

小冰期时中国南方地区降水模式的差异研究

肖思雅^{1, 2)}, 李廷勇^{3, 1)}, 陈朝军¹⁾, 黄冉¹⁾, 王涛¹⁾, 吴尧¹⁾,
徐玉珍¹⁾, 邱海英¹⁾, 黄洋阳¹⁾, 李俊云^{1, 2)}

- 1) 西南大学地理科学学院岩溶环境重庆市重点实验室,重庆,400715;
2) 自然资源部/广西岩溶动力学重点实验室,中国地质科学院岩溶地质研究所,广西桂林,541004;
3) 云南省高原地理过程与环境变化重点实验室,云南师范大学地理学部,昆明,650500

内容提要: 小冰期是过去一千年中全球气候变化的重要事件之一。关于小冰期时中国季风区和西风影响区气候变化的对比研究众多,但是缺乏中国南方地区降水模式时空差异的研究,难以了解中国南方地区降水变化规律。为了系统地了解小冰期时中国南方地区降水的复杂性,本文将中国南方地区划分为东南—华南沿海地区、中部地区以及西南地区三个区域,总共选取了19条高分辨率的古气候记录进行对比研究,主要有以下几点认识:①相对于中世纪暖期而言,小冰期期间中国南方东南—华南沿海地区的气候偏湿,这可能与雨带在中国南方的滞留时间延长和沿海地区受台风的影响增强有关。②中国中部地区秦岭南麓和神农架高山林区在小冰期时期主要呈“冷湿”的模式,差异在于秦岭南麓区域主要在小冰期中后期偏湿,这与中部其他区域偏“干”的模式不同。这种区域差异可能是由于地形地势和大气环流的复杂性导致。③中国西南地区受印度夏季风和东亚夏季风的共同影响,且该区域地形复杂,其气候变化在小冰期时期存在更加明显的空间差异,没有呈现出比较一致的降水模式。与小冰期期间的降水变化不同的是,近30年东南—华南沿海地区除了台湾和雷州半岛,其他区域降水明显减少,可能受气温和人类活动等因素的影响。通过结合高分辨率的古气候记录,我们系统分析了中国南方小冰期的干湿模式在时空上的差异及其可能的影响因子,这对于认识小冰期时中国南方不同区域降水的复杂性及未来旱涝灾害的防控具有一定意义。

关键词: 小冰期;中国南方地区;降水模式;古气候记录

“小冰期”一词最早于1939年由Matthes提出,用于描述美国加利福尼亚州内达华山脉的冰川活动时期(Matthes, 1939),泛指全新世气候最适宜期之后,即大约从2000 a BP开始的寒冷时期。后来“小冰期”主要指距现代最近的一次寒冷期(1300~1900 AD)(Jones and Mann, 2004)。“小冰期”包括冰川学概念和气候学概念(Matthews and Briffa, 2005)。在冰川学概念上,小冰期是指几百年以来最近的一次山脉冰川推进时期,主要表现为阿尔卑斯山(Holzhauser et al., 2005),喜马拉雅山(Kayastha and Harrison, 2008)等山脉的冰川推进。在气候学概念上,小冰期是指距现代最近的主要由于火山爆发和太阳活动减弱引起的一次全球性寒冷期。该时

期北半球的温度相对于1961~1990年器测记录的平均气温下降了0.5°C左右,不同区域气温下降的幅度存在一定差异(Mann et al., 2009; Wilson et al., 2016)。小冰期是相对于之前的中世纪暖期而言的整体上的变冷现象,但也并非是单调的寒冷期,期间也有不同频率的冷暖/干湿波动(Paulsen et al., 2003; Li Hongchun et al., 2011; Bronnimann et al., 2019)。

树轮、石笋和湖泊等记录的重建结果表明小冰期期间中国东部季风区的水文气候变化整体上呈“南(湿)—北(干)”的降水模式(Chen Jianhui et al., 2015):即以淮河一线(34°N)为界,中国东部季风区内南方湿润,北方干燥(Kuo Tzshing et al.,

注:本文为广西岩溶动力学重大科技创新基地开放课题资助项目(编号:KDL & Guangxi 202003),国家自然科学基金资助项目(编号:41772170, 42011530078)和中央高校基本科研业务费专项资金(编号:XDK2017A010, XDK2020D005)的成果。

收稿日期:2020-02-01;改回日期:2020-10-27;责任编辑:章雨旭。Doi: 10.16509/j.georeview.2021.01.005

作者简介:肖思雅,女,1996年生,硕士研究生,第四纪地质学专业;Email: zu626492@email.swu.edu.cn。通讯作者:李廷勇,男,1978年生,教授,博士生导师,主要从事第四纪地质学研究;Email: cdly@swu.edu.cn。李俊云,女,1978年生,副教授,主要从事自然地理学研究;Email: jxljy@swu.edu.cn。

2011; Li Hongchun et al., 2011; Chen Jianhui et al., 2015; Cui Anning et al., 2018)。但是,位于长江中游的湖北和尚洞石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 记录和江西洗药湖的孢粉记录显示小冰期主要呈“冷干”的模式 (Hu Chaoyong et al., 2008; Cui Anning et al., 2018), 这与“南(湿)—北(干)”的模式不一致。说明小冰期期间中国南方地区的气候变化也存在差异,可能存在“冷干”和“冷湿”两种气候模式,而不是一致呈“冷湿”的模式。

目前关于小冰期时期中国各地气候变化的研究较多,例如陈发虎等认为小冰期时西北干旱区和东部季风区的气候模式相反,小冰期时西北干旱区偏冷湿,而东部季风区偏冷干 (Chen Fahu et al., 2010)。王江林等利用帕尔默干旱指数重建 1300~2005 AD 期间青藏高原水分的时空变化,发现北大西洋涛动和太平洋年代际振荡分别是造成青藏高原南北方和东西部水分条件差异的主要原因 (Wang Jianglin et al., 2014)。还有学者利用经验模态分解法 (Empirical mode decomposition, EMD) 分析中国

东部地区东亚夏季风强度的时空变异性,发现小冰期季风区的气候模式可以是“暖/湿”和“冷/干”的组合,也可以是“冷/湿”和“暖/干”的组合 (Chu Peter et al., 2012),但是缺乏小冰期期间中国南方地区气候干湿变化差异及影响因子的研究。

本文基于中国南方地区 19 条高分辨率的古气候记录,结合大范围的冷暖干湿模式和古气候记录的区域性特征,在前人研究的基础上,对中国南方小冰期的降水特征进行系统分析,探讨以下主要科学问题:①中国南方地区各个区域的干湿变化特征;②影响小冰期时期中国南方不同区域降水的主要因素;③小冰期时中国南方地区的降水模式与现代降水模式的差异。

1 研究区概况

中国东部季风区以秦岭—淮河一线为界限,分为南北两个部分,秦岭—淮河以南为中国南方地区。中国南方地区可划分为西南地区、中部地区和东南—华南沿海地区,本文以省界线为界对中国南方

表 1 本研究中用于分析小冰期中国南方地区气候差异的记录的基本信息

Table 1 The basic information of records used to analyze climate differences in southern China during the Little Ice Age in this study

区域	序号	名称	经纬度	海拔 (m)	省份/市	代用指标	气候意义	年代方法	参考文献
东南沿海	1	上海旱涝指数	31°47'N, 121°23'E	—	上海	旱涝指数	降水	—	中央气象科学研究院, 1981
	2	玉华洞	26°70'N, 117°49'E	300	福建	$\delta^{18}\text{O}$	降水	^{230}Th	姜修洋等, 2012
	3	翠峰湖	24°30'N, 121°31'E	1810	台湾	硅藻, pH	降水	$^{210}\text{Pb}, ^{14}\text{C}$	Wang Liangchi et al., 2013
	4	冲绳海槽	24°48'N, 122°29'E	—	—	硅藻	降水	^{14}C	Li Dongling et al., 2011
	5	湖光岩	21°9'N, 110°17'E	23	广东	TOC	降水	$^{137}\text{Cs}, ^{14}\text{C}$	Chu Guoqiang et al., 2002
	6	双池玛珥湖	19°56'N, 110°11'E	90	海南	粒度	降水	$^{14}\text{C}, ^{210}\text{Pb}, ^{137}\text{Cs}$	汤文坤等, 2017
	7	台风频率	18~25°N, 108°~117°E	—	广东/海南/香港	台风	台风频率	—	Liu Kambiu et al., 2001
中部地区	8	佛爷洞	33°40'N, 109°05'E	500	陕西	$\delta^{18}\text{O}$	降水	$^{230}\text{Th}, ^{210}\text{Pb}$	Paulsen et al., 2003
	9	大鱼洞	33°08'N, 106°18'E	870	陕西	$\delta^{18}\text{O}$	降水	^{230}Th	Tan Liangcheng et al., 2009
	10	大九湖	31°34'N, 110°00'E	1700	湖北	孢粉	降水	^{14}C	何报寅等, 2003
	11	永兴洞	31°35'N, 111°14'E	800	湖北	$\delta^{18}\text{O}$	降水	^{230}Th	张伟宏等, 2019
	12	和尚洞	30°27'N, 110°25'E	294	湖北	$\delta^{18}\text{O}$	降水	U/Th, 微层计数	Hu Chaoyong et al., 2008
	13	鄱阳湖	29°09'N, 116°25'E	21	江西	$\delta^{13}\text{C}$	降水	^{14}C	Li Xiangzhong et al., 2016
西南地区	14	重庆旱涝指数	29°55'N, 106°57'E	—	重庆	旱涝指数	降水	—	中央气象科学研究院, 1981
	15	芙蓉洞	29°13'N, 107°54'E	480	重庆	$\delta^{18}\text{O}$	降水	$^{230}\text{Th}, ^{210}\text{Pb}$	Li Hongchun et al., 2011
	16	神奇洞	28°56'N, 103°06'E	1407	四川	$\delta^{18}\text{O}$	降水	^{230}Th	Tan Liangcheng et al., 2018
	17	泸沽湖	27°42'N, 100°47'E	2694	云南	粒径	降水	^{14}C	Sheng Enguo et al., 2015
	18	洱海	25°53'N, 100°10'E	1972	云南	粒径	降水	$^{14}\text{C}, ^{210}\text{Pb}, ^{137}\text{Cs}$	Xu Hai et al., 2015
	19	董哥洞	25°17'N, 108°05'E	680	贵州	$\delta^{18}\text{O}$	亚洲夏季风强度	^{230}Th , 微层计数	Zhao Kan et al., 2015

注:表中序号同图 1。

地区进行了大致的划分(图 1)。西南地区包括四川、重庆、贵州和云南;中部地区主要包括湖南、江西、湖北、安徽,和陕西南部;东南沿海地区包括江苏、上海、福建、台湾、广东、广西。西南地区西面为青藏高原,中部地区北部为秦岭,东南—华南沿海地区东临东海,南临南海。中国南方地区地势西高东低,横跨中国地势的第二和第三级阶梯,地形地貌复

杂多样,包含平原、丘陵、山地、盆地和高原五大类地形,其气候以热带和亚热带季风气候为主,雨热同期。虽然南方地区的面积仅占全国陆地面积的 25%,但其人口占全国总人口的 55% (茅海祥和王文, 2011)。该区域的干湿变化与人民生活和社会发展密切相关,因此深入研究中国南方地区的气候变化具有重要意义。



图1 本研究中用于对比分析的古气候记录的地理位置图

Fig. 1 Location of paleoclimatic records which are compared in this study

1—上海旱涝指数(中央气象科学研究院, 1981);2—福建玉华洞(姜修洋等, 2012);3—台湾省翠峰湖(Wang Liangchi et al., 2013);4—冲绳海槽(Li Dongling et al., 2011);5—广东湖光岩(Chu Guoqiang et al., 2002);6—海南双池玛珥湖(汤文坤等, 2017);7—广东省/海南岛/香港特别行政区的台风记录(Liu Kambiu et al., 2001);8—陕西佛爷洞(Paulsen et al., 2003);9—陕西大鱼洞(Tan Liangcheng et al., 2009);10—湖北大九湖(何报寅等, 2003);11—湖北永兴洞(张伟宏等, 2019);12—湖北和尚洞(Hu Chaoyong et al., 2008);13—江西鄱阳湖(Li Xiangzhong et al., 2016);14—重庆旱涝指数(中央气象科学研究院, 1981);15—重庆芙蓉洞(Li Hongchun et al., 2011);16—四川神奇洞(Tan Liangcheng et al., 2018);17—云南泸沽湖(Sheng Enguo et al., 2015);18—云南洱海(Xu Hai et al., 2015);19—贵州董哥洞(Zhao Kan et al., 2015)

1—Drought/wet index in Shanghai (Chinese Academy of Meteorological Sciences, 1981#); 2—Yuhua Cave in Fujian (Jiang Xiuyang et al., 2012&); 3—Tsufong Lake in Taiwan Province (Wang Liangchi et al., 2013); 4—southern Okinawa Trough (Li Dongling et al., 2011); 5—Huguangyan Lake in Guangdong (Chu Guoqiang et al., 2002); 6—Shuangchi Maar Lake in Hainan (Tang Wenkun et al., 2017&); 7—Frequency of typhoons in Guangdong Province, Hainan Island and Hongkong Special Administrative Region (Liu Kambiu et al., 2001); 8—Buddha Cave in Shaanxi (Paulsen et al., 2003); 9—Dayu Cave in Shaanxi (Tan Liangcheng et al., 2009); 10—Dajiu Lake in Hubei (He Baoyin et al., 2003&); 11—Yongxing Cave in Hubei (Zhang Weihong et al., 2019&); 12—Heshang Cave in Hubei (Hu Chaoyong et al., 2008); 13—Poyang Lake in Jiangxi (Li Xiangzhong et al., 2016); 14—drought/wet index in Chongqing (Chinese Academy of Meteorological Sciences, 1981#); 15—Furong Cave in Chongqing (Li Hongchun et al., 2011); 16—Shenqi Cave in Sichuan (Tan Liangcheng et al., 2018); 17—Lugu Lake in Yunnan (Sheng Enguo et al., 2015); 18—Erhai Lake in Yunnan (Xu Hai et al., 2015); 19—Dongge Cave in Guizhou (Zhao Kan et al., 2015)

2 数据来源及分析方法

2.1 数据来源

本文总共选取研究区内 19 条高分辨率的古气候记录, 包含历史资料、石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 、硅藻、湖泊沉积物的 TOC (Total Organic Carbon)、 $\delta^{13}\text{C}$ 和粒径 6 种主要类型的记录, 所选记录均可以反映亚洲夏季风强度或与亚洲夏季风相关的降水变化(表 1)。其中, 旱涝指数整理自中国近 500 年旱涝分布图集(中央气象科学研究院, 1981), 大鱼洞石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 记录等 8 条古气候记录下载自美国国家海洋和大气管理局(National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA) (<https://www.ncdc.noaa.gov/data-access/paleoclimatology-data>), 其他 9 条古气候记录由文献作者提供。为了更好地突出小冰期时期中国南方地区内部降水变化的规律, 本文呈现的记录尽可能涵盖中世纪暖期(900~1300 AD)和小冰期(1300~1900 AD)。

2.2 分析方法

本文对 19 条记录进行了干湿划分, 方法参考 Chen Jianhui et al., 2015。为了避免原始数据分辨率不均匀的影响, 首先计算了各条记录的平均分辨率, 再根据平均分辨率对各条记录进行等间距线性插值, 此步骤在软件 Origin8 中完成。其次, 部分记录如: 旱涝指数、石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 和鄱阳湖的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 记录, 需要乘以 -1 后才进行干湿划分, 使其符合“数据值

越大, 则越湿润”的条件; 其他符合条件的记录则可以直接进行干湿划分。最后计算各条记录在 900~1900 AD 区间的中值, 若某条记录在小冰期期间的指标值大于(小于)其中值的数据个数超过数据总量的 2/3 则为湿(干); 若指标值大于(小于)其中值的数据个数占数据总量的 1/2~2/3 则为偏湿(偏干); 若指标值大于中值和小于中值的数据个数各占数据总量的 1/2 则为正常年份。例如, 假设某条记录在小冰期期间的数据量为 N , 指标中值为 x , 那么当有超过 $\frac{2}{3}N$ 的数据量的指标的值大于 x 时, 则判断为湿。

3 结果

本文选取的记录中除了大九湖的记录分辨率为 63 a, 其他的分辨率均小于 15 a, 分辨率最高的是贵州董哥洞的石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 记录, 约为 1 a; 测年精度最高的为陕西大鱼洞的石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 记录, 其平均测年精度为 3 a。基于中国南方地区 19 条高分辨率记录的对比分析, 发现小冰期时中国南方地区的降水变化具有明显的空间差异性, 并非一致呈“冷湿”的模式。如图 2 所示: 气候偏湿润的区域主要集中在东南—华南沿海地区; 其次是中部地区位于秦岭南麓的区域和神农架高山林区, 而中部其他区域的气候则偏“干”。西南地区气候变化的时空差异性更为显著, 并未呈现比较一致或典型的干湿模式。

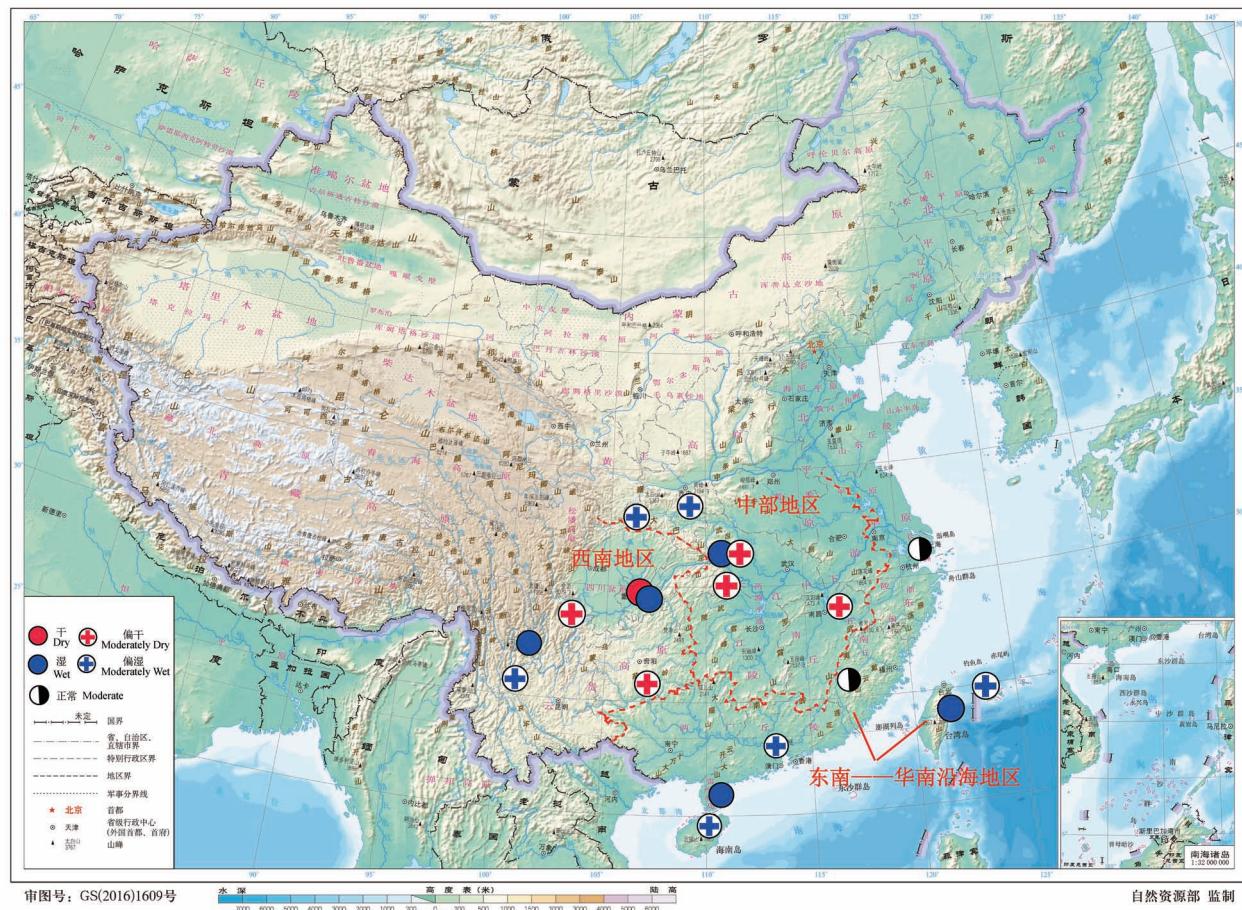


图 2 小冰期中国南方地区的干湿格局

Fig. 2 Drought/Wet patterns in southern China during the Little Ice Age

红色虚线代表中国东南—华南沿海地区、中部地区和西南地区的大概分界线

The red dashed lines represent the approximate boundaries between the coastal region of southeast—south China, the central region and the southwest region of southern China

4 讨论

4.1 小冰期中国东南—华南沿海地区的气候变化

旱涝指数分为五个等级,1,3,5 分别表示涝、正常年份和旱;数值越大,等级越高则越干旱。上海旱涝指数在小冰期时期的平均值为 3.05,接近正常年份,整体上没有呈现偏湿的现象(中央气象科学研究院,1981)(图 3a)。同期,福建玉华洞石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 指示该区域夏半年降水处于频繁波动时期(姜修洋等,2012)(图 3b)。两者在小冰期期间没有呈现偏湿的趋势,可能是由于数据涵盖时间较短,区域气候差异等原因造成。翠峰湖的湖水 pH 值在中世纪暖期 900~1300 AD 期间均小于平均值而在小冰期中晚期 1500~1900 AD 期间明显增加,指示该区域在中世纪暖期偏干,但在小冰期中晚期降水增加

(Wang Liangchi et al., 2013)(图 3c)。与翠峰湖的湖水 pH 值变化趋势较为一致的是南冲绳海槽的淡水种硅藻记录(图 3c 和 3d)。南冲绳海槽的淡水种硅藻数量在 1500~1900 AD 期间明显增加,指示降水增加,气候明显偏湿(Li Dongling et al., 2011)(图 3d)。

广东湖光岩玛珥湖沉积物中的 TOC 记录显示:在 900~1300 AD 期间其 TOC 值小于平均值,说明该区域在中世纪暖期偏干;但在 1300~1720 AD 期间其 TOC 值均大于平均值,指示小冰期气候湿润,表现为“暖干冷湿”的特征(Chu Guoqiang et al., 2002)(图 3e)。海南双池玛珥湖沉积物的粒径表明小冰期中前期有两个明显偏湿的阶段:1340~1480 AD 和 1550~1730 AD;但在 1730 AD 之后逐渐变干(汤文坤等,2017)(图 3f)。除了上海旱涝指

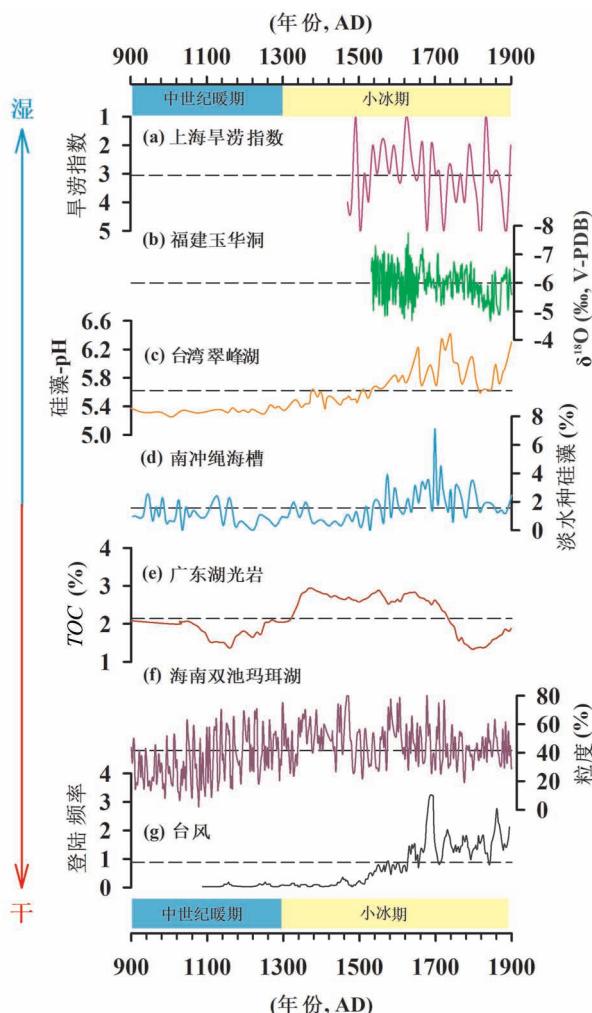


图3 中国东南—华南沿海地区的古气候记录对比: (a) 上海旱涝指数—11年平滑数据(中央气象科学研究院, 1981); (b) 福建玉华洞(姜修洋等, 2012, 原图2); (c) 台湾翠峰湖(Wang Liangchi et al., 2013, 原图9c); (d) 冲绳(Li Dongling et al., 2011, 原图4a); (e) 广东湖光岩(Chu Guoqiang et al., 2002, 原图4a); (f) 海南双池玛珥湖(汤文坤等, 2017, 原图4a); (g) 广东省/海南岛/香港特别行政区的台风频率(Liu Kambiu et al., 2001, 原图4)

Fig. 3 Comparison of paleoclimatic records in coastal region of southeast—south China: (a) drought/wet index in Shanghai—11-year running average (Chinese Academy of Meteorological Sciences, 1981 #); (b) Yuhua Cave in Fujian (Jiang Xiuyang et al., 2012&, original Fig. 2); (c) Tsuifong Lake in Taiwan Province (Wang Liangchi et al., 2013, original cave name; original Fig. 9c); (d) southern Okinawa Trough (Li Dongling et al., 2011, original Fig. 4a); (e) Huguangyan Lake in Guangdong (Chu Guoqiang et al., 2002, original Fig. 4a); (f) Shuangchi Maar Lake in Hainan (Tang Wenkun et al., 2017&, original Fig. 4a); (g) frequency of typhoons in Guangdong Province, Hainan Island and Hongkong Special Administrative Region (Liu Kambiu et al., 2001, original Fig. 4)

黑色虚线代表各记录的平均值。根据相应文献中的原始数据作图

Dashed lines denote average values of each record. The figures are redrawn based on the original data the literatures

数和玉华洞的石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 记录在小冰期表现为正常年份外,相对于中世纪暖期的气候而言,小冰期期间东南—华南沿海其他地区的气候偏“湿”:广东湖光岩 TOC 记录和海南双池玛珥湖沉积物的粒径记录显示小冰期前期和中期气候湿润;而翠峰湖的湖水 pH 值和南冲绳海槽的淡水种硅藻记录则在小冰期中后期(1500~1900 AD)偏湿。

4.2 小冰期中国中部地区的气候变化

位于中部地区的陕西佛爷洞石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 记录在中世纪暖期 900~1300 AD 期间主要围绕平均值波动;而在小冰期 1500~1810 AD 期间明显偏负(Paulsen et al., 2003),和陕西大鱼洞石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 记录的变化趋势较一致(Tan Liangcheng et al., 2009)(图 4a 和 4b)。但大鱼洞石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 较其平均值 $-7.15\text{\textperthousand}$ 明显偏负的持续时间较短,大约持续了 150a (1530~1680 AD) (Tan Liangcheng et al., 2009)(图 4b)。小冰期中晚期时大鱼洞和佛爷洞偏负的石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 值指示陕西南部地区偏湿的气候

环境(Paulsen et al., 2003; Tan Liangcheng et al., 2009)(图 4a 和 4 b)。同样,基于湖北高山沼泽大九湖的孢粉重建的降水量记录显示该区域在小冰期 1300~1900 AD 期间降水增多,气候湿润,与中世纪暖期偏干的气候模态不同(何报寅等, 2003)(图 4c)。然而,长江中游地区的湖北永兴洞(张伟宏等, 2019)、和尚洞(Hu Chaoyong et al., 2008)的石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 记录以及鄱阳湖(Li Xiangzhong et al., 2016)沉积物的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 记录却呈现出相反的变化趋势(图 4d—4f)。永兴洞、和尚洞石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 分别在 1480~1840 AD 和 1300~1750 AD 期间明显偏正(Hu Chaoyong et al., 2008; 张伟宏等, 2019),气候偏干(图 4d 和 4e)。鄱阳湖沉积物中总有机质的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 记录于 1420~1550 AD 和 1560~1830 AD 偏正,显示小冰期中后期气候呈现偏干的趋势,除了 1550~1560 AD 期间降水突然增多(Li Xiangzhong et al., 2016),类似的现象也存在于和尚洞的石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 记录中(图 4e 和 4f)。

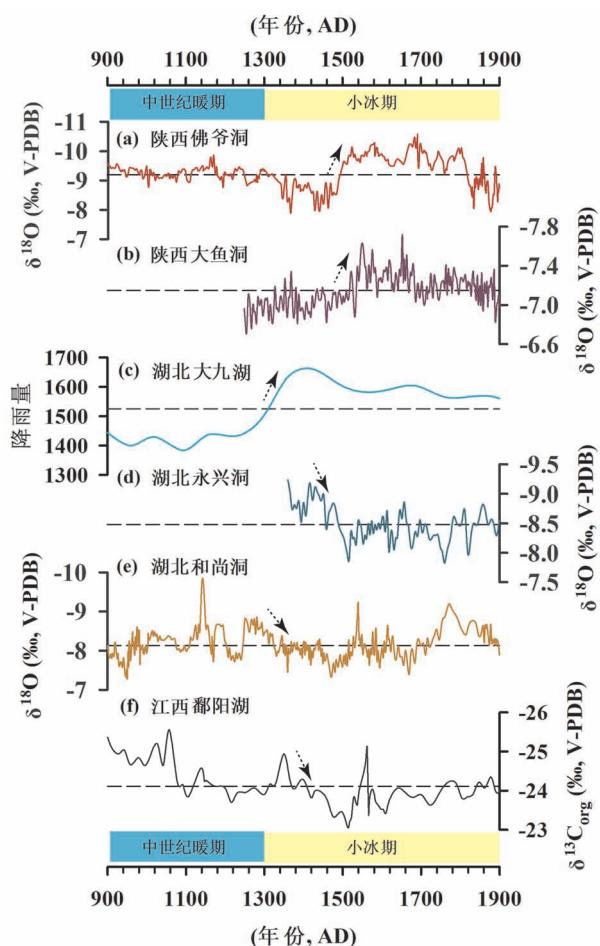


图 4 中国南方中部地区的古气候记录对比: (a) 陕西佛爷洞(Paulsen et al., 2003, 原图 6a); (b) 陕西大鱼洞(Tan Liangcheng et al., 2009, 原图 4A); (c) 湖北大九湖(何报寅等, 2003, 原图 5e); (d) 湖北永兴洞(张伟宏等, 2019, 原图 4); (e) 湖北和尚洞(Hu Chaoyong et al., 2008, 原图 4a); (f) 江西鄱阳湖(Li Xiangzhong et al., 2016, 原图 3a)

Fig. 4 Comparison of paleoclimatic records in the central part of south China: (a) Buddha Cave in Shaanxi (Paulsen et al., 2003, original cave name; original Fig. 6a); (b) Dayu Cave in Shaanxi (Tan Liangcheng et al., 2009, original Fig. 4A); (c) Dajiu Lake in Hubei (He Baoyin et al., 2003&, original Fig. 5e); (d) Yongxing Cave in Hubei (Zhang Weihong et al., 2019&, original Fig. 4); (e) Heshang Cave in Hubei (Hu Chaoyong et al., 2008, original Fig. 4a); (f) Poyang Lake (Li Xiangzhong et al., 2016, original Fig. 3a)

黑色虚线代表各记录的平均值;箭头表示相反的变化趋势。

根据前人原始数据作图

Dashed lines denote average values of each record. The arrows indicate the opposite trend. The figures are redrawn based on the original data the literatures

与中世纪暖期相比,秦岭南麓地区的佛爷洞和大鱼洞石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 记录以及神农架大九湖的记录反映小冰期时期气候偏湿,不同的是秦岭南麓地区的气候在小冰期中后期偏湿。这与长江中游地区的永兴洞、和尚洞石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 记录以及鄱阳湖的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 记录的变化趋势呈反相位关系,说明小冰期中后期中国南方中部地区可能存在两种不同的降水模式,即:“北湿南干”。

4.3 小冰期中国西南地区的气候变化

小冰期中晚期重庆的旱涝指数等级整体上偏高,其等级集中分布在 2~5 之间且平均值大于 3,说明这期间重庆的气候比正常年份偏干(中央气象科学研究院, 1981) (图 5a),这对应了重庆武隆芙蓉洞石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 偏正的阶段(1470~1700 AD),响应了小冰期开始后亚洲夏季风的减弱,降水减少(Li Hongchun et al., 2011) (图 5b)。比较特别的是,相比于小冰期,芙蓉洞石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 在中世纪暖期 900~1150 AD 期间明显偏正,而贵州董哥洞的石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 在中世纪暖期主要围绕平均值呈年代际一百年尺度高频振荡,体现了西南地区区域气候变化的复杂性(Li Hongchun et al., 2011; Zhao Kan et al., 2015) (图 5b 和 5c)。贵州董哥洞石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 在小冰期有两个明显偏正的阶段:1370~1440 AD 和 1500~1680 AD,与四川神奇洞石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 记录的两个明显偏正的阶段 1340~1400 AD 和 1545~1600 AD 较一致(Zhao Kan et al., 2015; Tan Liangcheng et al., 2018) (图 5c 和 5d)。这两个洞穴石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 明显偏正的阶段均对应了中国历史上两次著名的弱亚洲夏季风事件:“元末弱夏季风事件”和“明末弱夏季风事件”(Zhang Pingzhong et al., 2008)。然而,相对于中世纪暖期而言,云南泸沽湖沉积物的粒度在 1300~1750 AD 期间大于其平均值,指示小冰期期间气候偏湿(Sheng Enguo et al., 2015) (图 5e)。云南洱海沉积物的粒度在 900~1450 AD 期间均小于平均值,说明该区域在中世纪暖期和小冰期前期气候偏干;在 1450 AD 之后洱海沉积物的粒度逐渐增大且波动幅度变大,指示该区域气候偏湿且不稳定(Xu Hai et al., 2015) (图 5f)。在小冰期中晚期 1500~1900 AD,云南泸沽湖和洱海的粒径记录表现出了反相位变化,也体现了小冰期西南地区降水变化的复杂性(Xu Hai et al., 2015) (图 5e 和 5f)。因此,小冰期期间中国西南地区的气候变化也存在显著的内部差异。

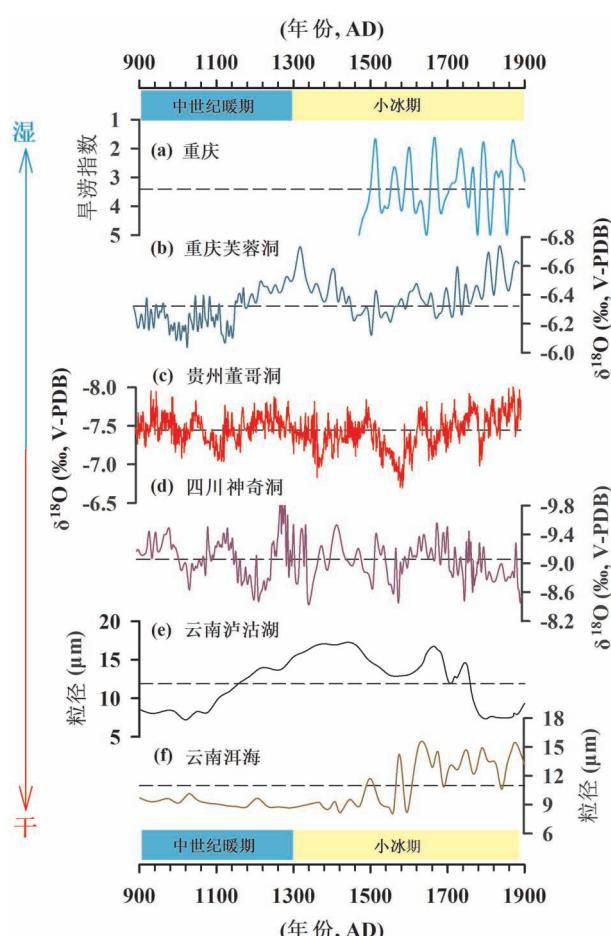


图5 中国西南地区的古气候记录对比: (a) 重庆旱涝指数—11年平滑数据(中央气象科学研究院, 1981); (b) 重庆芙蓉洞(Li Hongchun et al., 2011, 原图8a); (c) 贵州董哥洞(Zhao Kan et al., 2015, 原图3c); (d) 四川神奇洞(Tan Liangcheng et al., 2018, 原图7B); (e) 云南泸沽湖(Sheng Enguo et al., 2015, 原图4); (f) 云南洱海(Xu Hai et al., 2015, 原图4b)

Fig. 5 Comparison of paleoclimatic records in southwest China: (a) drought/wet index in Chongqing—11-year running average (Chinese Academy of Meteorological Sciences, 1981 #); (b) Furong Cave in Chongqing (Li Hongchun et al., 2011, original Fig. 8a); (c) Dongge Cave in Guizhou (Zhao Kan et al., 2015, original Fig. 3c); (d) Shenqi Cave in Sichuan (Tan Liangcheng et al., 2018, original Fig. 7B); (e) Lugu Lake in Yunnan (Sheng Enguo et al., 2015, original Fig. 4); (f) Erhai Lake in Yunnan (Xu Hai et al., 2015, original Fig. 4b)

黑色虚线代表各记录的平均值。根据前人原始数据作图

Dashed lines denote average values of each record. The figures are redrawn based on the original data the literatures

5 主要影响因素

触发小冰期的主要驱动机制是火山活动和太阳活动(Mann et al., 2005, 2009; Neukom et al.,

2019)。火山爆发频繁,火山灰进入大气层,导致大气层对太阳辐射的削弱作用增强,太阳辐射减弱而产生寒冷期(Mann et al., 2005)。与中世纪暖期相比,小冰期中国东南—华南沿海地区的气候偏湿润,可能与东南—华南沿海地区受台风的影响增强有关(Liu Kambiu et al., 2001)(图2e)。基于广东省、海南岛和香港特别行政区的历史资料重建的近1000年台风登陆频率记录显示小冰期期间,特别是1500 AD之后台风的登陆频率明显增加(Liu Kambiu et al., 2001)。因此,小冰期期间台风增强或次数增加,是导致东南—华南沿海地区降水增加的因素之一(Chen Chingsen and Chen Yileng, 2003; Wan Naijung et al., 2011; Yang Tiennan et al., 2011)。此外,小冰期期间西太平洋暖池海表温度低于正常值,中南半岛与菲律宾之间的对流活动减弱,西太平洋副热带高压可能异常南移,导致雨带在中国南方的滞留时间延长,也会造成东南—华南沿海地区季风性降雨增多(Tan Liangcheng et al., 2011; Chen Fahu et al., 2015)。

小冰期时期中国中部地区从南到北对亚洲夏季风变化的降水响应存在明显的区域差异。相对于中世纪暖期而言,小冰期中后期中部地区的降水模式表现为“北湿南干”。这种区域差异可能是由于地形和大气环流的复杂性所导致;秦岭的阻挡引起气流抬升,加强对流,导致秦岭南麓的迎风坡地区偏湿(Tan Liangcheng et al., 2011)。而神农架大九湖地处高海拔地区(1700 m),气温低,蒸发弱,有利于高山沼泽地水分的保留,在小冰期呈现“冷湿”的气候模态,与长江中游其他地区偏干的气候模态不同(何报寅等, 2003)。此外,中国西南地区受印度夏季风和东亚夏季风的共同影响(Wan Naijung et al., 2011),且该区域地形复杂(如:高原、山地和盆地等),其气候变化更复杂。中国南方地区的降水深受地形地貌的影响,地形地貌差异、海拔高度以及山坡朝向等都是造成南方地区内部降水差异显著的重要因素。

6 近30年中国南方地区降水变化的空间特征

目前所处的时期为现代暖期(1900~至今),1961~1990年器测记录的平均气温显示该时期北半球的气温比小冰期高出0.5°C左右(Jones and Mann, 2004; Mann et al., 2009; Wilson et al., 2016)。1990~2019年GPCC (Global Precipitation

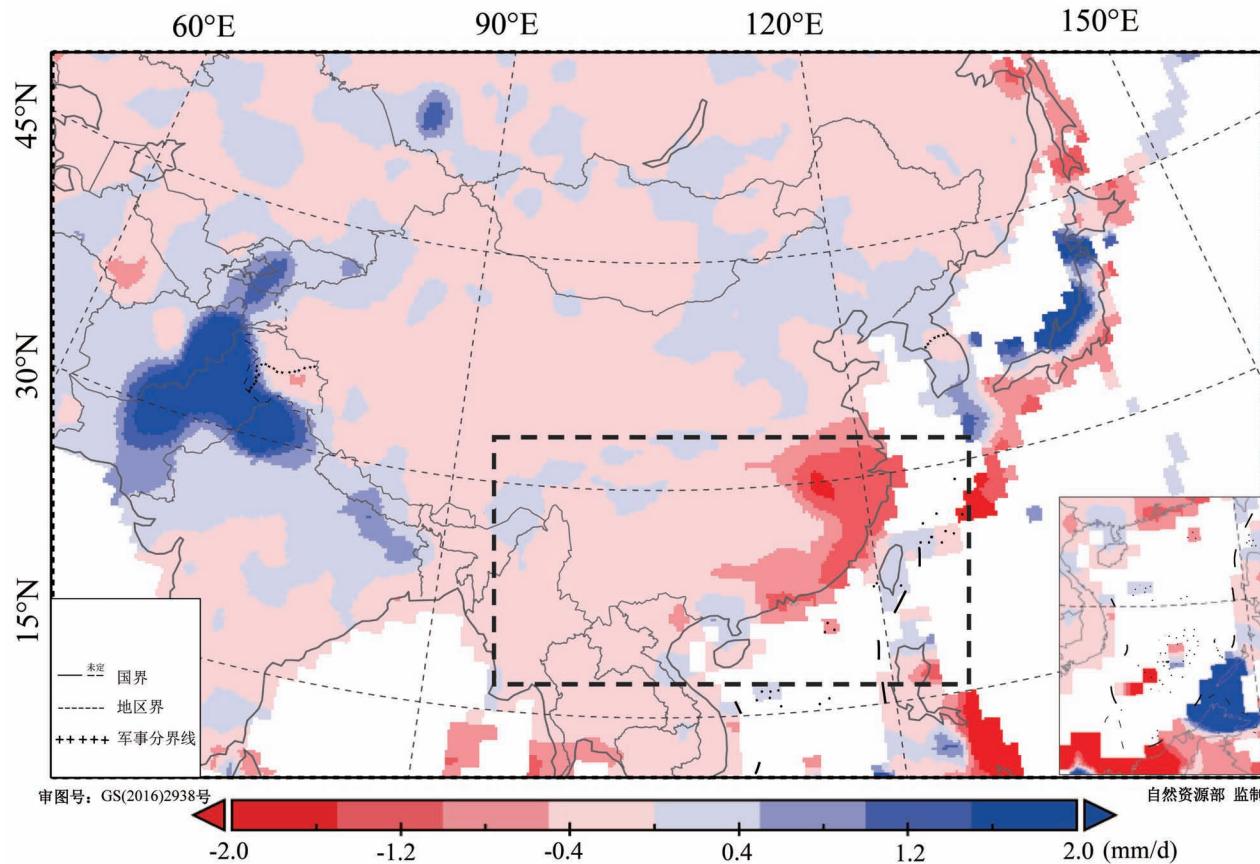


图 6 1990~2019 年基于 $1.0^\circ \times 1.0^\circ$ 网格分辨率的 GPCC V2018 combined+V6 降水异常分布图(相对于 1900~2019 年)

Fig. 6 GPCC V2018 combined+V6 precipitation anomaly based on the $1.0^\circ \times 1.0^\circ$ gridded gauge-analysis data during 1990~2019 AD (relative to 1900~2019 AD)

图片通过软件 Panoply4.10.12 绘制。数据下载自: <http://climexp.knmi.nl/start.cgi>

The figure is drawn by Panoply4.10.12. and the data is downloaded from: <http://climexp.knmi.nl/start.cgi>

Climatology Center) 年降水异常分布图显示近 30 年中国南方地区除了台湾、雷州半岛和秦岭南麓区域, 其他区域降水均呈减少的趋势, 特别是东南沿海地区降水明显减少(图 6)。秦岭南麓区域受迎风坡的影响, 水汽遇到山脉阻挡而抬升有利于降水的增加, 体现了地形因素对区域降水变化的影响 (Tan Liangcheng et al., 2011)。值得注意的是:除了台湾和雷州半岛, 近 30 年东南—华南沿海地区其他区域呈偏干的趋势, 这与小冰期时东南—华南沿海地区主要呈偏湿的趋势相反(图 2, 图 3, 图 6)。可能是由于现在的气温、人类活动等因素与小冰期时期存在差异 (Zhou Xiiji et al., 2011; Deng Wenfeng et al., 2017; Duan Fucai et al., 2020)。但目前在全球变暖的背景下, 西太副高的强度和位置以及其对东亚夏季风降水的影响仍存在很多争议, 有待进一步论证 (Huang Yanyan et al., 2016; Zhao Jinyao et

al., 2018)。另外, 基于综合代用指标重建的小冰期中国南方降水模式也可能会由于记录的数量、空间分布的均匀性、对气候响应的敏感程度、测年方法、测年误差以及分辨率等多种因素而存在一定程度的不确定性。相对于湖泊记录而言, 石笋对气候变化的响应更为迅速, 分辨率也更高;而历史资料的年代更精准, 缺点是记录涵盖时间短。不同记录各有优缺点, 综合分析更有助于古气候重建。因此在年代际—百年际时间尺度上的中国南方古气候重建中, 覆盖更多区域的高精度高分辨率记录显得尤为重要和紧迫。

7 结论

小冰期期间中国南方地区的降水存在显著的差异。相对于中世纪暖期偏干的气候而言, 小冰期期间东南—华南沿海地区的气候偏湿。中国中部地区

秦岭南麓和神农架高山林区在小冰期时期主要呈“冷湿”的气候模式,差异在于秦岭南麓地区主要在小冰期中后期偏湿;而中部地区其他区域(湖北、江西)则相反,以“冷干”的模式为主。小冰期时西南地区的降水模式更为复杂,没有呈现出比较一致的特征。目前,在全球变暖的大背景下,由于气温和人类活动等因素的影响,近30年中国南方地区的降水整体上呈减少的趋势,除了台湾、雷州半岛和秦岭南麓区域的降水增加。

小冰期时期中国南方地区不同区域降水模式的差异性,指示了气候环境的复杂性。重建小冰期时期中国南方地区内部降水模式的时空差异,对于认识中国南方地区降水变化规律以及旱涝灾害的预测和防控具有重要意义。但是单独使用石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 反映局地降水变化可能会存在不确定性;石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 与微量元素相结合的综合研究更能准确反映区域气候和水文条件的变化。当前,高精度年代控制下的高分辨率石笋微量元素记录仍旧相对缺乏,限制了大空间尺度上降水变化格局的对比研究。今后,获取更广阔区域的高精度高分辨率的多指标地质记录,对于准确的古气候重建尤为重要。而对不同地区响应全球气候变化的物理机制的深入研究,将对未来气候变化的预测产生重要影响。

致谢:感谢姜修洋教授、李冬玲博士、褚国强研究员、李祥忠研究员、李红春教授、张伟宏博士、盛恩国博士、徐海教授和汤文坤硕士为本研究提供各记录的原始数据。特别感谢法国波尔多大学张键博士对本论文修改提出许多宝贵意见和建议。最后感谢审稿专家和编辑部提出的建设性修改意见。

参 考 文 献 / References

(The literature whose publishing year followed by a “&” is in Chinese with English abstract; The literature whose publishing year followed by a “#” is in Chinese without English abstract)

何报寅, 张穗, 蔡述明. 2003. 近2600年神农架大九湖泥炭的气候变化记录. 海洋地质与第四纪地质, 23(2): 109~115.

姜修洋, 李志忠, 李金全, 孔兴功, 郭允. 2012. 最近500年来福建玉华洞石笋氧同位素记录及气候意义. 地理科学, 32(2): 208~212.

茅海祥, 王文. 2011. 中国南方地区近50 a 夏季干旱时空分布特征. 干旱气象, 29(3): 283~288.

汤文坤, 王永, 董进, 田飞, 刘瑾, 江南. 2017. 海南北部近2000年气候环境变化—来自双池玛珥湖高分辨率沉积记录. 西北地质, 50(1): 292~300.

张伟宏, 陈仕涛, 汪永进, 赵侃, 邵庆丰, 王天阳, 朱丽东. 2019. 小冰期东亚夏季风快速变化特征: 湖北石笋记录. 第四纪研究, 39(3): 765~774.

中央气象科学研究院. 1981. 中国近500年旱涝分布图集. 北京: 地

图出版社: 1~332.

Bronnimann S, Franke J, Nussbaumer S U, Zumbuhl H J, Steiner D, Trachsel M, Hegerl G C, Schurer A, Worni M, Malik A, Flückiger J, Raible C C. 2019. Last phase of the Little Ice Age forced by volcanic eruptions. *Nature Geoscience*, 12(8): 650~656.

Chen Chingsen, Chen Yileng. 2003. The rainfall characteristics of Taiwan. *Monthly Weather Review*, 131(7): 1323~1341.

Chen Fahu, Chen Jianhui, Holmes J, Boomer I, Austin P, Gates J B, Wang Ninglian, Brooks S J, Zhang Jiawu. 2010. Moisture changes over the last millennium in arid central Asia: a review, synthesis and comparison with monsoon region. *Quaternary Science Reviews*, 29(7~8): 1055~1068.

Chen Fahu, Xu Qinghai, Chen Jianhui, Birks H, John B, Liu Jianbao, Zhang Shengrui, Jin Liya, An Chengbang, Telford R J, Cao Xianyong, Wang Zongli, Zhang Xiaojian, Selvaraj K, Lu Houyuan, Li Yuecong, Zheng Zhuo, Wang Haipeng, Zhou Aifeng, Dong Guanghui, Zhang Jiawu, Huang Xiaozhong, Bloemendaal J, Rao Zhiguo. 2015. East Asian summer monsoon precipitation variability since the last deglaciation. *Scientific Reports*, 5: 1~11.

Chen Jianhui, Chen Fahu, Feng Song, Huang Wei, Liu Jianbao, Zhou Aifeng. 2015. Hydroclimatic changes in China and surroundings during the Medieval Climate Anomaly and Little Ice Age: Spatial patterns and possible mechanisms. *Quaternary Science Reviews*, 107(1): 98~111.

Chinese Academy of Meteorological Sciences. 1981#. Yearly charts of dryness/wetness in China for the last 500-year period, Beijing. SinoMap Cartogr. Publ. House, Beijing.

Chu Guoqiang, Liu Jiaqi, Sun Qing, Lu Houyuan, Gu Zhaoyan, Wang Wenyuan, Liu Tungsheng. 2002. The ‘Mediaeval Warm Period’ drought recorded in Lake Huguangyan, tropical South China. *Holocene*, 12(5): 511~516.

Chu Peter, Li Hongchun, Fan Chenwu, Chen Yongheng. 2012. Speleothem evidence for temporal—spatial variation in the East Asian Summer Monsoon since the Medieval Warm Period. *Journal of Quaternary Science*, 27(9): 901~910.

Cui Anning, Ma Chunmei, Zhao Lin, Tang Lingyu, Jia Yulian. 2018. Pollen records of the Little Ice Age humidity flip in the middle Yangtze River catchment. *Quaternary Science Reviews*, 193: 43~53.

Deng Wenfeng, Liu Xi, Chen Xuefei, Wei Gangjian, Zeng Ti, Xie Luhua, Zhao Jianxin. 2017. A comparison of the climates of the Medieval Climate Anomaly, Little Ice Age, and Current Warm Period reconstructed using coral records from the northern South China Sea. *Journal of Geophysical Research—Oceans*, 122(1): 264~275.

Duan Fucui, Zhang Zhenqiu, Wang Yi, Chen Jianshun, Liao Zebo, Chen Shitao, Shao Qingfeng, Zhao Kan. 2020. Hydrological variations in central China over the past millennium and their links to the tropical Pacific and North Atlantic oceans. *Climate of the Past*, 16(2): 475~485.

He Baoyin, Zhang Sui, Cai Shuming. 2003&. Climatic changes recorded in peat from the dajiu lake basin in shennongjia since the last 2 600 years. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 23(2): 109~115.

Holzhauser H, Magny M, Zumbuhl H J. 2005. Glacier and lake-level variations in west-central Europe over the last 3500 years. *Holocene*, 15(6): 789~801.

Hu Chaoyong, Henderson G M, Huang Junhua, Xie Shucheng, Sun

- Ying, Johnson K R. 2008. Quantification of Holocene Asian monsoon rainfall from spatially separated cave records. *Earth and Planetary Science Letters*, 266(3~4) : 221~232.
- Huang Yanyan, Li Xiaofan, Wang Huijun. 2016. Will the western Pacific subtropical high constantly intensify in the future? *Climate Dynamics*, 47(1~2) : 567~577.
- Jiang Xiuyang, Li Zhizhong, Li Jinquan, Kong Xinggong, Guo Yun. 2012&. Stalagmite $\delta^{18}\text{O}$ record from Yuhua Cave over the past 500 years and its regional climate significance. *Scientific Geographica Sinica*, 32(2) : 208~212.
- Jones P D, Mann M E. 2004. Climate over past millennia. *Reviews of Geophysics*, 42(2) : 1~42.
- Kayastha R B, Harrison S P. 2008. Changes of the equilibrium-line altitude since the Little Ice Age in the Nepalese Himalaya. *Annals of Glaciology*, 48(1) : 93~99.
- Kuo Tzshing, Liu Ziqi, Li Hongchun, Wan Naijung, Shen Chuanchou, Ku Tehlung. 2011. Climate and environmental changes during the past millennium in central western Guizhou, China as recorded by Stalagmite ZJD-21. *Journal of Asian Earth Sciences*, 40(6) : 1111~1120.
- Li Dongling, Jiang Hui, Li Tiegang, Zhao Meixun. 2011. Late Holocene paleoenvironmental changes in the southern Okinawa Trough inferred from a diatom record. *Chinese Science Bulletin*, 56(11) : 1131~1138.
- Li Hongchun, Lee Zhonghong, Wan Naijung, Shen Chuanchou, Li Tingyong, Yuan Daoxian, Chen Yongheng. 2011. The $\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^{13}\text{C}$ records in an aragonite stalagmite from Furong Cave, Chongqing, China: A 2000-year record of monsoonal climate. *Journal of Asian Earth Sciences*, 40(6) : 1121~1130.
- Li Xiangzhong, Yang Hong, Yao Yuan, Chen Yuwei, Liu Weiguo. 2016. Precipitation changes recorded in the sedimentary total organic carbon isotopes from Lake Poyang in the Middle and Lower Yangtze River, southern China over the last 1600 years. *Quaternary International*, 425: 292~300.
- Liu Kambiu, Shen Caiming, Louie Kinsheun. 2001. A 1,000-year history of typhoon landfalls in Guangdong, Southern China, reconstructed from Chinese historical documentary records. *Annals of the Association of American Geographers*, 91(3) : 453~464.
- Mann M E, Cane M A, Zebiak S E, Clement A. 2005. Volcanic and solar forcing of the tropical Pacific over the past 1000 years. *Journal of Climate*, 18(3) : 447~456.
- Mann M E, Zhang Zhihua, Rutherford S, Bradley R S, Hughes M K, Shindell D, Ammann C, Faluvegi G, Ni Fenbiao. 2009. Global Signatures and Dynamical Origins of the Little Ice Age and Medieval Climate Anomaly. *Science*, 326(5957) : 1256~1260.
- Mao Haixiang, Wang Wen. 2011&. Temporal and spatial distribution characteristic of summer drought in South China over recent 50 years. *Journal of Arid Meteorology*, 29(3) : 283~288.
- Matthes R E. 1939. Report of the Committee on Glaciers, 1939~40. *Transactions American Geophysical Union*, 20(2) : 518~523.
- Matthews J A, Briffa K R. 2005. The “Little Ice Age”: Re-evaluation of an evolving concept. *Geografiska Annaler Series a—Physical Geography*, 87A(1) : 17~36.
- Neukom R, Steiger N, Jose Gomez-Navarro J, Wang Jianghao, Werner J P. 2019. No evidence for globally coherent warm and cold periods over the preindustrial Common Era. *Nature*, 571(7766) : 550~554.
- Paulsen D E, Li Hongchun, Ku Tehlung. 2003. Climate variability in central China over the last 1270 years revealed by high-resolution stalagmite records. *Quaternary Science Reviews*, 22(5~7) : 691~701.
- Sheng Enguo, Yu Keke, Xu Hai, Lan Jiang Hu, Liu Bin, Che Shuai. 2015. Late Holocene Indian summer monsoon precipitation history at Lake Lugu, northwestern Yunnan Province, southwestern China. *Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology*, 438: 24~33.
- Tan Liangcheng, Cai Yanjun, Cheng Hai, An Zhisheng, Edwards R L. 2009. Summer monsoon precipitation variations in central China over the past 750 years derived from a high-resolution absolute-dated stalagmite. *Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology*, 280(3~4) : 432~439.
- Tan Liangcheng, Cai Yanjun, Cheng Hai, Edwards R L, Lan Jianghu, Zhang Haiwei, Li Dong, Ma Le, Zhao Peipei, Gao Yongli. 2018. High resolution monsoon precipitation changes on southeastern Tibetan Plateau over the past 2300 years. *Quaternary Science Reviews*, 195: 122~132.
- Tan Liangcheng, Cai Yong, An Zhisheng, Zhang Huiwen, Qin Shaonian. 2011. Climate patterns in north central China during the last 1800 yr and their possible driving force. *Climate of the Past*, 7(3) : 685~692.
- Tang Wenkun, Wang Yong, Dong Jin, Tian Fei, Liu Jin, Jiang Nan. 2017&. High resolution paleoenvironmental evolution revealed by a lacustrine sediment sequence in Shuangchi Maar Lake during past 2000 years in North Hainan Island. *Northwestern Geology*, 50(1) : 292~300.
- Wan Naijung, Li Hongchun, Liu Ziqi, Yang Hsinying, Yuan Daoxian, Chen Yongheng. 2011. Spatial variations of monsoonal rain in eastern China: Instrumental, historic and speleothem records. *Journal of Asian Earth Sciences*, 40(6) : 1139~1150.
- Wang Jianlin, Yang Bao, Qin Chun, Kang Shuyuan. 2014. Spatial patterns of moisture variations across the Tibetan Plateau during the past 700 years and their relationship with Atmospheric Oscillation modes. *International Journal of Climatology*, 34(3) : 728~741.
- Wang Liangchi, Behling Hermann, Lee Tehquei, Li Hongchun, Huh Chihhan, Shiau Liangjian, Chen Suhwa, Wu Junntzong. 2013. Increased precipitation during the Little Ice Age in northern Taiwan inferred from diatoms and geochemistry in a sediment core from a subalpine lake. *Journal of Paleolimnology*, 49(4) : 619~631.
- Wilson R, Anchukaitis K, Briffa K R, Buentgen U, Cook E, D'Arrigo R, Davi N, Esper J, Frank D, Gunnarson B, Hegerl G, Helama S, Klesse S, Krusic P J, Linderholm H W, Myglan V, Osborn T J, Rydval M, Schneider L, Schurer A, Wiles G, Zhang Peng, Zorita E. 2016. Last millennium northern hemisphere summer temperatures from tree rings: Part I: The long term context. *Quaternary Science Reviews*, 134: 1~18.
- Xu Hai, Zhou Xinying, Lan Jianghu, Liu Bin, Sheng Enguo, Yu Keke, Cheng Peng, Wu Feng, Hong Bin, Yeager K M, Xu Sheng. 2015. Late Holocene Indian summer monsoon variations recorded at Lake Erhai, Southwestern China. *Quaternary Research*, 83(2) : 307~314.
- Yang Tiennan, Lee Tehquei, Meyers P A, Fan Chengwei, Chen Roufei, Wei Kuoyen, Chen Yuegau, Wu Junntzong. 2011. The effect of typhoon induced rainfall on settling fluxes of particles and organic carbon in Yuanyang Lake, subtropical Taiwan. *Journal of Asian Earth Sciences*, 40(6) : 1171~1179.
- Zhang Pingzhong, Cheng Hai, Edwards R L, Chen Fahu, Wang Yongjin, Yang Xunlin, Liu Jian, Tan Ming, Wang Xianfeng, Liu

- Jinghua, An Chunlei, Dai Zhibo, Zhou Jing, Zhang Dezhong, Jia Jihong, Jin Liya, Johnson K R. 2008. A Test of Climate, Sun, and Culture Relationships from an 1810-Year Chinese Cave Record. *Science*, 322(5903): 940~942.
- Zhang Weihong, Chen Shitao, Wang Yongjin, Zhao Kan, Shao Qingfeng, Wang Tianyang, Zhu Lidong. 2019&. Rapid change in the East Asian Summer Monsoon: stalagmite records in Hubei, China. *Quaternary Sciences*, 39(3): 765~774.
- Zhao Jingyao, Cheng Hai, Yang Yan, Tan Liangcheng, Christoph Spötl, Ning Youfeng, Zhang Haiwei. 2018. Reconstructing the western boundary variability of the Western Pacific Subtropical High over the

past 200 years via Chinese cave oxygen isotope records. *Climate Dynamics*, 52(5~6): 3741~3757.

- Zhao Kan, Wang Yongjin, Edwards R L, Cheng Hai, Liu Dianbing, Kong Xinggong. 2015. A high-resolved record of the Asian Summer Monsoon from Dongge Cave, China for the past 1200 years. *Quaternary Science Reviews*, 122: 250~257.

- Zhou Xiuli, Zhao Ping, Liu Ge, Zhou TianJun. 2011. Characteristics of decadadal—centennial-scale changes in East Asian summer monsoon circulation and precipitation during the Medieval Warm Period and Little Ice Age and in the present day. *Chinese Science Bulletin*, 56(28~29): 3003~3011.

Pattern of precipitation changes in southern China during the Little Ice Age

XIAO Siya^{1,2)}, LI Tingyong^{3, 1)}, CHEN Chaojun¹⁾, HUANG Ran¹⁾, WANG Tao¹⁾,
WU Yao¹⁾, XU Yuzhen¹⁾, QIU Haiying¹⁾, HUANG Yangyang¹⁾, LI Junyun^{1, 2)}

- 1) *Chongqing Key Laboratory of Karst Environment, School of Geographical Sciences, Southwest University, Chongqing, 400715;*
2) *Key Laboratory of Karst Dynamics, MNR & Guangxi, Institute of Karst Geology, CAGS, Guilin, Guangxi, 541004;*
3) *Yunnan Key Laboratory of Plateau Geographical Processes and Environmental Change,
Faculty of Geography, Yunnan Normal University, Kunming, 650500*

Abstract: The Little Ice Age (LIA) is one of the most distinct events of global climate change in the past millennium. There are many comparative studies on the climate change between monsoon- and westerly-dominated regions in China during the LIA, but there is a lack of research on the spatiotemporal differences of climate change in southern China. It makes difficulty to understand the regularity of precipitation changes in southern China during the LIA. In order to comprehensively and systematically understand the complexity of regional precipitation in southern China during the LIA, we divide southern China into three regions, namely the coastal region of southeast—south China, the central region and the southwest region. A total of 19 high-resolution paleoclimate records are selected for comparative study, mainly including the following points: ① Compared to the Medieval Warm Period, the coastal region of southeast—south China mainly shows a “cold—wet” pattern over the LIA, which may be related to the prolonged residence time of rain belt in southern China and the enhanced influence of typhoon on coastal region. ② Over the mid—late LIA, the south flank of the Qinling Mountains and the alpine forest region of Shennongjia mainly showed a “cold—wet” pattern, of which the difference is that the southern flank of the Qinling Mountains was wet over the mid—late LIA. However, other areas in Central region were characterized by a “cold—dry” pattern. Such regional differences may be caused by the complexity of topography and atmospheric circulation. ③ Affected by Indian summer monsoon, East Asian summer monsoon and complex terrain, the climate change in southwest China experienced discrepancy during the LIA, without presenting a relatively consistent and typical climate pattern. Different from the precipitation changes during the LIA, the precipitation changes in the coastal region of southeast—south China decreased significantly in the past 30 years, except for the Taiwan and Leizhou peninsula, which may be affected by factors such as temperature and human activities. Based on the high-resolution paleoclimate records, we systematically analyzed the spatial and temporal differences of the Drought/Wet patterns and their possible influencing factors of the LIA in southern China. It is of great significance to understand the complexity of precipitation in different regions of southern China during the LIA, contributing to prevent and control the drought/flood disasters in the future as well.

Keywords: The Little Ice Age; southern China; precipitation patterns; paleoclimate records

Acknowledgements: This research was supported by the Open Project of Guangxi Key Science and Technology Innovation Base on Karst Dynamics (No. KDL & Guangxi 202003) to LI Junyun; the National Natural Science Foundation of China (Nos. 41772170; 42011530078), and the Fundamental Research Funds for the

Central Universities, China (No. XDKJ2017A010 and No. XDKJ2020D005) to LI Tingyong

First author: XIAO Siya, female, born in 1996, master student; Email: zu626492@email.swu.edu.cn

Corresponding author: LI Tingyong, male, born in 1978, professor, mainly working in Quaternary Geological Research; Email: cdlty@swu.edu.cn

Corresponding author: LI Junyun, female, born in 1978, associate professor, mainly working in Physical Geographical Research; Email: jxljy@swu.edu.cn

Manuscript received on: 2020-02-01; Accepted on: 2020-10-27; Edited by: ZHANG Yuxu

Doi: 10.16509/j.georeview.2021.01.005

《地质学报》和《地质论评》再获“第五届中国精品科技期刊”称号

2020年12月29日,中国科学技术信息研究所以线上会议的形式召开了“中国科技论文统计结果发布会”,会上公布了“2019年度中国百篇最具影响国内学术论文”名单、“第五届中国精品科技期刊”(共300部中文期刊,它们同时成为“中国精品科技期刊顶尖学术论文(F5000)”来源期刊)和“第五届国际化精品科技期刊”(共20部英文期刊)名单。中国地质学会主办期刊《地质学报》和《地质论评》连续5届均光荣上榜。《地质论评》1篇文章获得“中国百篇最具影响国内学术论文”称号。

为打造中国精品科技期刊,推动中国科技期刊评价体系的研究,提高中国科技水平,2000年开始,科技部开展了“中国精品科技期刊战略研究”和“中国精品科技期刊服务与保障系统”的研究。中国科学技术信息研究所承担科技部中国

科技期刊战略相关研究任务,在国内首先提出了“中国精品科技期刊”的概念,并于2008年评选“首届中国精品科技期刊”暨“中国精品科技期刊顶尖学术论文(F5000)”来源期刊,有效期3年。此后每3年评选一届。

自1987年以来,中国科学技术信息研究所承担“中国科技论文统计与分析”工作,相关宏观统计数据编入国家统计局和国家科学技术部编制的《中国科技统计年鉴》,统计和分析研究成果被科技管理部门和学术界广泛关注和应用。

LIU Zhiqiang: *Acta Geologica Sinica and Geological Review*
awarded continuously the title of “the 5th Outstanding
Science and Technology Journals of China”

中国精品科技期刊证书 Certificate of Outstanding S&T Journals of China

2020



F5000

地质论评

根据中国精品科技期刊遴选指标体系综合评价结果,贵刊入选“第5届中国精品科技期刊”,即“中国精品科技期刊顶尖学术论文(F5000)”项目来源期刊。

特此证明。

有效期: 2020年12月-2023年12月
证书编号: 2019-E009-JP068

精品科技期刊服务与保障系统项目组
中国科学技术信息研究所
2020年12月



中国精品科技期刊证书 Certificate of Outstanding S&T Journals of China

2020



F5000

地质学报

根据中国精品科技期刊遴选指标体系综合评价结果,贵刊入选“第5届中国精品科技期刊”,即“中国精品科技期刊顶尖学术论文(F5000)”项目来源期刊。

特此证明。

有效期: 2020年12月-2023年12月
证书编号: 2019-E010-JP066

精品科技期刊服务与保障系统项目组
中国科学技术信息研究所
2020年12月

