

末次盛冰期中国南方地质载体揭示的气候响应模式差异

卢海欣

浙江师范大学地理与环境科学学院, 浙江 金华

收稿日期: 2024年7月30日; 录用日期: 2024年8月29日; 发布日期: 2024年9月4日

摘要

末次盛冰期(LGM)是距今最近的全球冰量鼎盛时期。这一时期全球显著变冷, 气候状态与现代差异巨大, 因此成为古气候研究中的热点时期。中国南方地处亚热带气候区, 对气候变化响应敏感, 有学者已对LGM期间该地区的气候特征进行了初步研究, 但南方地区内部气候特征的差异仍未得到充分认识。为此文章梳理了LGM时期中国南方不同区域的地质记录, 总结了这一时期南方地区气候环境的基本特征, 并对其所呈现的区域性差异进行分析。研究表明LGM期间中国南方不同区域的地质载体对气候变化的响应存在两种模式, 一种是以冷干的气候特征为主, 集中在东南沿海与西南地区; 另一种则呈现为寒冷湿润的气候模式, 主要集中于长江中下游地区。进一步分析认为北半球夏季太阳辐射减弱和大陆冰盖扩张可能是南方地区冷干气候模式的主要驱动因素, 而长江中下游一带的冷湿模式可能与ENSO活动增强和夏季风减弱导致的梅雨量增加有关。上述研究为深入探讨LGM时期中国南方气候特征提供了理论基础, 也为预测未来气候变化提供了宝贵的参考。

关键词

末次盛冰期, 气候对比, 石笋, 孢粉, ENSO, 梅雨

Differences in Climate Response Patterns Revealed by Geological Carriers in Southern China during the Last Glacial Maximum

Haixin Lu

College of Geography and Environmental Sciences, Zhejiang Normal University, Jinhua Zhejiang

Received: Jul. 30th, 2024; accepted: Aug. 29th, 2024; published: Sep. 4th, 2024

文章引用: 卢海欣. 末次盛冰期中国南方地质载体揭示的气候响应模式差异[J]. 气候变化研究快报, 2024, 13(5): 1089-1097. DOI: 10.12677/ccrl.2024.135125

Abstract

The Last Glacial Maximum (LGM), with striking global cooling and remarkable differences in climate conditions compared to modern times, was the most recent peak in global ice volume, making it one of the hot topics in paleoclimate research. Southern China is located in the subtropical climate zone and is sensitive to the response to climate change. Scholars have conducted preliminary studies on the climate characteristics in the region during the LGM period, but the differences in the climatic characteristics in the southern region are still not fully recognized. Therefore, this paper collected the geological records of different regions in southern China during the LGM period, summarized the basic characteristics of the climatic environment in the southern region, and analyzed the regional differences it presents. The results show that there were two climatic response patterns of geological carriers in different regions of southern China during the LGM period, one of which was dominated by cold-dry climatic characteristics, concentrated in the southeast coastal and southwest regions, while the other was characterized by cold-wet climate, mainly distributed in the middle and lower reaches of the Yangtze River (MLRYR). Further analysis suggested that the weakening summer insolation in the Northern Hemisphere and the expansion of continental ice sheets may be the main driving factors for the cold-dry climate pattern in southern China, while the cold-wet climate in the MLRYR may be related to the increased Meiyu precipitation caused by the enhancement of ENSO activity and the weakening of summer monsoon. The above research provided a theoretical basis for further exploring the climate characteristics of southern China during the LGM period, and provided valuable references for predicting future climate change.

Keywords

The Last Glacial Maximum, Climate Comparison, Stalagmite, Pollen, ENSO, Meiyu

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

中国南方地区属于典型的亚热带季风气候，该区水热条件优越，生物多样性丰富，区内广泛分布着石笋、泥炭、湖泊沉积物以及河流沉积物等地质载体，为研究古气候变化提供了得天独厚的材料。由于中国南方地区受季风气候系统影响显著，对气候变化高度敏感，因而成为古气候环境研究的热点地区之一。末次盛冰期(Last Glacial Maximum, 简称 LGM, 23~19 ka B.P.)被认为是最近一次全球冰量最大时期，在此期间，地球系统发生显著变化，北半球夏季太阳辐射量位于低值水平，全球海平面约下降 130 m，大陆冰盖急剧扩张[1][2]。目前，以石笋、泥炭、湖泊沉积物和河流沉积物等为载体的 LGM 时期中国南方环境变化研究已取得了丰富成果，但不同地区的地质记录所反映的气候演化过程存在争议，例如，福建仙云洞[3]、广东湖光岩玛珥湖[4]、云南宝秀盆地[5]等地的记录呈现了寒冷干旱的气候模式，而江苏葫芦洞[6]、长江安徽池州河段[7]和湖北神农架大九湖[8]等地的古气候档案则指示了寒冷湿润的气候配置环境。可见，对于 LGM 时期中国南方的气候环境格局仍缺乏系统认识，因此，本文梳理了 LGM 时期中国南方不同区域的地质记录，试图厘清 LGM 时期中国南方内部区域的气候响应模式及其驱动机制。

2. 研究材料

考虑到气候代用指标具有多解性，本文采用多种指标综合反映 LGM 时期中国南方地区气候环境格

局,共选取 19 条 LGM 时期中国南方地区的古气候记录,包括石笋、泥炭、湖泊沉积物以及河流沉积物等地质载体,具体记录信息见表 1。其中,石笋氧同位素($\delta^{18}\text{O}$)常被用作反映夏季风强度的指标,其高值表示夏季风减弱、低值表示夏季风增强[9];石笋碳同位素($\delta^{13}\text{C}$)一般与区域水文环境有关,其高值反映区域水文环境恶化、低值反映区域水文环境改善[10];泥炭总有机碳同位素($\delta^{13}\text{C}_{\text{TOC}}$)与温度、降水等有关,一些研究认为其高值指示气候冷干、低值指示气候暖湿[11],但也有另外研究持相反观点[5];泥炭或湖泊沉积物中的 K/Rb、中值粒径(Md)、碳酸钙含量(CaCO_3)等指标,也与气候条件有关,较高的 K/Rb、Md 值和较低的 CaCO_3 值可指示暖湿气候,较低的 K/Rb、Md 值和较高的 CaCO_3 值则指示冷干气候[5] [12];河流沉积物中的粒度、化学风化指数(CIA)、Ti/Ca 均可指示物理或化学风化强度,其高值表示物理或化学风化加剧、低值表示物理或化学风化减弱[7] [13]。

Table 1. Paleoclimate records of southern China during the LGM period

表 1. LGM 时期中国南方地区的古气候记录

序号	地点	气候代用指标	指标气候意义	参考文献
1	福建仙云洞	石笋 $\delta^{18}\text{O}$	东亚夏季风强度	马乐等, 2020
2	广西响水洞	石笋 $\delta^{18}\text{O}$	夏季风降水	Cosford <i>et al.</i> , 2008
3	福建水竹洋	泥炭孢粉	温度、降水	Yue <i>et al.</i> , 2012
4	广东临江剖面	河流沉积物粒度	风力作用	杜恕环等, 2007
5	广东湖光岩玛珥湖	正构烷烃化合物	草本与木本植物的相对输入贡献	匡欢传等, 2013
6	云南小白龙洞	石笋 $\delta^{18}\text{O}$	印度夏季风降水	Cai <i>et al.</i> , 2015
7	云南宝秀盆地	泥炭 K/Rb、 $\delta^{13}\text{C}_{\text{TOC}}$	温度、降水	Huang <i>et al.</i> , 2016
8	云南属都湖	湖泊沉积物孢粉	温度、降水	Cook <i>et al.</i> , 2011
9	贵州三星洞	石笋 $\delta^{18}\text{O}$	夏季风降水	Jiang <i>et al.</i> , 2014
10	四川甘池	泥炭 TOC、 $\delta^{13}\text{C}_{\text{Org}}$ 、元素	东亚夏季风强度、植被演化、水文环境	Huang <i>et al.</i> , 2022
11	四川邛海湖	湖泊沉积物 Md、 CaCO_3	西南夏季风强度	Wang <i>et al.</i> , 2019
12	江苏葫芦洞	石笋 $\delta^{18}\text{O}$	东亚夏季风强度	Duan <i>et al.</i> , 2015
13	长江三角洲鹤鸣孔	黏土孢粉、藻类	温度、降水	覃军干等, 2007
14	长江安徽池州河段	河流沉积物 CIA、Ti/Ca	化学风化	Chen <i>et al.</i> , 2023
15	湖北落水洞	石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 、 $\delta^{13}\text{C}$	亚洲夏季风强度、区域有效湿度	Wang <i>et al.</i> , 2022
16	湖北大九湖	泥炭孢粉	温度、降水	Xiao <i>et al.</i> , 2015
17	湖南玲珑洞	石笋 $\delta^{18}\text{O}$	大气降水	Liu <i>et al.</i> , 2020
18	重庆小山岩洞	石笋 $\delta^{18}\text{O}$	亚洲夏季风强度	张伟宏等, 2020
19	湖北龙腑宫洞	石笋 $\delta^{13}\text{C}$	亚洲夏季风水热条件	Zhang <i>et al.</i> , 2020

3. 中国南方地区气候响应格局

基于中国南方地区 19 条古气候记录的对比分析,发现 LGM 时期中国南方地区的气候特征具有明显的空间差异性,东南沿海和西南地区整体表现为冷干气候,而长江中下游一带的气候更为湿润,并非一致呈“冷干”的气候模式(图 1)。

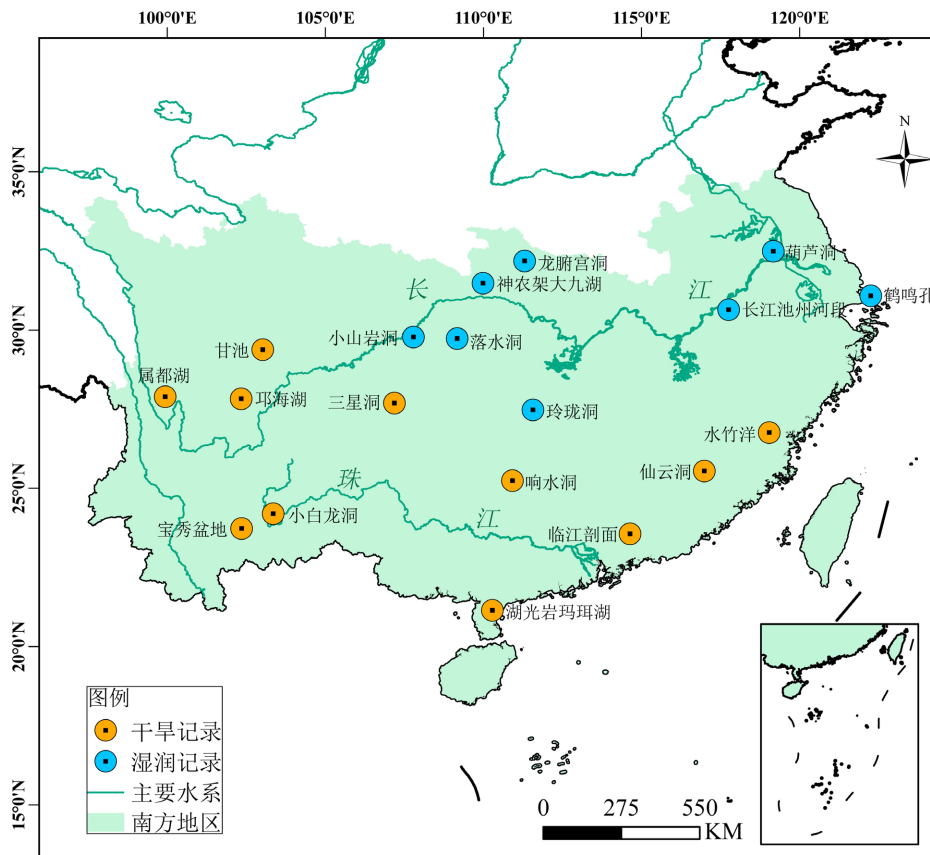


Figure 1. Climate response patterns in southern China during the LGM period
图 1. LGM 时期中国南方地区的气候响应模式

注：该图基于自然资源部标准地图服务网站下载的审图号为 GS(2020)4619 号的标准地图制作，底图无修改。

LGM 时期南方各区气候环境状况

闽粤桂地区：包括闽粤桂在内的东南沿海地区在 LGM 时期呈现出一致的冷干气候模式，具体表现为福建仙云洞和广西响水洞的石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 记录在 23~19 ka B.P. 具有缓慢偏正的趋势(图 2(a, b))，这表明 LGM 时期东亚夏季风强度逐渐减弱，气候条件向冷干状况转变[3] [14]。福建水竹洋泥炭沉积记录也显示温带落叶植物和杜鹃花科植物在该时期占优势，同样反映了冷干气候环境[15]。广东临江剖面的 MIS2 时期 (19.6~9.5 ka B.P.) 红色沙质沉积物记录了高比例的细沙含量，表明沉积物系干旱气候时期风力搬运堆积而成[13]。在这种气候背景下，东南沿海地区 C4 植物成为优势植被，这与广东湖光岩玛珥湖有机地球化学研究的结论相一致[4]。

云贵川地区：分布于中国西南部的云贵川地区在 LGM 期间也表现出与东南沿海地区相似的气候响应模式。来自云南小白龙洞的石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 记录清晰反映了 LGM 时期印度季风区夏季降水显著减少[16]。这一现象在云南的泥炭和湖泊记录中也得到印证，云南中部的宝秀盆地泥炭记录显示 K/Rb 与 $\delta^{13}\text{C}_{\text{TOC}}$ 值在 23~19 ka B.P. 明显偏低(图 2(e))，北部的属都湖孢粉记录在 22.6~17.7 ka B.P. 呈现出较低的花粉浓度，其中草类植物和耐寒松树林占比最大，这些证据都支持在印度夏季风减弱的背景下云南地区冷干气候条件加剧[5] [17]。同样，贵州三星洞石笋氧同位素记录在 23~19 ka B.P. 期间具有明显正向偏移的趋势(图 2(c))，指示印度夏季风降水减少[18]。此外，四川甘池泥炭记录中的低 TOC 和高 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 特征(图 2(d))以

及四川邛海湖的低 Md 值和高 CaCO₃ 含量均有效证实了 LGM 期间印度夏季风减弱、寒冷干旱的气候模式[12] [19]。

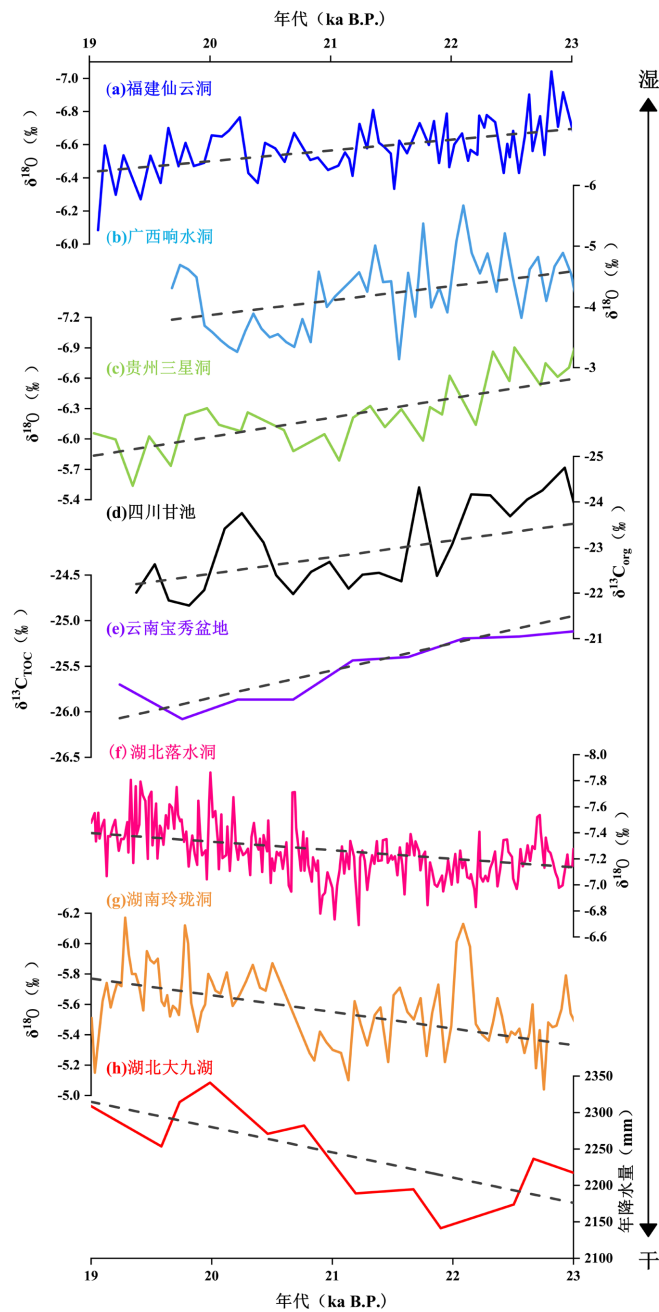


Figure 2. Comparison of paleoclimate records in Southern China
图 2. 中国南方地区的古气候记录对比

注：(a)福建仙云洞石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 记录[3]；(b)广西响水洞石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 记录[14]；(c)贵州三星洞石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 记录[18]；(d)四川甘池泥炭 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 记录[19]；(e)云南宝秀盆地泥炭 $\delta^{13}\text{C}_{\text{roc}}$ 记录[5]；(f)湖北落水洞石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 记录[21]；(g)湖南玲珑洞石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 记录[23]；(h)基于湖北大九湖孢粉重建的古降水记录[8]；灰色虚线代表 LGM 期间各记录的线性拟合趋势。

苏沪皖地区：与闽粤桂、云贵川等地相反，位于长江下游的苏沪皖在 LGM 时期整体表现出湿润的气候模式。如江苏葫芦洞石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 记录在 LGM 整体偏负，表明气候较为寒冷湿润[6]。附近的长江三角洲鹤鸣钻孔的孢粉、藻类记录显示，LGM 早期和晚期针阔叶林发育、中期植被稀少，由此可分为湿-干-湿三个阶段[20]。近期，来自皖南地区的报道指出，长江安徽池州河道沉积物的化学风化指标 CIA 和 Ti/Ca 在 LGM 时期保持高值水平，反映了 LGM 期间该地降水量增加、化学风化加剧[7]。

鄂湘渝地区：鄂湘渝等地的古气候记录主要集中于长江中游地区，且这些记录共同显示了 LGM 时期的湿润气候环境。例如，湖北落水洞石笋的 $\delta^{18}\text{O}$ 、 $\delta^{13}\text{C}$ 记录在 23~19 ka B.P. 基本负偏(图 2(f))，指示 LGM 时期该区的湿润气候[21] [22]。在湖北神农架大九湖流域的孢粉记录中，34.5~17.7 ka B.P. 期间冷杉林向更低海拔迁移，且重建的年均温度比现代温度低 5~14℃，年均降水量在 2100~2350 mm (图 2(h))，反映了 LGM 时期大九湖流域的冷湿气候条件[8]。湖南玲珑洞(图 2(g))和重庆小山岩洞的石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 记录在 LGM 时期均呈现偏负的倾向，且基于玲珑洞石笋氧同位素数据重建的古降水记录表明 23、21、19 ka B.P. 是长江中下游地区的强降水时期[23] [24]。然而，湖北龙腑宫洞石笋 $\delta^{13}\text{C}$ 记录在整体寒冷的 LGM 气候背景下被识别出 6 次明显的多百年尺度变暖事件，表明 LGM 时期长江中游地区的气候不稳定性[25]。

总而言之，在 LGM 期间，中国南方地区均表现出温度下降的特征，但在湿度方面却呈现出不同的响应模式，具体表现为东南沿海和西南地区干旱、长江中下游一带湿润的二元气候模式。

4. LGM 时期南方地区气候模式差异的机制分析

4.1. 湿润气候模式的影响因素

对于 LGM 时期长江中下游一带的湿润状况，厄尔尼诺-南方涛动(El Niño-Southern Oscillation, 简称 ENSO)活动可能是解释这一现象的主要机制。这种推测得到高分辨石笋记录的支持，生长于 LGM 期间的江苏葫芦洞石笋记录了显著的 2~7 年 ENSO 周期，暗示 ENSO 可能对长江中下游地区降水起着重要调控作用[26]。这一观点获得了近期研究的证实，研究发现长江中下游的洪涝灾害多发生于厄尔尼诺年，而干旱灾害多出现在拉尼娜年[27]。Koutavas 和 Joanides 的研究表明，LGM 期间热带太平洋纬向海表温(Sea Surface Temperature, 简称 SST)梯度下降，ENSO 增强，表现为厄尔尼诺态[28]。厄尔尼诺会促使西太暖池的 SST 下降，进而导致西太平洋副热带高压带南移，南移的西太平洋副热带高压带阻止雨带向北移动，导致雨带停滞在长江中下游地区形成梅雨，从而为长江中下游地区带来丰富的降水[29]。同时也有研究指出，东亚夏季风强度与长江中下游的梅雨量呈反相位关系，即东亚夏季风强度减弱时，季风雨带在长江中下游地区的停留时间延长，进而导致梅雨量增大[30] [31]。因此，LGM 期间长江中下游一带的湿润环境可能与厄尔尼诺事件和东亚夏季风减弱引起的梅雨量增加有关。此外，中国南方地区，河网密布，丘陵山地众多，其复杂地形产生的局地气候效应也不容忽视。例如，LGM 时期湖北神农架大九湖的气候环境受到高海拔山地的制约，由于神农架林区的平均海拔为 1600 m，云凝结核的高度也主要在 1000~1600 m 之间，故其山腰处易形成云海，从而降低温度和增加水汽[8]。

4.2. 干旱气候模式的影响因素

一些研究认为，LGM 时期较低的北半球夏季太阳辐射量是引发中国南方地区出现干旱气候的主要外部驱动因素[3] [15]。当太阳辐射减少时，太阳光谱中的紫外波段会发生大幅变化，引起平流层臭氧浓度的变化[32]，同时北大西洋流冰也会随着太阳辐射减弱而增加，北大西洋深层水形成减少，从而导致北半球高纬地区气温下降与触发北大西洋涛动负相位[33]。在此情况下，西伯利亚高压增强，西风带南移，东亚夏季风和印度夏季风减弱，进而导致中国南方大部分地区降水减少，出现气候干旱特征[21]。

值得注意的是，LGM 时期北美、北欧和南极大陆均有冰盖的分布[1]，因此中国南方地区的干旱气候

模式也有可能是对大陆冰盖急剧扩张的响应。关于冰盖与东亚气候的关系,前人进行了一系列的气候模拟研究。一项针对 MIS13 时期的冰盖与东亚夏季风的模拟研究发现,当格陵兰冰盖消失时,中国南方地区的降水增加。这是因为格陵兰冰盖消失会引发亚洲大陆增暖和西北太平洋降温,进而使海陆热力差异增大,东亚夏季风增强[34]。由此推测,当格陵兰冰盖面积较大时,东亚夏季风减弱,中国南方大部分地区气候干旱。此外,大陆冰盖也可通过减少低层大气中的水汽以及诱发欧洲和北美大陆上空的反气旋来削弱亚洲季风环流,从而导致东亚季风区夏季降水减少[35]。

在太阳辐射和冰盖的双重影响下,热带太平洋和热带印度洋在 LGM 期间出现广泛的 SST 变冷现象[36][37],较冷的 SST 抑制了海水的蒸发,进而减少了向陆地的水汽输送,由此可能引发中国南方地区的干旱气候模式[38]。同时,热带太平洋的经向海温梯度伴随 SST 下降而减小,促使热带辐合带(Intertropical Convergence Zone, 简称 ITCZ)向南移动[39],结果导致亚洲夏季风减弱[5]。Chiang 和 Bitz 基于海气耦合模型试验指出,LGM 期间 ITCZ 向南移动,特别是在北半球受到大冰盖强迫时,ITCZ 的南移现象更加明显[40]。当 ITCZ 南移时,其将水汽从北半球输送到南半球,从而导致半球间湿度不平衡,因此 LGM 期间中国南方地区的干旱气候也与 ITCZ 南移紧密相关。

5. 结论

本文系统研究了中国南方地区的石笋、泥炭、湖泊和河流沉积物记录,总结了末次盛冰期中国南方地区气候环境格局。研究发现,LGM 时期中国南方地区总体呈现出二元气候响应模式,闽粤桂等东南沿海地区以及云贵川等西南地区表现为寒冷干旱的气候特征,而包括鄂湘渝苏沪皖在内的长江中下游一带则主要表现为寒冷湿润的气候模式。北半球夏季太阳辐射减弱、大陆冰盖扩张、热带海水变冷和 ITCZ 南移触发了中国东南沿海和西南地区的干旱气候模式,而长江中下游地区的湿润环境更可能与 ENSO 增强和东亚夏季风减弱引起的梅雨量增加有关。综上所述,LGM 时期中国南方地区的气候模式主要是由太阳辐射、冰盖和海气环流等因素驱动,同时也会受到局地因素的制约。

参考文献

- [1] Clark, P.U., Dyke, A.S., Shakun, J.D., Carlson, A.E., Clark, J., Wohlfarth, B., *et al.* (2009) The Last Glacial Maximum. *Science*, **325**, 710-714. <https://doi.org/10.1126/science.1172873>
- [2] Laskar, J., Robutel, P., Joutel, F., Gastineau, M., Correia, A.C.M. and Levrard, B. (2004) A Long-Term Numerical Solution for the Insolation Quantities of the Earth. *Astronomy & Astrophysics*, **428**, 261-285. <https://doi.org/10.1051/0004-6361:20041335>
- [3] 马乐, 肖海燕, 张鑫, 等. 福建仙云洞石笋记录的 19.0~17.6ka B.P.期间东亚夏季风增强事件[J]. 第四纪研究, 2020, 40(4): 926-935.
- [4] 匡欢传, 周浩达, 胡建芳, 等. 末次盛冰期和全新世大暖期湖光岩玛珥湖沉积记录的正构烷烃和单体稳定碳同位素分布特征及其古植被意义[J]. 第四纪研究, 2013, 33(6): 1222-1233.
- [5] Huang, C., Wei, G., Ma, J. and Liu, Y. (2016) Evolution of the Indian Summer Monsoon during the Interval 32.7-11.4 Cal. Ka BP: Evidence from the Baoxiu Peat, Yunnan, Southwest China. *Journal of Asian Earth Sciences*, **131**, 72-80. <https://doi.org/10.1016/j.jseas.2016.09.008>
- [6] Duan, F., Wu, J., Wang, Y., Edwards, R.L., Cheng, H., Kong, X., *et al.* (2015) A 3000-Yr Annually Laminated Stalagmite Record of the Last Glacial Maximum from Hulu Cave, China. *Quaternary Research*, **83**, 360-369. <https://doi.org/10.1016/j.yqres.2015.01.003>
- [7] Chen, C., Tang, Y., Huang, K., Wan, Q., Zhang, X., Xie, D., *et al.* (2023) Vegetation and Chemical Weathering Changes since the Late MIS 3 in the Mid-Lower Yangtze River Valley: Evidence from Pollen and Geochemical Records. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, **610**, Article ID: 111354. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2022.111354>
- [8] Xiao, J., Xiao, X., Zhang, M., Shang, Z. and Chen, Y. (2015) Late Pleistocene Montane Vegetation and Climate History from the Dajiuhe Basin in the Western Hubei Province of Central China. *Review of Palaeobotany and Palynology*, **222**, 22-32. <https://doi.org/10.1016/j.revpalbo.2015.08.001>

- [9] Wang, Y.J., Cheng, H., Edwards, R.L., An, Z.S., Wu, J.Y., Shen, C., *et al.* (2001) A High-Resolution Absolute-Dated Late Pleistocene Monsoon Record from Hulu Cave, China. *Science*, **294**, 2345-2348. <https://doi.org/10.1126/science.1064618>
- [10] Wu, Y., Li, T., Yu, T., Shen, C., Chen, C., Zhang, J., *et al.* (2020) Variation of the Asian Summer Monsoon since the Last Glacial-Interglacial Recorded in a Stalagmite from Southwest China. *Quaternary Science Reviews*, **234**, Article ID: 106261. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2020.106261>
- [11] Li, H., Liew, P., Seki, O., Kuo, T., Kawamura, K., Wang, L., *et al.* (2013) Paleoclimate Variability in Central Taiwan during the Past 30Kyrns Reflected by Pollen, $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$, and n-Alkane- δD Records in a Peat Sequence from Toushe Basin. *Journal of Asian Earth Sciences*, **69**, 166-176. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2012.12.005>
- [12] Wang, G., Wei, Z., Wang, Y., Zhang, T., He, W., Sun, Z., *et al.* (2018) High-Resolution Paleoclimatic Records Spanning the Past 30 Cal Ka BP Inferred from Qionghai Lake Sediments in South-West China: Insights from Geochemical Investigations and Grain-Size Characteristics. *Geological Journal*, **54**, 2495-2507. <https://doi.org/10.1002/gj.3308>
- [13] 杜恕环, 李保生, 温小浩, 等. 岭南东江流域 MIS2 阶段红色沙质沉积物粒度分布特征分析[J]. 中国沙漠, 2007, 27(5): 771-774.
- [14] Cosford, J., Qing, H., Yuan, D., Zhang, M., Holmden, C., Patterson, W., *et al.* (2008) Millennial-Scale Variability in the Asian Monsoon: Evidence from Oxygen Isotope Records from Stalagmites in Southeastern China. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, **266**, 3-12. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2008.03.029>
- [15] Yue, Y., Zheng, Z., Huang, K., Chevalier, M., Chase, B.M., Carré, M., *et al.* (2012) A Continuous Record of Vegetation and Climate Change over the Past 50,000 Years in the Fujian Province of Eastern Subtropical China. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, **365**, 115-123. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2012.09.018>
- [16] Cai, Y., Fung, I.Y., Edwards, R.L., An, Z., Cheng, H., Lee, J., *et al.* (2015) Variability of Stalagmite-Inferred Indian Monsoon Precipitation over the Past 252,000 Y. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, **112**, 2954-2959. <https://doi.org/10.1073/pnas.1424035112>
- [17] Cook, C.G., Jones, R.T., Langdon, P.G., Leng, M.J. and Zhang, E. (2011) New Insights on Late Quaternary Asian Palaeomonsoon Variability and the Timing of the Last Glacial Maximum in Southwestern China. *Quaternary Science Reviews*, **30**, 808-820. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2011.01.003>
- [18] Jiang, X., He, Y., Shen, C., Lee, S., Yang, B., Lin, K., *et al.* (2014) Decoupling of the East Asian Summer Monsoon and Indian Summer Monsoon between 20 and 17 Ka. *Quaternary Research*, **82**, 146-153. <https://doi.org/10.1016/j.yqres.2014.05.001>
- [19] Huang, M., Deng, Y., Peng, H., Wen, Z., Shang, G., Guan, H., *et al.* (2022) Hydroclimatic Changes since the Last Glacial Maximum Recorded in Mountain Peat Deposit on the Southwestern Margin of the Sichuan Basin, China. *Frontiers in Ecology and Evolution*, **10**, Article 1050429. <https://doi.org/10.3389/fevo.2022.1050429>
- [20] 覃军干, 吴国璋, 郑洪波, 等. 长江三角洲末次盛冰期的气候波动[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2007, 27(6): 71-75.
- [21] Wang, Z., Chen, S., Wang, Y., Zhao, K., Liang, Y., Cheng, H., *et al.* (2022) A High-Resolution Stalagmite Record from Luoshui Cave, Central China over the Past 23.5 Kyr. *Quaternary Science Reviews*, **282**, Article ID: 107443. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2022.107443>
- [22] Wang, Z., Chen, S., Wang, Y., Zhao, K., Liang, Y., Li, X., *et al.* (2022) Climatic Implication of Stalagmite $\Delta 13\text{c}$ in the Middle Reaches of the Yangtze River since the Last Glacial Maximum and Coupling with $\delta^{18}\text{O}$. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, **608**, Article ID: 111290. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2022.111290>
- [23] Liu, Y., Hu, C. and Belshaw, N.S. (2020) Reconstruction of the East Asian Summer Monsoon Rainfall Distribution at Centennial Scale during the Last Glacial Maximum. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, **556**, Article ID: 109879. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2020.109879>
- [24] 张伟宏, 张振球, 陈剑舜, 等. 末次冰盛期东亚夏季风变化的重庆石笋记录[J]. 第四纪研究, 2020, 40(4): 918-925.
- [25] Zhang, Z., Wang, Y., Yang, Z., Liang, Y., Yang, S., Shao, Q., *et al.* (2020) Century-Scale Climatic Oscillations during the Last Glacial Maximum Revealed by Stalagmite Isotopic Records from Longfugong Cave, China. *Environmental Earth Sciences*, **79**, Article No. 517. <https://doi.org/10.1007/s12665-020-09250-6>
- [26] Kong, X., Wang, Y., Wu, J. and Cheng, H. (2003) A Continuous 3000-Year Precipitation Record of ENSO Variability during LGM from a Stalagmite in Nanjing. *Chinese Science Bulletin*, **48**, 480-484. <https://doi.org/10.1007/bf03183256>
- [27] Tong, J., Qiang, Z., Deming, Z. and Yijin, W. (2006) Yangtze Floods and Droughts (China) and Teleconnections with ENSO Activities (1470-2003). *Quaternary International*, **144**, 29-37. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2005.05.010>
- [28] Koutavas, A. and Joannides, S. (2012) El Niño-Southern Oscillation Extrema in the Holocene and Last Glacial Maximum. *Paleoceanography*, **27**, PA4208. <https://doi.org/10.1029/2012pa002378>

- [29] Liu, H., Gu, Y., Huang, X., Yu, Z., Xie, S. and Cheng, S. (2019) A 13,000-Year Peatland Palaeohydrological Response to the ENSO-Related Asian Monsoon Precipitation Changes in the Middle Yangtze Valley. *Quaternary Science Reviews*, **212**, 80-91. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2019.03.034>
- [30] 周汪洋, 段福才, 陈剑舜, 等. H1 事件时长江下游地区季风降水变化特征的石笋铀元素记录[J]. 沉积学报, 2021, 39(4): 932-941.
- [31] Ge, Q., Guo, X., Zheng, J. and Hao, Z. (2008) Meiyu in the Middle and Lower Reaches of the Yangtze River since 1736. *Chinese Science Bulletin*, **53**, 107-114. <https://doi.org/10.1007/s11434-007-0440-5>
- [32] Haigh, J.D. (1994) The Role of Stratospheric Ozone in Modulating the Solar Radiative Forcing of Climate. *Nature*, **370**, 544-546. <https://doi.org/10.1038/370544a0>
- [33] Bond, G., Kromer, B., Beer, J., Muscheler, R., Evans, M.N., Showers, W., *et al.* (2001) Persistent Solar Influence on North Atlantic Climate during the Holocene. *Science*, **294**, 2130-2136. <https://doi.org/10.1126/science.1065680>
- [34] Shi, F., Yin, Q., Nikolova, I., Berger, A., Ramstein, G. and Guo, Z. (2020) Impacts of Extremely Asymmetrical Polar Ice Sheets on the East Asian Summer Monsoon during the MIS-13 Interglacial. *Quaternary Science Reviews*, **230**, Article ID: 106164. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2020.106164>
- [35] 曹剑, 吴立广. 末次盛冰期冰盖对全球季风活动的非对称性影响[J]. 第四纪研究, 2016, 36(4): 425-435.
- [36] Xiong, Z., Zhai, B., Algeo, T.J., Lu, Z., Li, T., Meyer, H., *et al.* (2022) Intensified Aridity over the Indo-Pacific Warm Pool Controlled by Ice-Sheet Expansion during the Last Glacial Maximum. *Global and Planetary Change*, **217**, Article ID: 103952. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2022.103952>
- [37] Liu, S., Ye, W., Cao, P., Zhang, H., Chen, M., Li, X., *et al.* (2021) Paleoclimatic Responses in the Tropical Indian Ocean to Regional Monsoon and Global Climate Change over the Last 42 Kyr. *Marine Geology*, **438**, Article ID: 106542. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2021.106542>
- [38] Ma, T., Tarasov, P.E., Huang, K., Leipe, C., Man, M. and Zheng, Z. (2022) Intensified Climate Drying and Cooling during the Last Glacial Culmination (20.8-17.5 Cal Ka BP) in the South-Eastern Asian Monsoon Domain Inferred from a High-Resolution Pollen Record. *Quaternary Science Reviews*, **278**, Article ID: 107371. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2022.107371>
- [39] Lee, S., Chiang, J.C.H. and Chang, P. (2014) Tropical Pacific Response to Continental Ice Sheet Topography. *Climate Dynamics*, **44**, 2429-2446. <https://doi.org/10.1007/s00382-014-2162-0>
- [40] Chiang, J.C.H. and Bitz, C.M. (2005) Influence of High Latitude Ice Cover on the Marine Intertropical Convergence Zone. *Climate Dynamics*, **25**, 477-496. <https://doi.org/10.1007/s00382-005-0040-5>