

DOI: 10.5846/stxb201801250200

赵增友, 石胜强, 殷建军, 陈志霞, 秦趣, 刘安乐. 黔西高原 MIS3-MIS2 期炭屑记录与火灾模式研究. 生态学报, 2019, 39(2): - .  
Zhao Z Y, Shi S Q, Yin J J, Chen Z X, Qin Q, Liu A L, Zhang C S. Fire history can be obtained from the charcoal record on the southwest plateau of Guizhou. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(2): - .

## 黔西高原 MIS3-MIS2 期炭屑记录与火灾模式研究

赵增友<sup>1,\*</sup>, 石胜强<sup>2</sup>, 殷建军<sup>3</sup>, 陈志霞<sup>1</sup>, 秦趣<sup>1</sup>, 刘安乐<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 六盘水师范学院 旅游与历史文化学院, 六盘水 553004

<sup>2</sup> 西南大学 地理科学学院, 重庆 400715

<sup>3</sup> 中国地质科学院岩溶地质研究所, 国土资源部/广西壮族自治区岩溶动力学重点实验室, 桂林 541004

**摘要:** 火灾与气候、植被存在复杂的关系, 搞清东亚季风区的火灾模式及其发生机制, 对预测未来气候变化及火灾防治具有重要意义。通过对黔西高原 MIS3—MIS2 期间的古湖相沉积物进行炭屑分析并结合 AMS<sup>14</sup>C 测年数据研究发现: MIS3 晚期以来研究区的火灾主要发生于 36.3—35 cal ka BP、26.2—17.6 cal ka BP 期间, 中粒炭屑和大炭屑分别在 35、26.2、23.6 cal ka BP 记录到 3 次地方火。研究区炭屑记录对冷干事件响应敏感, 炭屑峰值区对应 Heinrich 事件(H 事件)、末次冰盛期(LGM)等干旱事件, 低值区对应 DO 事件, 呈现千年旋回的特征。比对东亚地区的炭屑记录发现, 在大范围的东亚季风区 MIS2 期比 MIS3 末期在火的强度和频率上都要高, 与欧洲模式显著不同。火的发生机制可能受气候因素的控制, 同时受植被类型的影响。

**关键词:** 炭屑; 火; 黔西高原; MIS2/3; 末次冰期

## Fire history can be obtained from the charcoal record on the southwest plateau of Guizhou

ZHAO Zengyou<sup>1,\*</sup>, SHI Shengqiang<sup>2</sup>, YIN Jianjun<sup>3</sup>, CHEN Zhixia<sup>1</sup>, QIN Qu<sup>1</sup>, LIU Anle<sup>1</sup>, ZHANG Chunsheng<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Liupanshui Normal University, Tourism and History culture Department, Liupanshui 553004, China

<sup>2</sup> School of Geography Science, Southwest University, Chongqing 400715, China

<sup>3</sup> Institute of Karst Geology, Chinese Academy of Geological Sciences; Karst Dynamics Laboratory, Ministry of Land and Resources/Guangxi, Guilin 541004, China

**Abstract:** Fire has a nonlinear relationship with climate and vegetation. Therefore, identifying the mode and mechanisms of fire in the East Asian monsoon area is very important when attempting to predict future climate change and improve fire management. A 110 cm continuous core from the southwest plateau of Guizhou was sampled at 1 cm intervals for charcoal analysis. The chronology of the core extended from MIS3 to MIS2. The results show that since the late MIS3, fire mainly happened in the 36.3—35 cal ka BP and 26.2—17.6 cal ka BP periods. Three local fires happened in the 35 cal ka BP, 26.2 cal ka BP, and 23.6 cal ka BP periods, and these were identified from the large and medium size charcoal particles. Comparison of the charcoal record with stalagmite and ice core records indicated that the peak in the charcoal record corresponds to cold-dry events, such as Heinrich and Last Glacial Maximum (LGM), and the low value area corresponds to DO events. These results have Millennium oscillation characteristics. A comparison with other charcoal records for the East Asian monsoon area showed that the intensity and frequency of fire in MIS2 was much stronger than in the late MIS3, which differs from the European pattern. The fire mechanism may be controlled by climatic factors and could be influenced by vegetation type.

**基金项目:** 贵州省教育厅自然科学基金(黔教合 KY 字[2014]284 号); 贵州省科技厅联合基金项目(黔科合 LH 字[2014]7458 号); 贵州省教育厅创新群体重大研究项目(黔教合 KY 字[2016]056 号); 六盘水师范学院 2011 协同创新项目(LPSSYXTZX201402); 六盘水师范学院科技创新团队项目(LPSSYKJTD201701)

收稿日期: 2018-01-25; 网络出版日期: 2018-00-00

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: tsuzzy0905@163.com

**Key Words:** charcoal; fire; Qianxi Plateau; MIS2/MIS3; last glacier

火是陆地生态系统的重要组成部分,直接影响植被类型的形成和演化,并间接的受气候条件、植被类型、人类活动的影响<sup>[1-2]</sup>。随着变暖趋势的加剧,全球火灾事件频发,如最近发生于美国加州的森林大火,给人类的生存和发展敲响了警钟。搞清火灾发生的机制,对预测未来气候变化及防治火灾具有重要意义。炭屑是植物组织未完全燃烧的产物,由于其产量大、易传播、不易分解等特性,使其成为追踪“火事件”的代用指标<sup>[3-4]</sup>。保存于湖泊、泥炭、沼泽中的炭屑颗粒,为研究地质历史时期的火事件提供了连续、长时间序列的记录,对研究火的强度、频率对植被的干扰程度具有重要的价值。

气候、植被、火灾之间存在着复杂的非线性关系,一方面气候通过闪电、可燃物湿度、温度等对火灾产生直接影响,另一方面气候通过影响植被生产量,而间接的影响火活动<sup>[5-6]</sup>。进入史前时代后,伴随人类活动的影响,使火事件的解译变得更加复杂<sup>[7]</sup>。晚更新世是人类活动影响少的阶段<sup>[7-9]</sup>,提供了研究气候-植被-火灾关系的理想条件。尽管国内外晚更新世火灾研究逐渐增多<sup>[10-18]</sup>,但对火灾机制与气候关系仍不清楚。有研究认为火的发生与冷干期相对应<sup>[19-22]</sup>,但也有研究认为暖湿的氧同位素 3 阶段(MIS3)及全新世大暖期,火灾频繁,而在冷期的氧同位素 2 阶段(MIS2)及末次冰盛期(LGM),火活动较弱<sup>[7,9]</sup>。因此,搞清东亚季风区火灾模式及气候变化与火、植被的关系对预测未来气候及火灾防治具有重要意义。

我国西南区的黔西高原,在其地质演化史中,由于频繁的上升和下降,发育了丰富的第四纪沉积物,为研究区域的气候及火灾历史提供了良好的载体。黔西高原地区的古生态研究较为薄弱,过去主要是利用孢粉指标来反映云贵高原贵州部分的古植被、古气候演变<sup>[23-25]</sup>,少有炭屑记录报道<sup>[26]</sup>。本研究旨在加强黔西高原地区火灾历史研究,试图搞清气候-火灾-植被的关系及东亚季风区的火灾模式。

## 1 研究区概况

研究区位于黔西高原西南部的六盘水市郊(图 1),北邻毕节,南邻兴义,西部与云南省曲靖相邻。地质构造上,属于扬子准地台上扬子台褶带的威宁至水城跌陷断褶束上。裸露基岩属于石炭系下石炭统黄龙群灰岩,同时,山体中上部发育有岩溶洞穴(干洞)。部分山体中部发育有第三系、第四系砂、页岩,指示遭受了强烈的构造抬升。

地貌上,主要属于岩溶峰丛与岩溶洼地的地貌组合,岩溶洼地呈 NW-SE 向狭长分布,岩溶洼地底部发育有落水洞等排水管道。

气候上,本区位于黔西高原,海拔 2070 m,属于亚热带山地气候区,冬冷夏凉,全年平均气温 15℃,夏季 7 月平均气温 19.7℃,冬季 1 月平均气温 3℃,年平均降水量 1200—1500 mm。

土壤上,在灰岩的地质背景下,周围山地发育了黄棕壤、黄壤及山地灌丛紫色土,在岩溶洼地中发育灰色沼泽土。

植被上,属于亚热带常绿落叶阔叶混交林带,受人类活动的影响,现生植被主要是灌木-蕨类及人工木材林,主要代表性植物:毛栗(*Castanea mollissima*)、青冈子(*Cyclobalanopsis glauca*)、蕨类(*Pteridophyta*)、火棘(*Pyracantha fortuneana*)、水毛花(*Schoenoplectus mucronatus*)。主要经济树种:马尾松(*Pinus massoniana*)、柳杉(*Cryptomeria fortunei*)。

## 2 材料与方法

LSL 钻孔取自贵州省六盘水市红桥新区石龙村附近,为一古湖泊沉积。研究剖面位于岩溶洼地的中心,该岩溶洼地为断陷构造,研究区内可见陡峭断陷崖壁,岩层产状近于 90°。由于地形封闭,发育了小型沼泽湿地,湿地总面积不超过 1 km<sup>2</sup>,呈狭长型。

岩芯长度为 110 cm,按物质组成及沉积物颜色,自上而下将剖面分为 3 层,其中 1—13 cm 为浅灰色淤泥,

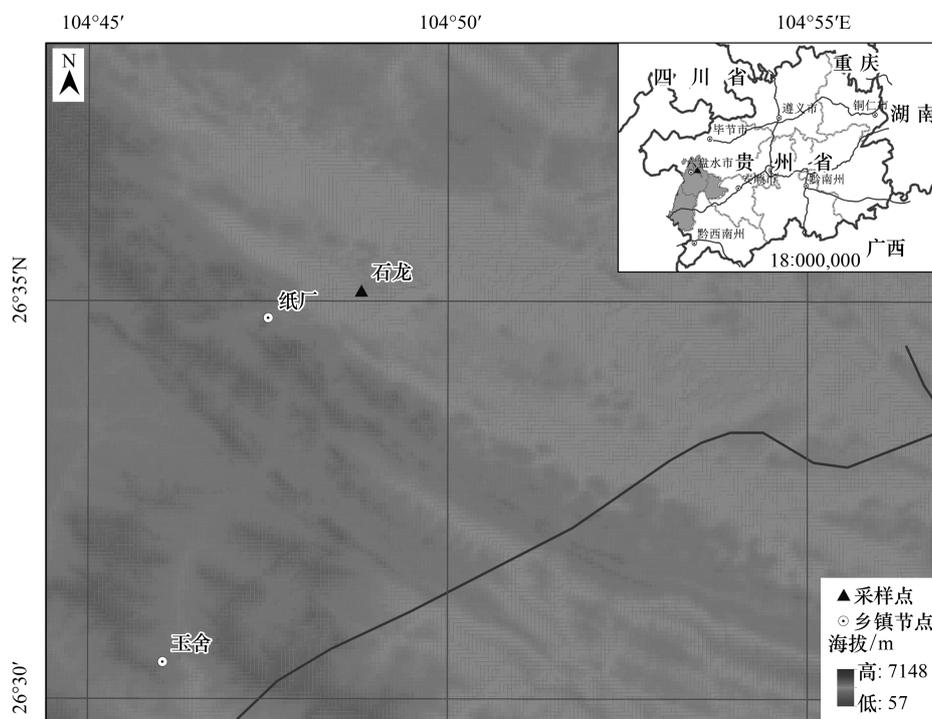


图 1 黔西高原石龙剖面位置图(自绘)

Fig.1 The location of Shilong profile in western Guizhou plateau

14—80 cm 为灰色淤泥,81—110 cm 为黑色淤泥。按照 1 cm 间距等距取样,共取得 55 个样品,将样品装袋带回实验室烘干。

炭屑提取采用孢粉常规酸碱处理法<sup>[27]</sup>,对所有样品进行炭屑分析。称取干样品 10 g 左右,加入 1 片石松孢子片( $27637 \pm 110$ )粒,用 10% HCL、40% HF 及 10%  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  分别进行酸碱处理,为减少实验流程对炭屑的影响,最后用重液浮选。

炭屑统计采用点接触法<sup>[28]</sup>,根据炭屑粒径分为:微炭屑  $< 30 \mu\text{m}$ 、中炭屑  $30\text{—}125 \mu\text{m}$ 、大炭屑  $> 125 \mu\text{m}$ 。在统计炭屑时,记录石松孢子的数量,以计算炭屑浓度。炭屑浓度的计算采用公式:  $W = A \times 27600 / (B \times G)$ ,式中 A 为统计的炭屑数,B 为统计的石松孢子数,G 为样品重量。炭屑统计在 Zeiss 显微镜下进行,每个样品统计不少于 40 个视域。炭屑图谱的绘制采用 Tilia 软件完成。

根据剖面岩性的变化,选取有机质含量丰富的 3 个样品,送美国 Beta 实验室进行  $\text{AMS}^{14}\text{C}$  测年,其中 LSL-1 样品测试材料为炭屑,年代结果精度高,其余两个样品测年材料为有机质,全部测年结果如表 1 所示,利用 INTCAL 13 软件<sup>[29]</sup>进行年代校正,根据测年结果建立年代序列,如图 2 所示。

表 1 黔西高原石龙  $\text{AMS}^{14}\text{C}$  测年结果Table 1  $\text{AMS}^{14}\text{C}$  dates for Shilong profile, Guizhou plateau

野外编号 Field Code	实验室编号 Lab Code	深度 Depth / cm	材料 Materials	碳同位素 $\delta^{13}\text{C} / \text{‰}$	加速器测年 $\text{AMS}^{14}\text{C} / \text{a BP}$	校正年代 Calibrated age / cal a BP
LSL-47	Beta-475023	18	有机质	-25.8	$16180 \pm 40$	19705—19365
LSL-22	Beta-475022	56	有机质	-26.6	$20700 \pm 50$	25233—24610
LSL-1	Beta-475021	110	炭屑	-24.5	$33830 \pm 240$	38875—37515

\*  $\text{AMS}^{14}\text{C}$ : 质谱加速器碳十四测年,即 Accelerator Mass Spectrometry radiocarbon dating 英文缩写

### 3 结果分析

#### 3.1 炭屑分析结果

本剖面炭屑总浓度在 59581—1583236 粒/g 之间, 平均为 392450 粒/g。>125  $\mu\text{m}$  炭屑浓度在 4710—334738 粒/g 之间, 平均为 52805 粒/g。30—125  $\mu\text{m}$  炭屑浓度为 24533—1234473 粒/g, 平均为 223218 粒/g。<30  $\mu\text{m}$  炭屑浓度在 9837—375077 粒/g 之间, 平均为 116427 粒/g。根据炭屑浓度的变化, 将剖面划分为 5 个炭屑带, 如图 3 所示。

I 层(110—96 cm)。炭屑总浓度整体较高, 平均为 481059 粒/g。微炭屑(<30  $\mu\text{m}$ ) 平均浓度为 132684 粒/g, 出现 1 个峰值。30—125  $\mu\text{m}$  的炭屑浓度整体较低, 平均为 247095 粒/g。大炭屑(>125  $\mu\text{m}$ ) 浓度较高, 平均浓度为 101279 粒/g, 记录到 1 次峰值, 可能指示 1 次当地火事件。

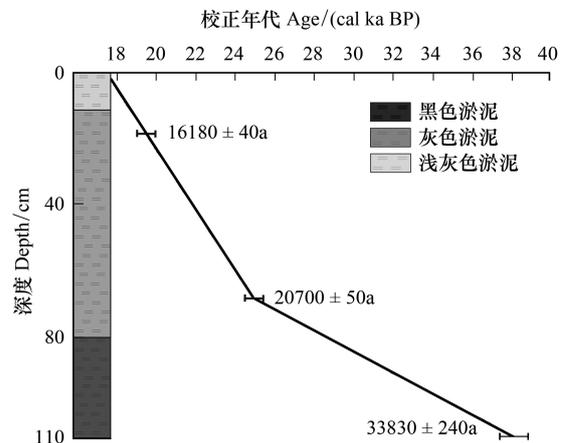


图 2 黔西高原石龙剖面年代序列图

Fig.2 Age-Depth model for Shilong profile western Guizhou plateau

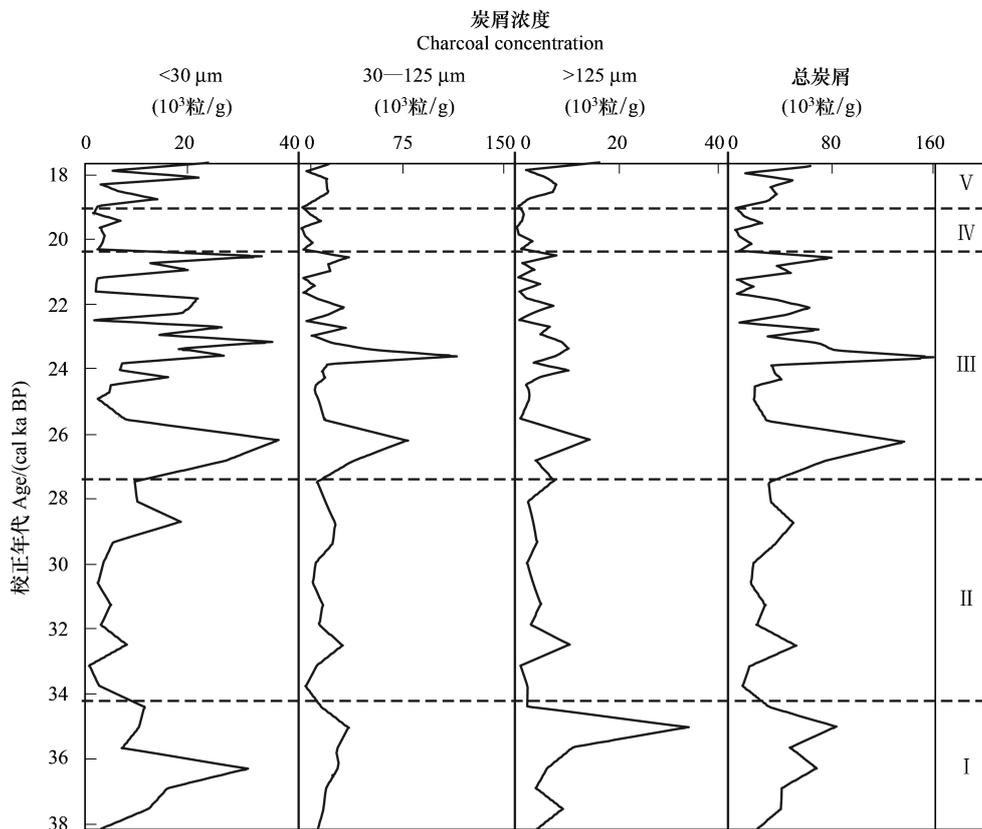


图 3 黔西高原石龙剖面炭屑图谱

Fig.3 The Charcoal spectra of Shilong profile western Guizhou plateau

II 层(95—74 cm)。各粒径炭屑浓度较 I 带显著降低, 波动平缓。炭屑总浓度平均为 256441 粒/g。微炭屑(<30  $\mu\text{m}$ ) 浓度平均为 40084 粒/g。30—125  $\mu\text{m}$  浓度平均为 175465 粒/g。大炭屑(>125  $\mu\text{m}$ ) 浓度, 平均为 40891 粒/g。3 个粒径炭屑浓度整体较低, 但均记录到 1 次小峰值。

Ⅲ层(73—26 cm),各粒径炭屑浓度较高且波动频繁。炭屑总浓度较高,平均为 486909 粒/g。微炭屑(<30  $\mu\text{m}$ )浓度较Ⅱ带上升至 154567 粒/g,波动频繁。中粒径炭屑(30—125  $\mu\text{m}$ )浓度较上带大幅度升高,平均为 281356 粒/g,炭屑浓度出现 2 个峰值。大炭屑(>125  $\mu\text{m}$ )浓度较Ⅱ带降至 50986 粒/g。各粒径炭屑均表现出与中粒径炭屑相近的峰值模式。

Ⅳ带(25—11 cm)炭屑总浓度及各级粒径炭屑均大幅降低,其中炭屑总浓度降至 123647 粒/g。微炭屑(<30  $\mu\text{m}$ )浓度降至 35351 粒/g。中粒径炭屑、大炭屑均较低。

Ⅴ带(10—0 cm),各粒径炭屑均表现出波动升高的趋势,其中微炭屑表现最为显著。炭屑总浓度升高至 381660 粒/g。微炭屑升高至 125840 粒/g,指示区域火增加。中粒径炭屑、大炭屑较上带升高,但峰值不明显。

### 3.2 MIS3-MIS2 期间火活动重建

根据炭屑浓度(CHAC),结合 AMS<sup>14</sup>C 测年结果,重建研究区火灾活动的记录。

38.2—34.4 cal ka BP, MIS3 晚期,炭屑浓度较高,微炭屑和大炭屑均记录到 1 次峰值,有研究认为,微炭屑指示区域火,而大炭屑、中炭屑指示当地火<sup>[30-31]</sup>。微炭屑在 36.3 cal ka BP 左右达到峰值,指示 1 次区域火事件。大炭屑和中粒径炭屑在 35 cal ka BP 左右达到峰值,指示 1 次当地火。

34.4—27.4 cal ka BP, MIS3 期后段,炭屑浓度整体较低,波动平缓,但各粒径炭屑均记录到 32.5 cal ka BP 左右 1 次弱峰值,发生 1 次小范围地方火灾。同时,微炭屑在 29.3—28.7 cal ka BP 左右也记录到 1 次区域火,可能与同期的亚周期的变干事件有关<sup>[32-33]</sup>。

27.4—20.3 cal ka BP, MIS2 期,炭屑浓度频繁达到峰值,中粒径炭屑分别在 26.2、23.6 ka 记录到本剖面的最高值,可能指示 2 次较大的地方火,其中 23.6 cal ka BP 的炭屑浓度达本剖面峰值,说明这次火事件强度大。微炭屑共记录到 4 次峰值,除上述 2 次峰值外,在 LGM 期间,有 2 次峰值,指示 2 次区域火。

20.3—18.9 cal ka BP,各粒径炭屑均降低,指示火灾事件减少。

18.9—17.6 cal ka BP,微炭屑和大炭屑波动升高,其中尤以微炭屑表现最为显著,记录到多次峰值,说明区域火灾事件增多。

## 4 讨论

### 4.1 气候与火的关系

火灾模式与气候的关系是古生态学研究的重要内容,本研究根据火灾重建的结果并结合格陵兰冰芯记录<sup>[32]</sup>、石笋记录<sup>[33-36]</sup>,试图搞清黔西高原 MIS3-MIS2 期间的火灾模式与气候的关系。

MIS3 期,石笋记录<sup>[33-36]</sup>显示中国南方季风区整体较为湿润。但在 36.3、35 cal ka BP 左右,微炭屑、大炭屑先后峰值,分别指示 1 次区域火和 1 次地方火。同期,在南京葫芦洞<sup>[34]</sup>及黔西雾露洞石笋中,存在亚周期的冷干事件<sup>[33,36]</sup>,尤其黔西 WU3 石笋,在 35 ka 左右的沉积间断<sup>[35-36]</sup>对应于格陵兰冰芯 DO7—DO8 之间的冷事件<sup>[32]</sup>,Duan 认为该沉积间断是由夏季风减弱的 h 事件造成<sup>[36]</sup>。32.5 cal ka BP 和 29.3—28.7 cal ka BP 各检测到 1 次弱峰值,可能是对葫芦洞、雾露洞石笋<sup>[34-36]</sup>  $\delta^{18}\text{O}$  亚周期干旱事件的响应,其中 WU3 石笋中,32.5 cal ka BP 冷干事件被称为 f 事件<sup>[36]</sup>(图 4)。H3 期间研究区各粒径炭屑总体水平较低,说明 H3 事件对研究区的火灾影响小。同期,沉积物  $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$  明显偏负(-27.16‰)说明研究区 H3 期间较湿润,与周边地区石笋  $\delta^{18}\text{O}$  差异显著,这可能是受黔西高原特殊地形有关。

MIS2 是末次冰期中最寒冷干旱的阶段,先后经历 H2、LGM 等冷干事件。在 26.2 cal ka BP,研究区各粒径炭屑记录到 1 次峰值,说明 1 次强地方火灾事件,对应于石笋记录的 H2b<sup>[34-36]</sup>事件,火灾造成木本植物花粉由 33.75%降至 26.64%左右,而蕨类孢子含量由火灾前的 12.88%升至 22.36%。24.2—23.6 cal ka BP 期间,南京葫芦洞<sup>[34]</sup>及黔西雾露洞石笋<sup>[35-36]</sup>指示 H2a 事件,此时中粒径炭屑记录在 23.6 cal ka BP 记录到 1 次峰值,指示 1 次强地方火事件,此事件造成乔木花粉含量降低。这两次火事件的时间与雾露洞石笋<sup>[36]</sup>及大西洋深海沉积物<sup>[37]</sup>中的 H2 事件双峰结构较接近,可认为是对 H2 双峰结构的响应。23.6—20.3 cal ka BP,末次

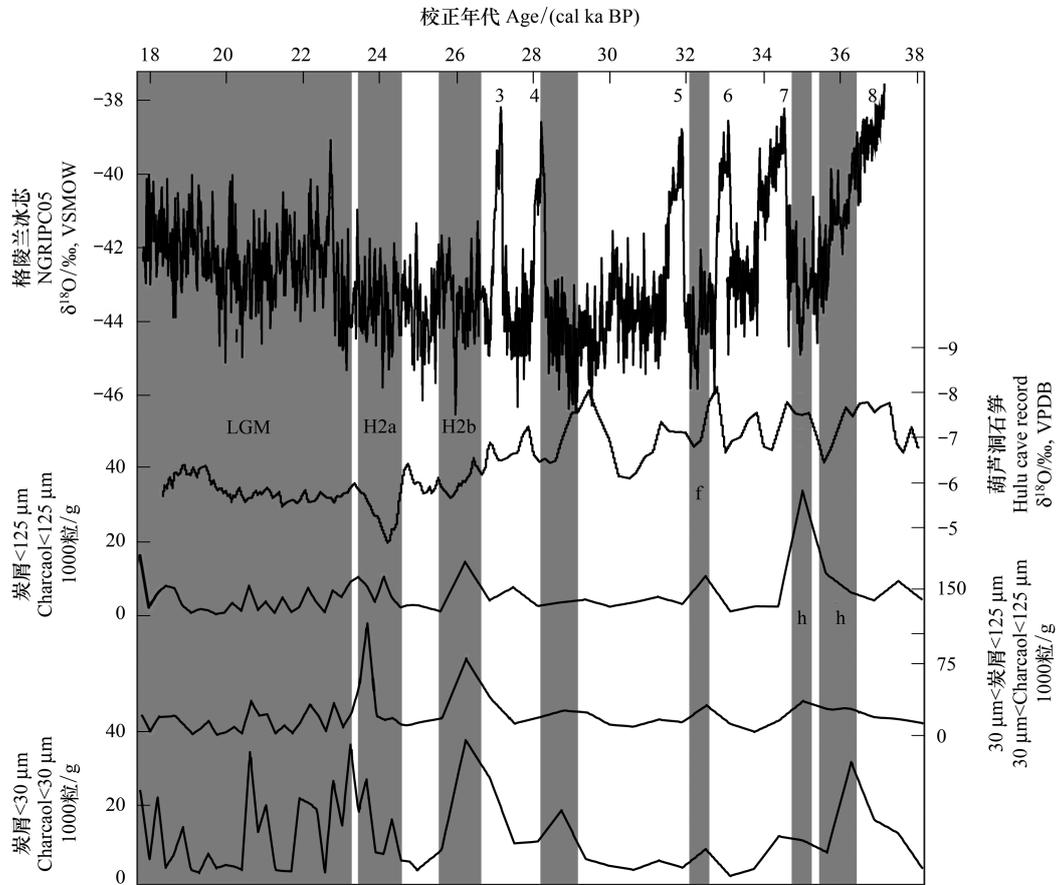


图4 黔西高原石龙剖面炭屑记录与石笋、冰心记录对比

Fig.4 The comparison of Charcoal record in western Guizhou plateau section with Hulu cave stalagmite record and NGRIP record

图中黑色阴影指干冷事件;图中数字指 DO 事件

冰盛期<sup>[32]</sup>(LGM),剖面中微炭屑浓度较高且频繁波动,指示区域火灾频繁。冰后期,尤其是 20.3—18.7 cal ka BP 炭屑浓度较低,此时木本植物和草本植物花粉异常贫乏,说明干冷的气候造成植被减少,故炭屑浓度较低。

通过炭屑记录与高分辨率石笋记录与格陵兰冰芯记录的比较,发现研究区火灾的发生与冷干事件高度相关,火灾活动强烈期主要对应于 H 事件、LGM 以及亚周期的干旱事件,DO 事件对应于火活动减弱期,Hubau 等也认为干旱是自然火灾的主要驱动因素<sup>[38]</sup>。同时,MIS2 期比 MIS3 期在火的强度和频率上都要高,MIS2 期的地方火灾均导致陆地生态系统的波动,而 MIS3 期的火灾强度和范围都要小的多,这与欧洲的火灾模式显著不同。

#### 4.2 东亚火灾模式对比

东亚地区的石笋<sup>[34-36]</sup>、湖泊<sup>[39]</sup>等记录均显示东亚地区的季风环流存在大范围的千年尺度的旋回,受东亚季风气候的影响,火灾事件,是否存在大区域相似的火灾模式,尤其是无人干扰之前的火灾模式,这是当前学界较为关注的问题。

长时间尺度的炭屑记录,无论是国内还是国外都较少,已有研究发现处于不同气候区的火灾模式有显著差异<sup>[7]</sup>。本文主要选取处于同一季风气候影响下的东亚地区炭屑记录进行对比,检讨东亚季风区晚更新世是否存在相似的火灾模式。涉及末次冰期的炭屑记录主要有:南海记录<sup>[19-20]</sup>、雷州半岛<sup>[9]</sup>、洞庭湖<sup>[40]</sup>、月亮湖记录<sup>[41]</sup>及云南记录<sup>[14]</sup>、黄土高原<sup>[11,42]</sup>(图 5),其中,本研究与南海、黄土高原、洞庭湖的炭屑记录在轨道尺度上具有较好的一致性,均指示 MIS2 期火灾活动较 MIS3 末期火灾强烈。尤其是在南海<sup>[19-20]</sup>、黄土高原<sup>[11,42]</sup>、洞庭湖的记录<sup>[40]</sup>,在 MIS2 期间炭屑浓度明显较高。在千年尺度上,黔西高原炭屑记录与渭南、南

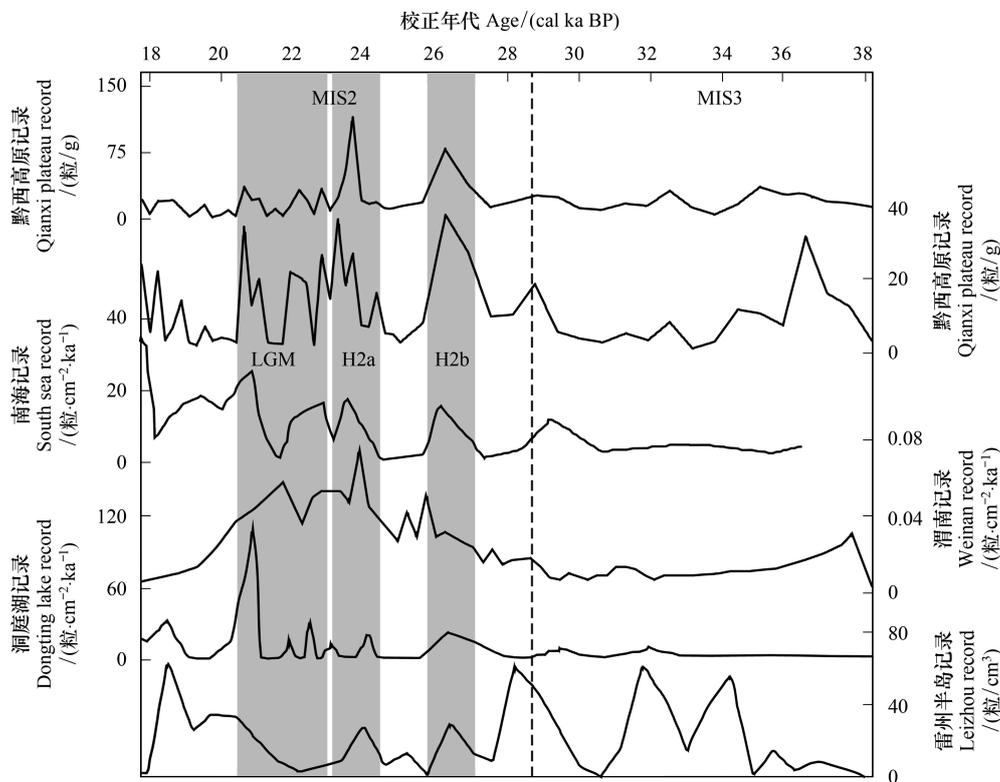


图 5 东亚地区炭屑记录对比

Fig.5 The comparison of Charcoal records in East Asia

海、洞庭湖的记录均对 H2、LGM 有响应,甚至对 H2 双峰结构的响应也趋于一致。同处东亚季风区的泰国记录<sup>[10]</sup>及新几内亚的记录<sup>[43]</sup>也显示出相似的模式。但雷州半岛研究表明, MIS3 期火活动要较 MIS2 期强烈<sup>[9]</sup>,火的发生对应于 DO 事件(图 5),与东亚地区记录显著不同,甚至与南海的记录也有较大差异,造成这种差异原因尚不明确。

通过以上分析,黔西高原火灾记录与东亚季风区火灾在 MIS3-MIS2 期间的可对比性表明,在轨道尺度上,东亚季风区 MIS2 期的火活动要较 MIS3 末期强烈,且火活动主要对应于冷干事件,这与东亚夏季风自 MIS3 以来逐渐减弱的大趋势相对应。千年尺度上,这些区域的火事件对冷干的 H 事件、LGM 响应事件一致。这与欧洲地区的同期火灾模式有较大差异<sup>[7,12-13]</sup>。当然,限于东亚地区长尺度的炭屑记录较有限,需要更多研究来验证。

### 4.3 火灾发生机制探讨

探讨火灾发生机制在火研究中是一个复杂的问题,火的发生受多种因素的影响,如气候、植被、人类活动等<sup>[7]</sup>。本研究区位于中国南方亚热带季风区,西南地区孢粉记录指示,即使是干冷的末次冰盛期,降水条件都能提供充足的可燃物<sup>[44-46]</sup>。检视本研究中的火灾事件,大部分发生于冷干期(千年尺度-百年尺度),炭屑峰值均与中国石笋记录中的干旱事件相对应,如 Hulu 洞石笋记录<sup>[34]</sup>中 H 事件、LGM 及亚周期冷干事件对应于炭屑记录中的峰值,而 DO 事件则对应于炭屑低值。前人研究发现冷干气候造成区域内相对湿度的降低,可能为火灾发生提供了条件<sup>[21,38,47-49]</sup>。云南青海湖炭屑记录也指示炭屑峰值响应于冷干事件<sup>[46]</sup>。因此,气候的干湿状况是火灾的主控因子。

植被类型也对火灾产生重要的影响,易燃植被更易引起火灾<sup>[50-51]</sup>。据已有孢粉分析结果显示,孢粉类型主要是松(*Pinus*)、冷杉(*Abies*)、铁杉(*Tsuga*)、栎属(*Quercus*)、禾本科(*Poaceae*)、莎草科(*Cyperaceae*)为主,从植被类型上来说,植被组成具有易燃的性质,如松、杉、禾本科均是易燃植被<sup>[50-51]</sup>,这为火灾的发生提供了另一重要条件。

## 5 结论

(1) 通过高精度的 AMS<sup>14</sup>C 测年及炭屑分析, 重建黔西高原的 MIS3-MIS2 期间的火活动历史; 研究区的火灾主要发生在 36.3—35.2、26.2—17.7 cal ka BP 期间, 其中, 中粒炭屑和大炭屑分别在 35、26.2、23.6 cal ka BP 记录到 3 次地方火。

(2) 火活动呈现与石笋氧同位素相似的千年尺度的旋回特征, 即冷干的 Heinrich 事件及 LGM 对应于火灾活动期, 而温暖湿润 DO 事件对应于火活动减弱期。

(3) 区域对比发现, 在大区域范围上, 在东亚季风区 MIS2 期的火活动要较 MIS3 末期强烈, 且火活动主要对应于冷干事件, 这与欧洲地区的火灾模式有显著差异。

(4) 本区 MIS3-MIS2 期间火灾的发生机制主要取决于两个因素: 一、气候干湿状况是火灾发生的决定因素, 二、植被状况也在一定程度上影响火灾的发生。

### 参考文献 (References):

- [ 1 ] 周道违, 周以良, 郑焕能. 火生态学研究评述. 世界林业研究, 1993, 6(6): 38-44.
- [ 2 ] 赵红梅, 于晓菲, 王健, 王国平. 火烧对湿地生态系统影响研究进展. 地球科学进展, 2010, 25(4): 374-380.
- [ 3 ] Patterson III W A, Edwards K J, Maguire D J. Microscopic charcoal as a fossil indicator of fire. Quaternary Science Reviews, 1987, 6(1): 3-23.
- [ 4 ] Clark J S. Particle motion and the theory of charcoal analysis: source area, transport, deposition, and sampling. Quaternary Research, 1988, 30(1): 67-80.
- [ 5 ] DeBano L F, Neary D G, Ffolliott P F. Fire's Effects on Ecosystems. New York: John Wiley and Sons, 1998: 1-352.
- [ 6 ] Bowman D M J S, Balch J K, Artaxo P, Bond W J, Carlson J M, Cochrane M A, D'Antonio C M, DeFries R S, Doyle J C, Harrison S P, Johnston F H, Keeley J E, Krawchuk M A, Kull C A, Marston J B, Moritz M A, Prentice I C, Roos C I, Scott A C, Swetnam T W, van der Werf G R, Pyne S J. Fire in the earth system. Science, 2009, 324(5926): 481-484.
- [ 7 ] Daniau A L, Harrison S P, Bartlein P J. Fire regimes during the last glacial. Quaternary Science Reviews, 2010, 29(21/22): 2918-2930.
- [ 8 ] 郑卓, 邓韞, 张华, 余荣春, 陈焱新. 华南沿海热带-亚热带地区全新世环境变化与人类活动的关系. 第四纪研究, 2004, 24(4): 387-393.
- [ 9 ] Xue J B, Zhong W, Xie L C, Unkel I. Millennial-scale variability in biomass burning covering the interval—41,000-7050 cal BP in the tropical Leizhou Peninsula (south China). Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2015, 438: 344-351.
- [ 10 ] Penny D. A 40,000 year palynological record from north-east Thailand; implications for biogeography and palaeo-environmental reconstruction. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2001, 171(3/4): 97-128.
- [ 11 ] Wang X, Peng P A, Ding Z L. Black carbon records in Chinese loess plateau over the last two glacial cycles and implications for paleofires. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2005, 223(1/2): 9-19.
- [ 12 ] Daniau A L, Sánchez-Goñi M F, Beaufort L, Laggoun-Défarge F, Loutre M F, Duprat J. Dansgaard-Oeschger climatic variability revealed by fire emissions in southwestern Iberia. Quaternary Science Reviews, 2007, 26(9/10): 1369-1383.
- [ 13 ] Daniau A L, Goñi M F S, Duprat J. Last glacial fire regime variability in western France inferred from microcharcoal preserved in core MD04-2845, Bay of Biscay. Quaternary Research, 2009, 71(3): 385-396.
- [ 14 ] Xiao X Y, Haberle S G, Shen J, Xue B, Burrows M, Wang S. Postglacial fire history and interactions with vegetation and climate in southwestern yunnan province of China. Climate of the Past, 2017, 13(6): 613-627.
- [ 15 ] Black M P, Mooney S D, Martin H A. A >43,000-year vegetation and fire history from Lake Baraba, New South Wales, Australia. Quaternary Science Reviews, 2006, 25(21/22): 3003-3016.
- [ 16 ] Markgraf V, Whitlock C, Haberle S. Vegetation and fire history during the last 18,000 cal yr B.P. in Southern Patagonia: Mallín Pollux, Coyhaique, Province Aisén (45°41'30"S, 71°50'30" W, 640 m elevation). Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2007, 254(3/4): 492-507.
- [ 17 ] Scott L. Microscopic charcoal in sediments: quaternary fire history of the grassland and savanna regions in South Africa. Journal of Quaternary Science, 2002, 17(1): 77-86.
- [ 18 ] Whitlock C, Bianchi M M, Bartlein P J, Markgraf V, Marlon J, Walsh M, McCoy N. Postglacial vegetation, climate, and fire history along the east side of the Andes (lat 41-42.5°S), Argentina. Quaternary Research, 2006, 66(2): 187-201.
- [ 19 ] Sun X J, Li X, Chen H C. Evidence for natural fire and climate history since 37 ka BP in the northern part of the South China Sea. Science in China Series D: Earth Sciences, 2000, 43(5): 487-493.
- [ 20 ] 罗运利, 陈怀成, 吴国瑄, 孙湘君. 南海最近 3 个冰期旋回中的天然火与气候——ODP1144 孔深海沉积中的炭屑记录. 中国科学(D 辑), 2001, 31(10): 854-860.
- [ 21 ] Torres-Rodríguez E, Lozano-García S, Roy P, Ortega B, Beramendi-Orosco L, Correa-Metrio A, Caballero M. Last Glacial droughts and fire

- regimes in the central Mexican highlands. *Journal of Quaternary Science*, 2015, 30(1): 88-99.
- [22] Robin V, Bork H R, Nadeau M J, Nelle O. Fire and forest history of central European low mountain forest sites based on soil charcoal analysis: the case of the eastern Harz. *The Holocene*, 2014, 24(1): 35-47.
- [23] 陈佩英, 周启承, 林树基. 贵州威宁 15000 年来的古环境——南屯泥炭层剖面研究. *贵州地质*, 1991, 8(2): 141-154.
- [24] 陈佩英, 林树基, 周启承. 贵州草海地区赵家院子泥炭层剖面孢粉研究. *贵州科学*, 1993, 11(3): 31-39.
- [25] 童国榜, 张俊牌, 羊向东, 罗宝信, 王毓钊, 陈佩英. 云贵高原晚新生代孢粉植物群与环境变迁. *海洋地质与第四纪地质*, 1994, 14(3): 91-104.
- [26] 赵增友, 袁道先, 石胜强, 罗伦德. 孢粉、炭屑揭示的黔西高原 MIS3b 期间古植被、古气候演变. *生态学报*, 2012, 32(15): 4811-4818.
- [27] Feagri K, Iversen J. *Textbook of Pollen Analysis*. Oxford: Blackwell, 1989: 1-295.
- [28] 李宜垠, 侯树芳, 赵鹏飞. 微炭屑的几种统计方法比较及其对人类活动的指示意义. *第四纪研究*, 2010, 30(2): 356-363.
- [29] Ramsey C B. Bayesian analysis of radiocarbon dates. *Radiocarbon*, 2009, 51(1): 337-360.
- [30] Tinner W, Conedera M, Ammann B, Gaggeler H W, Gedye S, Jones R, Sagesser B. Pollen and charcoal in lake sediments compared with historically documented forest fires in southern Switzerland since AD 1920. *The Holocene*, 1998, 8(1): 31-42.
- [31] Pitkänen A, Huttunen P. A 1300-year forest-fire history at a site in eastern Finland based on charcoal and pollen records in laminated lake sediment. *The Holocene*, 1999, 9(3): 311-320.
- [32] Svensson A, Andersen K K, Bigler M, Clausen H B, Dahl-Jensen D, Davies S M, Johnsen S J, Muscheler R, Rasmussen S O, Röthlisberger R, Steffensen J P, Vinther B M. The Greenland Ice Core Chronology 2005, 15-42 ka. Part 2: comparison to other records. *Quaternary Science Reviews*, 2006, 25(23/24): 3258-3267.
- [33] 崔英方, 汪永进, 刘殿兵. 黔西南雾露洞石笋记录的 MIS3 晚期亚洲季风变化和南北极气候的联系. *海洋地质与第四纪地质*, 2011, 31(3): 101-107.
- [34] Wang Y J, Cheng H, Edwards R L, An Z S, Wu J Y, Shen C C, Dorale J A. A high-resolution absolute-dated late pleistocene monsoon record from Hulu Cave, China. *Science*, 2001, 294(5550): 2345-2348.
- [35] 赵佩, 汪永进. 黔西南石笋记录 MIS3/2 阶段百年尺度季风演变和 H 事件特征. *海洋地质与第四纪地质*, 2011, 31(2): 121-128.
- [36] Duan F C, Liu D B, Cheng H, Wang X F, Wang Y J, Kong X G, Chen S T. A high-resolution monsoon record of millennial-scale oscillations during late MIS 3 from Wulu Cave, south-west China. *Journal of Quaternary Science*, 2014, 29(1): 83-90.
- [37] Bard E, Rostek F, Turon J L, Gendreau S. Hydrological impact of Heinrich events in the subtropical northeast Atlantic. *Science*, 2000, 289(5483): 1321-1324.
- [38] Hubau W, Van den Bulcke J, Van Acker J, Beeckman H. Charcoal-inferred Holocene fire and vegetation history linked to drought periods in the Democratic Republic of Congo. *Global Change Biology*, 2015, 21(6): 2296-2308.
- [39] Yancheva G, Nowaczyk N R, Mingram J, Dulski P, Schettler G, Negendank J F W, Liu J Q, Sigman D M, Peterson L C, Haug G H. Influence of the intertropical convergence zone on the East Asian monsoon. *Nature*, 2007, 445(7123): 74-77.
- [40] 谭志海, 龙艳侠, 毛龙江, 莫多闻, 廖冰, 刘钊. 洞庭盆地末次冰期中晚期以来黑褐色土壤剖面野火记录及气候关联. *首都师范大学学报: 自然科学版*, 2017, 38(4): 77-84.
- [41] 伍婧, 刘强. 晚冰期以来月亮湖孢粉记录反映的古植被与古气候演化. *地球科学——中国地质大学学报*, 2012, 37(5): 947-954.
- [42] 谭志海, 黄春长, 庞奖励, 周群英. 陇东黄土高原北部全新世野火历史的木炭屑记录. *第四纪研究*, 2008, 28(4): 733-739.
- [43] Thevenon F, Bard E, Williamson D, Beaufort L. A biomass burning record from the West Equatorial Pacific over the last 360 ky: methodological, climatic and anthropic implications. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2004, 213(1/2): 83-99.
- [44] Chen X M, Chen F H, Zhou A F, Huang X Z, Tang L Y, Wu D, Zhang X J, Yu J Q. Vegetation history, climatic changes and Indian Summer Monsoon evolution during the Last Glaciation (36,400-13,400 cal yr BP) documented by sediments from Xingyun Lake, Yunnan, China. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2014, 410: 179-189.
- [45] Yao Y F, Song X Y, Wortley A H, Blackmore S, Li C S. A 22 570-year record of vegetational and climatic change from Wenhai Lake in the Hengduan Mountains biodiversity hotspot, Yunnan, Southwest China. *Biogeosciences*, 2015, 12(5): 1525-1535.
- [46] Xiao X Y, Shen J I, Haberle S G, Han Y, Xue B, Zhang E L, Wang S M, Tong G B. Vegetation, fire, and climate history during the last 18 500 cal a BP in south-western Yunnan Province, China. *Journal of Quaternary Science*, 2015, 30(8): 859-869.
- [47] Porter S C, An Z S. Correlation between climate events in the North Atlantic and China during the last glaciation. *Nature*, 1995, 375(6529): 305-308.
- [48] Rocca M E, Brown P M, MacDonald L H, Carrico C M. Climate change impacts on fire regimes and key ecosystem services in Rocky Mountain forests. *Forest Ecology and Management*, 2014, 327: 290-305.
- [49] Power M J, Whitney B S, Mayle F E, Neves D M, de Boer E J, Maclean K S. Fire, climate and vegetation linkages in the Bolivian Chiquitano seasonally dry tropical forest. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 2016, 371(1696): 20150165.
- [50] Baker W L. *Fire ecology in Rocky Mountain Landscapes*. Washington DC: Island Press, 2009: 1-605.
- [51] Kelly R F, Higuera P E, Barrett C M, Hu F S. A signal-to-noise index to quantify the potential for peak detection in sediment—charcoal records. *Quaternary Research*, 2011, 75(1): 11-17.