

# 基于湖泊沉积记录的中国西南地区 全新世气候变化 研究进展

杨迪<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>云南师范大学地理学部, 云南 昆明

<sup>2</sup>云南省高原地理过程与环境变化重点实验室, 云南 昆明

收稿日期: 2024年2月8日; 录用日期: 2024年3月6日; 发布日期: 2024年3月13日

## 摘要

全新世以来的气候变化特征是当今世界范围内古气候研究的重点和热点。位于亚洲东南部的中国西南地区地貌类型复杂, 其气候变化不仅受全球性气候因素驱动, 也显著受其他区域性因素的影响, 其环境因子更加复杂。在对中国西南地区全新世以来湖泊沉积重建古气候相关研究整合分析的基础上, 本文归纳总结了该区百年时间尺度上全新世植被演替和气候变化的主要特征。结果表明, 西南地区全新世以来总体呈现湿润的气候特征, 即早期(11.5~8 ka BP)气候从干冷向暖湿转变, 中期(8~3.5 ka BP)温暖湿润, 晚期(3.5 ka BP至今)气候向减湿方向发展; 表明该区具有相对独特的区域性气候特征。同时, 本文还对全新世西南地区的气候变化的影响机制进行了讨论。

## 关键词

全新世, 湖泊沉积物, 气候变化, 中国西南地区

# Research Progress of Holocene Climate Change in Southwest China Based on Lake Sedimentary Records

Di Yang<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Faculty of Geography, Yunnan Normal University, Kunming Yunnan

<sup>2</sup>Yunnan Key Laboratory of Plateau Geographical Processes & Environmental Change, Kunming Yunnan

Received: Feb. 8<sup>th</sup>, 2024; accepted: Mar. 6<sup>th</sup>, 2024; published: Mar. 13<sup>th</sup>, 2024

文章引用: 杨迪. 基于湖泊沉积记录的中国西南地区全新世气候变化研究进展[J]. 气候变化研究快报, 2024, 13(2): 210-220. DOI: 10.12677/ccrl.2024.132022

## Abstract

The characteristics of climate change since the Holocene are the focus and hot spot of pale climate research around the globe. The various geomorphologic types of southwest China, which is in south-east Asia, contribute to the complexity of its environmental aspects. The region's climate change is impacted by both global and regional influences, making it even more complicated. We provide a summary of the key elements of Holocene vegetation succession and climate change in southwest China on a 100-year time scale based on the integration and analysis of lake sedimentary reconstruction and paleoclimate-related studies conducted since the Holocene. The results indicate that southwest China has experienced a humid Holocene; that is, the climate changed from being dry and cold to warm and humid in the early period (11.5~8 ka BP), warm and humid in the middle period (8~3.5 ka BP) and decreasing humidity in the late period (3.5 ka BP to present). It implies that this region has a comparatively unique regional climatic feature. The mechanisms influencing climate change in the southwestern part of the Holocene are also discussed.

## Keywords

Holocene, Lake Sediment, Climate Change, Southwest China

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

全新世是地球地质历史演化过程中最新的一个阶段, 大约从距今 11.5 ka 开始地球进入全新世, 气候变得温暖而湿润, 与之前严寒而干燥的冰期环境截然不同。重建过去的气候对于探索气候变化的规律及其动力机制、理解当今气候变化的原因, 以及预测未来气候变化的趋势至关重要[1]。因此, 全新世以来的气候变化特征, 成为当今世界范围内古气候研究的重点和热点[2]。湖泊沉积物沉积连续、覆盖面积广且对气候响应敏感, 是研究高分辨率古气候环境变化过程的极佳对象[3]。位于亚洲东南部的中国西南地区, 是大尺度气候变化研究最为敏感的区域之一[4]。由于该区地处中国的第一和第二阶梯上, 地貌类型复杂, 且位于西风气流、印度季风和东亚季风的交汇区域, 其气候变化不仅受全球性气候因素驱动, 也显著受其他区域性因素的影响[5]。前人对西南地区湖泊沉积物气候环境变化的研究工作相对集中在泸沽湖[6] [7] [8]、洱海[9] [10] [11] [12]、属都湖[13]、星云湖[14]、天才湖[15]、杞麓湖[16]、抚仙湖[17] [18] 等区域。相比于中国其他区域, 该区的气候变化同时存在全球性和区域性特点, 更加具有复杂性。已有研究表明, 我国不同区域全新世以来的气候变化过程可能存在差异[19]。不同于其他地区, 西南地区全新世以来气候变化的研究相对滞后, 主要体现在具有较好年代控制和较高分辨率的古气候记录较少, 且研究位点分布不均, 湖泊沉积重建古气候多为定性结果。尽管如此, 前人关于西南地区古气候的相关研究仍然为理解该区域的气候变化特征积累了资料。然而, 目前相关研究还仅局限于单一点位, 缺乏对西南地区气候变化特征的整体把握。本研究在整合已发表的相关基于湖泊沉积记录的古气候研究结果基础上, 综述西南地区全新世气候环境变化方面取得的研究进展, 进而对区域性的全新世气候变化进行比较分析, 以期能够更好地认识和理解该区域全新世以来气候环境的变化特征, 并探讨其气候变化机制。

## 2. 研究区概况

中国西南地区主要包括四川盆地、横断山区、云贵高原区域，范围包括四川省、云南省、贵州省、重庆市。空间范围为 21°N~34°N、92°E~110°E，区域总面积约  $1.14 \times 10^6 \text{ km}^2$ 。此外，西南地区是我国重要的季风区之一，受印度、东亚季风影响显著，气候类型以亚热带季风气候为主，也有少数的热带季风气候及山地温带和寒带气候，是气候变化的敏感和脆弱区之一[20]。研究该区地貌类型复杂多样，地势西高东低、北高南低，由于该区毗邻青藏高原，高原季风对区域的气候也有重要影响。

## 3. 数据来源

本文所用数据来源于前人正式发表的湖泊沉积记录资料，研究钻孔和剖面的选取遵循相对时间跨度长、分辨率高以及湖泊沉积记录原则。根据这 3 个原则，最终在西南地区选择了现在已有的湖泊沉积重建古气候记录数据(见图 1)，用于区域全新世以来的整体气候特征分析。所选择的湖泊沉积记录覆盖我国西南的主要区域，整体而言具有较好的空间代表性。此外，为了更准确地把握西南地区全新世以来的整体气候特征，避免单一序列和单一指标造成的误差，本研究在充分利用所选择点位湖泊沉积记录的基础上，结合该区全新世以来的其他气候替代性指标，以多序列、多指标的方式来辅助印证相关分析结果。

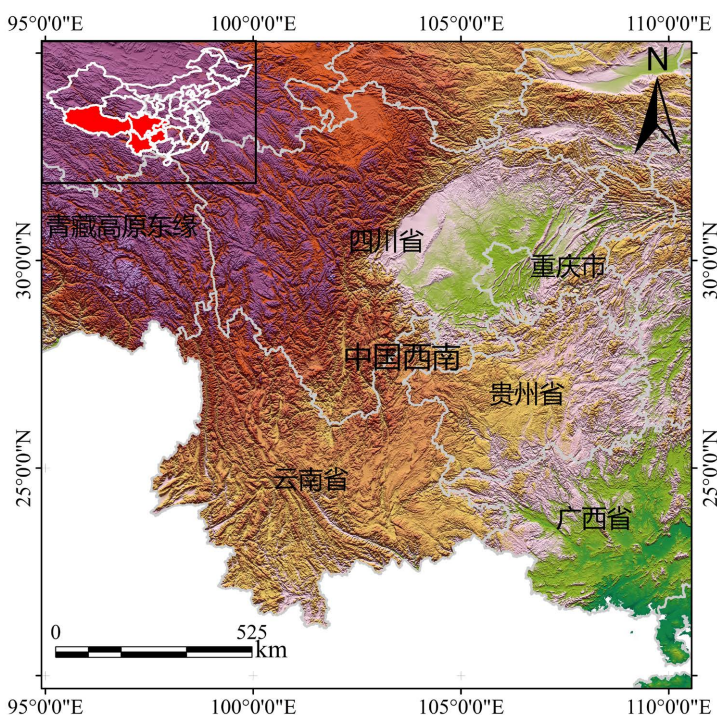


Figure 1. Location diagram of southwest China

图 1. 中国西南地区位置示意图

## 4. 西南地区全新世气候演化特征

### 4.1. 青藏高原东缘

Shen (2006) [21]对青藏高原东缘义敦湖钻孔进行了孢粉学研究，结果表明，11.5~9.2 ka BP 时期主要特征为从草地到森林的过渡，年均降水量和月均温在该时期达到了接近现代的水平。9.2~6.8 ka BP 时期，花粉组合以桦木和松花粉为主，花粉浓度也达到了整个序列的最高值。气候定量重建结果表明，该时期

年均降水量的最大值出现在 9.0~7.5 ka BP, 最大年均降水量大约比现在高 100~120 mm, 6.8~2.5 ka BP 时期。2.5 ka BP 至今的这段时间内, 栎属花粉取代了松属花粉占据主导地位。该时期 7 月气温稳定下降, 接近现代值。年降水量一开始急剧下降到现代值以下, 然后从 1.6~1.3 ka BP 又急剧地增加, 之后又经历了减少后, 稳定至现代值的水平。高原东南部边缘以川西螺髻山大海子湖和杀野马湖孢粉记录表明: 12.4~11.0 ka BP 为松和栎为主的针阔叶林; 11~9.1 ka BP, 川西冕宁杀野马湖流域发育了冷杉属、桦木属和落叶栎为主的森林植被; 9.1~7.8 ka BP, 常绿栎和铁杉属(*Tsuga*)增加, 指示气候暖湿; 7.8~4.0 ka BP, 硬叶林扩展, 表明降雨季节性增加; 4.0~2.0 ka BP, 各种植物的花粉浓度都有不同程度的降低, 反映出气候的恶化和人类活动的加强; 2.0~1.0 ka BP 以来, 杀野马湖流域硬叶林继续发育直到现今[22]。Lu 等(2011) [23]利用典型对应分析(Canonical Correspondence Analysis, CCA)对青藏高原及其周边地区 1202 个表土花粉样品分析确定了影响青藏高原现代花粉分布的主要环境因子, 定量重建了藏南沉错流域全新世气候变化历史; 10.7~9.0 cal ka BP, 气候暖干, 年均温比现在高 0.8℃; 9~6.1 cal ka BP, 气候湿润, 年降水量比现在高 30 mm; 6.1~3.2 cal ka BP, 气候变干。Zhang 等(2015) [24]定量重建了青藏高原东部布托湖流域全新世年降水量和年均温的变化, 定量重建结果表明, 11.1~8.7 cal ka BP, 气候湿润; 8.7~8 cal ka BP, 气候冷干; 8~6 cal ka BP, 气候湿润; 6~5.6 cal ka BP, 气候冷干; 5.6~1.8 cal ka BP, 气候湿润。此外, Chen 团队对基于花粉的古气候定量重建作了时间分辨率为 50 年的集成研究, 发现高原早中全新世夏季温度最暖期出现在 9~5 cal ka BP, 夏季温度随后逐渐下降至今, 这与夏季太阳辐射和西南季风的增强相吻合[25]。众多资料表明, 青藏高原全新世总的气候特征是早中期气候比较温暖湿润, 而晚期开始气候明显干旱。在大部分地区全新世中期的气温升高与湿度增加一致。虽然得出高原全新世气温变化模式仍存在争议, 但全新世早期至中期出现夏季温度峰值, 与夏季太阳辐射和西南夏季风增强相吻合[25]。藏东南花粉记录和年降雨量的定量估计显示, 西南季风先后在 10.1、9.2、8.2、7.7、6.5、5.8、4.5、3.0、2.1、1.1 cal ka BP 出现 10 次百年尺度的季风减弱事件[26]。中国西南地区已有的湖泊沉积记录如表 1 所示。

**Table 1.** Existing lake sedimentary records in southwest China

**表 1.** 中国西南地区已有的湖泊沉积记录

位置	采样点位置	代用指标	年代区间(ka BP)	参考文献
青藏高原东部边缘	义敦湖	孢粉	0~13.3	Shen 等(2006, 2008)
	大海子	孢粉	0~7	李旭和刘金陵(1988)
	杀野马湖	孢粉	0~11	Jarvis (1993)
	沉错	孢粉	约 2~8	黄赐璇等(1983)
	仁错	孢粉	0~18.8	唐领余等(1998, 2004)
	木格错	孢粉	0~12.2	Ni 等(2019)
	拉龙错	孢粉	0.1~17.7	Kramer 等(2010, 2010)
	布托湖	孢粉	1.8~11.1	Zhang 等(2015)
四川盆地	红海	孢粉	0~12	李旭和刘金陵(1988)
	邛海	粒度、正构烷烃	0~11	何薇等(2018)
云贵高原	彝海	色素、孢粉	2.2~10	吴艳宏等(1999)
	洱海	有机碳稳定同位素记录、硅藻、孢粉	0~12	张振克等(2000); 周静等(2003)
	泸沽湖	孢粉、TOC、CaCO <sub>3</sub>	3.3~15	郑茜等(2014)
	腾冲青海	粒度、总有机碳、碳酸盐、磁化率	0~15.7	刘亚生等(2016)

续表

云 贵 高 原	天才湖	粒度、磁化率、烧失量、有机碳、 有机氮、色度	0~12	韩艳等(2013)
	星云湖	碳酸盐氧同位素、有机碳	0~11	Hodell 等(1999); Wu 等(2017); 马顺容(2021)
	抚仙湖	孢粉、碳酸盐、粒度、方解石、石英、 元素、碳酸盐同位素、正构烷烃	0~13.3	李婷等(2019); 杨春和等 (2022); 孙启发等(2018)
	阳宗海	孢粉	0~13.2	王敏等(2020)
	杞麓湖	元素、粒度	0~11	刘圣之等(2022)
	异龙湖	孢粉、元素	0~15.4	李凯等(2018); 范云峰等(2022)

## 4.2. 四川盆地

四川盆地湖泊沉积记录较少,古气候记录主要以剖面沉积分析为主。何薇等(2018) [27]利用四川邛海沉积物粒度组成及正构烷烃代用指标变化特征表明,邛海地区全新世以来的气候环境变化过程自 11 cal ka BP 以来,邛海气候经历了“冷干-暖湿-冷干”的变化过程。其中,邛海沉积物记录的 23~19 cal ka BP、12.8~11.7 cal ka BP 和 9~5 cal ka BP 这 3 次典型气候时期,在时间和气候特征上与末次冰盛期(LGM)、新仙女木事件(YD)和全新世气候适宜期(HCO)相符,可能是对西南季风强度变化及地质历史时期典型气候事件的响应。吴艳宏等(2006) [28]利用四川冕宁彝海的 G1 孔沉积物色素如叶绿素衍生物含量(CD)、总胡萝卜素(TC)、颤藻叶黄素(Osc)和蓝藻黄素(Myx)进行了研究。参考孢粉资料,恢复了该地区全新世以来的气候变化过程。10~8.8 cal ka BP 为升温阶段,气候温凉偏干; 8.7~2.2 cal ka BP 为大暖期,气候前期温暖湿润,后期暖热偏干或半湿; 2.2 ka BP 以来为降温期,气候温凉偏干,存在次级波动。石胜强等(2012) [29]运用古气候参数方法对四川洪雅 GMH 剖面进行了孢粉分析,定量重建了该地区 35 ka BP 以来的古气候参数。该剖面表明,该地区在 11.9~0.5 cal ka BP 期间,气候参数曲线总体呈现波动上升趋势,古温度参数平均为 12.9°C,古降水量参数为 1680 mm。5 cal ka BP 至今,古温度曲线总体呈现下降趋势,古温度参数平均为 12.8°C,古降水量参数为 1660 mm。在 9.82 ka BP 和 2.15 ka BP 这两段时间段内都出过降温减湿的阶段,说明该区全新世温和湿润的大气候特征背景下,也存在次一级的冷暖干湿变化。

## 4.3. 云贵高原

云贵高原是中国主要的湖泊分布区域之一,基于孢粉资料定量重建的云南星云湖区域年降水量、模拟的年降水量都显示印度夏季风自早全新世逐渐减弱,季风最强盛时期发生在 8.5~5.5 ka 期间,5.5 ka 以来夏季风持续减弱,直至持续到中世纪暖期开始,在中世纪暖期结束后季风继续减弱[30]。周静等(2003) [10]采集和分析了洱海北部弥苴河入区的连状岩芯(ES 孔)孢粉样品。该钻孔的孢粉组合特征指出: 9.7~8.8 cal ka BP 期间,植被组合反映出该时期温偏湿的气候特征,为全新世初期的升温期; 8.8~8.3 cal ka BP 期间,气候冷偏干; 8.3~7.4 cal ka BP 这一阶段的气候特征主要为偏温湿; 7.4~6.8 cal ka BP,本阶段气候特征为冷干; 6.8~5.5 cal ka BP,该阶段气候特征为暖湿; 5.5~5.1 cal ka BP 的气候特征为冷干; 5.1~2.4 cal ka BP 的气候特征为凉偏干; 2.4~1.9 cal ka BP 的气候特征为温干; 1.9 cal ka BP 至今,松属含量增加,铁杉属、冷杉属含量很低,胡桃科(Juglandaceae)、莎草科、藜科表现为不同时间段的孤峰状态。总的来说,该区气候特征表现为以暖干为总体特征,但也存在次一级的冷暖干湿波动。郑茜等(2014) [7]通过对泸沽湖岩芯上部 474 cm 进行了孢粉分析和 TOC (总有机碳)、CaCO<sub>3</sub> (碳酸钙)百分含量的测定,揭示了在 15,000~12,300 a BP,泸沽湖气候条件为温凉偏湿; 12,300~10,300 a BP,气候相对偏暖偏干; 在早全新世(10,300~7500 a BP)和中全新世(7500~3800 a BP),为温暖湿润的气候条件; 在中全新世有效湿度不如早全

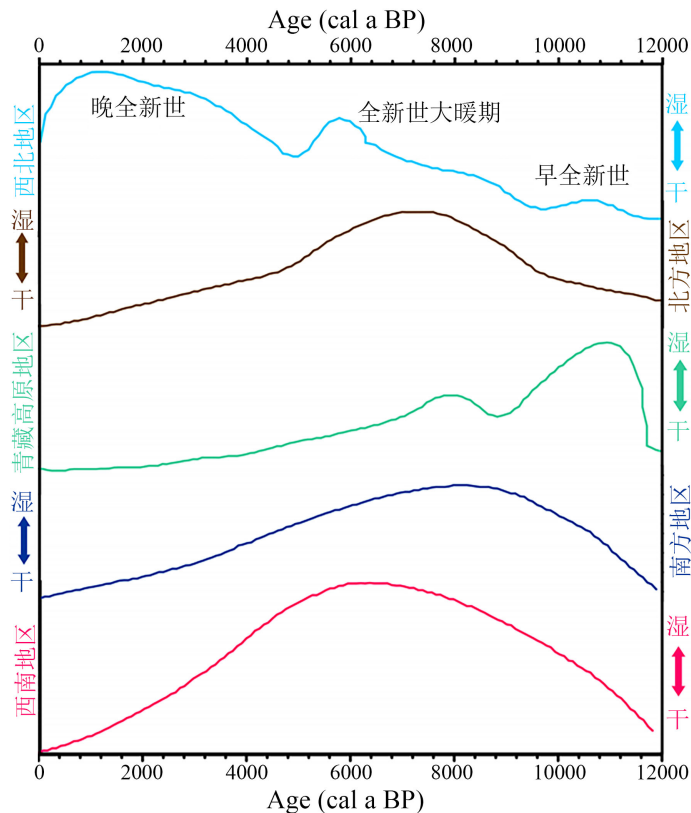
新世；在 3800~3300 a BP，有一次持续的冷干事件；在晚全新世(3300 a BP 至今)，气温和湿度比早中全新世均偏低。张振克等(1998) [31]利用高分辨率湖泊沉积的有机碳稳定同位素记录、硅藻等环境指标分析结果，重建了洱海流域全新世大暖期的环境变化序列主要以温暖湿—暖湿干为主，其中存在明显冷干湿事件，冷事件出现在 7.2 cal ka BP、5.3 cal ka BP 和 3.7 cal ka BP。全新世大暖期洱海湖面波动与气候变化具有明显的一致性。韩艳(2012) [32]对天才湖沉积中心的湖泊岩芯进行了粒度、磁化率、烧失量(LOI)、有机碳(TOC)含量、有机氮(TN)含量、色度等多项环境代用指标的综合分析，重建了约 12 cal ka BP 以来滇西北地区天才湖区的气候环境演化序列。即新仙女木晚期，西南季风较弱，气候冷干；全新世早期，气温回升，西南季风整体较强，气候比较湿润，但存在一个相对稳定的较干早期；全新世中期，温度相对较高，西南季风开始逐渐减弱，气候相对干旱；全新世晚期，西南季风强弱变化明显，具有四次季风较强期和三次较弱期，分别对应四次较强降水的湿润期和三次较弱降水的干旱期。刘亚生(2015) [33]通过对云南腾冲青海钻取的湖泊沉积岩芯样品的粒度特征、总有机碳、碳酸盐、磁化率及年代学分析测试，探讨了沉积物各物化指标的变化特点及其环境指示意义，重建出 15.7 cal ka BP 以来云南腾冲地区总体气候呈现冷湿—温湿—暖干—温和偏干的演变过程，并可分为 4 个阶段，阶段 I: 15.70~12.77 ka BP，气候温凉偏湿；阶段 II: 12.77~4.68 ka BP 为温暖湿润期，气候温暖，降水多，湖泊水位高；阶段 III: 4.68~0.31 ka BP，气候特征呈现出从温湿向暖干气候逐渐演变，降水减少，湖泊水位下降；阶段 IV: 0.31 ka BP 以来，气候特征为前期温和湿润，后期具有趋向暖干化特征，响应了近几十年来全球气候变暖导致的气候变化趋势。总的来看，滇西北地区湖泊沉积记录的全新世气候具有较好的一致性。

星云湖沉积物自生碳酸盐氧同位素记录了大气降水氧同位素的变化，进而可以反映印度季风的变化，该记录表现出 11~6.5 ka 同位素偏负，指示该阶段印度季风最强；之后同位素逐渐偏正，说明印度季风减弱[33] [34]。袁子杰(2023) [35]滇中湖泊沉积记录的全新世气候变化与火历史指出，湿润的全新世早期(11.7~6 cal ka BP)火活动较少，而湿度降低的中全新世期间(6~2.8 cal ka BP)火活动增多。2.8 cal ka BP 以来，区域持续干旱，但火活动迅速减少。李婷(2020) [18]对抚仙湖沉积物进行了碳酸盐、粒度、方解石、石英、元素 Ca、元素 Si、以及 Sr/Rb 比值等环境代用指标的详细分析，并与碳酸盐稳定同位素研究。研究表明，12~8.8 cal ka BP，抚仙湖处于早全新世升温的湿润气候期；8.8~4.4 cal ka BP，抚仙湖流域处于持续暖干的气候期。在此期间，抚仙湖流域 5.1 cal ka BP 时有一次短暂气候突然变冷、季风减弱的气候事件。4.37~2.0 cal ka BP，抚仙湖沉积物的各个指标均发生较大变化，流域环境变化明显。2.2~2 cal ka BP 期间，气候呈现从自 12 ka 以来最暖干到接近现代湿润程度的巨大变化。王敏等(2020) [36]以云南阳宗海 1020 cm 长的湖泊沉积物岩芯为研究对象，重建了阳宗海流域过去 13,000 年的植被、气候以及森林火灾历史。研究表明，过去 13,000 年气候变化可分为 4 个阶段：1) 13,200~11,000 cal a BP，气候温凉湿润；2) 11,000~8000 cal a BP，气候较上阶段温暖偏干；3) 8000~5000 cal a BP，流域内气温升至 13,000 cal a BP 以来的最高值，湿度进一步降低；4) 5000 cal a BP 至今，气温和湿度均明显下降。刘圣之(2023) [37]通过对滇中杞麓湖沉积物地球化学指标及粒度参数等环境代用指标的分析，重建了杞麓湖流域约 11 ka cal BP 的气候环境变化过程。11,000~6000 cal a BP，暖湿的气候条件；6000~500 cal a BP，气候向暖干趋势变化；500 cal a BP 至今，人为活动较为剧烈，气候波动较大。李凯等(2018) [38]通过对云南异龙湖 4.56 m 沉积岩芯进行 X 射线荧光光谱分析(XRF)，获得了高分辨率元素地球化学序列。研究结果指出，14,500~9000 cal yr. BP，异龙湖流域降水丰沛，气候较湿润；9000~6000 cal yr. BP 期间，区域温度增加导致流域干旱化加剧；6000 cal yr. BP 以后，外源物质输入锐减可能指示了区域降水的降低。滇中地区湖泊沉积记录的全新世气候既有同一性又有差异性，但在整体上是十分吻合。此外，范云峰(2023) [39]对异龙湖流域沉积物进行了孢粉分析，也指出 15,400~14,200 cal a BP，该阶段气候温和湿润；14,200~9400 cal a BP，本阶段较上阶段气温有所减低，湿度有所增加，气候温凉湿润，末期呈现变暖变湿的趋势；9400~5800

cal a BP, 本阶段气候暖热湿润; 5800~3000 cal a BP, 本阶段较上一阶段温度有所下降, 湿度有所减少, 气候暖干; 3000 cal a BP 至今, 此阶段温度进一步降低, 湿度有越来越干的趋势。异龙湖流域自 15,400 以来的气候经历了温和湿润→温凉湿润→暖湿→暖干→温干的变化, 温度变化大致经历了温和→升温→高温→降温→继续降温的变化, 湿度有越来越干的趋势。整体上看, 其基本的变化与滇中及滇西北地区的差别不大。

## 5. 西南地区和中国其他地理单元全新世以来气候变化对比

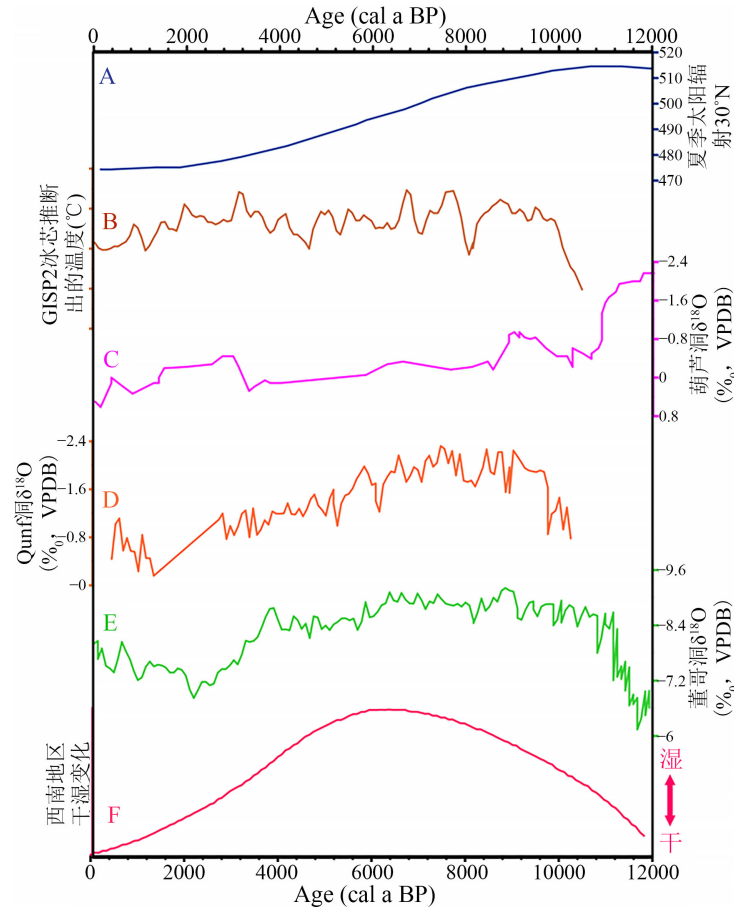
本文引用王楠等(2018) [40]绘制出的西南地区全新世以来的湿润度变化曲线, 并结合 Ran 等(2013) [41]绘制的中国南部、北部、西北以及青藏高原全新世以来湿润度曲线进行综合对比分析(图 2)。结果表明, 中国西南地区全新世以来气候变化呈现多次的升温、降温过程, 这与我国其他区域全新世气候的总体特点是一致的, 即全新世早期属于升温期, 中期温暖湿润, 晚期向干冷化方向发展[42]。就湿润度来说, 全新世以来各个地理单元的湿润度变化趋势存在明显差别。具体表现为, 西南地区与中国北部及南部其他地区全新世湿润度变化趋势基本一致, 即早期由于干旱状态向湿润状态演变, 中期总体呈现湿润的特征, 晚期呈变干趋势。但中国北部与西南地区湿润度变化相比, 北部湿润期呈现起始时间晚、结束时间早的特点; 而中国南部其他地区与西南地区湿润度变化相比, 中国南部其他地区湿润期呈现起始时间早、结束时间早的特点。新疆和青藏地区全新世湿润度与西南地区湿润度变化特征相差较大, 主要表现在青藏高原地区全新世早期湿度大, 中期以后向相对干的环境演变; 而西北地区湿润度变化则表现为全新世早中期较为干旱, 晚期以后向湿润状态演变。



**Figure 2.** Moisture changes in different geographical regions of China since Holocene (modified from Wang *et al.* (2018) [40])

**图 2.** 全新世以来中国不同地理区域湿润度变化(改自王楠等(2018) [40])

## 6. 中国西南地区全新世气候的驱动机制



注：A：30°N 夏季太阳辐射；B：GISP2 冰芯推断出的温度；C：葫芦洞 $\delta^{18}\text{O}$ ；D：Qunf 洞 $\delta^{18}\text{O}$ ；E：董哥洞 $\delta^{18}\text{O}$ ；F：西南地区干湿变化。

**Figure 3.** Regional comparison of Holocene climate records in southwest China

**图 3.** 西南地区全新世气候记录区域对比

通过上述区域对比可以发现(见图 3)，中国全新世以来各个地理单元的气候并非完全一致，但整个区域内全新世以来的气候大致较为温和稳定，即早中期(11.5~3.5 cal ka BP)气候属于升温期，气候特征总体表现为温暖湿润；晚期(3.5 cal ka BP 至今)气候向偏干、偏冷演化[42]。从整体上看，我国全新世的气候基调是暖。由于西南地区地势起伏大，地形复杂，气候因子复杂，因此为了更好地理解和把握其全新世以来的气候变化规律，本文基于以上湖泊沉积记录，结合其他古气候替代性指标，对全新世以来的气候变化进行了系统分析，以此探究我国西南地区全新世以来古气候的演化特征。并对沉积记录的全新世冷事件进行了区域对比，探讨了西南地区全新世气候变化的主要驱动机制。我国西南地区的气候变化受到季风的显著影响，因此本文将西南地区全新世湿度曲线与印度季风区与东亚季风区的石笋氧同位素进行了对比，发现其与印度季风区的阿曼石笋及董哥洞石笋氧同位素记录具有较好的一致性，黄冉(2021) [43]对贵州石将军洞 SJJ7 石笋  $\delta^{18}\text{O}$  进行标准化处理，提取纯太平洋信号，验证了西南地区石笋  $\delta^{18}\text{O}$  受 ISM 与 EASM 共同影响；该信号与 WPWP (Western Pacific Warm Pool)海表温度之间的关系也证实了 ENSO (El Niño-Southern Oscillation)活动对亚洲夏季风的影响。据此，本文认为中国西南地区全新世气候变化与印



度夏季风密切相关。太阳活动作为亚洲夏季风变化最重要的外部驱动力,年代际尺度上的气候振荡更多受到低纬驱动,其中 ITCZ (Intertropical Convergence Zone)平均位置移动以及 ENSO 活动是影响亚洲夏季风变化最主要的因素。因此,本文还将其与太阳辐射曲线进行了对比,发现其与 30°N 夏季太阳辐射曲线的变化也十分相似,本文认为其全新世气候变化还受控于夏季太阳辐射。此外,我国西南地区还紧靠青藏高原,地势起伏大,地形复杂,高原的隆升与下降都会对其区域气候产生重大影响,因此其可能还受到青藏高原的影响。气候的变化还受控于大洋环流,热带辐合带的移动,厄尔尼诺、南方涛动等的影响,这些因子的变化也可能影响西南地区的气候变化,由于其内在机制比较复杂,所以其对西南地区气候变化的影响还有待进一步的探究。

## 7. 结语与展望

总的来说,西南地区全新世以来百年尺度上的气候演化特征与全球气候特征大致具有一致性,即气候以温和湿润为主,且与 8.2 ka BP、5.5 ka BP、2.8 ka BP 冷事件具有一致的响应关系。但由于西南地区西邻青藏高原,又同时受亚非季风及高原季风的多重影响,其气候的演化特征和变化强度也具有明显的区域特性,如该区气候对 5.5 ka BP 冷事件的响应程度要比 8.2 ka BP 事件更为明显。湖泊沉积记录的西南地区全新世以来总体呈现湿润的气候特征。其中,早期(11.5~8 ka BP)属于增湿期,中期(8~3.5 ka BP)总体表现为湿润,晚期(3.5 ka BP 至今)气候向减湿方向发展,这与基于孢粉记录的西南地区全新世以来的气候变化基本一致。与其他地理单元比较可以发现,西南地区与中国北部及南部其他地区全新世湿润度变化趋势基本一致,即早期由干旱状态向湿润状态演化,中期总体呈现湿润的特征,晚期呈变干趋势。目前,西南地区基于湖泊沉积记录的全新世以来气候重建研究多以定性分析为主,定量研究也在逐渐增多,且目前大多数研究都是以多指标相互佐证的研究为主,提高了古气候重建的精度。然而,云南地区湖泊较多,湖泊沉积研究成果颇丰,但研究区不均匀,主要集中在滇中及滇西北地区,应扩大研究范围,完善云南湖泊沉积记录,整合湖泊沉积记录数据,帮助研究者更好地理解 and 把握云南及西南地区的气候环境变化。

## 参考文献

- [1] Newman, L., Kiefer, T., Otto-Bliesner, B. and Wanner, H. (2010) The Science and Strategy of the Past Global Changes (PAGES) Project. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, **2**, 193-201. <https://doi.org/10.1016/j.cosust.2010.04.004>
- [2] Bond, G., et al. (1997) A Pervasive Millennial-Scale Cycle in North Atlantic Holocene and Glacial Climates. *Science*, **278**, 1257-1266. <https://doi.org/10.1126/science.278.5341.1257>
- [3] 何薇, 汪亘, 王永莉, 魏志福, 巩俊成, 张婷, 马云雪, 玉晓丽. 四川邛海湖泊沉积物记录的去 30 cal. ka B.P. 以来的古气候环境特征[J]. 第四纪研究, 2018, 38(5): 1179-1192.
- [4] 刘国华. 西南生态安全格局形成机制及演变机理[J]. 生态学报, 2016, 36(22): 7088-7091.
- [5] 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.
- [6] 李素萍, 李金锋, 武振杰, 等. 泸沽湖地区晚全新世气候和环境演变[J]. 地质学报, 2016, 90(8): 1998-2012.
- [7] 郑茜, 张虎才, 明庆忠, 等. 泸沽湖记录的西南季风区 15000 a B.P.以来植被与气候变化[J]. 第四纪研究, 2014, 34(6): 1314-1326.
- [8] 蔡萌. 1.6 万年以来泸沽湖沉积中碳酸盐和粒度变化及其环境指示意义[D]: [硕士学位论文]. 昆明: 云南师范大学, 2019.
- [9] 陈敬安, 万国江, 陈振楼, 等. 洱海沉积物化学元素与古气候演化[J]. 地球化学, 1999(6): 562-570.
- [10] 周静, 王苏民, 吕静. 洱海地区一万多年以来气候环境演化的湖泊沉积记录[J]. 湖泊科学, 2003, 15(2): 104-111.
- [11] 陈敬安, 万国江, 徐经意. 洱海沉积物粒度记录与气候干湿变迁[J]. 沉积学报, 2000, 18(3): 341-345.
- [12] 张振克, 吴瑞金, 王苏民, 等. 全新世大暖期云南洱海环境演化的湖泊沉积记录[J]. 海洋与湖沼, 2000, 31(2):

210-214.

- [13] Yao, Y.F., Song, X.Y., Wortley, A.H., Wang, Y.F., Blackmore, S. and Li, C.S. (2017) Pollen-Based Reconstruction of Vegetational and Climatic Change over the Past ~30 ka at Shudu Lake in the Hengduan Mountains of Yunnan, Southwestern China. *PLOS ONE*, **12**, e0171967. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0171967>
- [14] 张宏亮, 李世杰, 冯庆来, 等. 云南星云湖沉积物正构烷烃记录的近代环境变化[J]. 第四纪研究, 2008, 28(4): 746-753.
- [15] 韩艳. 滇西北地区天才湖沉积记录揭示的 12 cal. ka B.P. 以来的环境变迁[D]: [硕士学位论文]. 南京: 南京师范大学, 2013.
- [16] 李楠, 常凤琴, 张虎才, 等. 近 70 年来云南杞麓湖流域气候变化与人类活动的湖泊沉积记录[J]. 云南师范大学学报(自然科学版), 2016, 36(5): 60-66.
- [17] 杨春和, 杨欢, 郑平波, 等. 抚仙湖沉积物多指标记录的过去 5000 年湖泊环境变化[J]. 湖泊科学, 2022, 34(4): 1359-1371.
- [18] 李婷. 抚仙湖沉积物记录的 12 ka 以来的气候变化[D]: [硕士学位论文]. 昆明: 云南师范大学, 2020.
- [19] He, X., Zhou, J., Zhang, X. and Tang, K. (2006) Soil Erosion Response to Climatic Change and Human Activity during the Quaternary on the Loess Plateau, China. *Regional Environmental Change*, **6**, 62-70. <https://doi.org/10.1007/s10113-005-0004-7>
- [20] 张武龙, 张井勇, 范广洲. CMIP5 模式对我国西南地区干湿季降水的模拟和预估[J]. 大气科学, 2015, 39(3): 559-570.
- [21] Shen, C.M., Liu, K.-B., Tang, L.Y. and Overpeck, J.T. (2006) Quantitative Relationships between Modern Pollen Rain and Climate in the Tibetan Plateau. *Review of Palaeobotany and Palynology*, **140**, 61-77. <https://doi.org/10.1016/j.revpalbo.2006.03.001>
- [22] 李旭, 刘金陵. 四川西昌螺髻山全新世植被与环境变化[J]. 地理学报, 1988(1): 44-51.
- [23] Lu, H., Wu, N., Liu, K., et al. (2011) Modern Pollen Distributions in Qinghai-Tibetan Plateau and the Development of Transfer Functions for Reconstructing Holocene Environmental Changes. *Quaternary Science Reviews*, **30**, 947-966. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2011.01.008>
- [24] Zhang, Y., Kong, Z., Zhang, Q.B. and Yang, Z.J. (2015) Holocene Climate Events Inferred from Modern and Fossil Pollen Records in Butuo Lake, Eastern Qinghai-Tibetan Plateau. *Climatic Change*, **133**, 223-235. <https://doi.org/10.1007/s10584-015-1463-6>
- [25] Chen, F., Zhang, J., Liu, J., et al. (2020) Climate Change, Vegetation History, and Landscape Responses on the Tibetan Plateau during the Holocene: A Comprehensive Review. *Quaternary Science Reviews*, **243**, Article ID: 106444. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2020.106444>
- [26] Shen, C.M. (2003) Millennial-Scale Variations and Centennial-Scale Events in the Southwest Asian Monsoon: Pollen Evidence from Tibet. Ph.D. Thesis, Louisiana State University, Baton Rouge, LA. [https://repository.lsu.edu/gradschool\\_dissertations/3440](https://repository.lsu.edu/gradschool_dissertations/3440)
- [27] 何薇, 汪亘, 王永莉, 等. 四川邛海湖泊沉积物记录的过去 30 cal. ka B.P. 以来的古气候环境特征[J]. 第四纪研究, 第四纪研究, 2018, 38(5): 1179-1192.
- [28] 吴艳宏, 王苏民, 侯新花. 青藏高原中部错鄂全新世湖泊沉积物年代学研究[J]. 中国科学 D 辑(地球科学), 2006, 36(8): 713-722.
- [29] 石胜强, 袁道先, 罗伦德, 等. 35000 a BP 以来四川洪雅的孢粉记录与气候变化[J]. 中国岩溶, 2012, 31(2): 121-130.
- [30] 唐领余, 沈才明, 吕厚远, 等. 青藏高原第四纪孢粉研究五十年[J]. 中国科学(地球科学), 2021, 51(12): 2015-2034.
- [31] 张振克, 吴瑞金, 王苏民, 等. 近 8 ka BP 来云南洱海地区气候演化的有机碳稳定同位素记录[J]. 海洋地质与第四纪地质, 1998(3): 24-25, 27-29. <https://doi.org/10.16562/j.cnki.0256-1492.1998.03.003>
- [32] 韩艳. 滇西北地区天才湖沉积记录揭示的 12 cal. ka B.P. 以来的环境变迁[D]: [硕士学位论文]. 南京: 南京师范大学, 2012.
- [33] 刘亚生. 云南腾冲青海湖沉积物物化参数的环境意义及末次冰消期以来气候变化[D]: [硕士学位论文]. 昆明: 云南师范大学, 2015.
- [34] Wu, Y., Li, T.Y., Yu, T.L., 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>

- [35] 袁子杰. 滇中湖泊沉积记录的全新世气候变化与火历史[D]: [硕士学位论文]. 兰州: 兰州大学, 2023. <https://doi.org/10.27204/d.cnki.glzhu.2022.002409>
- [36] 王敏, 蒙红卫, 黄林培, 等. 云南阳宗海流域过去 13000 年植被演替与森林火灾[J]. 第四纪研究, 2020, 40(1): 175-189.
- [37] 刘圣之. 全新世以来杞麓湖沉积物记录的流域环境及有机碳埋藏变化研究[D]: [硕士学位论文]. 昆明: 云南师范大学, 2023.
- [38] 李凯, 谭斌, 倪健, 等. 末次盛冰期以来云南异龙湖的环境演变——来自地球化学沉积记录的证据[J]. 生态学报, 2018, 38(24): 8973-8982.
- [39] 范云峰. 滇南异龙湖流域过去 15400 年植被、气候和森林火灾史[D]: [硕士学位论文]. 昆明: 云南师范大学, 2023.
- [40] 王楠, 钟静, 李勇, 等. 基于孢粉记录的中国西南地区全新世气候变化研究进展[J]. 应用与环境生物学报, 2018, 24(5): 1015-1022.
- [41] Ran, M. and Feng, Z. (2013) Holocene Moisture Variations across China and Driving Mechanisms: A Synthesis of Climatic Records. *Quaternary International*, **313-314**, 179-193. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2013.09.034>
- [42] 侯光良, 方修琦. 中国全新世气温变化特征[J]. 地理科学进展, 2011, 30(9): 1075-1080.
- [43] 黄冉. 贵州石将军洞石笋多指标记录的晚全新世气候和环境演变[D]: [硕士学位论文]. 重庆: 西南大学, 2021.