

# 贵州黑洞4 750年以来高分辨率石笋δ<sup>13</sup>C记录

郜魁,何尧启,邱万银,张鑫,冯唐慧,姜修洋

引用本文:

部魁,何尧启,邱万银,张鑫,冯唐慧,姜修洋.贵州黑洞4 750年以来高分辨率石笋 δ<sup>13</sup>C记录[J]. 沉积学报, 2024, 42(3): 970-980.

GAO Kui, HE YaoQi, QIU WanYin, et al. A High-Resolution Stalagmite  $\delta^{13}$ C Record for the Past 4 750 Years from Dark Cave, Guizhou, SW China[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2024, 42(3): 970-980.

#### 相似文章推荐(请使用火狐或IE浏览器查看文章)

#### Similar articles recommended (Please use Firefox or IE to view the article)

#### 南岭东部定南大湖沉积物粒度敏感组分及末次冰消期环境记录

Evolution of Climate Recorded by Sensitive Grain-Size Components of Dahu Swamp Since 16ka, Nanling Mountains, South China 沉积学报. 2018, 36(2): 310-318 https://doi.org/10.14027/j.issn.1000-0550.2018.035

#### 闽西仙云洞石笋记录的Heinrich2事件年龄及亚旋回特征

Timing and Structure of the Heinrich 2 Abrupt Event Inferred from a Spe-leothem Record from Xianyun Cave, Western Fujian Province 沉积学报. 2018, 36(6): 1139–1147 https://doi.org/10.14027/j.issn.1000–0550.2018.143

#### 全新世早期弱夏季风事件的精确定位及机制探讨——以湖南莲花洞LHD5石笋为例

Discussion about the Mechanism of the Weak Summer Monsoon Events during the Early Holocence: A case study of precisely dated stalagmite record from Lianhua Cave, Hunan province, China 沉积学报. 2016, 34(2): 281–291 https://doi.org/10.14027/j.cnki.cjxb.2016.02.007

浙江北湖桥岩芯记录的早一中全新世环境演变

History of Environmental Change during Early-Middle Holocene Recorded by Beihuqiao Core in Zhejiang China 沉积学报. 2016, 34(3): 543-554 https://doi.org/10.14027/j.cnki.cjxb.2016.03.012

#### 早全新世季风演化的高分辨率石笋 8 180记录研究——以河南老母洞石笋为例

Early Holocene Monsoon Evolution of High-resolution Stalagmite O Records: in Henan Laomu Cave 沉积学报. 2015, 33(1): 134–141 https://doi.org/10.14027/j.cnki.cjxb.2015.01.014 文章编号:1000-0550(2024)03-0970-11

DOI: 10.14027/j.issn.1000-0550.2022.068

# 贵州黑洞 4 750 年以来高分辨率石笋 $\delta^{13}$ C 记录

郜魁<sup>1,2</sup>,何尧启<sup>3</sup>,邱万银<sup>1,2</sup>,张鑫<sup>1,2</sup>,冯唐慧<sup>1,2</sup>,姜修洋<sup>1,2</sup> 1.福建师范大学地理科学学院,湿润亚热带生态一地理过程教育部重点实验室,福州 350007 2.福建师范大学地理研究所,福州 350007

3.贵州民族大学旅游与航空服务学院,贵阳 550025

**摘 要 【目的】**全球变暖背景下,喀斯特地貌广布的西南地区可能面临石漠化加剧的风险,对该区域石漠化演变历史的重建具 有重要意义。【方法】通过采自贵州省黔西县黑洞一支石笋(HD12)的29个<sup>230</sup>Th年龄和954个δ<sup>13</sup>C数据,重建了该地区过去 4750年的生态环境演变历史。【结果与结论】发现在4322~3526 a B.P.以及803~82 a B.P.时段存在两个显著的δ<sup>13</sup>C正偏移,说明 这两个时段洞穴上方的生态环境出现了恶化。HD12石笋δ<sup>13</sup>C记录在约803 a B.P.的显著偏正持续了约290 a,其振幅达4.2%o,指 示了该区域石漠化的扩张过程。这一时期西南地区多个洞穴石笋δ<sup>13</sup>C值的一致偏正特征,可能指示了宋末靖康事件(823 a B.P.) 后,人口的大量迁入和气候的干旱化导致了该区域石漠化的扩张。HD12石笋δ<sup>13</sup>C值在4322~3526 a B.P.时期的偏正,振幅达 4.9%o,其中4322~3977 a B.P.偏正过程对应于北半球4.2 ka事件,而3777~3526 a B.P.的偏正对应3.7 ka事件,两个时期的干旱 事件在西南地区的多个石笋与湖泊记录中均有体现,说明在此期间,亚洲夏季风减弱,降水减少可能引起了该区域植被覆盖度 大幅降低和土壤严重退化。

关键词 石笋δ<sup>13</sup>C;晚全新世;喀斯特石漠化;中国西南地区 第一作者简介 郜魁,男,1997年出生,博士研究生,全球变化研究,E-mail: 934063640@qq.com 通信作者 姜修洋,男,教授,E-mail: xyjiang@fjnu.edu.cn

中图分类号 P532 文献标志码 A

# 0 引言

石漠化是指喀斯特地区地表植被和土壤演变为 几乎没有植被和土壤的岩石景观<sup>[1]</sup>。我国西南地区 喀斯特地貌广布<sup>[2]</sup>,其低成土率与高渗透性造就了脆 弱的生态环境,容易受人类活动以及气候变迁影响 发生石漠化,进而造成更多的地质灾害,例如干旱、 泥石流、滑坡和地面沉降等<sup>[3]</sup>。尽管该区域石漠化问 题在近几十年得到了缓解<sup>[4]</sup>,但在全球变暖的背景 下,旱涝交替愈发频繁,石漠化问题可能再度加剧<sup>[3]</sup>。 因此,了解其演化历史及其与气候变化和人类活动 的联系对区域可持续发展具有重要意义。

得益于洞穴石笋具有能够绝对定年、记录连续 且时间跨度较长等优势<sup>[5]</sup>,其中的δ<sup>18</sup>O和δ<sup>13</sup>C指标被 广泛用于古气候和古环境重建<sup>[67]</sup>。相比于δ<sup>18</sup>O在气 候重建方面的优势,石笋δ<sup>13</sup>C对于洞穴上部的生态环 境的变化更敏感,但在不同时间尺度上其主控因子

不尽相同181。在轨道尺度,冰期一间冰期的转换可能 产生极大温湿差异,石笋δ<sup>13</sup>C可能响应于C<sub>4</sub>/C<sub>4</sub>植被 类型的更替[9-10]。在千年尺度上,植被类型发生更替 的概率较低,温度对石笋 $\delta^{I3}$ C的影响似乎更明显<sup>[8,11]</sup>。 百年一年代际尺度上,在热带、亚热带季风区,石笋  $\delta^{13}$ C可能与 $\delta^{18}$ O同时受控于水热条件的变化,响应区 域季风环流变化引起的植被覆盖度或生物量变化<sup>66</sup>。 近年来,随着洞穴监测的开展[12-13],多指标分析方法 的引入<sup>[7,14]</sup>以及对δ<sup>13</sup>C信号传递过程及其机制的剖 析,在气候条件相对一致的西南地区,其区域内石笋  $\delta^{3}$ C的一致持续显著正偏移指示石漠化演化的巨大 潜力日益凸显[15-18]。例如, Kuo et al. [15]通过对比贵州 织金洞石笋 $\delta^{18}O$ 和 $\delta^{13}C$ 指出,清朝雍正年间因铜矿开 采活动而大规模移民到贵州中西部导致该地区喀斯 特石漠化加速。Zhao et al.<sup>[16]</sup>以及Li et al.<sup>[17]</sup>分别通过 对黔中夜郎洞、广西丰鱼洞石笋δ<sup>13</sup>C记录的分析,提 出了类似的结论。最近,陈朝军等18通过对比中国西

收稿日期:2022-04-08;修回日期:2022-06-16;录用日期:2022-08-12;网络出版日期:2022-08-12 基金项目:国家自然科学基金项目(42071106)[Foundation: National Natural Science Foundation of China, No. 42071106]

南地区多个洞穴δ<sup>13</sup>C记录,指出宋末靖康事件后,人 口的大规模南迁以及当时干旱的气候可能触发了该 区域石漠化的扩张。

上述研究主要讨论了历史时期人类活动对西南 地区生态环境的影响,而在晚全新世的其他时段,西 南地区类似于石漠化的大规模生态环境演化过程如 何尚不明朗,其与气候变化之间的联系也有待研究。 尤其是4.2 ka事件作为划分中晚全新世的金钉子<sup>[19]</sup>, 其气候突变过程被认为波及了整个北半球,且对人 类社会造成了深远的影响<sup>[6,20]</sup>,被石笋<sup>[21]</sup>、湖泊沉积<sup>[22]</sup> 以及泥炭<sup>[23]</sup>等记录所捕捉。因而,研究该时段气候变 化对生态环境的影响具有重要意义。

贵州省位于中国西南喀斯特地区的中心,喀斯 特面积居全国首位,面临的石漠化问题最为严峻,最 具代表性。贵州的石漠化面积已达到 32 480 km<sup>2</sup>, 占贵州省出露碳酸盐岩总面积的 25.7%<sup>13</sup>。在该区域 利用洞穴开展研究有利于厘清石漠化演变历史及其 与气候和人类活动的联系。本文选取位于贵州省黔 西县重新镇黑洞的一根长 954 mm 的石笋,利用 29 个<sup>230</sup>Th 年龄和 954 个碳同位素(δ<sup>13</sup>C)数据,建立了 4 750~82 a B.P. 的碳同位素序列,重点讨论了 803 a B.P.以来西南地区的石漠化扩张过程、4.2 ka和 3.7 ka事件期间中国西南地区生态环境演化过程及 其与气候变化的潜在联系。

# 1 研究区域、材料及方法

#### 1.1 研究区域概况

黑洞(27°12′N,106°10′E)位于贵州省黔西县 东北约35 km的重新镇(图1a)。洞穴长约10 km,海 拔1120 m,位于荔波茂兰保护区董哥洞西北约290 km处。洞穴内部温度约为13.5℃,洞穴上覆基岩厚 度介于30~50 m,土壤厚度介于10~20 cm,局部基岩 裸露<sup>[24-25]</sup>。洞穴顶部为石漠化环境,部分为农地,目 前种植玉米或烤烟,只零星生长了少量灌木和草类 (图1b,c)。研究区域的气候是典型的亚热带季风气 候,受亚洲夏季风的强烈影响,每年80%的降雨量出 现在5—10月。距黑洞89 km的贵阳气象站记录显 示,该区域年平均降水量为1176.6 mm,年平均温度 为15.2℃。该站77年(公元1945年至2021年)的温 度记录显示,该区域冬季和夏季平均温度分别为 2℃和22℃。



图1 (a)黑洞和西南地区其他古气候记录的位置;(b)洞顶耕作情况;(c)洞顶植被一土壤景观 红色圆点表示本文用作对比的记录

Fig.1 (a) Location of Dark cave and other paleoclimate records; (b) farming above cave; (c) vegetation-soil landscape above cave Red dots indicate records used for comparison in this study

## 1.2 材料与方法

HD12石笋整体外形呈圆柱状,长约954 mm,直 径约50 mm(图2a)。沿生长轴切开并抛光后,其抛 光面在自然光下呈浅黄色一乳白色,岩性致密,有少 量溶孔。

在石笋抛光面上用直径为0.5 mm的牙钻沿着 生长轴钻取29个样品用于<sup>230</sup>Th定年,测年工作在台 湾大学高精度质谱与环境变迁实验室(HISPEC)完 成<sup>[26]</sup>。化学分离步骤和仪器分析方法分别参照 Edwards *et al*.<sup>[27]</sup>和 Cheng *et al*.<sup>[28]</sup>。分析仪器为MC-ICP-MS Neptune,年龄误差类型为±2 σ<sup>[29]</sup>。在福建师 范大学稳定同位素中心使用直径为0.5 mm的牙钻沿 着石笋中心生长轴以1 mm为间隔依次钻取954个碳 同位素分析样品,采用Kiel IV 装置和Finnigan MAT-253 型质谱仪联机测试,数据采用 VPDB标准,分析 误差(±2 σ)优于±0.1‰。

2 结果

#### 2.1 <sup>230</sup>Th年代

表1列出了HD12石笋的U、Th同位素含量和29 个<sup>230</sup>Th年龄。结果显示,样品的<sup>238</sup>U含量介于(420~ 898)×10<sup>°</sup> g/g,<sup>232</sup>Th含量较低,介于(187~4552)×10<sup>-12</sup> g/g,测年误差(±2σ)均小于51 a,所有年龄在误差范 围内符合石笋生长层序。通过MOD-AGE软件<sup>[31]</sup>,建 立了HD12石笋4750~82 a B.P.时段的年代学标尺 (图 2b)。石笋发育阶段的生长速率介于0.04~1.37 mm/a,平均速率为0.29 mm/a(图 2c)。

#### 2.2 石笋碳同位素记录

HD12石笋δ<sup>13</sup>C时间序列如图3所示。δ<sup>13</sup>C值介 于-11.59‰~-6.39‰,平均值为-9.10‰,振幅达 5.2‰,平均分辨率为5a。在年代际尺度上,HD12石 笋δ<sup>13</sup>C变化呈现出一系列持续十年至数十年的高频 振荡旋回。在百年尺度上,δ<sup>13</sup>C序列在整体略微偏正 的趋势上出现了两个显著偏正的时期:(1)4 322~ 3 526 a B.P.时段,大致对应4.2 ka和3.7 ka事件,δ<sup>13</sup>C 平均值为-8.83‰,从4 322 a B.P.持续偏正到3 725 a B.P.达到序列最正值(-6.39‰),然后快速偏负至 -10.55‰,振幅达4.9‰,事件在开始和结束均有定年 点控制,测年误差均优于21年;(2)803~82 a B.P.时 段,大致对应小冰期和现代暖期以及中世纪暖期的 一部分,δ<sup>13</sup>C平均值为-8.16‰,其偏正过程大约持续 了 290 a,振幅达4.2‰,相比于事件开始,事件结束的 定年控制更好,测年误差均优于8年。石笋剖面图显



图 2 (a) HD12 石笋剖面图(黑点为定年点);(b)通过 MOD-AGE 方法<sup>[31]</sup>建立的 HD12 的年龄模型(黑点和 误差棒表示<sup>230</sup>Th 年龄和误差,黑线和红线分别代表 MOD-AGE 模型的年龄中位数和 2σ范围);(c)平均生 长速率

Fig.2 (a) Photograph of HD12 stalagmite (black dots indicate dating points); (b) The age model of HD12 established by the MOD-AGE methods<sup>[31]</sup> (black dots and error bars indicate <sup>230</sup>Th ages and errors; black line. age median; red lines.  $2\sigma$  range from MOD-AGE model); (c) growth rate of stalagmite HD12

#### 表 1 黑洞HD12石笋的U、Th同位素含量和<sup>230</sup>Th年龄

#### Table 1 U and Th isotope compositions and <sup>230</sup>Th ages of stalagmite HD12 in Dark cave

| 样品编号     | <sup>238</sup> U                    |      | <sup>232</sup> Th       |       | $\delta^{234}$ U |      | [ <sup>230</sup> Th/ <sup>238</sup> U] |                 | <sup>230</sup> Th/ <sup>232</sup> Th |      | <sup>230</sup> Th年龄/a |     | <sup>230</sup> Th年龄(a B.P.) |     | $\delta^{234}$ U初始值 |      |
|----------|-------------------------------------|------|-------------------------|-------|------------------|------|--|-----------------|--------------------------------------|------|-----------------------|-----|-----------------------------|-----|---------------------|------|
|          | /×10 <sup>-9</sup> g/g <sup>a</sup> |      | /×10 <sup>-12</sup> g/g |       | 测量值"             |      | 活度比。                                   |                 | 原子比/×10-6                            |      | 未校正                   |     | 相对于1950 AD <sup>c,d</sup>   |     | 校正后 <sup>b</sup>    |      |
| HD12-5   | 483                                 | ±0.6 | 417                     | ±7.7  | 1 325            | ±3.3 | 0.003 9                                | ±0.000 07       | 74                                   | ±2   | 182                   | ±3  | 109                         | ±6  | 1 325               | ±3.3 |
| HD12-26  | 637                                 | ±1.0 | 482                     | ±8.8  | 1 298            | ±3.9 | 0.007 6                                | ±0.000 09       | 165                                  | ±4   | 359                   | ±4  | 278                         | ±6  | 1 299               | ±3.9 |
| HD12-55  | 553                                 | ±0.6 | 456                     | ±11.0 | 1 369            | ±2.5 | 0.009 8                                | ±0.000 11       | 196                                  | ±5   | 452                   | ±5  | 372                         | ±7  | 1 370               | ±2.5 |
| HD12-73  | 446                                 | ±0.5 | 299                     | ±11.9 | 1 363            | ±2.8 | 0.014 0                                | ±0.000 15       | 344                                  | ±14  | 647                   | ±7  | 568                         | ±8  | 1 365               | ±2.8 |
| HD12-107 | 619                                 | ±0.7 | 310                     | ±9.8  | 1 362            | ±2.2 | 0.021 8                                | ±0.000 15       | 717                                  | ±23  | 1 009                 | ±7  | 932                         | ±7  | 1 366               | ±2.2 |
| HD12-160 | 692                                 | ±1.1 | 287                     | ±9.4  | 1 381            | ±3.5 | 0.025 1                                | ±0.000 13       | 998                                  | ±33  | 1 155                 | ±6  | 1 079                       | ±7  | 1 386               | ±3.5 |
| HD12-216 | 527                                 | ±0.5 | 450                     | ±9.6  | 1 436            | ±2.3 | 0.032 3                                | $\pm 0.000\ 27$ | 624                                  | ±14  | 1 456                 | ±12 | 1 375                       | ±13 | 1 442               | ±2.3 |
| HD12-240 | 699                                 | ±1.0 | 231                     | ±8.1  | 1 441            | ±3.4 | 0.036 0                                | ±0.000 17       | 1 797                                | ±63  | 1 620                 | ±8  | 1 544                       | ±8  | 1 448               | ±3.4 |
| HD12-270 | 702                                 | ±0.7 | 397                     | ±9.4  | 1 402            | ±2.1 | 0.040 1                                | $\pm 0.000\ 22$ | 1 169                                | ±29  | 1 831                 | ±10 | 1 754                       | ±11 | 1 409               | ±2.1 |
| HD12-290 | 668                                 | ±0.9 | 224                     | ±9.1  | 1 441            | ±2.9 | 0.048 3                                | ±0.000 19       | 2 372                                | ±97  | 2 175                 | ±9  | 2 099                       | ±9  | 1 450               | ±2.9 |
| HD12-340 | 665                                 | ±0.6 | 284                     | ±7.0  | 1 415            | ±2.4 | 0.048 4                                | ±0.00019        | 1 868                                | ±47  | 2 204                 | ±9  | 2 136                       | ±9  | 1 424               | ±2.4 |
| HD12-357 | 483                                 | ±0.5 | 192                     | ±10.4 | 1 440            | ±1.9 | 0.051 5                                | ±0.000 23       | 2 140                                | ±117 | 2 323                 | ±10 | 2 248                       | ±11 | 1 450               | ±1.9 |
| HD12-379 | 774                                 | ±0.9 | 257                     | ±10.0 | 1 410            | ±2.8 | 0.052 5                                | ±0.000 19       | 2 605                                | ±102 | 2 397                 | ±9  | 2 322                       | ±9  | 1 420               | ±2.8 |
| HD12-417 | 514                                 | ±0.4 | 799                     | ±10.2 | 1 381            | ±1.3 | 0.057 2                                | $\pm 0.000~32$  | 607                                  | ±8   | 2 644                 | ±15 | 2 556                       | ±17 | 1 392               | ±1.4 |
| HD12-430 | 651                                 | ±0.9 | 734                     | ±9.3  | 1 391            | ±3.2 | 0.058 5                                | $\pm 0.000\ 20$ | 854                                  | ±11  | 2 693                 | ±10 | 2 609                       | ±12 | 1 402               | ±3.2 |
| HD12-487 | 627                                 | ±0.8 | 314                     | ±9.6  | 1 411            | ±2.9 | 0.063 3                                | $\pm 0.000\ 25$ | 2 081                                | ±64  | 2 894                 | ±12 | 2 817                       | ±12 | 1 422               | ±2.9 |
| HD12-515 | 532                                 | ±0.5 | 382                     | ±9.8  | 1 415            | ±1.8 | 0.070 3                                | $\pm 0.000 41$  | 1 615                                | ±43  | 3 214                 | ±19 | 3 134                       | ±20 | 1 427               | ±1.8 |
| HD12-523 | 420                                 | ±0.5 | 277                     | ±10.0 | 1 447            | ±2.7 | 0.072 7                                | ±0.000 31       | 1 817                                | ±66  | 3 280                 | ±14 | 3 202                       | ±15 | 1 460               | ±2.7 |
| HD12-547 | 751                                 | ±1.0 | 354                     | ±10.4 | 1 446            | ±2.9 | 0.073 2                                | $\pm 0.000\ 22$ | 2 564                                | ±76  | 3 303                 | ±11 | 3 226                       | ±11 | 1 460               | ±2.9 |
| HD12-590 | 555                                 | ±0.6 | 187                     | ±9.1  | 1 429            | ±2.6 | 0.075 6                                | $\pm 0.000\ 25$ | 3 698                                | ±180 | 3 4 3 9               | ±12 | 3 364                       | ±12 | 1 443               | ±2.6 |
| HD12-626 | 898                                 | ±1.1 | 432                     | ±9.3  | 1 451            | ±2.8 | 0.079 3                                | $\pm 0.000\ 21$ | 2 719                                | ±59  | 3 576                 | ±10 | 3 499                       | ±11 | 1 466               | ±2.9 |
| HD12-662 | 733                                 | ±0.7 | 339                     | ±6.8  | 1 433            | ±2.6 | 0.080 6                                | ±0.000 23       | 2 878                                | ±58  | 3 664                 | ±11 | 3 596                       | ±12 | 1 448               | ±2.6 |
| HD12-669 | 464                                 | ±0.5 | 502                     | ±8.8  | 1 425            | ±2.6 | 0.084 6                                | $\pm 0.000~32$  | 1 289                                | ±23  | 3 861                 | ±15 | 3 777                       | ±16 | 1 441               | ±2.6 |
| HD12-693 | 512                                 | ±0.6 | 421                     | ±9.1  | 1 404            | ±2.5 | 0.085 0                                | $\pm 0.000\ 26$ | 1 705                                | ±37  | 3 914                 | ±13 | 3 833                       | ±13 | 1 420               | ±2.6 |
| HD12-746 | 742                                 | ±0.8 | 266                     | ±12.1 | 1 444            | ±2.6 | 0.089 6                                | $\pm 0.000\ 27$ | 4 125                                | ±188 | 4 058                 | ±13 | 3 983                       | ±14 | 1 461               | ±2.7 |
| HD12-790 | 634                                 | ±1.0 | 283                     | ±8.5  | 1 436            | ±3.7 | 0.091 6                                | $\pm 0.00044$   | 3 384                                | ±102 | 4 166                 | ±21 | 4 089                       | ±22 | 1 453               | ±3.8 |
| HD12-855 | 627                                 | ±0.8 | 311                     | ±8.8  | 1 471            | ±3.8 | 0.098 4                                | $\pm 0.00042$   | 3 272                                | ±94  | 4 4 1 4               | ±21 | 4 337                       | ±21 | 1 489               | ±3.9 |
| HD12-901 | 631                                 | ±1.0 | 807                     | ±9.5  | 1 448            | ±4.7 | 0.101 3                                | $\pm 0.00050$   | 1 308                                | ±16  | 4 591                 | ±25 | 4 506                       | ±26 | 1 467               | ±4.8 |
| HD12-950 | 638                                 | ±0.7 | 4552                    | ±10.5 | 1 421            | ±2.9 | 0.106 2                                | ±0.000 71       | 245                                  | ±2   | 4 871                 | ±34 | 4 731                       | ±51 | 1 440               | ±3.0 |

注:分析误差为平均值的2  $\sigma$ ;<sup>230</sup>Th的衰变常数为9.170 5×10<sup>-6</sup> a<sup>-1</sup>,<sup>234</sup>U的衰变常数为2.822 1×10<sup>-6</sup> a<sup>-1</sup>(<sup>238</sup>U) 的衰变常数为 1.551 25×10<sup>-10</sup> a<sup>-1[29]</sup>; <sup>a</sup>[<sup>238</sup>U]=[<sup>235</sup>U]×137.818(±0.65‰)<sup>[30]</sup>;  $\delta^{234}$ U=([<sup>234</sup>U/<sup>238</sup>U]<sub>活度比</sub>-1)×1 000; <sup>b</sup> $\delta^{234}$ U<sub>初始值</sub>基于<sup>230</sup>Th 年龄(T) 计算,即 $\delta^{234}$ U<sub>初始值</sub> = $\delta^{234}$ U<sub>测量值×</sub>e<sup>λ234\*T</sup>,且T为校正年龄; [<sup>230</sup>Th/<sup>238</sup>U]<sub>活度比</sub>=1-e<sup>-λ230T</sup>+( $\delta^{234}$ U<sub>测量值</sub>/1 000)[ $\lambda_{230}/(\lambda_{230}-\lambda_{234})$ ](1-e<sup>-( $\lambda$ 230- $\lambda$ 234</sub>)T),T为年龄; d<sup>230</sup>Th/<sup>232</sup>Th为4(±2)×10<sup>-6</sup>,即假定<sup>232</sup>Th/<sup>238</sup>U为3.8(地球平均值)的物质达到平衡时的值;误差估计设定为50%; B.P. 即"Before Present", 表示距公元1950年。</sup>

示在这两个时期方解石沉积较其他时间段更纯洁 (图2a),石笋沉积速率相对较慢(图2c)。除了这两 个时期石笋δ<sup>13</sup>C值显著偏正外,其他几个偏正事件持 续时间较短(<100 a)且振幅较小,暂不作进一步 讨论。

# 3 讨论

#### 3.1 黑洞石笋δ<sup>13</sup>C的指示意义

从石笋形成过程看,从地面至洞穴,石笋δ<sup>13</sup>C在 传输过程中至少会经历两次同位素分馏过程:(1)水 一气同位素交换,土壤CO,溶解于岩溶包气带中的水 生成碳酸溶液(H<sub>2</sub>O+CO<sub>2</sub>→H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>);(2)水一岩同位素 分馏,碳酸溶液在裂隙通道与围岩作用溶解碳酸钙, 直至母液饱和(CaCO<sub>3</sub>+H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>→Ca<sup>2+</sup>+2HCO<sub>3</sub>),当母液 经滴水通道或裂隙进入洞穴内部与空气接触,滴水 CO<sub>2</sub>脱气外溢使溶液处于过饱和状态,并在石笋表层 产生碳酸钙沉淀。整个过程受控于气候因素与非气 候因素,包括洞穴上方植被类型(C<sub>3</sub>/C<sub>4</sub>)的变化、植被 覆盖度或生物量的变化、土壤CO<sub>2</sub>产率、大气CO<sub>2</sub>浓 度或源的变化、岩溶表层带方解石的先期沉积 (PCP)、滴水速率以及CO<sub>2</sub>的脱气等都会对石笋 $\delta$ <sup>13</sup>C 值产生影响<sup>[8,1232]</sup>,而这些控制因子均不同程度地受控



图 3 HD12石笋δ<sup>13</sup>C时间序列

黑色细线为原始 $\delta^{13}$ C值,叠加于其上的黑色粗线为5点滑动平均值,黑色斜线为趋势线,黑色虚线为各分段 $\delta^{13}$ C均值,误差棒表示<sup>230</sup>Th测年点和误差(±2 $\sigma$ ), 灰色条柱及两边文字表示两个偏正事件及其持续时间

Fig.3 Stalagmite HD12  $\delta^{13}$ C time series

Thin black line means original  $\delta^{13}$ C value; thick black line means 5-point moving average; black diagonal line is trend line; black dashed line means  $\delta^{13}$ C value of each segment; error bars indicate  $^{230}$ Th dating points and  $\pm 2\sigma$  errors; gray columns and text indicate the two offset events and their durations

于区域内洞穴的气候水文环境<sup>[12]</sup>。通常,C。植物喜湿 冷,C。植物喜干热气候,若洞穴上覆植被为C。植物 (木本植物为主),石笋δ<sup>13</sup>C值的变化范围为-14‰~ -6‰;若上覆植被为C,植物(禾本植物为主),石笋的  $δ^{13}$ C 值则在-6‰~2‰变化。湿润的气候会促进生物 量的增加,从而促进土壤CO,的产生<sup>66</sup>,温度升高有利 于增强土壤有机质分解速率及植物根的呼吸效率, 增大土壤pCO,,δ<sup>13</sup>C值偏负。在气候干旱期,地表流 水、洞穴渗流水以及洞穴滴水都显著减少,渗流带溶 液易发展为过饱和状态,CO,脱气作用增强,从而造 成PCP现象,δ<sup>13</sup>C值偏正<sup>18</sup>。从来源看,大气CO,、碳酸 盐围岩和上覆土壤 CO,是石笋中碳的三个主要来 源<sup>[33-35]</sup>,其中大气CO,的δ<sup>13</sup>C值在工业革命前相对稳 定<sup>136</sup>:碳酸盐围岩在封闭洞穴系统中对石笋δ<sup>13</sup>C影响 显著,干旱(湿润)条件下由于渗流水流速相对缓慢 (迅速),增加(减少)了水-岩相互作用时间,溶解了 更多(较少)的基岩,石笋δ<sup>13</sup>C值偏正(偏负)<sup>[34]</sup>:而对 于大多数半开放式洞穴系统,上覆土壤CO,对石笋  $\delta^{13}$ C起主导作用,CO,主要来源于植物根呼吸作用和 土壤微生物分解作用[10,33]。现代观测表明,岩溶洞穴 上方土壤CO,对石笋δ<sup>13</sup>C值影响最大,其贡献介于 60%~95%<sup>[8]</sup>,因为土壤CO<sub>2</sub>的碳同位素组成来自土壤 以及土壤中生长的植被的碳同位素组成,而降水和 温度变化直接影响地表植被和土壤微生物的新陈代谢,在相对温和的气候条件下,更茂盛的植被导致有机物衍生的土壤CO<sub>2</sub>比例更高,因此δ<sup>13</sup>C更负<sup>1121</sup>。总之,石笋δ<sup>13</sup>C主要受控于土壤CO<sub>2</sub>产率以及区域水文条件。

除了自然过程会影响石笋δ<sup>13</sup>C外,人类活动对洞 穴上覆植被--土壤条件的改造也是--个不可忽视的 因素,一些研究指出,中国石笋δ<sup>13</sup>C能够记录人类活 动导致的植被一土壤退化[16-18]。例如,谭亮成等[7]通 过山东省黄巢洞的石笋多指标分析指出自15世纪开 始,当地山区的植被和土壤受森林采伐和土地垦殖 活动的影响不断增强,在16-18世纪当地的森林被 严重破坏甚至清除;Zhang et al.<sup>[32]</sup>发现中国江西省神 农洞的两根石笋δ<sup>13</sup>C在公元700年至1100年急剧偏 正,提出自唐代"安史之乱"以后,随着大规模移民到 江西北部,当地森林遭受了大规模的持续砍伐:Lu et al.14通过中国东南部牛鼻洞石笋碳氧同位素重建了 过去120 a 的气候和生态环境演变并指出20世纪50 年代末至60年代初该洞石笋δ<sup>13</sup>C的显著正偏记录了 "钢铁大跃进";而在喀斯特地貌广布的西南地区,其 区域内石笋δ<sup>13</sup>C的一致偏正则可能指示了人类活动 对洞穴上覆土壤的改造和对森林的砍伐引起的石漠 化过程[15-18]。

发生在4 322~3 526 a B.P.和803~82 a B.P.时段 的两个显著偏正事件,前者对应4.2 ka和3.7 ka事 件,δ<sup>13</sup>C以持续缓慢偏正并伴随高频振荡为主要变化 特征,伴随事件的结束又恢复至之前的平均值,反映 了当时气候波动导致的δ<sup>13</sup>C变化;而后者的偏正过程 对应中世纪暖期,其δ<sup>13</sup>C呈现出快速偏正的突变模 式,而后经历了一定程度的负偏,但仍显著高于平均 气候态下的δ<sup>13</sup>C值,可能与当时增强的人类活动有 关。综上,推测HD12石笋δ<sup>13</sup>C值偏负可能指示了水 热条件较好的湿润状态下植被覆盖度较高、土壤CO<sub>2</sub> 产率相对较高;反之则指示干冷气候状态下或人为 破坏导致的植被覆盖度较低、土壤CO,产率较低。

### 3.2 靖康事件以来西南地区石漠化演化过程

如果基于单一洞穴重建的牛态环境演化过程具 有区域局限性,那么通过区域内多个洞穴记录的综 合对比重建大区域石漠化过程则更具科学性,也有 助于分析区域内生态环境演化在细节上的差异。将 HD12石笋δ<sup>13</sup>C与重庆芙蓉洞FR0510石笋δ<sup>13</sup>C<sup>[37]</sup>(图 4a)和贵州石将军洞 SJJ7、SJJ-300 石笋δ<sup>13</sup>C<sup>[18]</sup>(图 4b) 对比发现,三个洞穴石笋δ<sup>13</sup>C变化范围存在一定差 异,贵州黑洞方解石石笋和重庆芙蓉洞文石石笋δ<sup>13</sup>C 变化范围分别为-11.59%~-6.39% 和-7.2%~ -6.2‰,贵州石将军洞两根石笋则分别为-6.1‰~ 1.1% 和-8.1%~1.6%,这可能与区域植被类型、洞穴 上部基岩厚度以及石笋矿物相的不同有关。石将军 洞洞顶基岩厚度约100 m,灌丛植被发育[18];芙蓉洞 洞穴顶部盖层为300~500 m,上方植被茂盛,以乔木 和灌木为主<sup>[37]</sup>;贵州黑洞上方已经出现了石漠化现象 (图1b,c),以农地为主,生长了部分灌木,但其上覆 基岩厚度仅10~30 m,因此相比于芙蓉洞和石将军 洞,贵州黑洞相对更薄的洞顶盖层可能减少了对基 岩的溶解,因而其 $\delta^{13}$ C值整体相对偏负。另外,文石  $δ^{13}$ C 通常比方解石偏重, 芙蓉洞石笋 FR0510 和石将 军洞石笋SJJ-300为文石石笋,对于SJJ7方解石石笋 原文作者也将其进行了校正,因此,三个洞穴石笋的  $\delta^{13}$ C值的变化范围的不同可能主要体现了岩溶过程 的复杂性和区域环境的差异性,而非单纯的植被类 型比例的不同。尽管各洞穴石笋 $\delta^{13}$ C变化范围不同, 但在重叠时段各记录表现出整体一致的变化特征 (图4),特别是在800 a B.P. 左右,三个洞穴石笋δ<sup>13</sup>C 值快速偏正,黑洞与芙蓉洞的δ<sup>13</sup>C值分别偏正了 4.2‰和4.4‰,石将军洞两根石笋的δ<sup>13</sup>C值则分别偏 正了 5.9‰和 6.5‰。另外,黔中夜郎洞石笋δ<sup>13</sup>C 值在 这一时期的偏正幅度达到了 8.0‰,接近 Heinrich事 件和 Younger Dryas 事件的振幅<sup>[38]</sup>;广西响水洞石笋 δ<sup>13</sup>C 偏正幅度远远超过了该记录过去 6 000 a 的变 化,达7.0‰<sup>[39]</sup>;重庆的新崖洞石笋δ<sup>13</sup>C 在这一时期的 偏正也超过了小冰期的振幅<sup>[40]</sup>。上述结果说明,在 800 a B.P.左右的显著偏正是西南地区洞穴石笋δ<sup>13</sup>C 的共同特征。





(a)重庆芙蓉洞FR0510石笋δ<sup>13</sup>C<sup>137</sup>;(b)贵州石将军洞SJJ7、SJJ-300石笋δ<sup>13</sup>C及 其5点平滑<sup>118</sup>;(c)贵州黑洞HD12石笋δ<sup>13</sup>C及其5点平滑;灰色虚线表示变化趋 势;灰色条柱表示小冰期;两个蓝色条柱分别表示现代暖期和中世纪暖期;橙色 条柱表示靖康事件;误差棒分别表示各记录的定年点和误差(±2σ)

Fig.4 Comparison of  $\delta^{13}$ C records for stalagmite HD12 with others in southwest China in the recent 2 000s

(a) FR0510 stalagmite, Furong cave, Chongqing<sup>[37]</sup>; (b) SJJ7 and SJJ-300 stalagmites, Shijiangjun cave, Guizhou<sup>[18]</sup>; (c) HD12 stalagmite, Dark cave, Guizhou. (gray dashed line. trend of change; gray column. Little Ice Age; two blue columns. Modern and Medieval Warm Periods, respectively; orange column. Jingkang incident; error bars. <sup>230</sup>Th dating points and  $\pm 2\sigma$  errors)

前人研究表明,大规模人为干扰可能破坏植被 覆盖度和土壤蓄水能力,甚至使土壤层变薄引发石 漠化而被石笋δ<sup>13</sup>C所记录<sup>[12,15,18]</sup>。重庆新崖洞<sup>[40]</sup>和广 西盘龙洞<sup>[41]</sup>石笋δ<sup>13</sup>C记录自AD1980石漠化恢复<sup>[4]</sup>以 来逐渐偏轻的过程也反向印证了这一观点。北宋 末年金朝南下攻陷北宋,导致北宋灭亡,史称靖康 事件[42]。此后,随着中国政治一经济中心南移,大约 500万北方移民迁入南方各地,在872~788 a B.P., 中国西南地区成为宋朝人口增长最快的区域之 一<sup>[43]</sup>。最近,陈朝军等<sup>[18]</sup>综合对比西南地区石笋δ<sup>13</sup>C 记录认为,靖康事件(823 a B.P.)后,人口迁入引起 的大规模森林砍伐以及农业生产等土地利用活动 的增强,可能与当时干旱的气候共同导致了西南地 区石漠化的扩张,因而该地区石笋 $\delta^{13}$ C在这一时期普 遍偏正。显然,黑洞HD12石笋 $\delta^{13}$ C值在803 a B.P.后 的快速偏正特征(图4c),进一步证明了靖康事件 (823 a B.P.)后,西南地区人类活动的增强所引起的 石漠化是该区域石笋δ<sup>13</sup>C普遍偏正的主要原因。洞 穴上部的耕作情况和大量基岩裸露状态也证实了 该区域存在一定程度的石漠化(图1b,c)。另外, HD12石笋在该时段生长速率较低(图2c),暗示着 气候干旱对石笋δ<sup>13</sup>C值的偏正也可能起着一定的作 用。陈朝军等118通过历史资料、多个地质载体以及 多指标记录的综合分析指出,受东亚夏季风变化影 响,中国西南地区中世纪暖期(1000~650 a B.P.)气 候偏干;小冰期(650~100 a B.P.)气候湿润,这在一 定程度上也解释了在约400 a B.P. 西南地区石笋  $\delta^{i3}$ C普遍偏负的现象,但尽管这一时期的气候状态 已经好转,贵州黑洞以及石将军洞石笋δ<sup>13</sup>C仍显著 高于平均气候态下的δ<sup>13</sup>C均值,说明人类活动的增 强对该区域的生态环境造成了不可逆的影响。值 得注意的是,靖康事件在不同石笋记录中的振幅、 持续时间上有一定差异。不同的振幅可能归因于 区域生态环境以及洞穴岩溶过程的差异<sup>111</sup>,即石笋  $δ^{13}$ C的局地效应<sup>[44]</sup>。另外,重庆芙蓉洞 $δ^{13}$ C记录几乎 立即响应靖康事件,而贵州石将军洞与黑洞δ<sup>i3</sup>C记 录似乎表现出约100 a的延迟响应,这说明人类活 动强度在时空上的变化可能是这一差异的主要原 因[43]。换言之,这一时期的重庆地区可能率先遭受 人口南迁带来的剧烈植被一土壤退化,而后才是更 靠南的贵州地区。

# **3.3 4.2** ka 和 **3.7** ka 事件期间西南地区的生态环境 演化

HD12 石 笋 δ<sup>13</sup>C 另一个主要特征是在 4 322~ 3 526 a B.P. 时段的显著偏正, 在这一趋势上叠加了 一系列十年一百年尺度的次级振荡,整个事件振幅 达4.9‰,呈现出"缓慢开始,快速结束"的结构特征。 其中4 322~3 977 a B.P. 偏正过程对应于北半球 4.2 ka事件<sup>[20]</sup>, 而 3 777~3 526 a B.P. 的偏正对应 3.7 ka 事件[45]。相比于4.2 ka事件被普遍认可的全球性, 3.7 ka事件的研究较少,但在亚洲季风区也有一些报 道。例如,在东亚季风区的北部,韩国南海岸Seomjin 河河漫滩沉积物的多指标记录清晰地记录了 3.7 ka 事件,并且展示出与热带西太平洋海温的相关性[49]; 印度北部的Sahiva洞石笋记录了3850~3300 a B.P. 的干旱事件及其与人类文明演化的相关性4%。在我 国西南地区,多地都记录到了4.2 ka 干旱事件,而发 生在3.7 ka的干旱事件[45]却在不同记录中差异显著 甚至在一些记录中缺失,贵州七星洞QX3石笋δ<sup>i8</sup>0 值记录了发生在4 548~3 715 a B.P. 时段的干旱事 件[47];贵州纳朵洞 ND3 石笋在 4.2 ka 期间因干旱发生 了沉积间断[48];贵州野鸡坪YJP01泥炭钻孔钙含量和 烧失量(LOI)在4 300~4 100 a B.P.显著降低表明期间 西南地区降水减少、温度降低[23];云南省西北部程海湖 的高分辨率花粉和木炭记录显示4670~3470 a B.P. 该区域年平均气温下降,降水量减少[22];青藏高原东 南缘越西泥炭记录的粉尘通量峰值出现在4500~ 3900 a B.P.,表明期间温度和降水显著降低[49]。上述 记录以及黑洞 HD12 石笋δ<sup>13</sup>C 值在 4.2~3.7 ka 事件期 间的偏正表明期间亚洲夏季风显著减弱,引起区域 内一致的干旱,导致了区域环境的持续恶化。

与贵州的荔波董哥洞DA石笋δ<sup>13</sup>C记录<sup>[50]</sup>对比发现,两个洞穴记录的干旱事件在起止时间上基本吻合,但与HD12记录不同的是,董哥洞记录呈现"快速开始,缓慢结束"的结构特征(图5a),其记录的4.2 ka事件的偏正幅度远大于3.7 ka事件。另外,相对于HD12石笋4.9‰的偏正幅度,董哥洞石笋δ<sup>13</sup>C 偏正幅度仅1.8‰(图5),且董哥洞石笋δ<sup>13</sup>C 受洞穴上覆C<sub>3</sub>和C<sub>4</sub>两种植被类型共同影响<sup>[51]</sup>,与以C<sub>3</sub>植被类型为主的黑洞不同,说明了区域之间洞穴上方生态环境条件的差异性。董哥洞更低的海拔以及相对较好的土壤条件,允许其具有更好的生态环境<sup>[52]</sup>,进而使得DA石笋δ<sup>13</sup>C偏正幅度更小;其更厚的洞穴顶部盖层可能



图 5 4.2~3.7 ka 期间中国西南地区石笋δ<sup>13</sup>C记录对比 (a)DA石笋δ<sup>13</sup>C及其5点平滑值<sup>[50]</sup>;(b)HD12石笋δ<sup>13</sup>C及其5点平滑值;灰色矩 形表示各记录在4.2~3.7 ka事件的干旱间隔、淡蓝色矩形表示两次显著的生态 环境波动;黄色虚线指示事件变化结构;误差棒分别表示各记录的定年点和误 差(±2 σ)

# Fig.5 Comparison of stalagmite $\delta^{13}$ C records in southwest China during 4.2-3.7 ka

(a) DA stalagmite  $\delta^{13}$ C and 5-point smoothed value <sup>[50]</sup>; (b) HD12 stalagmite  $\delta^{13}$ C and 5-point smoothed value; gray columns mean drought intervals for each record at the 4.2-3.7 ka; blue columns mean two significant ecological fluctuations; red dashed lines mean event change structure; error bars mean <sup>230</sup>Th dating points and  $\pm 2\sigma$  errors

增加了水一岩作用时间,溶解了更多基岩,使得其 δ<sup>13</sup>C整体偏正。因此,尽管两个洞穴记录的振幅变化 相差较大,但在约4400~3500 a B.P.这一时段内显 著偏正是两者的共有特征,两个记录可能共同响应 了4.2 ka与3.7 ka事件,此时亚洲夏季风减弱,引起 了西南地区土壤和植被的退化<sup>[21,50]</sup>。而关于两者不 同的响应模式,仍需要进一步研究。

# 4 结论

利用贵州黑洞HD12石笋29个高精度<sup>230</sup>Th年龄 和954个碳同位素,获得了平均分辨率为5a的石笋 δ<sup>13</sup>C数据,通过与其他古气候重建指标的综合对比, 重建了中国西南喀斯特地区4750~82 a B.P.的生态 环境演变过程。其中,4322~3526 a B.P.以及803~ 82 a B.P.时段存在两个显著的δ<sup>13</sup>C 正偏移,两次事件 的持续偏正过程分别发生在4322~3725 a B.P.以及 803~635 a B.P.。与西南地区多个洞穴石笋δ<sup>13</sup>C所记 录的一致,黑洞HD12石笋δ<sup>13</sup>C值在约803 a B.P.后普 遍显著偏正,表明宋末靖康事件后随着经济中心南 移,人口大量迁入该区域使得这一地区由于土地利 用的增强导致植被、土壤的退化,加剧了石漠化的扩 张过程。此外,黑洞与同处于西南喀斯特地区的多 个洞穴记录都捕捉到了4.2 ka和3.7 ka事件,说明期 间亚洲夏季风减弱、降水减少引起了西南地区植被 生态系统的退化。

致谢 感谢云南师范大学地理学部李廷勇研究 员、南京师范大学地理科学学院刘殿兵教授在数据 收集中提供的大力支持和帮助;感谢台湾大学沈川 洲教授在定年上提供的帮助;感谢审稿专家和编辑 部老师对本文提出的建设性修改建议,使此文得以 完善。

#### 参考文献(References)

- Yuan D X. Rock desertification in the subtropical karst of South China[J]. Zeitschrift f
  ür Geomorphologie, 1997(108): 81-90.
- Zeng S B, Jiang Y J, Liu Z H. Assessment of climate impacts on the karst-related carbon sink in SW China using MPD and GIS
   [J]. Global and Planetary Change, 2016, 144: 171-181.
- [3] Jiang Z C, Lian Y Q, Qin X Q. Rocky desertification in Southwest China: Impacts, causes, and restoration[J]. Earth-Science Reviews, 2014, 132: 1-12.
- [4] 罗旭玲,王世杰,白晓永,等.西南喀斯特地区石漠化时空演变 过程分析[J]. 生态学报,2021,41(2):680-693. [Luo Xuling, Wang Shijie, Bai Xiaoyong, et al. Analysis on the spatio-temporal evolution process of rocky desertification in southwest karst area [J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(2): 680-693. ]
- [5] 程海,张海伟,赵景耀,等.中国石笋古气候研究的回顾与展望
  [J].中国科学(D辑):地球科学,2019,49(10):1565-1589.
  [Cheng Hai, Zhang Haiwei, Zhao Jingyao, et al. Chinese stalagmite paleoclimate researches: A review and perspective[J]. Science China (Seri. D): Earth Sciences, 2019, 49(10): 1565-1589. ]
- [6] Zhang H W, Cheng H, Sinha A, et al. Collapse of the Liangzhu and other Neolithic cultures in the Lower Yangtze region in response to climate change[J]. Science Advances, 2021, 7(48): eabi9275.
- [7] 谭亮成,刘文,王甜莉,等.石笋多指标记录揭示的山东中部森林采伐历史[J].中国科学(D辑):地球科学,2020,50(11): 1643-1654. [Tan Liangcheng, Liu Wen, Wang Tianli, et al. A multiple-proxy stalagmite record reveals historical deforestation in central Shandong, northern China[J]. Science China (Seri. D): Earth Sciences, 2020, 50(11): 1643-1654. ]
- [8] 黄伟,刘殿兵,王璐瑶,等. 洞穴石笋δ<sup>13</sup>C在古气候重建研究中

的现状与进展[J]. 地球科学进展, 2016, 31 (9): 968-983. [Huang Wei, Liu Dianbing, Wang Luyao, et al. Research status and advance in carbon isotope ( $\delta^{13}$ C) variation from stalagmite [J]. Advances in Earth Science, 2016, 31(9): 968-983.]

- [9] Dorale J A, Gonzalez L A, Reagan M K, et al. A high-resolution record of Holocene climate change in speleothem calcite from cold water cave, northeast Iowa[J]. Science, 1992, 258(5088): 1626-1630.
- [10] Dorale J A, Edwards R L, Ito E, et al. Climate and vegetation history of the midcontinent from 75 to 25 ka: A speleothem record from Crevice cave, Missouri, USA[J]. Science, 1998, 282 (5395): 1871-1874.
- [11] Genty D, Baker A, Massault M, et al. Dead carbon in stalagmites: Carbonate bedrock paleodissolution vs. ageing of soil organic matter. Implications for <sup>13</sup>C variations in speleothems[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2001, 65(20): 3443-3457.
- [12] Li T Y, Huang C X, Tian L J, et al. Variation of  $\delta^{13}$ C in plantsoil-cave systems in karst regions with different degrees of rocky desertification in southwest China and implications for paleoenvironment reconstruction[J]. Journal of Cave and Karst Studies, 2018, 80(4): 212-228.
- [13] Li J Y, Li T Y. Seasonal and annual changes in soil/cave air  $pCO_2$  and the  $\delta^{13}C_{DIC}$  of cave drip water in response to changes in temperature and rainfall[J]. Applied Geochemistry, 2018, 93: 94-101.
- [14] Lu J Y, Zhang H W, Li H Y, et al. Climatic and anthropogenic influence on vegetation in southeastern China during the past 120 years inferred from speleothem[J]. Quaternary International, 2022, 625: 60-65.
- [15] Kuo T S, Liu Z Q, Li H C, et al. Climate and environmental changes during the past millennium in central western Guizhou, China as recorded by stalagmite ZJD-21[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2011, 40(6): 1111-1120.
- [16] Zhao M, Li H C, Liu Z H, et al. Changes in climate and vegetation of central Guizhou in southwest China since the last glacial reflected by stalagmite records from Yelang cave[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2015, 114: 549-561.
- [17] Li H C, Bar-Matthews M, Chang Y P, et al. High-resolution  $\delta^{18}$ O and  $\delta^{13}$ C records during the past 65 ka from Fengyu cave in Guilin: Variation of monsoonal climates in South China[J]. Quaternary International, 2017, 441: 117-128.
- [18] 陈朝军,袁道先,程海,等.人类活动和气候变化触发了中国 西南石漠化的扩张[J].中国科学(D辑):地球科学,2021,51 (11):1950-1963. [Chen Chaojun, Yuan Daoxian, Cheng Hai, et al. Human activity and climate change triggered the expansion of rocky desertification in the karst areas of southwestern China [J]. Science China (Seri. D): Earth Sciences, 2021, 51(11): 1950-1963.]
- [19] Walker M, Gibbard P, Head M J, et al. Formal subdivision of the

Holocene series/Epoch: A summary[J]. Journal of the Geological Society of India, 2019, 93(2): 135-141.

- Weiss H. Global megadrought, societal collapse and resilience at 4. 2-3. 9 ka BP across the Mediterranean and West Asia[J].
   Past Global Change Magazine, 2016, 24(2): 62-63.
- [21] Wang Y J, Cheng H, Edwards R L, et al. The Holocene Asian monsoon: Links to solar changes and North Atlantic climate[J]. Science, 2005, 308(5723): 854-857.
- [22] Xiao X Y, Haberle S G, Li Y L, et al. Evidence of Holocene climatic change and human impact in northwestern Yunnan province: High-resolution pollen and charcoal records from Chenghai Lake, southwestern China[J]. The Holocene, 2018, 28(1): 127-139.
- [23] Zeng M X, Zeng Q, Peng H J, et al. Late Holocene hydroclimatic changes inferred from a karst peat archive in the western Guizhou Plateau, SW China[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2022, 229: 105179.
- [24] Jiang X Y, He Y Q, Shen C C, et al. Replicated stalagmiteinferred centennial-to decadal-scale monsoon precipitation variability in southwest China since the mid Holocene[J]. The Holocene, 2013, 23(6): 841-849.
- [25] Jiang X Y, He Y Q, Wang X Y, et al. The Preboreal-like Asian monsoon climate in the early last interglacial period recorded from the Dark cave, Southwest China[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2017, 143: 39-44.
- [26] Shen C C, Wu C C, Cheng H, et al. High-precision and highresolution carbonate <sup>230</sup>Th dating by MC-ICP-MS with SEM protocols[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2012, 99: 71-86.
- [27] Edwards R L, Chen J H, Wasserburg G J. <sup>238</sup>U-<sup>234</sup>U-<sup>230</sup>Th-<sup>232</sup>Th systematics and the precise measurement of time over the past 500,000 years[J]. Earth and Planetary Science Letters, 1987, 81 (2/3): 175-192.
- [28] Cheng H, Edwards R L, Shen C C, et al. Improvements in <sup>230</sup>Th dating, <sup>230</sup>Th and <sup>234</sup>U half-life values, and U-Th isotopic measurements by multi-collector inductively coupled plasma mass spectrometry[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2013, 371-372: 82-91.
- [29] Jaffey A H, Flynn K F, Glendenin L E, et al. Precision measurement of half-lives and specific activities of <sup>235</sup>U and <sup>238</sup>U[J]. Physical Review C, 1971, 4(5): 1889-1906.
- [30] Hiess J, Condon D J, McLean N, et al. <sup>238</sup>U/<sup>235</sup>U Systematics in terrestrial uranium-bearing minerals[J]. Science, 2012, 335 (6076): 1610-1614.
- [31] Hercman H, Pawlak J. MOD-AGE: An age-depth model construction algorithm[J]. Quaternary Geochronology, 2012, 12: 1-10.
- [32] Zhang H W, Cai Y J, Tan L C, et al. Large variations of δ<sup>13</sup>C values in stalagmites from southeastern China during historical times: Implications for anthropogenic deforestation[J]. Boreas, 2015, 44(3): 511-525.

- [33] McDermott F. Palaeo-climate reconstruction from stable isotope variations in speleothems: A review[J]. Quaternary Science Reviews, 2004, 23(7/8): 901-918.
- [34] 李红春,顾德隆,Stott L D,等.北京石花洞石笋500年来的 δ<sup>13</sup>C 记录与古气候变化及大气CO<sub>2</sub>浓度变化的关系[J].中国 岩溶,1997,16(4):285-295. [Li Hongchun, Ku Telung, Stott L D, et al. Interannual-resolution δ<sup>13</sup>C record of stalagmites as proxy for the changes in precipitation and atmospheric CO<sub>2</sub> in Shihua cave, Beijing[J]. Carsologica Sinica, 1997, 16(4): 285-295.]
- [35] Tan L C, Zhang H W, Qin S J, et al. Climatic and anthropogenic impacts on  $\delta^{13}$ C variations in a stalagmite from central China[J]. Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences, 2013, 24(3): 333-343.
- [36] Francey R J, Allison C E, Etheridge D M, et al. A 1000-year high precision record of  $\delta^{13}$ C in atmospheric CO<sub>2</sub>[J]. Tellus B: Chemical and Physical Meteorology, 1999, 51(2): 170-193.
- [37] Li H C, Lee Z H, Wan N J, et al. The  $\delta^{18}$ O and  $\delta^{13}$ C records in an aragonite stalagmite from Furong cave, Chongqing, China: A-2000-year record of monsoonal climate[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2011, 40(6): 1121-1130.
- [38] Zhao M, Li H C, Shen C C, et al. δ<sup>18</sup>O, δ<sup>13</sup>C, elemental content and depositional features of a stalagmite from Yelang cave reflecting climate and vegetation changes since Late Pleistocene in central Guizhou, China[J]. Quaternary International, 2017, 452: 102-115.
- [39] Zhang M L, Yuan D X, Lin Y S, et al. A 6000-year highresolution climatic record from a stalagmite in Xiangshui cave, Guilin, China[J]. The Holocene, 2004, 14(5): 697-702.
- [40] Li J Y, Li H C, Li T Y, et al. High-resolution δ<sup>18</sup>O and δ<sup>13</sup>C records of an AMS <sup>14</sup>C and <sup>230</sup>Th/U dated stalagmite from Xinya cave in Chongqing: Climate and vegetation change during the Late Holocene[J]. Quaternary International, 2017, 447: 75-88.
- [41] Yin J J, Li H C, Tang W, et al. Rainfall variability and vegetation recovery in rocky desertification areas recorded in recentlydeposited stalagmites from Guilin, South China[J]. Quaternary International, 2019, 528: 109-119.
- [42] 吴涛.靖康之变与开封人口的南迁[J].黄河科技大学学报, 1999,1(1):55-60. [Wu Tao. The Jingkang Incident and the southward migration of population in Kaifeng[J]. Journal of Huanghe S&T University, 1999, 1(1):55-60. ]
- [43] 吴松弟. 南宋人口的发展过程[J]. 中国史研究, 2001(4):107-

124. [Wu Songdi. The development of the population during the southern Song Dynasty[J]. Journal of Chinese Historical Studies, 2001(4): 107-124.]

- [44] Cosford J, Qing H, Mattey D, et al. Climatic and local effects on stalagmite  $\delta^{13}$ C values at Lianhua cave, China[J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2009, 280(1/2): 235-244.
- [45] Park J, Park J, Yi S, et al. Abrupt Holocene climate shifts in coastal East Asia, including the 8. 2 ka, 4. 2 ka, and 2. 8 ka BP events, and societal responses on the Korean peninsula[J]. Scientific Reports, 2019, 9(1): 10806.
- [46] Kathayat G, Cheng H, Sinha A, et al. The Indian monsoon variability and civilization changes in the Indian subcontinent[J]. Science Advances, 2017, 3(12): e1701296.
- [47] 张振球,张伟宏,刘树双,等.贵州石笋记录的中晚全新世东 亚夏季风变化[J]. 沉积学报,2023,41(1):196-205. [Zhang Zhenqiu, Zhang Weihong, Liu Shushuang, et al. Variation in the East Asian summer monsoon during the Middle and Late Holocene inferred from a stalagmite record in Guizhou, China[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2023,41(1): 196-205. ]
- [48] Wang J L. Mid-Late Holocene stalagmite 
  <sup>38</sup>O and 
  <sup>33</sup>C records in Naduo cave, Guizhou province, China[J]. Journal of Chemistry, 2021, 2021: 7624833.
- [49] Peng H J, Bao K S, Yuan L G, et al. Abrupt climate variability since the last deglaciation based on a high-resolution peat dust deposition record from southwest China[J]. Quaternary Science Reviews, 2021, 252: 106749.
- [50] Liu D B, Wang Y J, Cheng H, et al. Strong coupling of centennialscale changes of Asian monsoon and soil processes derived from stalagmite  $\delta^{18}$ O and  $\delta^{13}$ C records, southern China[J]. Quaternary Research, 2016, 85(3): 333-346.
- [51] 张美良,程海,林玉石,等.贵州荔波1.5万年以来石笋高分辨 率古气候环境记录[J].地球化学,2004,33(1):65-74. [Zhang Meiliang, Cheng Hai, Lin Yushi, et al. High resolution paleoclimatic environment records from a stalagmite of Dongge cave since 15 000 a in Libo, Guizhou province, China[J]. Geochimica, 2004, 33(1):65-74.]
- [52] 赵侃. 贵州董哥洞近 1000 年石笋纹层年代学与同位素气候重 建[D]. 南京:南京师范大学, 2011. [Zhao Kan. Annually-Counting chronology and the isotopic climate reconstruction over the past millennia from stalagmites in Dongge cave[D]. Nanjing: Nanjing Normal University, 2011. ]

# A High-Resolution Stalagmite $\delta^{13}$ C Record for the Past 4 750 Years from Dark Cave, Guizhou, SW China

GAO Kui<sup>1,2</sup>, HE YaoQi<sup>3</sup>, QIU WanYin<sup>1,2</sup>, ZHANG Xin<sup>1,2</sup>, FENG TangHui<sup>1,2</sup>, JIANG XiuYang<sup>1,2</sup>

1. Key Laboratory of Humid Subtropical Eco-geographical Processes, Ministry of Education, College of Geography Science, Fujian Normal University, Fuzhou 350007, China

2. Institute of Geography, Fujian Normal University, Fuzhou 350007, China

3. College of Tourism and Air Service, Guizhou Minzu University, Guiyang 550025, China

**Abstract:** [Objective] Global warming may increase the risk of expansion of karst rock desertification (KRD) in Southwest(SW) China, where karst landscapes are widespread, so it is important to reconstruct the evolution of KRD in this region. [Methods] In this study, the regional eco-evolution of the past 4 750 years was reconstructed based on 29 <sup>230</sup>Th ages and 954  $\delta^{13}$ C records collected from stalagmite HD12 in Dark cave, Qianxi county, Guizhou province. [Results and Conclusions] Two significant positive  $\delta^{13}$ C offsets were found at 4 322-3 526 a B.P.and 803-82 a B.P., indicating deterioration of the ecological environment at those times. A significant positive  $\delta^{13}$ C record of the HD12 stalagmite at about 803 a B.P. persisted for about 290 years with an amplitude of 4.2‰, indicating expansion of KRD in the area. The consistent positive  $\delta^{13}$ C in stalagmites from several caves in SW China during this period suggests that the large-scale population migration and climatic drought after the Jingkang event (823 a B.P.) promoted the expansion of KRD in this region. During 4 322-3 526 a B.P., the positive shift of HD12 stalagmite  $\delta^{13}$ C values had an amplitude of 4.9‰. The positive shift at 4 322-3 977 a B.P. corresponds to the 4.2 ka event, and for 3 777-3 526 a B.P. it corresponds to the 3.7 ka event. These two periods of drought are also reflected in several stalagmite and lake records in SW China, suggesting that the weakened Asian summer monsoon and reduced precipitation at those times may have caused a large reduction in vegetation cover and severe soil degradation in the region.

**Key words**: stalagmite  $\delta^{13}$ C; Late Holocene; karst rock desertification; Southwest China