面气候值数据集, 同时提供了谐波处理前后的累年日降水序列。广西防城港 (站号: 59626) 为例 (图 3), 该站降水的季节变化在傅里叶截断后的时间序列中得到很好的表示, 而由于采样不足引起的高频噪音则被有效的剔除。另一方面, 未经谐波处理的累年日降水量序列可以为当日历史上是否出现强降水事件提供一个参考信息。如该站因 2015 年 7 月 28 日出现强降水事件 (日降水量为 318.8 mm), 未经谐波处理的累年日降水量为 32.1 mm, 明显高于谐波处理后的气候值 (20.8 mm)。

3.4 分段处理

气候学界很早就开始注意到气候序列的均一性

问题, 一般认为, 所谓均一的气候序列是指其变化仅受气候条件的影响 (么枕生等, 1963)。长期气象观测序列不可避免地受到迁址、仪器更新、观测规则变化等非自然因素的影响, 导致相关时段的子序列之间存在系统性的偏差, 即非均一性 (严中伟等, 2014)。资料的非均一性可能明显影响标准气候值的统计 (Peterson et al., 1994; Easterling and Peterson, 1995), 严格意义上的气候标准值应该是排除任何非均一性的 (张志富, 2009)。因此, 有必要对序列存在明显非均一性断点的站点进行分段统计。本数据集研制过程中, 对这些站点进行了分段处理。具体做法如下:

(1) 对于迁站水平距离超过 50 km 或海拔高度变化大于 100 m 的台站迁址前后的序列, 如果没有进行均一化, 则考虑进行分段统计。依据观测站站址迁移信息, 共有 131 个站点在观测站址迁移后需要进行分段统计。

(2) 对平均气温、最高气温和最低气温, 还需在 (1) 基础上, 对气温序列事先进行均一性检验 (Cao et al., 2016)。当某站统计时段内的年最高气温、年最低气温及年平均气温中至少 2 个存在不连续点, 且不连续点前后序列均值差异不低于 0.5°C 时, 将该点作为该站人工分段的时间点。基于气温非均一性检验结果补充对 128 个台站的气温

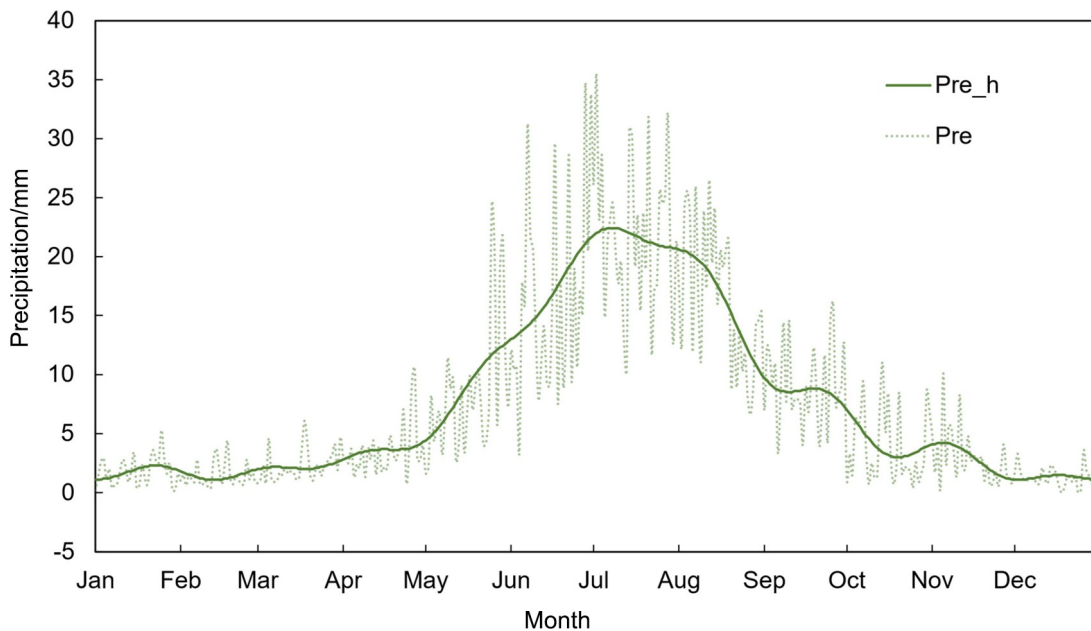


图 3 广西防城港站谐波处理前 (曲线 Pre) 后 (曲线 Pre_h) 的 1991~2020 年累年降水日值序列。

Fig. 3 Daily precipitation over the years before (line: Pre) and after (line: Pre_h) harmonic treatment from 1991 to 2020 at Fangchenggang station in Guangxi.

序列进行分段处理, 这些断点均对应着站址迁移、环境变化以及观测方式改变等相应的元数据变化。

(3) 对于能见度相关要素, 由于人工观测与自动观测存在明显非均一性, 在(1)和(2)基础上, 从元数据中提取的各台站人工、自动观测切换时间信息, 将切换时间作为断点加入上述分段中形成针对能见度的分段区间, 并基于该分段区间对人工观测时段能见度序列和自动观测时段能见度序列进行了分别统计。由于大部分台站于2010~2014年间进行能见度人工自动切换, 自动观测时段不足10年, 将自动观测时段统计结果作为参考气候值。

4 评估结果

本节主要给出了1991~2020年中国地面气候值的整体概况, 以及气温、降水、能见度、风速共4个要素的标准气候值的评估结果。评估主要分析了以上要素空间分布特征、与1981~2010年差值空间分布及频数分布、气候趋势分析、差异较大台站时序分析等。

4.1 站点数

得益于中国地面自动观测系统的发展及观测数据完整性和质量的提升, 与以往发布的几套中国地面气候值数据集相比, 1991~2020年统计周期提供的地面气候值站点数最多(表3)。其中, 超过98%的站点为中国气象局当前业务观测站点。已有国家级业务考核站点中, 仅15个新建站点由于观测时间不满10年, 无法提供相应的气候平均值。

表4给出1991~2020年统计周期内14个要素的年气候值包含的站点数。积雪、地温、降水、湿度、日照、温度、水汽压、天气现象的完整性均超过99%。除1个季节观测站(吉林天池, 站号54287)外, 所有站点均提供了气温的年气候值。风的年气候值站点数比气温少53个站, 这主要是

由于在人工观测阶段, 这些站点缺少北京时02时的夜间观测数据。由于长期进行一日4次云量观测的台站仅有683个, 其余多数台站云量观测为一日3次, 依据气候值统计方法, 一日3次观测的台站的云量日平均值记为缺测, 相应的年气候值为缺测, 因此云的年气候值站点数只有683个。由于小型蒸发观测受仪器自身辐射等因素影响较大, 观测蒸发量与实际蒸发存在较大偏差。1985年开始, 我国开始陆续使用更加接近实际水面观测的大型蒸发器皿(E-601等)。考虑到大型蒸发和小型蒸发观测之间的系统偏差(Xiong et al., 2012), 分别给出大型蒸发(390个站)和小型蒸发观测(2352个站)的蒸发量气候值。

4.2 气温

图4给出了1991~2020年全国各台站累年年平均气温、最高气温和最低气温的空间分布。可以看出, 平均气温、最高气温和最低气温均呈现出东南地区暖、西北和东北地区偏冷的基本气候特征。

图5为1991~2020年与1981~2010年全国各台站累年年平均气温、最高气温和最低气温差异的空间分布。相较于1981~2010年, 大部分台站1991~2020年年平均气温、最高气温、最低气温整体有所上升, 上升值在0.5°C以内, 全国2357个站中, 1991~2020年比1981~2010年年平均气温升高的站占96.6%, 我国大部分地区呈现变暖趋势。全国分别有86.8%、86.4%、72.4%的台站年平均气温、最高气温、最低气温上升0.1°C~0.5°C; 有9.4%、10.1%、20.5%的台站年平均气温、最高气温、最低气温上升0.5°C~1.0°C(图6)。

1991~2020年较1981~2010年年平均气温气候值差异最大的台站为云南元阳站(56976)和青海同德站(52957)。其中元阳站的1991~2020年与1981~2010年年平均气温、最高气温和最低气温气候值差异分别为8.0、9.9和6.7°C(表5)。

表3 各统计时段的中国地面气候值数据集站点数

Table 3 Number of stations for the China ground climate normals in each statistical period

统计时段	1961~1990年	1971~2000年	1981~2010年	1991~2020年
站数	647	722	2414	2438

表4 各要素年气候值站点数

Table 4 Number of stations of each variable

要素	云	蒸发	冻土	积雪	地温	降水	气压	湿度	日照	温度	水汽压	能见度	天气现象	风
站数	683	2352	1204	2431	2419	2436	2360	2430	2421	2437	2429	2309	2424	2431

表 5 云南元阳站不同统计周期的累年年平均值

Table 5 Annual mean over the years of different statistical periods at Yuanyang station, Yunnan Province

要素项	1998~2020年平均值	1981~1996年平均值	差值
平均气温	24.5	16.5	8.0
平均最高气温	30.6	20.7	9.9
平均最低气温	20.4	13.7	6.7

由于元阳站在 1997 年迁站, 海拔由 1542.6 m 变为 257.1 m, 导致气温序列在 1997 年出现断点, 迁站前气温偏低, 迁站后偏高 (图 7)。同德站的 1991~2020 年与 1981~2010 年年平均气温气候值差值为 3.1°C, 主要由于同德站在 2001 年 1 月迁站, 海拔由 3289.4 m 下降为 3080.0 m, 导致气温序列在

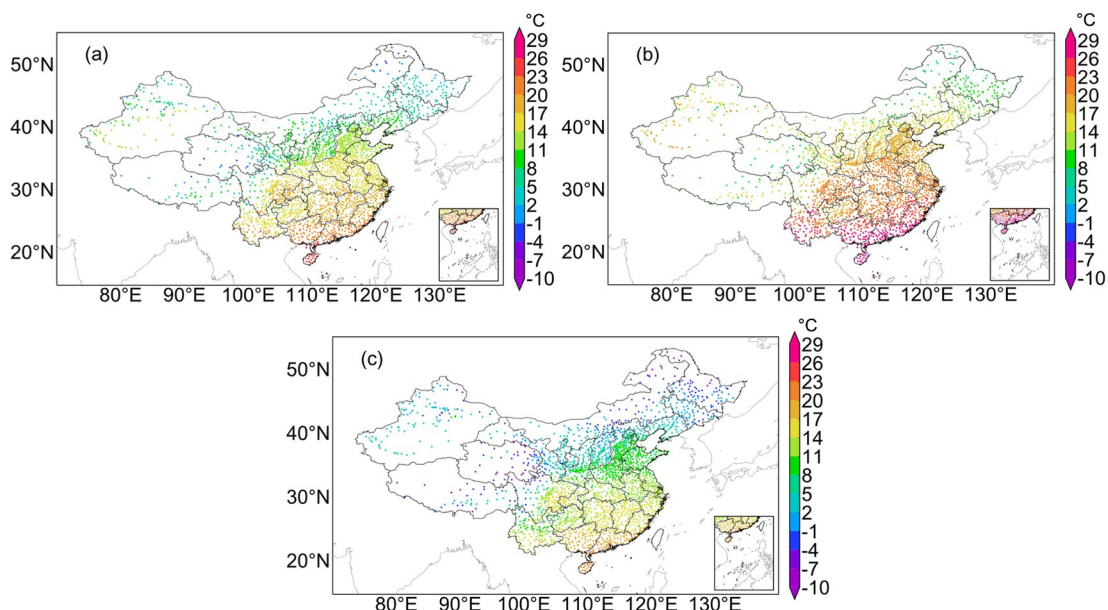


图 4 1991~2020 年全国各台站累年 (a) 年平均气温、(b) 最高气温、(c) 最低气温空间分布。

Fig. 4 The spatial distribution of (a) annual mean temperature, (b) annual maximum temperature and (c) annual minimum temperature over the years at various stations in China for 1991–2020.

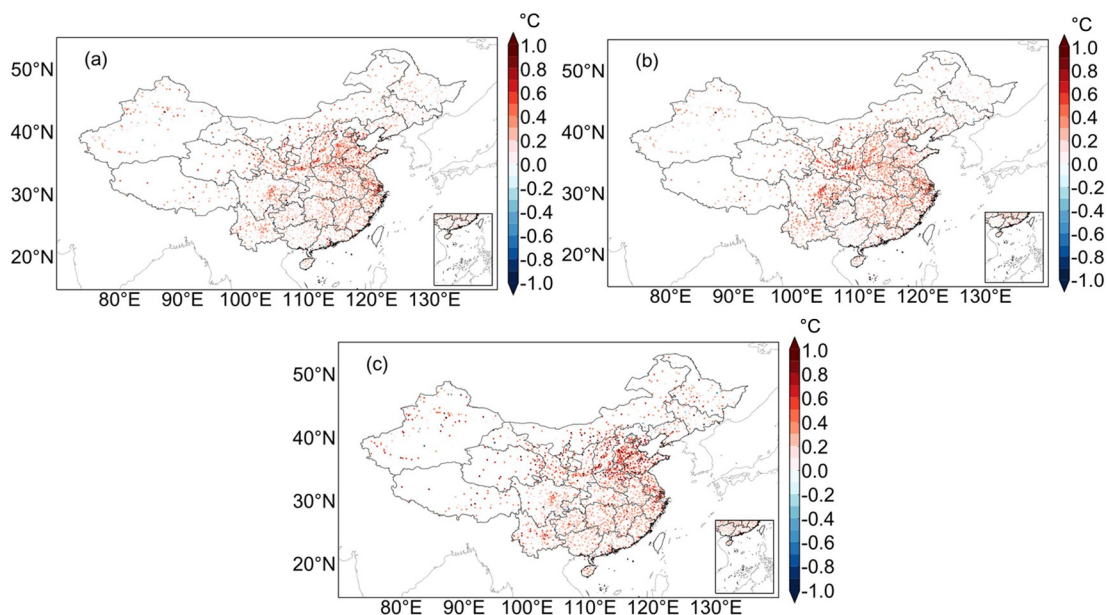


图 5 1991~2020 年与 1981~2010 年全国各台站累年 (a) 年平均气温、(b) 最高气温、(c) 最低气温差空间分布。

Fig. 5 The spatial distribution of (a) annual average temperature, (b) maximum temperature, and (c) minimum temperature difference at various stations in China from 1991 to 2020 and from 1981 to 2010.

2001 年后出现突然升高，而表现为该站平均气温、最高气温、最低气温气候值升高较多。由于迁站带来的海拔高度、地理位置、观测环境等的变化，导致包括气温、降水、风速、相对湿度、气压等序列均出现断点，从而 1991~2020 年较 1981~2010 年气候值差异较大。

气温类要素统计项中还包括采暖度日数和制冷度日数。采暖度日数是一年 365 天中，当室外日平均温度低于 18°C 时，将低于 18°C 的度数乘以 1 天，当室外日平均温度高于 18°C 时，乘积为 0，

将此 365 个乘积累加，为该年采暖度日数；类似地，制冷度日数是一年中，当室外日平均温度高于 26°C 时，将高于 26°C 的度数乘以 1 天，并将此乘积累加。累年平均月采暖（制冷）度日数为为历年该月采暖（制冷）度日之累年算术平均；累年平均年采暖（制冷）度日数为累年平均各月采暖（制冷）度日数之和。分析了 1991~2020 年与 1981~2010 年采暖度日数、制冷度日数差异频数分布（图略），与全国绝大部分台站年平均气温气候值呈升高趋势一致，全国大部分地区采暖度日数呈减小趋势，制

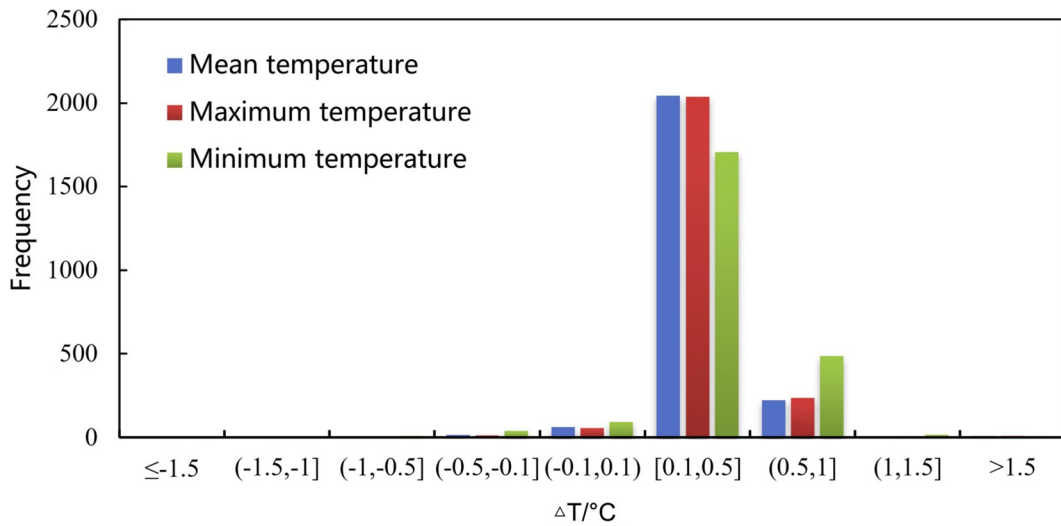


图 6 1991~2020 年与 1981~2010 年全国各台站累年年平均气温、最高气温、最低气温差频数分布。

Fig. 6 Frequency distribution of the annual average, maximum, and minimum temperature differences at all stations in China over the years in 1991–2020 and 1981–2010.

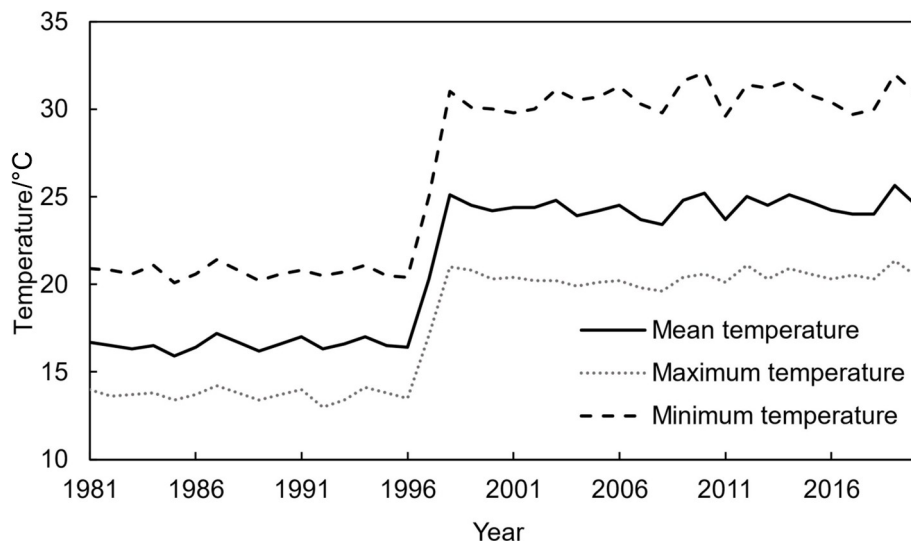


图 7 1981~2020 年元阳站年平均气温、最高气温、最低气温序列。

Fig. 7 Series of annual mean, maximum, and minimum temperatures at Yuanyang station from 1981 to 2020.

冷度日数呈增大趋势。其中, 23.5% 台站 1991~2020 年较 1981~2010 年采暖度日数差异小于 -100°C d ; 7.0% 台站 1991~2020 年较 1981~2010 年制冷度日数差异大于 30°C d 。

4.3 降水

将 1991~2020 年和 1981~2010 年累年年降水量 (图 8) 对比评估, 可以看出 1991~2020 年我国的年降水量南多北少, 最大降水区域在海南沿海, 年降水量不超过 2800 mm。相比 1981~2010 年年降水量气候值 (图略), 1991~2020 年年降水量在我国东北地区、西北地区增多, 在我国长江以南大部分地区也呈增多趋势, 在云南、河南、陕西等省降水量减少, 86.5% 站点年降水量 1991~2020 年气候值与 1991~2020 年气候值差值在 $-50\sim 50\text{ mm}$ 之间, 98.5% 站点年降水量 1991~2020 年气候值与 1991~2020 年气候值差值在 $-100\sim 100\text{ mm}$ 之间。其中有 1094 个站年降水量 (占比 46.4%) 降水增多 $5\sim 50\text{ mm}$, 586 个站年降水量 (占比 24.9%) 降水减少 $5\sim 50\text{ mm}$ (图 9)。差值超过 $\pm 200\text{ mm}$ 的站点有两个 (表 6), 分别是云南元阳站 (56976) 和广东南海 (59288), 两站分别于 1997 年和 1991 年发生迁站, 导致年降水序列出现断点 (图略), 从而使前后两段时间的年降水量气候值产生

较大差异。

表 7 分别给出了 1991~2020 年平均日降水量 $\geq 0.1\text{ mm}$ 、 $\geq 10\text{ mm}$ 、 $\geq 25\text{ mm}$ 、 $\geq 50\text{ mm}$ 天数相比 1981~2010 年平均日降水量 $\geq 0.1\text{ mm}$ 、 $\geq 10\text{ mm}$ 、表 6 1991~2020 年与 1981~2010 年年降水量气候值差值大于 200 mm 的台站

Table 6 Stations with the annual precipitation difference of 200 mm between 1991–2020 and 1981–2010

站号	1991~2020气候值/mm	1981~2010气候值/mm	差值/mm
56976	848.9(1997~2020年)	1434.3(1981~1997年)	-585.4
59288	1793.9(1991~2020年)	1553.8(1981~1991年)	240.1

表 7 1991~2020 年与 1981~2010 年各降雨等级降水日数差值情况

Table 7 Difference of the precipitation days of various rainfall levels between 1991–2020 and 1981–2010

降雨等级	日数增多站数 占全部站数	日数减少站数 占全部站数	二者持平站数 占全部站数
小雨 (0.1~9.9 mm)	28.7%	69.7%	1.6%
中雨 (10.0~24.9 mm)	63.4%	31.6%	5.0%
大雨 (25.0~49.9 mm)	57.9%	29.4%	12.7%
暴雨及以上 (大于50.0 mm)	48.4%	27.1%	24.5%

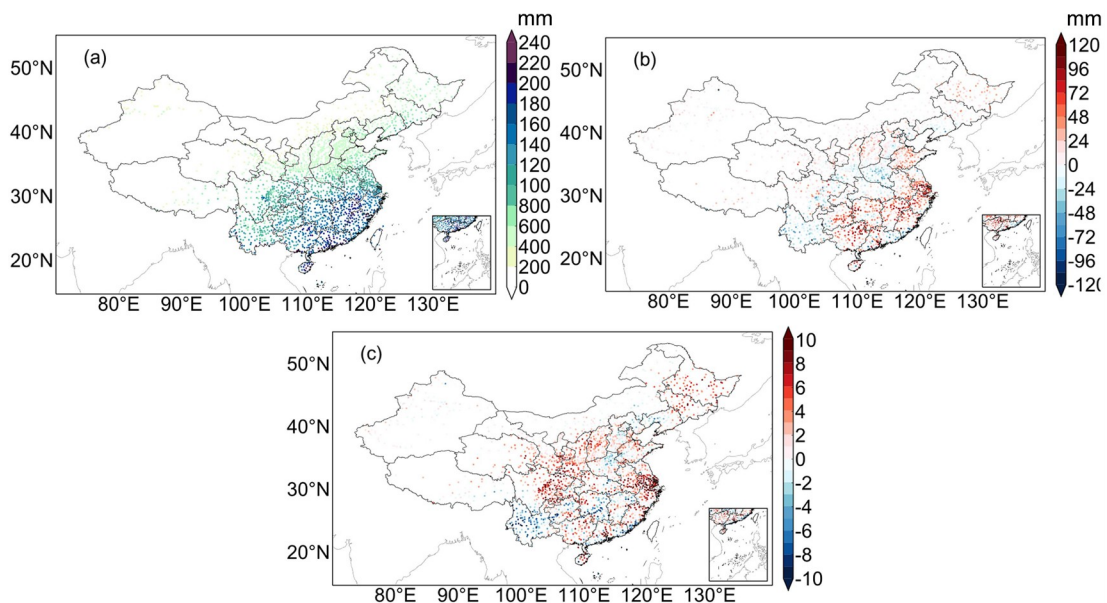


图 8 (a) 1991~2020 年年降水量标准气候值 (单位: mm), (b) 1991~2020 年与 1981~2010 年年降水量标准气候值差值 (单位: mm), (c) 1991~2020 年全国各站年降水量变化线性趋势 (通过 0.01 显著性检验, 单位: mm a^{-1})

Fig. 8 (a) Annual precipitation (units: mm) normals for 1991–2020. (b) Difference between the annual precipitation normals for 1991–2020 and comparable averages for 1981–2010 (units: mm). (c) Linear trend of the annual precipitation at various stations in China from 1991 to 2020 (only the trends significant at the 99% level are shown, units: mm a^{-1}).

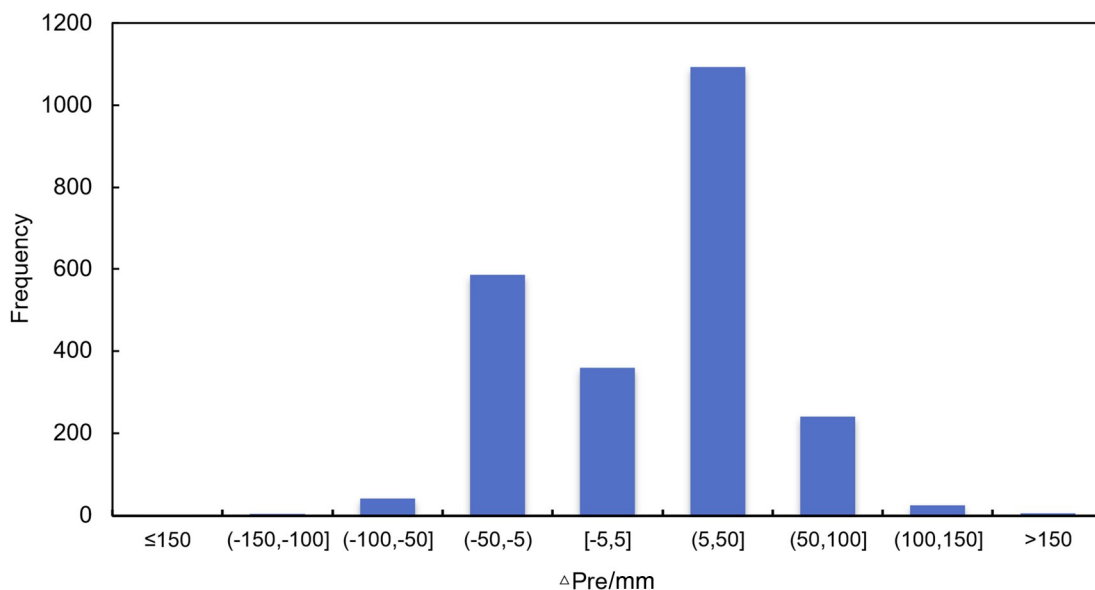


图9 1991~2020年与1981~2010年全国各台站累年年降水量差值频数分布。

Fig. 9 Frequency distribution of the annual precipitation differences at all stations in China over the years in 1991–2020 and 1981–2010.

≥25 mm、≥50 mm 日数增多、减少和持平的站数占全国站数的百分比情况。可以看出，全国 28.7% 的台站 1991~2020 年小雨日数相比 1981~2010 年增多，69.7% 的台站 1991~2020 年小雨日数减少；与小雨日数的情况相反，63.4% 的台站 1991~2020 年中雨日数增多，31.6% 的台站 1991~2020 年中雨日数减少；57.9% 的台站 1991~2020 年大雨日数增多，29.4% 的台站 1991~2020 年大雨日数减少；48.4% 的台站 1991~2020 年暴雨日数增多，27.1% 的台站 1991~2020 年暴雨日数减少。也就是说，1991~2020 年相比 1981~2010 年大部分台站有降水的日数减少，而出现中雨、大雨、暴雨及以上降水的日数增多，这与近年来极端天气气候事件增多有关。

4.4 能见度

2010 年以后全国各台站陆续由人工能见度观测转为自动能见度观测。人工向自动观测的切换对资料序列的均一性产生一定影响。因此能见度统计过程中，除了依照迁站信息（与其他要素相同）的断点设置所获取的 1991~2020 标准气候值外，还对人工观测时段能见度序列和自动观测时段能见度序列进行了分别统计，作为临时和参考气候值提供不同需求的用户使用。各站点（共 2049 个）分布和人工自动观测切换时间如图 10 所示，可见全国范围内仪器切换的时间主要集中在 2014~2016 年。

图 11 为 1991~2020 年累年能见度小于 10 km

频率标准气候值（即未进行人工和自动分段时的统计结果）与 1981~2010 年对应项目的差值频数分布，可见两者能见度差值呈现正态分布，整体上能见度小于 10 km 频率有所增加，说明能见度下降。频率前后两次的差值数值在 0~2% 之间分布的台站数量最多。

临时气候值（人工观测时段）与参考气候值（自动观测时段）相较于未进行人工自动分段的标准气候值的差值呈现的趋势基本一致，但数值有所差异（图 12）。以北京站（54511）为例，能见度月值的临时气候值整体上低于标准气候值，而代表自动观测的参考气候值则高于标准气候值，且参考气候值能见度 < 10 km 的频率月值与标准气候值和临时气候值在数值上差异较为明显，说明自动观测时段获取的能见度数据与人工观测时段数据有较为明显的非均一性。

能见度临时气候值、参考气候值与标准气候值的差值空间分布同样体现了上述特点（图 13）。自动观测数据统计的能见度 < 10 km 频率累年值仅在四川东部以及珠江三角洲等少数地区减少，在全国大部分地区都明显增高，在切换为仪器自动观测后，四川东部与珠江三角洲地区能见度观测数值提升，而全国其他地区能见度数值则降低。空间分布同样反应了自动观测较为明显的非均一性。

4.5 风

1991~2020 年全国各台站年平均风速气候值

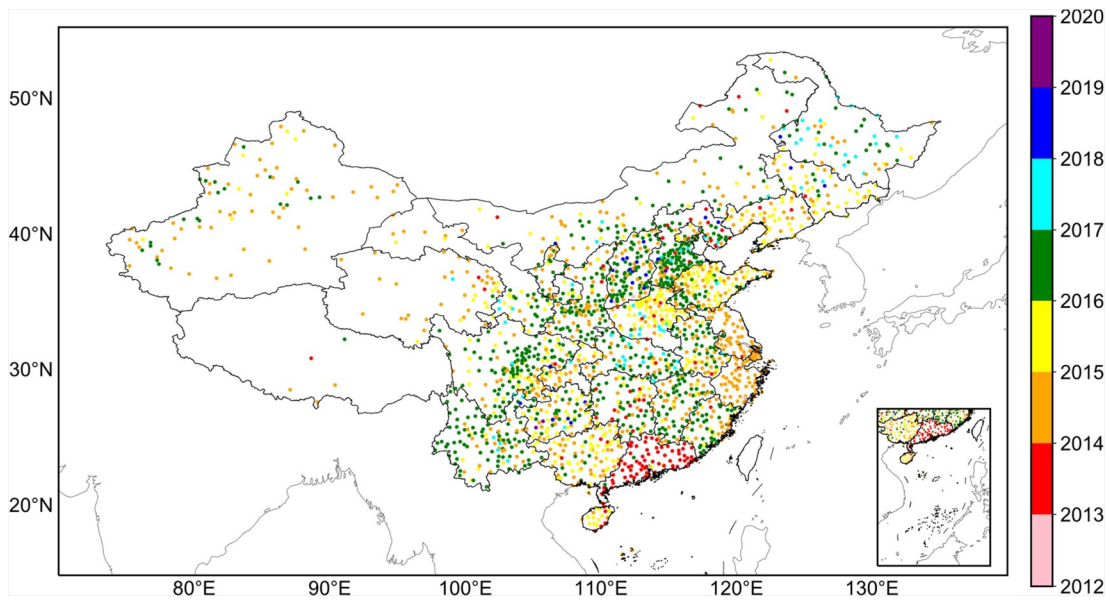


图 10 能见度台站分布及人工自动切换时间。
Fig. 10 Map showing the visibility station distribution and manual automatic switching time.

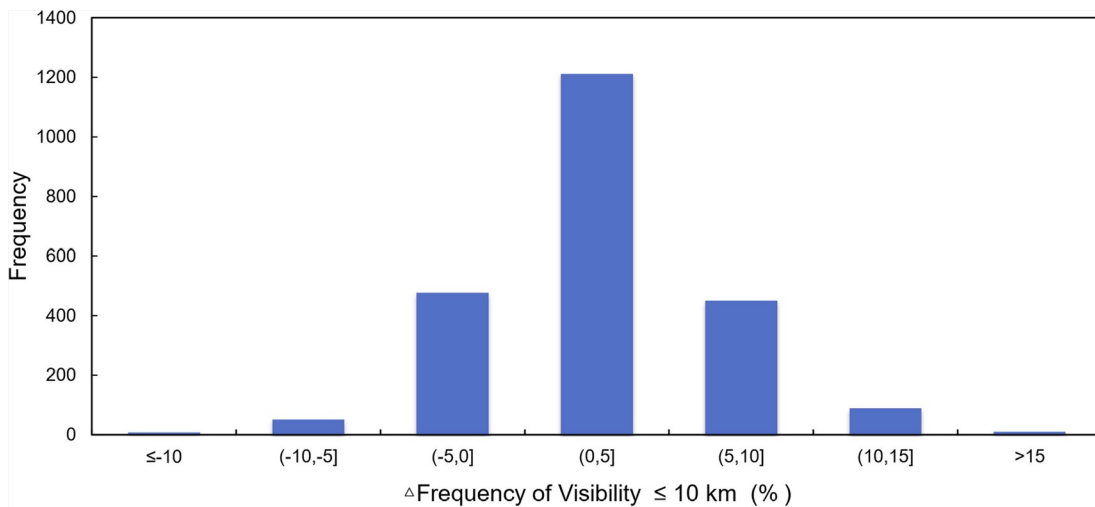


图 11 1991~2020 年与 1981~2010 年全国各台站累年能见度小于 10 km 频率差值频数分布。
Fig. 11 Frequency distribution of the frequency difference of visibility less than 10 km at all stations in China between 1991-2020 and 1981-2010.

如图 14a 所示，年平均风速数值主要集中在 $0.8 \sim 3.6 \text{ m s}^{-1}$ ，最大频数出现在 $1.8 \sim 2.0 \text{ m s}^{-1}$ 区间。

由 1991~2020 年与 1981~2010 年两版气候值对应站点平均风速差值 (图 14b)，结合频数分布 (图 15) 可知，差值频数分布基本呈正态分布，绝大部分站点两者的差值在 $\pm 0.4 \text{ m s}^{-1}$ 之间，平均风速减小的站点数略多于风速增大的站点数，平均风速增大的站点主要集中于广东、广西、福建等地区，而江苏、安徽、山东等东部地区风速减小较为明显。总之，前后两套气候值产品的年平均风速变

化较小。

5 结论与讨论

1991~2020 年中国地面气候值数据集提供了中国 2438 个站点的气温、降水等共 14 个要素的气候值。相对于 1981~2010 年中国地面气候值数据集，在标准气候值、临时气候值的基础上，增加了参考气候值，数据集提供的基于自动观测统计得到的能见度参考气候值，为能见度监测评估提供了一套与当前观测方式一致、代表性更好的气候背景场；

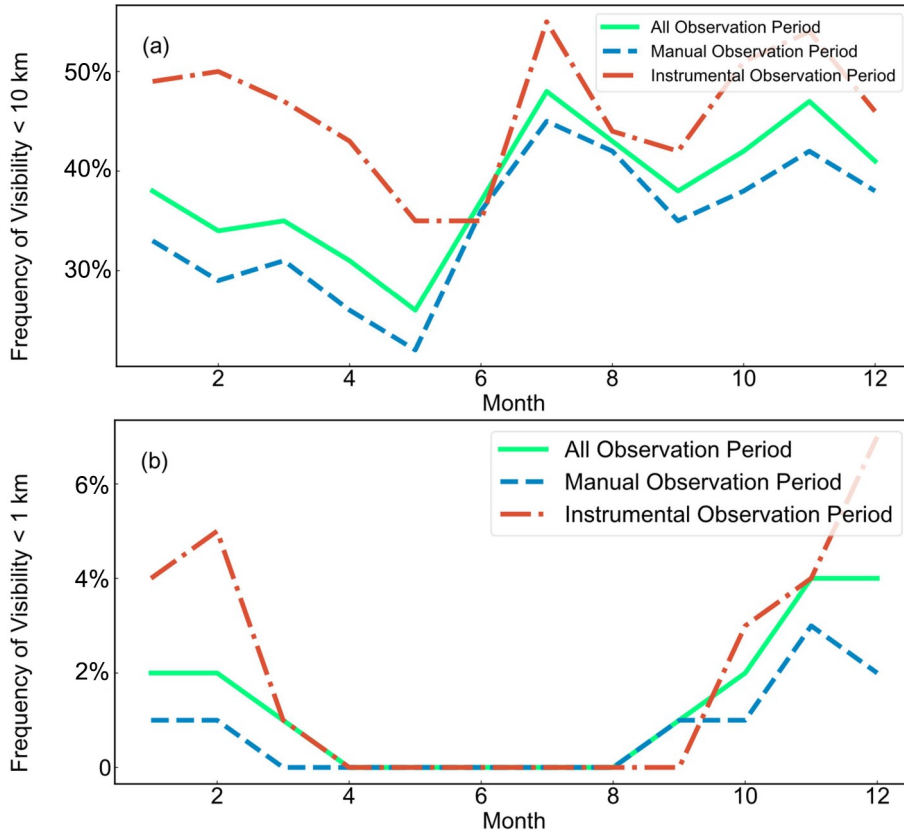


图 12 完整时段（1991~2020 年，绿线）、人工观测时段（1991 年 1 月至 2013 年 8 月，蓝线）以及自动观测时段（2013 年 9 月至 2020 年 12 月）北京站能见度 (a) <10 km 频率月值，(b) <1 km 频率月值。

Fig. 12 Frequency of visibility at Beijing station in each period with (a) less than 10 km frequency and (b) less than 1 km frequency during the complete period (1991–2020, green line), manual observation period (199101–201308, blue line), and automatic observation period (201309–202012, red line).

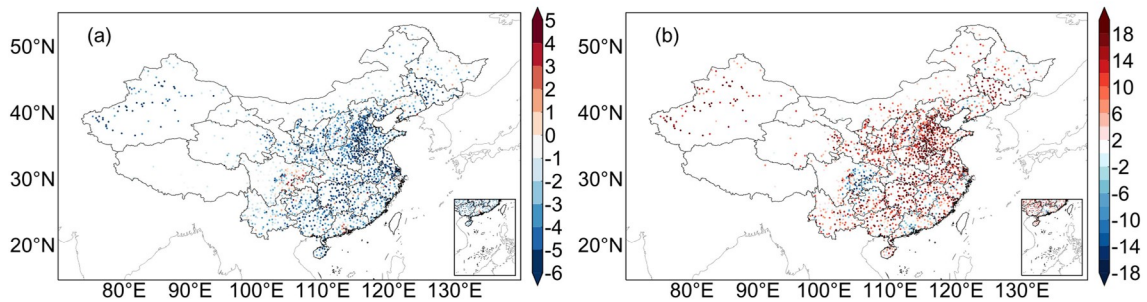


图 13 能见度<10 km 频率年临时 (a) 气候值、(b) 参考气候值与 1991~2020 年标准气候值差值的空间分布。

Fig. 13 Spatial distribution of the frequency difference of visibility less than 10 km between (a) temporary normals, (b) reference normals, and 1991–2020 climate normals.

新增开展了 2400 多个国家级地面站的经纬度、海拔高度的时序变化合理性分析，订正了历史元数据存在的一些质量问题，包括异常跳变问题、多个数据源（历史沿革文件、A 文件、地面日值数据集、站址迁移发文等）的元数据不一致问题，提高了用

于统计气候值的数据源的质量。为减少气温、降水日际变化的高频噪音，在计算日气候值时，根据傅里叶级数理论，对通过算数平均得到的累年日值序列进行了谐波处理，谐波处理后得到的日气候值在体现气象变量季节性转换的同时，又避免了日与日

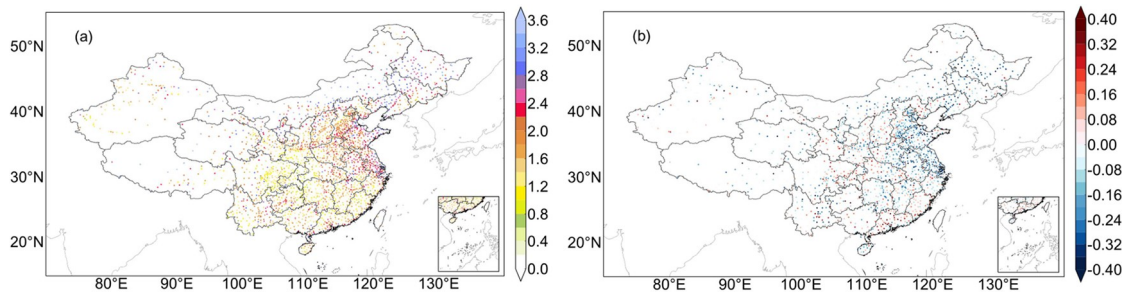


图 14 (a) 1991~2020 年全国各台站年平均风速 (单位: m s^{-1}) 气候值, (b) 1991~2020 年与 1981~2010 年年平均风速气候值差异 (单位: m s^{-1})

Fig. 14 (a) Annual mean wind speed normals at various stations in China for 1991–2020 (units: m s^{-1}). (b) Differences in annual average wind speed and climate values between 1991–2020 and 1981–2010 (units: m s^{-1}).

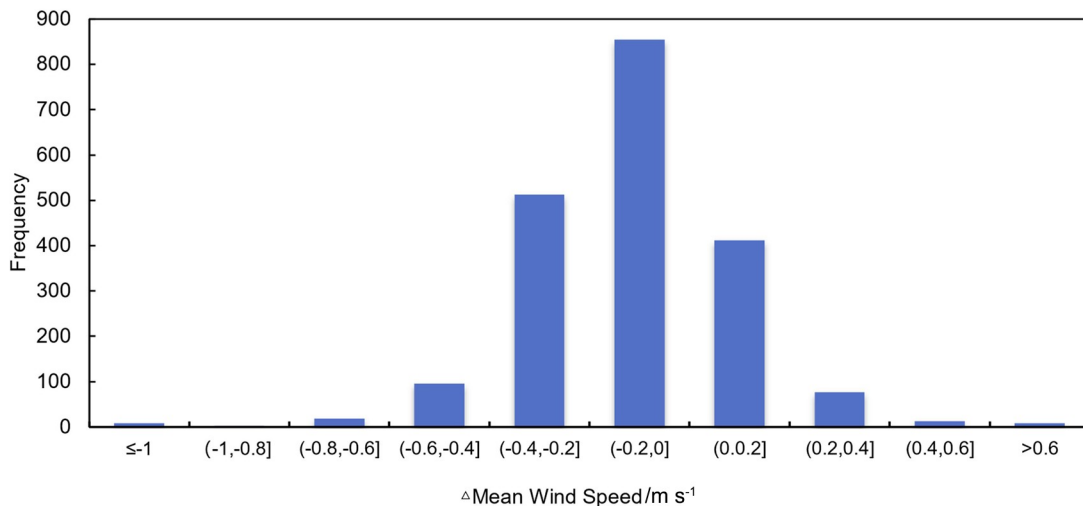


图 15 1991~2020 年与 1981~2010 年全国各台站年平均风速气候值差异频数分布。

Fig. 15 Frequency distribution of the annual mean wind speed difference at all stations in China between 1991–2020 and 1981–2010.

之间的异常突变特征, 具有更好的气候代表性。

分析了气温、降水、能见度、风速共 4 个要素的空间分布特征、与 1981~2010 年标准值差异分析、气候趋势分析。主要得到以下结论: (1) 相较于 1981~2010 年, 我国大部分地区呈现变暖趋势, 96.6% 的台站 1991~2020 年年平均气温、最高气温、最低气温整体有所上升。(2) 1991~2020 年年降水量相比 1981~2010 年年降水量, 我国东北地区、西北地区、长江以南大部分地区呈增多趋势, 云南、河南、陕西等省降水量减少。1991~2020 年出现中雨、大雨、暴雨及以上降水的日数增多。(3) 人工观测时段统计结果与全时段统计数值相近, 而自动观测时段获取的统计结果与前两者存在明显差异, 说明人工、自动观测时段数据有较为明显的非均一性, 在进行气候和环境研究时不能忽视切换前后的数值变化。(4) 1991~2020 年与 1981~

2010 年相比, 平均风速减小的站数略多于风速增大的站数, 平均风速增大的地区主要位于广东、广西、福建、四川东部、重庆、湖北西部等地区。

1991~2020 年中国地面气候值数据集已提供全国各级气象业务部门应用。后续将通过中国气象数据网 (<http://data.cma.cn/>[2022-03-01]) 向社会公众用户释放。

致谢 衷心感谢新疆维吾尔自治区气象信息中心李秦、国家气候中心任玉玉、支蓉、湖北省气象局秦运龙在数据集研制过程中给予的支持和帮助。

参考文献 (References)

Arguez A, Vose R S. 2011. The definition of the standard WMO climate normal: The key to deriving alternative climate normals [J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 92(6): 699–704. doi:10.1175/2010BAMS2955.1

- Arguez A, Applequist S. 2013. A harmonic approach for calculating daily temperature normals constrained by homogenized monthly temperature normals [J]. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 30(7): 1259–1265. doi:10.1175/JTECH-D-12-00195.1
- Arguez A, Durre I, Applequist S, et al. 2012a. NOAA's 1981–2010 U. S. climate normals: An overview [J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 93(11): 1687–1697. doi:10.1175/BAMS-D-11-00197.1
- Arguez A, Applequist S, Vose R S, et al. 2012b. NOAA's 1981–2010 climate normals methodology of temperature-related normals [R]. NCDC Report, 7.
- Cao L J, Zhu Y N, Tang G L, et al. 2016. Climatic warming in China according to a homogenized data set from 2419 stations [J]. *Int. J. Climatol.*, 36(13): 4384–4392. doi:10.1002/joc.4639
- 丁一汇, 王会军. 2016. 近百年中国气候变化科学问题的新认识 [J]. *科学通报*, 61(10): 1029–1041. Ding Y H, Wang H J. 2016. Newly acquired knowledge on the scientific issues related to climate change over the recent 100 years in China [J]. *Chinese Sci. Bull. (in Chinese)*, 61(10): 1029–1041. doi:10.1360/N972015-00638
- Easterling D R, Peterson T C. 1995. A new method for detecting undocumented discontinuities in climatological time series [J]. *Int. J. Climatol.*, 15(4): 369–377. doi:10.1002/joc.3370150403
- Guttman N B. 1989. Statistical descriptors of climate [J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 70(6): 602–607. doi:10.1175/1520-0477(1989)070<0602:SDOC>2.0.CO;2
- Landsberg H E. 1955. Weather “normals” and normal weather [J]. *Wkly Wea. Crop Bull.*, 42: 7–8.
- 李庆祥 廖捷, 徐文慧, 等. 2018. 基准气候数据及气候变化观测 [M]. 北京: 气象出版社, 352pp. Li Qingxiang. 2018. *Baseline Climate Data and Climate Change Observation (in Chinese)* [M]. Beijing: China Meteorological Press, 352pp.
- 李晓燕, 翟盘茂, 任福民. 2005. 气候标准值改变对 ENSO 事件划分的影响 [J]. *热带气象学报*, 21(1): 72–78. Li Xiaoyan, Zhai Panmao, Ren Fumin. 2005. Redefining ENSO episodes based on changed climate references [J]. *J. Trop. Meteor. (in Chinese)*, 21(1): 72–78. doi:10.3969/j.issn.1004-4965.2005.01.008
- 刘璐, 冉令坤, 周玉淑, 等. 2015. 北京“7.21”暴雨的不稳定性及其触发机制分析 [J]. *大气科学*, 39(3): 583–595. Liu Lu, Ran Lingkun, Zhou Yushu, et al. 2015. Analysis on the instability and trigger mechanism of torrential rainfall event in Beijing on 21 July 2012 [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 39(3): 583–595. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1407.14144
- 刘宁微, 马雁军, 王扬锋, 等. 2012. 辽宁中部地区大气能见度器测与目测数据的对比分析 [J]. *环境科学研究*, 25(10): 1120–1125. Liu Ningwei, Ma Yanjun, Wang Yangfeng, et al. 2012. Comparative analysis of atmospheric visibility data from the middle area of Liaoning Province using instrumental and visual observations [J]. *Res. Environ. Sci. (in Chinese)*, 25(10): 1120–1125. doi:10.13198/j.res.2012.10.47.liunw.014
- Lu S, Hu Z Y, Yu H P, et al. 2021. Changes of extreme precipitation and its associated mechanisms in Northwest China [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 38(10): 1665–1681. doi:10.1007/s00376-021-0409-3
- 么枕生. 1963. *气候统计* [M]. 北京: 气象出版社, 594pp. Yao Zhensheng. 1963. *Climate statistics (in Chinese)* [M]. Beijing: China Meteorological Press, 594pp.
- Peterson T C, Easterling D R. 1994. Creation of homogeneous composite climatological reference series [J]. *Int. J. Climatol.*, 14(6): 671–679. doi:10.1002/joc.3370140606
- 任芝花, 余予, 邹凤玲, 等. 2012. 部分地面要素历史基础气象资料质量检测 [J]. *应用气象学报*, 23(6): 739–747. Ren Zhihua, Yu Yu, Zou Fengling, et al. 2012. Quality detection of surface historical basic meteorological data [J]. *J. Appl. Meteor. Sci. (in Chinese)*, 23(6): 739–747. doi:10.3969/j.issn.1001-7313.2012.06.011
- 任芝花, 张志富, 孙超, 等. 2015. 全国自动气象站实时观测资料三级质量控制系统研制 [J]. *气象*, 41(10): 1268–1277. Ren Zhihua, Zhang Zhifu, Sun Chao, et al. 2015. Development of three-step quality control system of real-time observation data from AWS in China [J]. *Meteor. Mon. (in Chinese)*, 41(10): 1268–1277. doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2015.10.010
- 王瑞, 周学东, 李崇志, 等. 2015. 江苏省能见度的人工与自动观测差异分析 [J]. *气象科学*, 35(2): 183–188. Wang Rui, Zhou Xuedong, Li Chongzhi, et al. 2015. Analysis on visibility difference between manual and automatic observation in Jiangsu [J]. *J. Meteor. Sci. (in Chinese)*, 35(2): 183–188. doi:10.3969/2014jms.0100
- 王绍武, 罗勇, 赵宗慈, 等. 2014. 2013 年又是一个暖年 [J]. *气候变化研究进展*, 10(6): 460–464. Wang Shaowu, Luo Yong, Zhao Zongci, et al. 2014. 2013 is a warm year again [J]. *Progr. Inquisit. Mutat. Climat. (in Chinese)*, 10(6): 460–464. doi:10.3969/j.issn.1673-1719.2014.06.010
- World Meteorological Organization. 1989. Calculation of monthly and annual 30-year standard normals[R]. WMO/TD-No. 341.
- World Meteorological Organization. 2007. The role of climatological normals in a changing climate [R]. WCDMP-No. 61.
- World Meteorological Organization. 2011. Guide to Climatological Practices [R]. WMO-No. 100.
- World Meteorological Organization. 2015. Seventeenth World Meteorological Congress (WMO-No. 1157). Geneva.
- World Meteorological Organization. 2017. WMO Guidelines on the Calculation of Climate Normals[R]. WMO-No. 1203.
- Xie P P, Yatagai A, Chen M, et al. 2007. A gauge-based analysis of daily precipitation over East Asia [J]. *J. Hydrometeorol.*, 8(3): 607–626. doi:10.1175/JHM583.1
- Xiong A Y, Liao J, Xu B. 2012. Reconstruction of a daily large-pan evaporation dataset over China [J]. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, 51(7): 1265–1275. doi:10.1175/JAMC-D-11-0123.1
- 严中伟, 李珍, 夏江江. 2014. 气候序列的均一化: 定量评估气候变化的基础 [J]. *中国科学: 地球科学*, 44(10): 2101–2111. Yan Zhongwei, Li Zhen, Xia Jiangjiang. 2014. Homogenization of climate series: The basis for assessing climate changes [J]. *Science China Earth Sciences*, 57(12): 2891–2900. doi:10.1007/s11430-014-4945-x
- 张永强, 张海涛, 杨新爱, 等. 2013. 人类活动及气候变化对河北省地表径流量的影响 [J]. *水利科技与经济*, 19(6): 28–31, 36. Zhang Yongqiang, Zhang Haitao, Yang Xinai, et al. 2013. Impact of human activities and climatic change on surface runoff in Hebei Province [J]. *Water Conservancy Science and Technology and Economy (in*

- Chinese), 19(6): 28-31,36. doi:[10.3969/j.issn.1006-7175.2013.06.013](https://doi.org/10.3969/j.issn.1006-7175.2013.06.013)
- 张志富. 2009. 国外气候资料整编方法介绍——以美国、加拿大为例 [J]. 干旱气象, 27(4): 395-401. Zhang Zhifu. 2009. Introduction of foreign climate normals: A case of U. S. and Canada [J]. J. Arid Meteor. (in Chinese), 27(4): 395-401. doi:[10.3969/j.issn.1006-7639.2009.04.016](https://doi.org/10.3969/j.issn.1006-7639.2009.04.016)
- 中国气象局. 2003. 地面气象观测规范 [M]. 北京: 气象出版社, 151pp. China Meteorological Administration. 2003. Code for Surface Meteorological Observation (in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorological Press, 151pp.
- 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 2017. GB/T 34412-2017 地面标准气候值统计方法 [S]. 北京: 中国标准出版社. General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, China National Standardization Administration. 2017. GB/T 34412-2017 Statistical method for the surface standard climate normals (in Chinese) [S]. Beijing: China Standards Press.
- 周鑫, 郭正堂, 秦利. 2010. 近百年来自然和人为因素对亚洲季风降水影响的时间序列分析研究 [J]. 中国科学: 地球科学, 40(12): 1718-1724. Zhou Xin, Guo Zhengtang, Qin Li. 2010. Natural and anthropogenic impacts on the Asian monsoon precipitation during the 20th century [J]. Sci. China Earth Sci., 53(11): 1683-1688. doi:[10.1007/s11430-010-4072-2](https://doi.org/10.1007/s11430-010-4072-2)