

于颖卓, 郑景云, 郝志新. 1796—2015 年成都雨季降水量序列重建与特征分析 [J]. 地理科学, 2022, 42(2): 314-322. [Yu Yingzhuo, Zheng Jingyun, Hao Zhixin. Reconstruction and analysis of rainy season precipitation in Chengdu during 1796-2015. Scientia Geographica Sinica, 2022, 42(2): 314-322.] doi: 10.13249/j.cnki.sgs.2022.02.013

1796—2015 年成都雨季降水量序列重建与特征分析

于颖卓^{1,2,3}, 郑景云^{1,2}, 郝志新^{1,2}

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所/中国科学院陆地表层格局与模拟重点实验室, 北京 100101;
2. 中国科学院大学资源与环境学院, 北京 101408; 3. 北京吉威空间信息股份有限公司, 北京 100043)

摘要: 利用清代雨雪分寸记录和现代器测资料, 重建了成都 1796—2015 年分辨率为年的雨季降水量序列。结果表明, 过去 220 a 间成都的平均雨季降水量为 838 mm, 19 世纪 20~40 年代、80 年代到 20 世纪 10 年代、20 世纪 30~40 年代降水偏多, 19 世纪初到 20 年代、50~70 年代、20 世纪 20 年代、50 年代到 21 世纪初降水偏少, 并在 1879—1880 年发生了由少到多的明显突变; 降水最多的 10 a 为 1832 年、1896 年、1898 年、1899 年、1903 年、1907 年、1915 年、1921 年、1937 年和 1947 年, 最少的 10 a 为 1814 年、1838 年、1865 年、1868 年、1869 年、1872 年、1930 年、1939 年、1970 年和 2002 年。成都雨季降水量存在显著的 50~75 a 周期, 和太平洋年代际振荡 (Pacific Decadal Oscillation, PDO) 指数在 50~70 a 信号上存在较强的负相关, 且与上一年冬季至当年秋季北印度洋的全球海表温度 (SST) 及当年夏秋季赤道太平洋的 SST 也存在较强的负相关, SST 偏暖 (冷) 时, 雨季降水量往往偏少 (多)。

关键词: 雨雪分寸; 成都; 雨季; 降水量重建

中图分类号: F129.9 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-0690(2022)02-0314-09

成都位于中国西南地区 (102°54'~104°53'E、30°05'~31°26'N), 地处四川盆地西部、青藏高原东缘, 属于亚热带季风气候, 四季分明, 雨热同期^[1]; 其降水主要受东亚季风和南亚季风的共同影响^[2], 年降水量约为 900~1000 mm。降水量年内分布极不均匀, 其中 5~10 月为雨季^[3], 占全年降水量的 85% 以上, 特别是 7~8 月的雨量最为集中, 约为全年降水量的 1/2; 而 11 月至次年 4 月为干季。在年代际尺度上, 成都 20 世纪 70 年代中期以前降水偏多, 而 90 年代末以后显著减少^[4,5]。成都的气象观测记录始于 1906 年, 观测地点位于成都平安桥街的天主教堂^[6], 但资料多有缺失, 1951 年以后才具有完整的器测降水记录。然而五六十年代的降水器测数据对于揭示年代际至百年以上尺度的降水时空变化特征显然太短, 也无法诊断其与年代际尺度气候模态是否存在稳定的遥相关机制, 因此

借助高分辨率代用资料扩充资料长度十分必要。

西南地区树轮、石笋等自然代用资料较为丰富, 研究人员已利用这些自然证据中的环境代用指标恢复历史时期的气候变化^[7]。如成都以西横断山地区树轮降水重建结果^[8]显示, 在过去 400 多年中降水存在 6 个明显的干旱时期和 5 个湿润时期, 其中 17 世纪的干旱持续时间最长, 且降水变化存在显著的 3~5、60 和 79~85 a 左右变化周期; 而位于成都以东的重庆水鸣洞石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 序列^[9]显示, 亚洲季风在 14 世纪迅速减弱, 且 1400—1650 年夏季降水波动频繁。除了自然证据, 古气候学者利用历史文献资料 (如地方志、实录等史料), 建立了包括成都在内的多个站点 1470 年以来分辨率为年的旱涝等级序列^[10-12]。但因其主要根据文献对旱涝状况的描述和各等级发生概率而定性重建, 结果仅反映了成都地区的干湿变化特

收稿日期: 2020-11-12; **修订日期:** 2021-04-09

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41831174, 41671201) 资助。 [Foundation: National Natural Science Foundation of China (41831174, 41671201).]

作者简介: 于颖卓 (1993-), 女, 江苏常州人, 博士, 主要从事气候变化研究。E-mail: yuyingzhuo@qq.com

通讯作者: 郝志新。E-mail: haozx@igsrr.ac.cn

征,无法与现代定量观测记录相结合,计算降水变率及识别极端降水事件等。

现存于中国故宫第一历史档案馆的清代雨雪分寸档案,记录了乾隆至宣统年间(1736—1911年)273个站点(地区)逐次降水发生日期、降雨入渗深度(以分和寸为单位表示,称“雨分寸”)和积雪厚度(雪分寸)等,或者定性描述一个时段(通常为旬或月、季)内降水总体特征^[13],可用于重建过去降水变化序列。已有学者利用这份资料,重建了黄河中下游地区17个站点的年降水量^[14-17]、季风尾闾区雨季长度及雨量^[18]、长江中下游地区的梅雨量^[19]等,为研究中国东部季风区降水变化的空间格局和特征提供了基础。

西南地区的雨雪分寸记录以1796年以后最为丰富,其中与成都有关的雨雪档案约2000余件,连续且详细奏报了降水日期或降水次数,已被用于重建成都地区雨季开始期序列^[20]。本文将雨雪分寸为基础资料,重建1796年以来成都逐年降水量序列,该结果不但有助于揭示成都地区降水的年-年代际变化规律,而且通过与东亚季风强度变化序列对比,为深入分析亚洲各季风系统的长期变化及对降水的影响提供了重要科学价值。

1 资料与方法

1.1 清代雨雪分寸记录

雨雪分寸档案主要来源于清代硃批奏折、军机处录副、上谕档、宫中档、耕作档等,内容包括雨雪、冷暖、水灾、旱灾、农业、收成、粮价等,并通常以“省”为行政单位向皇帝进行奏报^[21]。本文从中摘录的四川省及成都地区(地名出现“省城”“成都”“华阳”)档案件数如表1所示,1736—1911年共有2616件档案,年均数量接近15件。按年均件数来看,光绪年间记录最为丰富,平均1a约30件,宣统和乾隆年间则记录较少,年均仅4件和7件。

不同时期成都雨雪分寸中降水信息的记载形式也有所区别。乾隆年间主要是阶段性降水多寡的定性描述,也有一部分具体降水日期、次数、强度或寸数的记录,如乾隆十四年(1749年)“入夏以来通省得雨沾足,今省城每间日必得雨一次,初

表1 四川省雨雪分寸档案中涉及成都的件数统计

Table 1 The number of entries in the Yu-Xue-Fen-Cun record related to Chengdu in Sichuan Province

年号	起止年份	年数/a	成都件数	年均件数
乾隆	1736—1795	60	425	7
嘉庆	1796—1820	25	313	13
道光	1821—1850	30	412	14
咸丰	1851—1861	11	217	20
同治	1862—1874	13	221	17
光绪	1875—1908	34	1016	30
宣统	1909—1911	3	12	4
乾隆-宣统	1736—1911	176	2616	15

七、初八两日(对应的阳历为20、21/7,下同)夜更陆续得大雨数阵”^①。嘉庆至道光年间主要记载了降水的具体日期和次数,部分记录附有降水强度的文字描述,如嘉庆二年(1797年)“成都及附近州县六月以来于初一日、初三日、初十日、十四日、二十日、二十二等日(25、27/6,4、8、14、16/7)叠沛甘霖极为优渥”^②。咸丰朝以后大部分记录为逐月降水次数的奏报,如咸丰八年(1858年)五月(11/6—10/7)“成都华阳两首县得雨八次,耘耨秧苗,田水充盈”^③。同时,嘉庆朝以来除了降水日期和次数的定量记录,还有阶段性降水多寡的定性描述,如嘉庆十一年(1806年)“七月(14/8—11/9)以来成都省城得雨次数过多”^④。

相比于中国东部地区,西南地区离京城遥远,发达程度和受重视程度也较低,奏报数量较少,内容也相对简略。其中对于“雨分寸”与“雪分寸”的记录很少,因此很难参考东部地区的研究,直接利用降水入渗深度来反演清代的降水量。然而,自嘉庆元年(1796年)至光绪三十三年(1907年),成都雨雪分寸记录中对于降水日期或降水次数有着较为连续且详细的奏报,且有关雨季(5~10月)的降水日数记录较干季多40%。当地官员向统治者奏报这些信息,表明降水日数或次数也能较好地反映成都的降水量,且统治者和官员对雨季降水的重视程度高于干季。这是因为成都的降水大部分都出现在雨季期间(1951—2015年平均雨季降水

① 四川巡抚硕色. 硃批奏折,包5,乾隆二年六月十日(1737年7月23日)奏报。

② 四川布政使林僩. 硃批奏折,卷334,嘉庆二年闰六月二十二日(1797年8月14日)奏报。

③ 四川总督王庆云. 咸丰八年六月二十四日(1858年8月3日)奏报。

④ 四川总督勒保. 硃批奏折,卷403,嘉庆十一年八月初十日(1806年9月21日)奏报。

量占全年的 88%), 雨季降水的多寡对农业生产有着举足轻重的影响。整理档案发现, 奏报中雨季降水日数和次数通常相等, 以道光四年(1824 年)为例, 当年四川省城成都的雨季降水记录如下: “四月初一、六、九、十三、十八、十九(23、28/4, 1、5、10、11/5)等日共得雨六次”^①、“闰四月初一、三、四、五、七、十一、十四、十七及二十一至二十四(22、24、25、26、28/5, 1、4、7、11-14/6)等日共得雨十二次”^②、“五月初一、三、五、七、八、十一、十四、二十、二十二至二十五(20、22、24、26、27、30/6, 3、9、11-14/7)等日共得雨十二次”^③、“六月初一至五日及七、八、十一至十四(20-24、26、27/7, 30/7-2/8)等日共得雨十一次”^④、“七月初六、八、十及十六至十八、二十三、二十四(23、25、27/8, 2-4、9、10/9)等日共得雨八次”^⑤、“八月初一至五及十七、十九、二十一至二十三(17-21/9, 3、5、7-9/10)等日共得雨十次”^⑥、“九月初十、十一、十五、十六、二十一、二十二(26、27、31/10, 1、6、7/11)等日叠次得雨”^⑦。因此, 本文试图利用月降水日数这一指标, 重建成都 1796 年以来雨季降水量序列。

在统计成都雨雪分寸档案中的各月降水日数时, 由于一部分记录有具体降水日期, 还有一部分仅有农历月降水次数的记载, 需要将其统一转化为公历月降水日数。因为降水次数和日数可视为相等, 所以有具体降水日期时按照农历日期对应的公历日期来统计公历月降水日数, 否则统计农历月降水日数, 再按比例分配到公历月。在统计过程中, 当时间地点相同, 但因奏报人不同, 而奏报内容出现矛盾的情况时, 本文则尽量使用同一位奏报人的连续记录。

1.2 现代器测数据

用于重建的现代器测数据包括中国气象局提供的成都(1951—2003 年)和温江(2004—2015 年)逐日降水量(http://data.cma.cn/dataService/cdcindex/datacode/SURF_CLI_CHN_MUL_DAY\1907-1950 年成都逐月降水量^[22]), 以及英国东安格利亚大学气候研究中心(Climatic Research Unit, 简称

CRU)提供的 1901—2015 年全球 $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ 陆地网格化气象数据集 CRU TS4.03(<https://catalogue.ceda.ac.uk/uuid/10d3e3640f004c578403419aac167d82>)中的逐月降水数据。由于清代雨雪分寸记录截止至 1911 年(宣统三年), 而现代气象站点的数据大多始于 1951 年, 为了保证站点降水量重建的连续性和完整性, 采用 CRU 气象数据集中的月降水数据对近代缺乏资料的时段进行重建。而在清代和 1951 年以后, 则基于现代器测逐日降水量记录建立雨季各月降水量与降水日数的回归方程, 用降水日数反演雨季降水量。

在逐日降水量数据中, 由于成都站点($104^{\circ}01'E, 30^{\circ}40'N$, 海拔 506.1 m, 台站号 56294)记录时段为 1951—2003 年, 附近的温江站点($103^{\circ}50'E, 30^{\circ}42'N$, 海拔 539.3 m, 台站号 56187)记录时段为 2004—2015 年, 为了形成 1951—2015 年连续的观测序列, 本文对成都和温江各月降水量进行了双样本 T 检验和 F 检验, 发现在 $\alpha=0.05$ 的显著性水平上各月降水量均值和方差均无显著差异, 可认为成都和温江的降水量序列能够直接连接, 进而将成都逐日降水量资料延长至 2015 年。

1.3 降水重建方法

1.3.1 1951—2015 年逐月降水量与降水日数的关系及 1796—1907 年降水量重建

利用器测资料, 对成都 1951—2015 年雨季各月降水日数与降水量进行相关分析, 建立可用于重建降水量的回归方程。在统计器测数据中雨季各月的降水日数时, 舍弃所有小于 3 mm 的降水日数。原因有以下 3 点: 一是考虑到清代降水观测不使用仪器, 较少的日降水量难以用肉眼观测到; 二是成都雨季降水量大, 较少的日降水量对总降水量贡献很小, 如果使用这些数值, 反而会减弱降水日数和降水量的相关性; 三是“雨雪分寸”的最小记录单位是一分(约 3.2 mm), 且雨分寸为“一分”的记录并不多见, 不会使重建结果产生较大的系统偏差。但在统计总降水量时, 仍然按照真实值计算, 并不舍弃 3 mm 以下的日降水量, 即某月的总

① 四川总督琦善. 硃批奏折, 包 124, 道光十年闰四月十六日(1830 年 6 月 6 日)奏报.

② 四川总督琦善. 硃批奏折, 包 124, 道光十年五月二十三日(1830 年 7 月 12 日)奏报.

③ 四川总督琦善. 硃批奏折, 包 124, 道光十年六月二十六日(1830 年 8 月 14 日)奏报.

④ 四川总督琦善. 硃批奏折, 包 125, 道光十年八月初三日(1830 年 9 月 19 日)奏报.

⑤ 四川总督琦善. 硃批奏折, 包 125, 道光十年八月三十日(1830 年 10 月 16 日)奏报.

⑥ 四川总督琦善. 硃批奏折, 包 125, 道光十年九月初十日(1830 年 10 月 26 日)奏报.

⑦ 四川总督琦善. 硃批奏折, 包 125, 道光十年十月初四日(1830 年 11 月 18 日)奏报.

降水量通过较大的几次降水过程进行反演。

成都 1951—2015 雨季各月降水量与降水日数变化特征如图 1 所示, 5~10 月的逐月降水日数与降水量的相关系数分别为 0.68、0.64、0.44、0.59、0.76 和 0.74, 均能通过 $\alpha=0.001$ 的显著性检验。因此, 可以利用最小二乘法建立 5~10 月各月降水量与月降水日数的一元线性回归方程, 进而重建成都雨季(5~10 月)内逐月和雨季降水量及其 95% 置信区间。

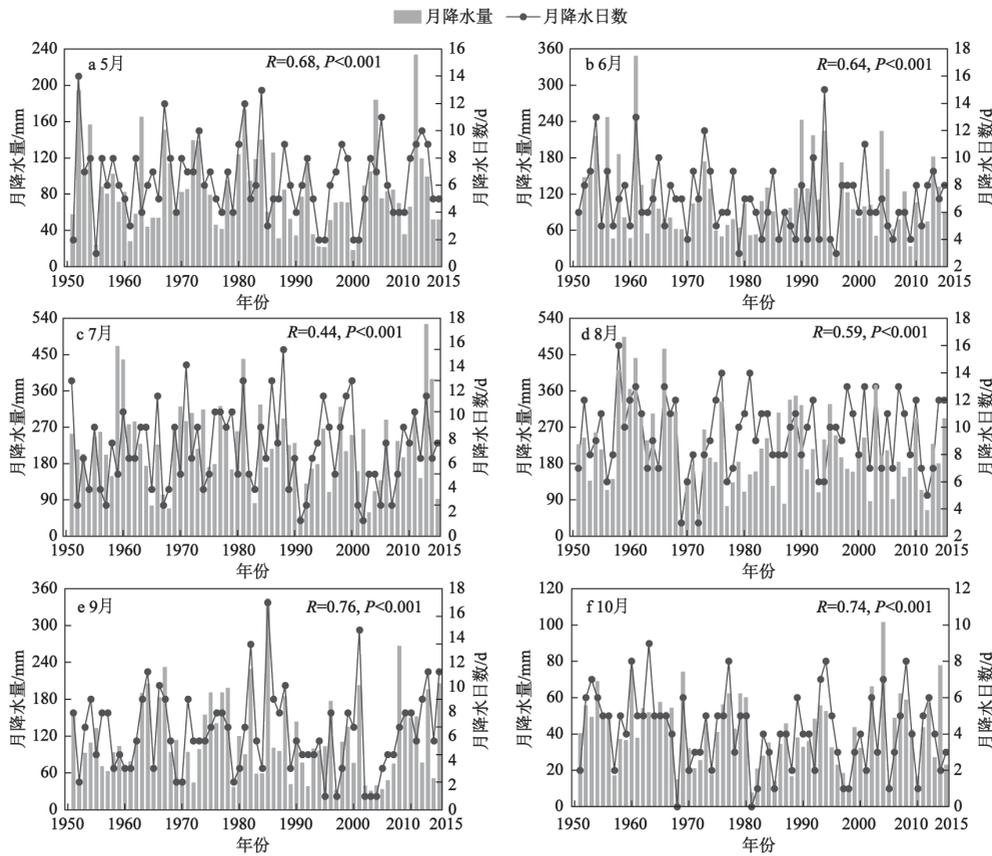
1796 年以来, 包含有成都(包括地名为“四川省城”“成都府”“成都”“华阳”)的雨雪分寸档案一共有 2 191 件, 占四川省总件数的 85%。嘉庆元年(1796)至光绪三十三年(1907)记录较完备, 因此 1796—1907 年按照前述方法基于月降水日数重建雨季降水量。

对于 1951—2015 年, 尽管该时段雨季降水量可以通过观测数据直接获得, 但为了保证历史与观测数据的均一性, 本文统计现代日降水量数据

中 5~10 月各月超过 3 mm 的降水日数, 利用已建立的各月线性回归方程反演雨季降水量。

1.3.2 1908—1950 年降水重建

1908—1950 年缺少降水日数数据, 无法用降水日数反演降水量, 同时也缺少完整的雨季降水器测数据。为了保持序列的连续性, 本文选择 CRU 气象数据集中包含成都站点的格点(104°~104°30'E, 30°30'~31°N)月降水数据对成都雨季降水量进行重建。成都从 1907 年 5 月开始有月降水观测数据(其中 1911—1923 年、1926 年、1930—1932 年共 18 a 的雨季有缺值), 1951 年以后有逐日降水观测数据, 将 1907—2015 年雨季 CRU 格点降水量与成都站点的器测降水量进行相关性计算, 发现相关系数为 0.64, 均通过 0.001 显著性水平检验, 二者的一元线性回归关系可表达为: $y=1.33x-276.58$ 。其中 y 代表成都雨季总降水量, x 代表 CRU 数据集中成都所在格点的雨季降水量, 单位为 mm。该方程可用于重建 1908—1950 年的



R 为逐月降水日数与降水量的相关系数

图 1 成都 1951—2015 年雨季各月降水量与降水日数

Fig.1 Correlation coefficients between precipitation days and monthly precipitation in Chengdu for the rainy season

雨季降水量。

1.3.3 资料插补

当某一年雨季各月降水量出现缺值时,若5~10月有3个月及以上有数据,则按其总和除以占雨季降水量的总比例(1951—2015多年平均)作为该年的雨季降水量进行插补;若雨季缺值月份超过3个月,则根据雨雪分寸记录中的定性描述以及《中国三千年气象记录总集》^[23]中地方志记载的补充,参考《中国近五百年旱涝分布图集》^[8]的评判标准对雨季的降水量进行等级评定,分为旱、偏旱、正常、偏涝、涝5个等级,并用Gamma函数对该站点的多年(1951—2015年)雨季降水量进行拟合,5个等级分别用累计概率分布的5%、15%、50%、85%和95%分位点数值进行插补。例如,出现长时间的“亢旱”“大旱”时定为旱,出现“缺雨,秋收微觉欠薄”“雨泽稀少”等描述时定为偏旱,出现“晴雨得宜”“雨泽应时”等描述时定为正常,出现“雨水较多偶有被淹”“得雨微觉过多”等描述时定为偏涝,出现“连日大雨河水汛溢”“连雨过多江水泛滥”等描述时定为涝。

2 结果与讨论

2.1 重建结果及不确定性

成都雨季降水量重建结果如图2所示。其中1901—1907年是CRU格点数据与雨雪分寸重建结果的共有时段,二者相关系数 $R=0.79$,经过校正的无偏相关系数 $R=0.84$,超过 $\alpha=0.01$ 显著性水平;对其分别进行双样本F检验和T检验,结果都显示2套数据在 $\alpha=0.05$ 的显著性水平上方差和均值没有显著差异。而通过对1796—1907年的雨雪分寸重建结果和1951—2015年的观测值进行双样本F检验和T检验,结果显示两者在 $\alpha=0.05$ 的显著性水平上方差和均值没有显著差异,表明3套数据可以相互衔接使用。此外,将1796—1907年的成都的雨雪分寸重建雨季降水量和《中国近五百年旱涝分布图集》^[10-12]中成都的旱涝指数(有旱涝指数的年份共109年)进行相关分析,相关系数为-0.29(旱涝指数1为涝5为旱,因此与降水量的相关系数为负值),通过 $\alpha=0.05$ 的显著性检验;而1796—2015年重建序列和旱涝指数(有旱涝指数的年份共159a)的相关系数为-0.28($P<0.001$),与1796—1907年相近。1796—2015年,旱涝指数为1、2、3、4、5的年份各占总数(159a)的14%、

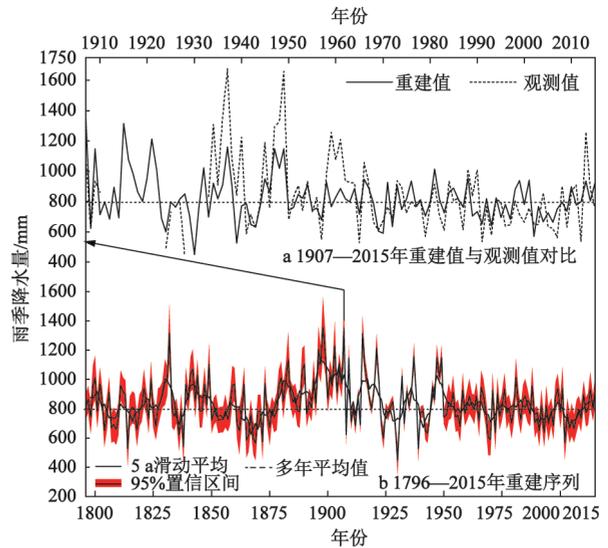


图2 1907—2015年成都雨季降水量重建序列及其95%置信区间

Fig.2 Rainy season precipitation reconstruction series in Chengdu from 1907 to 2015

32%、29%、19%、6%。将重建的成都雨季降水量按照同样的概率分布换算成1~5级,其中与旱涝指数相同的年份共43a,相差1级的年份共82a,分别占总数的28%和51%,而与旱涝指数相反(相差3级及以上)的年份仅有11a,进一步证明了重建结果的可靠性。

但同时需要指出的是,该降水量重建结果存在一定的不确定性,主要来源于2个方面。首先,资料本身的精度比不上器测数据,雨雪分寸资料是由地方官员进行记录和奏报的,有一定的主观性,难免存在错报、漏报等情况,另外农历月降水日数向公历月的转换、因资料缺失而进行的插值等都会给结果带来不确定性。其次,尽管月降水日数和降水量表现出了较好的相关性,重建方程的方差解释量也仅达30%。特别是当降水日数较多但实际日降水量较小时,重建值偏高;当降水日数较少但实际日降水量较大时,重建值偏低。如图2b所示,1796—2015年,成都雨季降水量重建序列95%置信区间的上下限与重建值的差值最小为38.7mm(1928年),最大为205mm(1898年),平均为99.3mm。

2.2 雨季降水量的年际—年代际变化

由图2可知,总体上成都雨季降水量在1796—2015年经历了频繁的波动,220a间的平均雨季降水量为838mm,其中降水最多的10a为

1832 年、1896 年、1898 年、1899 年、1903 年、1907 年、1915 年、1921 年、1937 年和 1947 年, 最少的 10 a 为 1814 年、1838 年、1865 年、1868 年、1869 年、1872 年、1930 年、1939 年、1970 年和 2002 年。

图 3 展示了成都 19~21 世纪各年代的雨季降水量距平(基准为 1801—2010 年, 平均值为 835.7 mm), 其中 19 世纪代表 1801—1900 年, 并依此类推。整体来看, 19 世纪以来成都的雨季降水量经历了多次增加与减少的过程, 峰值出现在 19 世纪末至 20 世纪初, 之后出现明显的下降趋势。与 1801—2010 年的均值相比, 19 世纪 20~40 年代、19 世纪 80 年代到 20 世纪 10 年代、20 世纪 30~40 年代降水偏多, 19 世纪初到 20 年代、19 世纪 50~70 年代、20 世纪 20 年代、20 世纪 50 年代到 21 世纪初降水偏少。雨季最大降水量发生在 19 世纪 90 年代, 10 a 平均为 995.1 mm; 最少降水量发生在 19 世纪 60 年代, 10 a 平均为 700.6 mm; 降水量差距最大的相邻 10 a 发生在 19 世纪 40 年代和 50 年代, 雨季降水量平均相差 156.6 mm。

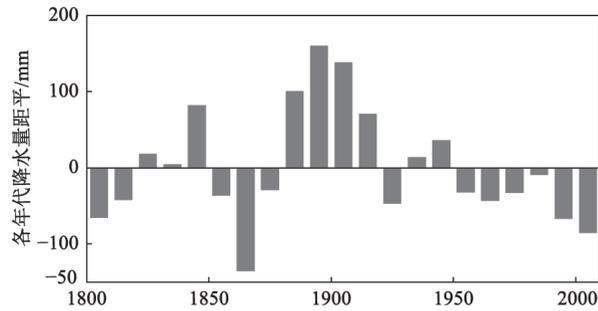


图 3 1800—2010 年成都各年代雨季降水量距平
Fig.3 Rainy season precipitation anomalies in Chengdu from 1800 to 2010

为了探讨成都 1796—2015 年雨季降水量的变化速率, 用最小二乘法估计其不同时间尺度上的线性倾向。从 1796 年开始滑动计算每 10 a、30 a、50 a、100 a 尺度上的雨季降水量的年变化速率(图 4), 发现 1796—2015 年成都雨季降水量出现了多次快速增加与减少的过程。在 10 a 尺度上, 最大降水增加速率出现在 1939—1948 年, 增速为 51.7 mm/a, 而最大下降速率出现在 1829—1838 年, 为 -48.6 mm/a。30 a 尺度和 50 a 尺度上的走势比较接近, 成都雨季降水增加速率最快的 30 a 和 50 a

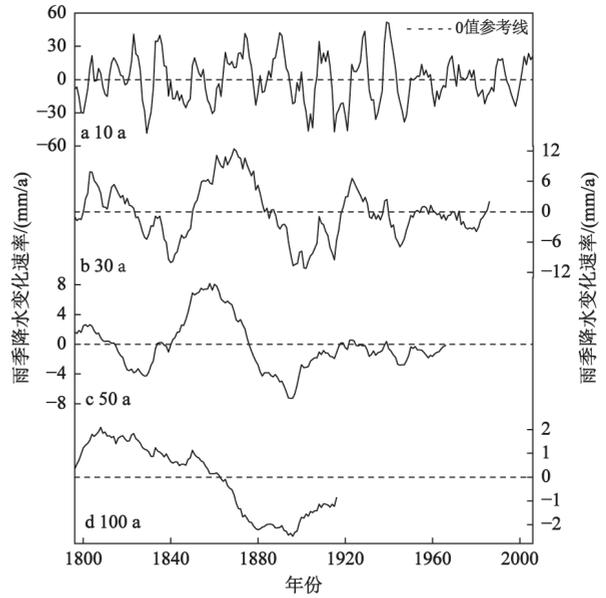


图 4 1796—2015 年成都不同时间尺度滑动计算的雨季降水量变化速率

Fig.4 The changing rates of the rainy season precipitation in Chengdu during 1796-2015

分别是 1869—1898 年和 1858—1907 年, 下降速率最快的 30 a 和 50 a 则分别为 1902—1931 年和 1896—1945 年, 后者均包含了前者的时间段。在百年尺度上, 成都雨季降水量变化速率先是增速变快, 后逐渐变慢, 最后转为负值, 变化速率由正转负的分界点为 1863 年。降水增加速率最快的 100 a 发生在 1808—1907 年, 为 2.1 mm/a; 而下降速率最快的 100 a 则发生在 1896—1995 年, 为 -2.5 mm/a。

对成都 1796—2015 年雨季降水量序列进行小波分析, 结果显示, 在 95% 置信水平上, 成都雨季降水量存在显著的 50~75 a 周期。小波功率谱还表明, 成都雨季降水量在 1890—1920 年存在显著的 2~3 a 周期, 而在 1885—1960 年存在显著的 12~20 a 周期。取子序列长度分别为 5 a、10 a、15 a、20 a, 对 1796—2015 年的成都雨季降水量序列进行滑动 T 检验, 计算得到成都雨季降水量突增的年份为 1879—1880 年(95% 置信水平)。

此外, 为了探讨成都雨季降水量的可能影响因素^[24-26], 将重建序列与全球海表温度(SST)进行遥相关分析。将美国国家海洋和大气管理局(NOAA)提供的空间分辨率为 1°×1°的 COBE-SST2 数据集中 1850—2015 年全球逐月 SST 按季节平均, 得到逐年春季(2~4 月)、夏季(5~7 月)、秋

季(8~10月)、冬季(11~次年1月)的平均 SST,然后将本文重建的 1851—2015 年成都雨季降水量分别与上一年冬季、当年春季、当年夏季、当年秋季的全球 SST 进行遥相关分析。成都雨季降水量与上一年冬季至当年秋季的北印度洋 SST 都呈现出较好的负相关关系($P<0.05$),并且与当年夏季和秋季的赤道太平洋 SST 也存在较强的负相关关系。因此,上一年冬季至当年秋季北印度洋和赤道太平洋的 SST 偏暖(冷)时,雨季降水量往往偏少(多)。显著性较强的区域在当年秋季范围最大,夏季次之,在春季范围最小。

同时,将重建的成都雨季降水量和 1470—1998 年逐年太平洋年代际振荡(Pacific Decadal Oscillation, PDO)指数序列^[27]进行相关分析,发现在 50~70 a 周期上,成都雨季降水量与 PDO 指数存在明显负相位,相关系数为 $-0.68(P<0.001)$,即 PDO 处于暖(冷)相位时,成都雨季降水量偏少(多)。而已有研究显示,在 50~70 a 尺度上, PDO 位相与华北降水也呈反相关关系,且 PDO 暖位相时,中国东部通常表现为“南涝北旱”的格局^[28,29]。上述结果表明, PDO 作为多年代际的背景海温场,其对成都和华北降水的调控作用可能基本一致,未来的研究将结合气候模式与重建数据对具体调控机制进行深入探讨^[30]。

3 结论与展望

本文基于成都地区的清代雨雪分寸记录和现代器测数据,以月降水日数为主要指标,重建了 1796—2015 年成都雨季(5~10月)降水量。本文主要结论如下:

成都雨季降水量在 1796—2015 年波动频繁,过去 220 a 间,平均雨季降水量为 838 mm。其中 19 世纪 20~40 年代、19 世纪 80 年代到 20 世纪 10 年代、20 世纪 30~40 年代降水偏多,19 世纪初到 20 年代、19 世纪 50~70 年代、20 世纪 20 年代、20 世纪 50 年代到 21 世纪初降水偏少,且在 1879—1880 年发生了由少到多的明显突变。在 10 a 尺度上,降水量增加最快的时段出现在 1939—1948 年,而减少最快的时段则出现在 1829—1838 年;在百年尺度上,成都雨季降水量变化速率由快速增加,逐渐变慢,最后转负,变化速率由正转负的分界点为 1863 年;其上升速率最快的 100 年发生在 1808—1907 年,为 2.1 mm/a;而

下降速率最快的 100 a 则发生在 1896—1995 年,为 -2.5 mm/a。

成都雨季降水量存在明显的 50~75 a 周期,和 PDO 在 50~70 a 信号上存在较强的负相关, PDO 处于暖(冷)相位时,成都雨季降水量往往偏少(多)。对比统计结果还显示,成都的雨季降水量与上一年冬季至当年秋季北印度洋的 SST,与当年夏季和秋季的赤道太平洋的 SST 也存在较强的负相关, SST 偏暖(冷)时,雨季降水量往往偏少(多)。

值得注意的是,受历史资料本身的局限性及用于重建降水方程方差解释量的影响, 1796—2015 年,成都雨季降水量平均值存在 ± 99.3 mm 的不确定性范围(95% 置信区间)。因此在利用重建降水量解决具体问题时,需考虑其结果的不确定性。下一步,我们将进一步挖掘西南地区雨雪分寸记录,在更多站点开展重建工作,为深入探讨南亚季风与东亚季风的关系提供基础数据。

参考文献(References):

- [1] 成都年鉴社. 成都年鉴(2019)[M]. 成都: 成都年鉴社, 2019. [Chengdu Yearbook Press. Chengdu yearbook(2019). Chengdu: Chengdu Yearbook Press, 2019.]
- [2] 徐裕华. 西南气候[M]. 北京: 气象出版社, 1991. [Xu Yuhua. Climate for Southwestern China. Beijing: China Meteorological Press, 1991.]
- [3] 中国气象局. 中国雨季监测指标 西南雨季[M]. 北京: 气象出版社, 2018. [China Meteorological Administration. Monitoring indices of rainy season in China—Rainy season in Southwest China. Beijing: China Meteorological Press, 2018.]
- [4] 《西南区域气候变化评估报告》编写委员会. 西南区域气候变化评估报告决策者摘要及执行摘要[M]. 北京: 气象出版社, 2013. [Committee of “regional climate change assessment report for Southwest China”. Summary for policymakers and executive summary of regional climate change assessment report for Southwest China. Beijing: China Meteorological Press, 2013.]
- [5] 刘劲龙, 徐刚, 杨娟, 等. 近55年来四川盆地气候的干湿变化趋势分析[J]. 西南大学学报(自然科学版), 2013, 35(1): 138-143. [Liu Jinlong, Xu Gang, Yang Juan et al. Climatic variations of dryness and wetness in Sichuan Basin during 1955-2009. Journal of Southwest University (Natural Science Edition), 2013, 35(1): 138-143.]
- [6] 李茂刚. 清末至民国时期四川的气象事业[J]. 四川气象, 1992, 2: 48-54. [Li Maogang. Meteorology observations in Sichuan from the late Qing Dynasty to the Republic of China. Journal of Sichuan Meteorology, 1992, 2: 48-54.]
- [7] 朱正杰, 苏菲, 陈敬安, 等. 西南地区全新世气候变化概述[J]. 地球与环境, 2009, 37(2): 163-169. [Zhu Zhengjie, Su Fei,

- Chen Jingan et al. Holocene climate changes in Southwest China. *Earth and Environment*, 2009, 37(2): 163-169.]
- [8] 勾晓华, 杨涛, 高琳琳, 等. 树轮记录的青藏高原东南部过去 457 年降水变化历史[J]. *科学通报*, 2013, 58(11): 978-985. [Gou Xiaohua, Yang tao, Gao Linlin et al. A 457-year reconstruction of precipitation in the southeastern Qinghai-Tibet Plateau, China using tree-ring records. *Chinese Science Bulletin*, 2013, 58(11): 978-985.]
- [9] 杨勋林, 陈发虎, 袁道先, 等. 高分辨率石笋记录的三峡库区小冰期气候变化[J]. *地理科学*, 2013, 33(5): 629-634. [Yang Xunlin, Chen Fahu, Yuan Daoxian et al. Climate change during Little Ice Age with high-resolution stalagmite record in the Three-Gorges Reservoir Area. *Scientia Geographica Sinica*, 2013, 33(5): 629-634.]
- [10] 中央气象局气象科学研究院. 中国近五百年旱涝分布图集[M]. 北京: 地图出版社, 1981. [Chinese Academy of Meteorological Science. Yearly charts of dryness/wetness in China for the last 500 years. Beijing: Cartographic Publishing House, 1981.]
- [11] 张德二, 刘传志. 《中国近五百年旱涝分布图集》续补(1980—1992年)[J]. *气象*, 1993, 19(11): 41-45. [Zhang De'er, Liu Chuanzhi. Continuation (1980-1992) of the "Yearly charts of dryness/wetness in China for the last 500 years". *Meteorological Monthly*, 1993, 19(11): 41-45.]
- [12] 张德二, 李小泉, 梁有叶. 《中国近五百年旱涝分布图集》的再续补(1993—2000年)[J]. *应用气象学报*, 2003, 14(3): 379-384. [Zhang De'er, Li Xiaoquan, Liang Youye. Re-continuation (1993-2000) of the "Yearly charts of dryness/wetness in China for the last 500 years". *Journal of Applied Meteorological Science*, 2003, 14(3): 379-384.]
- [13] Hao Z, Yu Y, Ge Q et al. Reconstruction of high-resolution climate data over China from rainfall and snowfall records in the Qing Dynasty[J]. *Wiley Interdisciplinary Reviews-Climatic Change*, 2018, 9(3): 111.
- [14] 郝志新, 郑景云, 葛全胜. 1736 年以来西安气候变化与农业收成相关分析[J]. *地理学报*, 2003, 58(5): 735-742. [Hao Zhixin, Zheng Jingyun, Ge Quansheng. Climate change and harvest in Xi'an since 1736: The high-resolution data derived from the archives in the Qing Dynasty. *Acta Geographica Sinica*, 2003, 58(5): 735-742.]
- [15] 郑景云, 郝志新, 葛全胜. 山东 1736 年来逐季降水重建及其初步分析[J]. *气候与环境研究*, 2004, 9(4): 551-566. [Zheng Jingyun, Hao Zhixin, Ge Quansheng. Seasonal precipitation reconstruction and analysis in Shandong Province derived from the archives in the Qing Dynasty since 1736. *Climatic and Environmental Research*, 2004, 9(4): 551-566.]
- [16] Zheng J, Hao Z, Ge Q. Method for seasonal precipitation reconstruction derived from snow and rainfall archives in Qing Dynasty: A case study in Shijiazhuang[J]. *Progress in Natural Science*, 2004, 14(8): 738-744.
- [17] Zheng J, Hao Z, Ge Q. Variation of precipitation for the last 300 years over the middle and lower reaches of the Yellow River[J]. *Science in China Series D-Earth Sciences*, 2005, 48(12): 2182-2193.
- [18] Ge Q, Hao Z, Tian Y et al. The rainy season in the Northwestern part of the East Asian Summer Monsoon in the 18th and 19th centuries[J]. *Quaternary International*, 2011, 229: 16-23.
- [19] Ge Q, Guo X, Zheng J et al. Meiyu in the middle and lower reaches of the Yangtze River since 1736[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2008, 53(1): 107-114.
- [20] 郝志新, 张亮, 刘洋, 等. 过去 300 年中国西南与东部地区雨季始期变化特征的比较研究[J]. *第四纪研究*, 2021, 41(2): 389-397. [Hao Zhixin, Zhang Liang, Liu Yang et al. A comparative study on the characteristics of rainy season in Southwest and Eastern China during the past 300 years. *Quaternary Sciences*, 2021, 41(2): 389-397.]
- [21] 张丕远. 中国历史气候变化[M]. 济南: 山东科学技术出版社, 1996: 533. [Zhang Piyuan. Historical climate change in China. Jinan: Shandong Science and Technology Press, 1996: 533.]
- [22] Tao S, Fu C, Zeng Z et al. Two longterm instrumental climatic data bases of the People's Republic of China[DB/OL]. ORNL/CDIAC-47, NDP-039. Carbon Dioxide Information Analysis Center, Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, Tennessee, 1997.
- [23] 张德二. 中国三千年气象记录总集[M]. 南京: 江苏教育出版社, 2013. [Zhang De'er. A compendium of Chinese meteorological records of the last 3000 years. Nanjing: Jiangsu Education Press, 2013.]
- [24] 张顾炜, 曾刚, 倪东鸿, 等. 西南地区秋季干旱的年代际转折及其可能原因分析[J]. *大气科学*, 2016, 40(2): 311-323. [Zhang Guwei, Zeng Gang, Ni Donghong et al. Decadal shift of autumn drought in Southwest China and its possible causes. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2016, 40(2): 311-323.]
- [25] 李永华, 卢楚翰, 徐海明, 等. 热带太平洋—印度洋海表温度变化及其对西南地区东部夏季旱涝的影响[J]. *热带气象学报*, 2012, 28(2): 145-156. [Li Yonghua, Lu Chuhan, Xu Haiming et al. Anomalies of sea surface temperature in Pacific-Indian Ocean and effects on drought/flood in summer over eastern of Southwest China. *Journal of Tropical Meteorology*, 2012, 28(2): 145-156.]
- [26] Wang L, Huang G, Chen W et al. Wet-to-dry shift over Southwest China in 1994 tied to the warming of tropical warm pool[J]. *Climate Dynamics*, 2018, 51: 3111-3123.
- [27] Shen C M, Wang W C, Gong W et al. A Pacific Decadal Oscillation record since 1470 A D reconstructed from proxy data of summer rainfall over eastern China[J]. *Geophysical Research Letters*, 2006, 33(3): L03702.
- [28] Yang Q, Ma Z, Fan X et al. Decadal modulation of precipitation patterns over Eastern China by sea surface temperature anomalies[J]. *Journal of Climate*, 2017, 30: 7017-7033.
- [29] Hao Z, Zheng J, Ge Q. Analysis of precipitation cycles in the middle and lower reaches of the Yellow River[J]. *Journal of*

Geographical Sciences, 2008, 18: 17-25.

[30] Huang X, Zhou Tianjun, Dai Aigu et al. South Asian summer

monsoon projections constrained by the interdecadal Pacific oscillation. *Science Advances*. 2020, 6: eaay6546.

Reconstruction and Analysis of Rainy Season Precipitation in Chengdu During 1796-2015

Yu Yingzhuo^{1,2,3}, Zheng Jingyun^{1,2}, Hao Zhixin^{1,2}

(1. *Key Laboratory of Land Surface Pattern and Simulation, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China*; 2. *College of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 101408, China*; 3. *Beijing Geoway Info-tech Co., LTD, Beijing 100043, China*)

Abstract: Chengdu (102°54'-104°53'E, 30°05'-31°26'N) is located in the region of southwest, and on the east edge of Tibetan Plateau, where the precipitation is affected by the South Asia monsoon and East Asia monsoon, and rainy season is concentrated from May to October. The meteorological observation was started from 1951, which is too short for revealing the decadal to centennial climate variation. Thus, it is important to reconstruct long-term precipitation series in Chengdu, and also it has great significance for not only recognizing teleconnections of precipitation with climatic modes, but also analyzing the long-term variation of Asian monsoon subsystems and their impacts on precipitation. There are abundant Yu (rainfall)-Xue (snowfall)-Fen (Chinese length unit, 0.32 cm)-Cun (10-Fen, 3.2 cm) archives reported to the Emperors by officials in the Qing Dynasty in Southwest China, which recorded precipitation dates or event frequencies in Chengdu in detail, providing important data for the reconstruction of the rainy season precipitation in Chengdu since the middle and late Qing Dynasty. Based on Yu-Xue-Fen-Cun archives and modern instrumental data, this paper reconstructed the rainy season (May to October) precipitation in Chengdu from 1796 to 2015 with annual resolution, using the relationship between monthly rainy days and precipitation. The results show that the average rainy season precipitation during the past 220 years in Chengdu is 838±99.3 mm (95% confidence interval). The precipitation is higher than normal in 1820s-1840s, 1880s-1910s, 1930s-1940s, and lower in 1800s-1820s, 1850s-1870s, 1920s, and 1950s-2000s, and there is an obvious abrupt change from less rainfall to more in 1879-1880. The ten years of 1832, 1896, 1898, 1899, 1903, 1907, 1915, 1921, 1937 and 1947 have highest precipitation, while 1814, 1838, 1865, 1868, 1869, 1872, 1930, 1939, 1970 and 2002 have lowest precipitation. On the decadal time scale, the rapid increasing precipitation occurs at 1939-1948, and rapid decreasing precipitation occurs at 1829-1838. On the centennial time scale, the rapid increasing in 100-year occurs at 1808-1907 with a rate of 2.1 mm/a, and the rapid decreasing in 100-year occurs at 1896-1995 with a rate of -2.5mm/a. The reconstructed series in Chengdu show significant oscillation signal with 50-75a cycles, and has a strong negative correlation with PDO for 50-70a cycle. It also has a strong negative correlation with SST of the northern Indian Ocean from the winter of the previous year to the autumn of the current year, and SST of the equatorial Pacific Ocean in the summer and autumn of the current year, which means warmer (colder) SST tended to link with less (more) rainy season precipitation.

Key words: Yu-Xue-Fen-Cun; Chengdu; rainy season; reconstruction of precipitation