

贵州黑洞4750年以来高分辨率石笋 $\delta^{13}\text{C}$ 记录

郜魁^{1,2}, 何尧启³, 邱万银^{1,2}, 张鑫^{1,2}, 冯唐慧^{1,2}, 姜修洋^{1,2}

1. 福建师范大学地理科学学院, 湿润亚热带生态—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²³⁰Th年龄和954个 $\delta^{13}\text{C}$ 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 $\delta^{13}\text{C}$ 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 $\delta^{13}\text{C}$ 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‰, 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 $\delta^{13}\text{C}$ 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 $\delta^{13}\text{C}$ 值在4322~3526 a B.P. 时期的偏正, 振幅达4.9‰, 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 $\delta^{13}\text{C}$; 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^[1]。我国西南地区喀斯特地貌广布^[2], 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^[3]。尽管该区域石漠化问题在近几十年得到了缓解^[4], 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^[5]。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^[6], 其中的 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^{13}\text{C}$ 指标被广泛用于古气候和古环境重建^[6-7]。相比于 $\delta^{18}\text{O}$ 在气候重建方面的优势, 石笋 $\delta^{13}\text{C}$ 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^[8]。在轨道尺度, 冰期—间冰期的转换可能产生极大温湿差异, 石笋 $\delta^{13}\text{C}$ 可能响应于 C_3/C_4 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 $\delta^{13}\text{C}$ 的影响似乎更明显^[8, 11]。百年—年际尺度上, 在热带、亚热带季风区, 石笋 $\delta^{13}\text{C}$ 可能与 $\delta^{18}\text{O}$ 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^[6]。近年来, 随着洞穴监测的开展^[12-13], 多指标分析方法的引入^[7, 14]以及对 $\delta^{13}\text{C}$ 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 $\delta^{13}\text{C}$ 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 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^{13}\text{C}$ 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.*^[16]以及Li *et al.*^[17]分别通过对黔中夜郎洞、广西丰鱼洞石笋 $\delta^{13}\text{C}$ 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

南地区多个洞穴 $\delta^{13}\text{C}$ 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^[19],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^[6,20],被石笋^[21]、湖泊沉积^[22]以及泥炭^[23]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 km²,占贵州省出露碳酸盐岩总面积的25.7%^[3]。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²³⁰Th年龄和954个碳同位素($\delta^{13}\text{C}$)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1 120 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 °C,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^[24-25]。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1 176.6 mm,年平均温度为15.2 °C。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 °C和22 °C。

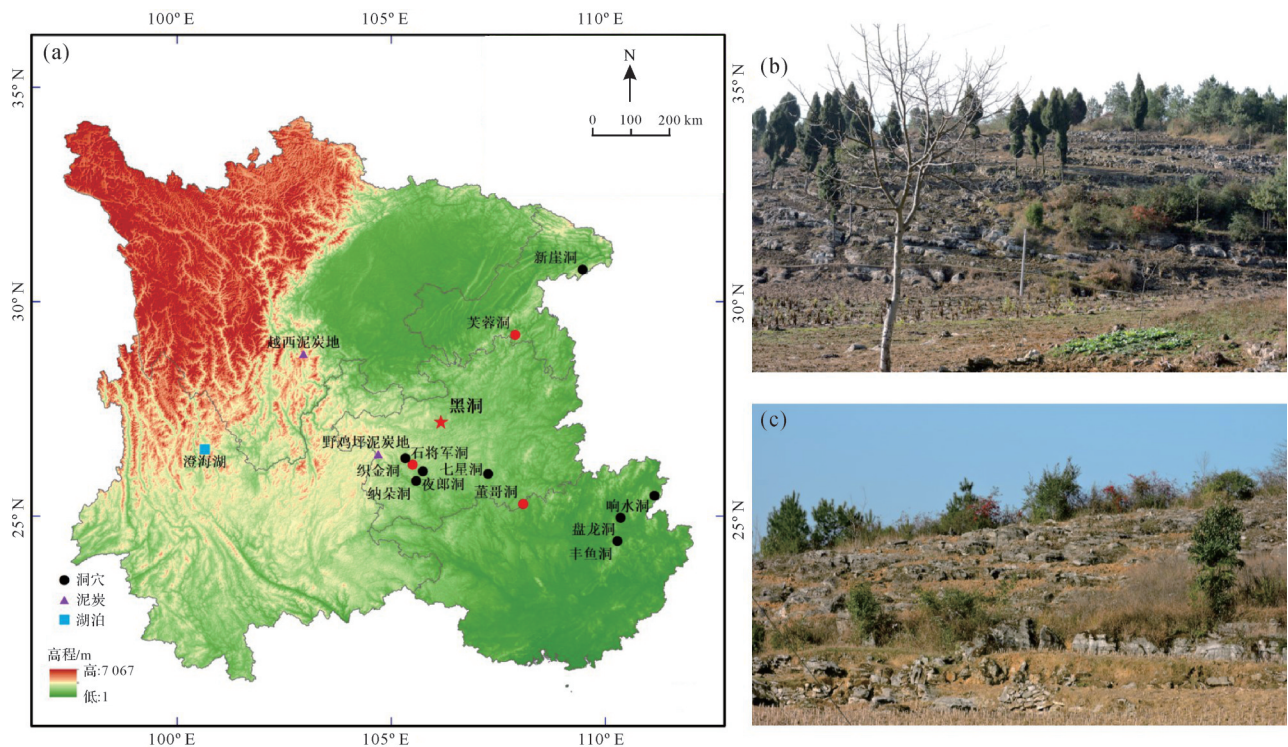


图1 (a) 黑洞和西南地区其他古气候记录的位置;(b) 洞顶耕作情况;(c) 洞顶植被—土壤景观

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—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 ^{230}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^[26]。化学分离步骤和仪器分析方法分别参照Edwards *et al.*^[27]和Cheng *et al.*^[28]。分析仪器为MC-ICP-MS Neptune,年龄误差类型为 $\pm 2\sigma$ ^[29]。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($\pm 2\sigma$)优于 $\pm 0.1\text{‰}$ 。

2 结果

2.1 ^{230}Th 年代

表1列出了HD12石笋的U、Th同位素含量和29个 ^{230}Th 年龄。结果显示,样品的 ^{238}U 含量介于(420~

898) $\times 10^{-9}$ g/g, ^{232}Th 含量较低,介于(187~4 552) $\times 10^{-12}$ g/g,测年误差($\pm 2\sigma$)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^[31],建立了HD12石笋4 750~82 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 $\delta^{13}\text{C}$ 时间序列如图3所示。 $\delta^{13}\text{C}$ 值介于 -11.59‰ ~ -6.39‰ ,平均值为 -9.10‰ ,振幅达 5.2‰ ,平均分辨率为5 a。在年代际尺度上,HD12石笋 $\delta^{13}\text{C}$ 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, $\delta^{13}\text{C}$ 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, $\delta^{13}\text{C}$ 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, $\delta^{13}\text{C}$ 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

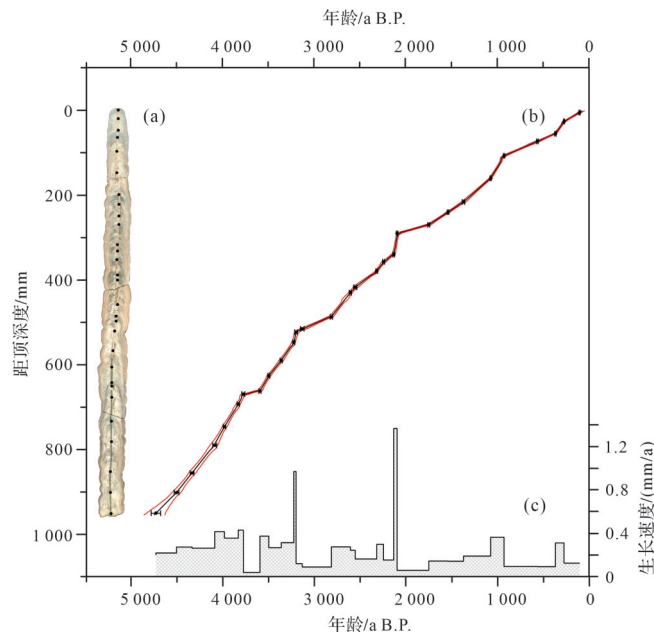


图2 (a) HD12石笋剖面图(黑点为定年点);(b)通过MOD-AGE方法^[31]建立的HD12的年龄模型(黑点和误差棒表示 ^{230}Th 年龄和误差,黑线和红线分别代表MOD-AGE模型的年龄中位数和 2σ 范围);(c)平均生长速率

Fig.2 (a) Photograph of HD12 stalagmite (black dots indicate dating points); (b) The age model of HD12 established by the MOD-AGE methods^[31] (black dots and error bars indicate ^{230}Th ages and errors; black line, age median; red lines, 2σ 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 ^{230}Th 年龄

Table 1 U and Th isotope compositions and ^{230}Th ages of stalagmite HD12 in Dark cave

样品编号	^{238}U		^{232}Th		$\delta^{234}\text{U}$		$[\text{}^{230}\text{Th}/\text{}^{238}\text{U}]$		$^{230}\text{Th}/\text{}^{232}\text{Th}$		^{230}Th 年龄/a		^{230}Th 年龄(a B.P.)		$\delta^{234}\text{U}$ 初始值	
	/ $\times 10^{-9}$ g/g ^a		/ $\times 10^{-12}$ g/g		测量值 ^a		活度比 ^c		原子比/ $\times 10^{-6}$		未校正		相对于 1950 AD ^{c,d}		校正后 ^b	
HD12-5	483	± 0.6	417	± 7.7	1 325	± 3.3	0.003 9	$\pm 0.000 07$	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	$\pm 0.000 09$	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	$\pm 0.000 11$	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	$\pm 0.000 15$	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	$\pm 0.000 15$	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	$\pm 0.000 13$	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	$\pm 0.000 17$	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	$\pm 0.000 19$	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	$\pm 0.000 23$	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	$\pm 0.000 19$	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	$\pm 0.000 31$	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	3 439	± 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	$\pm 0.000 23$	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	$\pm 0.000 44$	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	$\pm 0.000 42$	3 272	± 94	4 414	± 21	4 337	± 21	1 489	± 3.9
HD12-901	631	± 1.0	807	± 9.5	1 448	± 4.7	0.101 3	$\pm 0.000 50$	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	$\pm 0.000 71$	245	± 2	4 871	± 34	4 731	± 51	1 440	± 3.0

注:分析误差为平均值的 2σ ; ^{230}Th 的衰变常数为 $9.170 5 \times 10^{-6} \text{ a}^{-1}$, ^{234}U 的衰变常数为 $2.822 1 \times 10^{-6} \text{ a}^{-1}$ [28], ^{238}U 的衰变常数为 $1.551 25 \times 10^{-10} \text{ a}^{-1}$ [29]; $[\text{}^{238}\text{U}] = [\text{}^{235}\text{U}] \times 137.818 (\pm 0.65\%)$ [30]; $\delta^{234}\text{U} = ([\text{}^{234}\text{U}]/[\text{}^{238}\text{U}])_{\text{活度比}} - 1 \times 1000$; $\delta^{234}\text{U}_{\text{初始值}}$ 基于 ^{230}Th 年龄(T)计算,即 $\delta^{234}\text{U}_{\text{初始值}} = \delta^{234}\text{U}_{\text{测量值}} \times e^{\lambda^{234}T}$,且 T 为校正年龄; $[\text{}^{230}\text{Th}/\text{}^{238}\text{U}]_{\text{活度比}} = 1 - e^{-\lambda^{230}T} + (\delta^{234}\text{U}_{\text{测量值}}/1000) [\lambda^{230}/(\lambda^{230} - \lambda^{234})] (1 - e^{-(\lambda^{230} - \lambda^{234})T})$, T 为年龄; $^{230}\text{Th}/\text{}^{232}\text{Th}$ 为 $4 (\pm 2) \times 10^{-6}$,即假定 $^{232}\text{Th}/\text{}^{238}\text{U}$ 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。

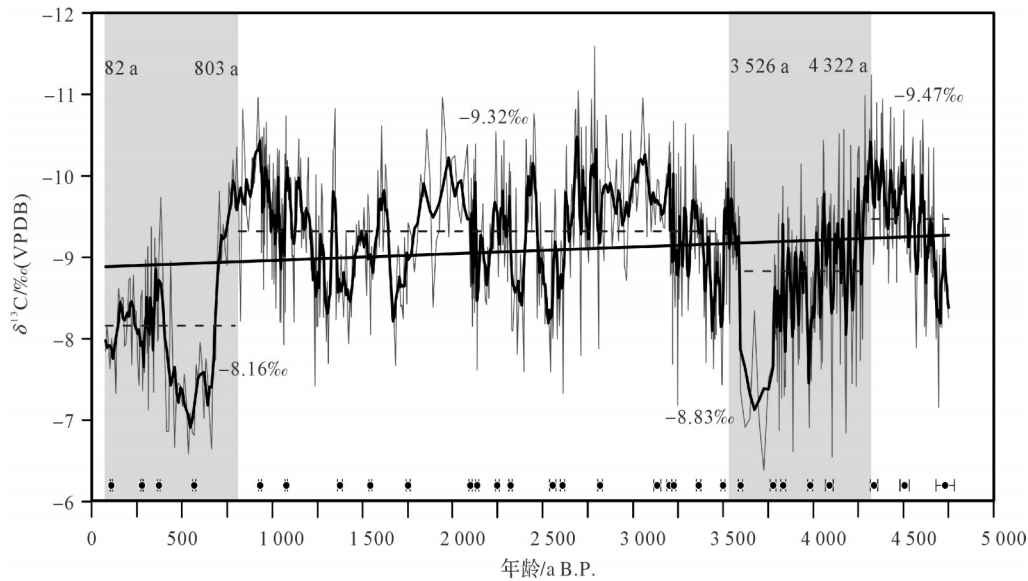
示在这两个时期方解石沉积较其他时间段更纯洁(图2a),石笋沉积速率相对较慢(图2c)。除了这两个时期石笋 $\delta^{13}\text{C}$ 值显著偏正外,其他几个偏正事件持续时间较短($<100 \text{ a}$)且振幅较小,暂不作进一步讨论。

3 讨论

3.1 黑洞石笋 $\delta^{13}\text{C}$ 的指示意义

从石笋形成过程看,从地面至洞穴,石笋 $\delta^{13}\text{C}$ 在传输过程中至少会经历两次同位素分馏过程:(1)水—气同位素交换,土壤 CO_2 溶解于岩溶包气带中的水

生成碳酸溶液($\text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2 \rightarrow \text{H}_2\text{CO}_3$);(2)水—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($\text{CaCO}_3 + \text{H}_2\text{CO}_3 \rightarrow \text{Ca}^{2+} + 2\text{HCO}_3^-$),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_2 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_3/C_4)的变化、植被覆盖度或生物量的变化、土壤 CO_2 产率、大气 CO_2 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_2 的脱气等都会对石笋 $\delta^{13}\text{C}$ 值产生影响[8,12,32],而这些控制因子均不同程度地受控

图3 HD12石笋 $\delta^{13}\text{C}$ 时间序列

黑色细线为原始 $\delta^{13}\text{C}$ 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 $\delta^{13}\text{C}$ 均值,误差棒表示 ^{230}Th 测年点和误差($\pm 2\sigma$),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 $\delta^{13}\text{C}$ time series

Thin black line means original $\delta^{13}\text{C}$ value; thick black line means 5-point moving average; black diagonal line is trend line; black dashed line means $\delta^{13}\text{C}$ 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^[12]。通常, C_3 植物喜湿冷, C_4 植物喜干热气候,若洞穴上覆植被为 C_3 植物(木本植物为主),石笋 $\delta^{13}\text{C}$ 值的变化范围为 $-14\text{‰}\sim -6\text{‰}$;若上覆植被为 C_4 植物(禾本植物为主),石笋的 $\delta^{13}\text{C}$ 值则在 $-6\text{‰}\sim 2\text{‰}$ 变化。湿润的气候会促进生物量的增加,从而促进土壤 CO_2 的产生^[6],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 $p\text{CO}_2$, $\delta^{13}\text{C}$ 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_2 脱气作用增强,从而造成PCP现象, $\delta^{13}\text{C}$ 值偏正^[8]。从来源看,大气 CO_2 、碳酸盐围岩和上覆土壤 CO_2 是石笋中碳的三个主要来源^[33-35],其中大气 CO_2 的 $\delta^{13}\text{C}$ 值在工业革命前相对稳定^[36];碳酸盐围岩在封闭洞穴系统中对石笋 $\delta^{13}\text{C}$ 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 $\delta^{13}\text{C}$ 值偏正(偏负)^[34];而对于大多数半开放式洞穴系统,上覆土壤 CO_2 对石笋 $\delta^{13}\text{C}$ 起主导作用, CO_2 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_2 对石笋 $\delta^{13}\text{C}$ 值影响最大,其贡献介于 $60\%\sim 95\%$ ^[8],因为土壤 CO_2 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_2 比例更高,因此 $\delta^{13}\text{C}$ 更负^[12]。总之,石笋 $\delta^{13}\text{C}$ 主要受控于土壤 CO_2 产率以及区域水文条件。

除了自然过程会影响石笋 $\delta^{13}\text{C}$ 外,人类活动对洞穴上覆植被—土壤条件的改造也是一个不可忽视的因素,一些研究指出,中国石笋 $\delta^{13}\text{C}$ 能够记录人类活动导致的植被—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.*^[32]发现中国江西省神农洞的两根石笋 $\delta^{13}\text{C}$ 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 $\delta^{13}\text{C}$ 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 $\delta^{13}\text{C}$ 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, $\delta^{13}\text{C}$ 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 $\delta^{13}\text{C}$ 变化;而后者的偏正过程对应中世纪暖期,其 $\delta^{13}\text{C}$ 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 $\delta^{13}\text{C}$ 值,可能与当时增强的人类活动有关。综上,推测HD12石笋 $\delta^{13}\text{C}$ 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_2 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_2 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生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 $\delta^{13}\text{C}$ 与重庆芙蓉洞FR0510石笋 $\delta^{13}\text{C}$ ^[37](图4a)和贵州石将军洞SJJ7、SJJ-300石笋 $\delta^{13}\text{C}$ ^[18](图4b)对比发现,三个洞穴石笋 $\delta^{13}\text{C}$ 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 $\delta^{13}\text{C}$ 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^[37];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 $\delta^{13}\text{C}$ 值整体相对偏负。另外,文石 $\delta^{13}\text{C}$ 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 $\delta^{13}\text{C}$ 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 $\delta^{13}\text{C}$ 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 $\delta^{13}\text{C}$ 值快速偏正,黑洞与芙蓉洞的 $\delta^{13}\text{C}$ 值分别偏正了4.2‰和4.4‰,石将军洞两根石笋的 $\delta^{13}\text{C}$ 值则分别偏

正了5.9‰和6.5‰。另外,黔中夜郎洞石笋 $\delta^{13}\text{C}$ 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^[38];广西响水洞石笋 $\delta^{13}\text{C}$ 偏正幅度远远超过了该记录过去6 000 a的变化,达7.0‰^[39];重庆的新崖洞石笋 $\delta^{13}\text{C}$ 在这一时期的偏正也超过了小冰期的振幅^[40]。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 $\delta^{13}\text{C}$ 的共同特征。

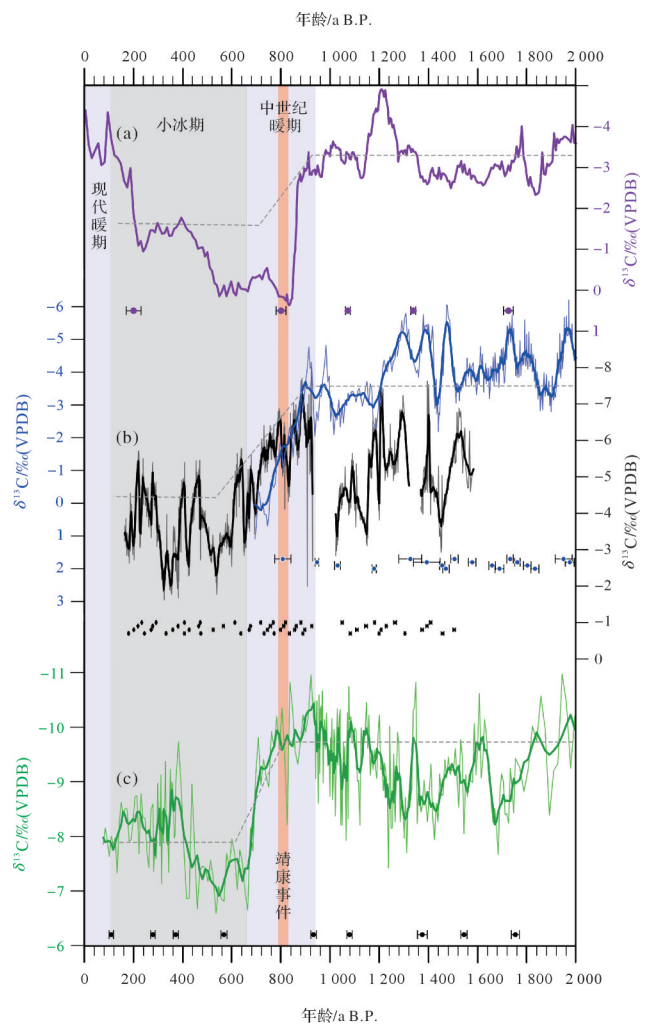


图4 近2000年HD12石笋 $\delta^{13}\text{C}$ 记录与中国西南地区石笋 $\delta^{13}\text{C}$ 记录对比

(a)重庆芙蓉洞FR0510石笋 $\delta^{13}\text{C}$ ^[37]; (b)贵州石将军洞SJJ7、SJJ-300石笋 $\delta^{13}\text{C}$ 及其5点平滑^[18]; (c)贵州黑洞HD12石笋 $\delta^{13}\text{C}$ 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($\pm 2\sigma$)

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

(a) FR0510 stalagmite, Furong cave, Chongqing^[37]; (b) SJJ7 and SJJ-300 stalagmites, Shijiangjun cave, Guizhou^[18]; (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. ²³⁰Th 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 $\delta^{13}\text{C}$ 所记录^[12,15,18]。重庆新崖洞^[40]和广西盘龙洞^[41]石笋 $\delta^{13}\text{C}$ 记录自AD1980石漠化恢复^[4]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—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^[43]。最近,陈朝军等^[18]综合对比西南地区石笋 $\delta^{13}\text{C}$ 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 $\delta^{13}\text{C}$ 在这一时期普遍偏正。显然,黑洞HD12石笋 $\delta^{13}\text{C}$ 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 $\delta^{13}\text{C}$ 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 $\delta^{13}\text{C}$ 值的偏正也可能起着一定的作用。陈朝军等^[18]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(1 000~650 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 $\delta^{13}\text{C}$ 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 $\delta^{13}\text{C}$ 仍显著高于平均气候态下的 $\delta^{13}\text{C}$ 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^[11],即石笋 $\delta^{13}\text{C}$ 的局地效应^[44]。另外,重庆芙蓉洞 $\delta^{13}\text{C}$ 记录几乎立即响应靖康事件,而贵州石将军洞与黑洞 $\delta^{13}\text{C}$ 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—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 $\delta^{13}\text{C}$ 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—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^[20],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^[45];印度北部的Sahiya洞石笋记录了3 850~3 300 a B.P.的干旱事件及其与人类文明演化的相关性^[46]。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 $\delta^{18}\text{O}$ 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4 670~3 470 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4 500~3 900 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 $\delta^{13}\text{C}$ 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 $\delta^{13}\text{C}$ 记录^[50]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 $\delta^{13}\text{C}$ 偏正幅度仅1.8‰(图5),且董哥洞石笋 $\delta^{13}\text{C}$ 受洞穴上覆 C_3 和 C_4 两种植被类型共同影响^[51],与以 C_3 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^[52],进而使得DA石笋 $\delta^{13}\text{C}$ 偏正幅度更小;其更厚的洞穴顶部盖层可能

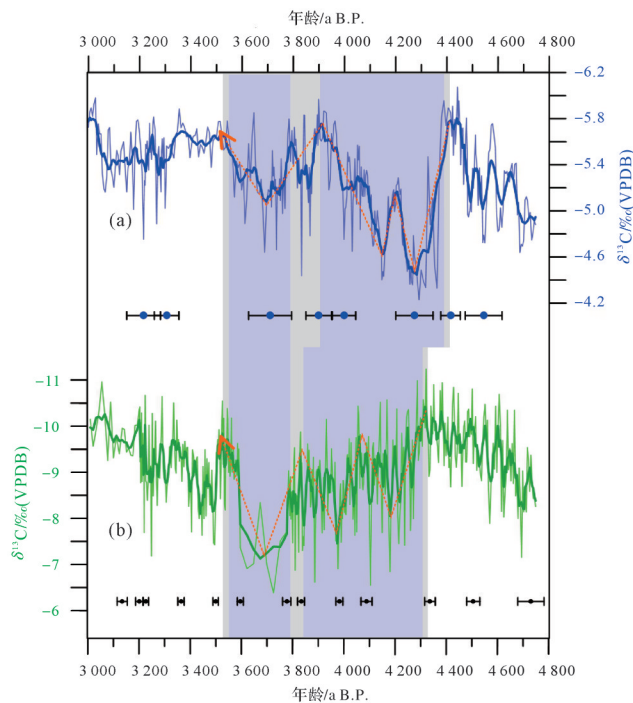


图5 4.2~3.7 ka期间中国西南地区石笋 $\delta^{13}\text{C}$ 记录对比 (a) DA石笋 $\delta^{13}\text{C}$ 及其5点平滑值^[50]; (b) HD12石笋 $\delta^{13}\text{C}$ 及其5点平滑值; 灰色矩形表示各记录在4.2~3.7 ka事件的干旱间隔, 淡蓝色矩形表示两次显著的生态环境波动; 黄色虚线指示事件变化结构; 误差棒分别表示各记录的定年点和误差($\pm 2\sigma$)

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

(a) DA stalagmite $\delta^{13}\text{C}$ and 5-point smoothed value^[50]; (b) HD12 stalagmite $\delta^{13}\text{C}$ 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 ^{230}Th dating points and $\pm 2\sigma$ errors

增加了水-岩作用时间, 溶解了更多基岩, 使得其 $\delta^{13}\text{C}$ 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4 400~3 500 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^[21,50]。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 ^{230}Th 年龄和954个碳同位素, 获得了平均分辨率为5 a的石笋 $\delta^{13}\text{C}$ 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4 750~82 a B.P. 的生态环境演变过程。其中, 4 322~3 526 a B.P. 以及803~82 a B.P. 时段存在两个显著的 $\delta^{13}\text{C}$ 正偏移, 两次事件

的持续偏正过程分别发生在4 322~3 725 a B.P. 以及803~635 a B.P.。与西南地区多个洞穴石笋 $\delta^{13}\text{C}$ 所记录的一致, 黑洞HD12石笋 $\delta^{13}\text{C}$ 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)

- [1] Yuan D X. Rock desertification in the subtropical karst of South China[J]. Zeitschrift für Geomorphologie, 1997(108): 81-90.
- [2] 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): ea-bi9275.
- [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 $\delta^{13}\text{C}$ 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 ($\delta^{13}\text{C}$) 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 ^{13}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 $\delta^{13}\text{C}$ in plant-soil-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 $p\text{CO}_2$ and the $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 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 $\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^{13}\text{C}$ 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.
- [20] 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 stalagmite-inferred 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 high-resolution carbonate ^{230}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. ^{238}U - ^{234}U - ^{230}Th - ^{232}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 ^{230}Th dating, ^{230}Th and ^{234}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 ^{235}U and ^{238}U [J]. Physical Review C, 1971, 4(5): 1889-1906.
- [30] Hiess J, Condon D J, McLean N, et al. $^{238}\text{U}/^{235}\text{U}$ 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 $\delta^{13}\text{C}$ 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 $\delta^{13}\text{C}$ 记录与古气候变化及大气 CO_2 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 $\delta^{13}\text{C}$ record of stalagmites as proxy for the changes in precipitation and atmospheric CO_2 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 $\delta^{13}\text{C}$ 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 $\delta^{13}\text{C}$ in atmospheric CO_2 [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 $\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^{13}\text{C}$ 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. $\delta^{18}\text{O}$, $\delta^{13}\text{C}$, 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 high-resolution 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 $\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^{13}\text{C}$ records of an AMS ^{14}C and $^{230}\text{Th}/\text{U}$ 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 recently-deposited 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, Matthey D, et al. Climatic and local effects on stalagmite $\delta^{13}\text{C}$ 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 $\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^{13}\text{C}$ 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 centennial-scale changes of Asian monsoon and soil processes derived from stalagmite $\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^{13}\text{C}$ 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 $\delta^{13}\text{C}$ Record for the Past 4 750 Years from Dark Cave, Guizhou, SW China

GAO Kui^{1,2}, HE YaoQi³, QIU WanYin^{1,2}, ZHANG Xin^{1,2}, FENG TangHui^{1,2}, JIANG XiuYang^{1,2}

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 ^{230}Th ages and 954 $\delta^{13}\text{C}$ records collected from stalagmite HD12 in Dark cave, Qianxi county, Guizhou province. [Results and Conclusions] Two significant positive $\delta^{13}\text{C}$ 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 $\delta^{13}\text{C}$ 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 $\delta^{13}\text{C}$ 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 $\delta^{13}\text{C}$ 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 $\delta^{13}\text{C}$; Late Holocene; karst rock desertification; Southwest China