

太阳活动和 ENSO 控制南岭东部有效降水变化

谢 宇，刘粤峰，程彩玉，周梦涛，彭小桃，程 珂，周厚云

华南师范大学 地理科学学院，广州 510631

摘要：在我国东南地区，器测时代之前的气候环境变化是否与 ENSO 活动有关还未见报道。本文在 ^{210}Pb 定年基础上，重建了南岭东部过去 150 a（分辨率 1.86 a）的石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 记录。对比器测指标，发现该石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 记录与当地有效降水变化密切相关，并以此重建了南岭东部地区过去 150 a 有效降水变化历史。南岭东部有效降水变化与 ENSO 活动密切相关，El Niño 态对应有效降水增加和石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 变轻，La Niña 态对应有效降水减少和石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 变重。有效降水变化长期趋势受到太阳活动控制，太阳活动减弱时南岭东部有效降水增加，反之亦然。ENSO 和太阳活动变化引起的雨带位置和西北太平洋副热带高压变化主导了南岭东部有效降水的变化。本研究结果表明，石笋可能成为研究这一地区 ENSO 影响下年际—年代际尺度上降水变化的有力工具。

关键词：石笋；稳定氧同位素；有效降水；ENSO；太阳活动；华南

Solar activity and ENSO controlled variation of effective precipitation in the eastern Nanling Mountains

XIE Yu, LIU Yuefeng, CHENG Caiyu, ZHOU Mengtao, PENG Xiaotao, CHENG Ke, ZHOU Houyun

School of Geography, South China Normal University, Guangzhou 510631, China

Abstract: *Background, aim, and scope* ENSO could influence the Northwest Pacific Subtropical High (NPSH) and location of monsoon rain belt, which in turn resulted in differential variations of precipitation in eastern China. This was confirmed by modern observations which showed that El Niño led to more precipitation in South China and less precipitation in North China and La Niña led to an opposite picture. However, it's still not clear whether the ENSO-rainfall association existed in South China prior to the modern observations. A stalagmite (LFD-1), which was collected from the eastern Nanling Mountains in South China, was used to explore the possible correlation between ENSO activities and precipitation variations in South China during the last 150 years.

Materials and methods The stalagmite LFD-1 is 156 mm in length and was collected from Tiger Cave in the eastern Nanling Mountains. Thirteen sub-samples were drilled for ^{210}Pb dating. Sub-samples for stable oxygen and carbon isotope ($\delta^{18}\text{O}$ - $\delta^{13}\text{C}$) analysis were obtained by micro-milling along the growth axis of LFD-1 with a 0.25 mm interval and one from every two sub-sample was picked out for $\delta^{18}\text{O}$ - $\delta^{13}\text{C}$ analysis. The $\delta^{18}\text{O}$ - $\delta^{13}\text{C}$ isotopes were

收稿日期：2020-03-13；录用日期：2020-06-30；网络出版：2020-07-12

Received Date: 2020-03-13; **Accepted Date:** 2020-06-30; **Online first:** 2020-07-12

基金项目：国家自然科学基金项目（4127121, 41473093）；广东省自然科学基金重点项目（9251064004000001）

Foundation Item: National Natural Science Foundation of China (4127121, 41473093); Key Project of Guangdong Natural Science Foundation (9251064004000001)

通信作者：周厚云，E-mail: hyzhou@gig.ac.cn

Corresponding Author: ZHOU Houyun, E-mail: hyzhou@gig.ac.cn

引用格式：谢 宇, 刘粤峰, 程彩玉, 等. 2021. 太阳活动和 ENSO 控制南岭东部有效降水变化 [J]. 地球环境学报, 12(2): 137–145.

Citation: Xie Y, Liu Y F, Cheng C Y, et al. 2021. Solar activity and ENSO controlled variation of effective precipitation in the eastern Nanling Mountains [J]. Journal of Earth Environment, 12(2): 137–145.

determined with a Thermo-Fisher MAT 253 mass spectrometer. **Results** The ^{210}Pb dating results indicated that the top 40 mm of LFD-1 had an average growth rate of $(0.27 \pm 0.02) \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$, suggesting that the top 40 mm of LFD-1 developed during the last 150 a. During the last 150 a, the $\delta^{18}\text{O}$ record had a highest value of $-5.03\text{\textperthousand}$ (at a depth of 13.4 mm), a lowest value of $-8.30\text{\textperthousand}$ (at a depth of 0.88 mm) and an average of $-6.34\text{\textperthousand}$. Significant inter-annual to decadal variations could be observed in the LFD-1 $\delta^{18}\text{O}$ record. **Discussion** The LFD-1 $\delta^{18}\text{O}$ record displayed high similarity to the effective precipitation (EP) and temperature records at a nearby meteorological station at Chenzhou during the last 60 a. Changes in temperature could explain only a small part of the variation of the $\delta^{18}\text{O}$ record. The $\delta^{18}\text{O}$ variations were attributed largely to EP variations with lighter $\delta^{18}\text{O}$ corresponding to higher EP and vice versa. Both the $\delta^{18}\text{O}$ record and EP showed similar trends to an ENSO proxy, the sea surface temperature (SST) over the Niño 3 district. Positive SST anomalies (El Niño-like mode) corresponded to more EP at the eastern Nanling Mountains and lower $\delta^{18}\text{O}$ values in LFD-1 and vice versa. The long-term trend of the $\delta^{18}\text{O}$ record paralleled roughly to the total solar irradiance. Shifts of the monsoon rain belt controlled by ENSO activities and solar irradiance were suggested to be responsible for changes in the EP over the eastern Nanling Mountains and the $\delta^{18}\text{O}$ record of LFD-1. Stronger ENSO activities and weaker solar irradiance contributed a southward shift of the monsoon rain belt, resulting in more rainfall in South China and vice versa. **Conclusions** (1) The LFD-1 $\delta^{18}\text{O}$ record was an appropriate proxy for EP variations in the eastern Nanling Mountains. (2) The variation of EP in the eastern Nanling Mountains is highly correlated to ENSO and solar activities. On inter-annual to decadal time scales, higher (lower) EP and lighter (heavier) $\delta^{18}\text{O}$ corresponded to stronger ENSO activities and vice versa. The long-term trend of EP variation was also controlled by solar irradiance with weaker (stronger) activities leading to higher (lower) EP in the Nanling Mountains and vice versa. (3) ENSO and solar activities modulated the EP in the Nanling Mountains by influencing the NPSH and location of the monsoon rain belt in eastern China. **Recommendations and perspectives** The speleothems in Southeastern China may be suitable archives for investigation of ENSO controlled rainfall variations in this region, a very important economic zone of China. The speleothem $\delta^{18}\text{O}$ records from this region may also provide key information for explanation of the speleothem $\delta^{18}\text{O}$ records from monsoonal China. However, more precisely dated speleothem $\delta^{18}\text{O}$ records covering longer periods are needed.

Key words: speleothem; $\delta^{18}\text{O}$; effective precipitation; ENSO; solar activity; South China

以往的研究显示 ENSO 活动是影响我国气候特别是一些极端气候事件的重要大气过程，对我国社会和经济发展造成了严重影响 (Zong and Chen, 2000; Wang et al, 2001a; Jiang et al, 2006)。如 Jiang et al (2006) 发现长江中下游地区洪涝灾害的发生与 ENSO 活动密切相关，El Niño 发生的年份更容易导致洪水灾害。一般认为 ENSO 会改变西北太平洋副热带高压及季风雨带的位置，进而对我国不同地区降水变化产生影响 (Huang et al, 2004; Ding et al, 2008, 2009; Xie et al, 2016)。东南地区是我国最重要的经济区之一。气候环境变化可能对这一地区经济活动产生的影响不仅是重要的科学问题，也是重要的现实问题。对这一地区过去气候环境变化的特征、规律和影响因素进行分析将有助于这一问题的解

决。对器测资料的分析显示我国东南地区的降水变化受 ENSO 活动强烈影响 (Yin et al, 2010; Zhang et al, 2015; Zhai et al, 2016)，如 Zhai et al (2016) 发现 2015/16 年强 El Niño 在东南地区产生了大量降水。但器测时期之前这一地区的降水是否受到 ENSO 活动的影响还未见报道。

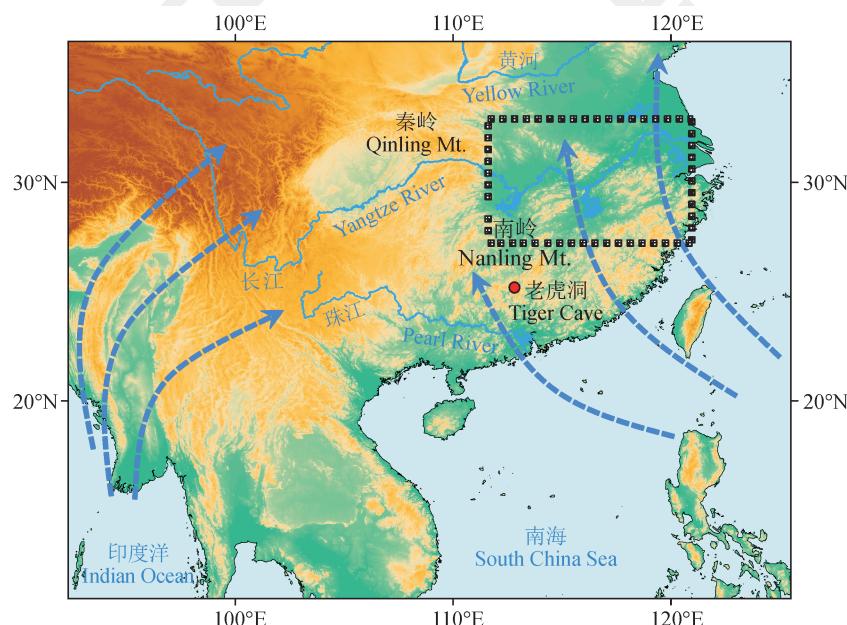
石笋可以提供高分辨率的过去气候环境变化信息。在我国季风区，已有研究显示石笋可以记录 ENSO 活动 (Tan, 2014; Liu et al, 2018)。本文根据一支采自南岭东部老虎洞的石笋 LFD-1，探讨了其稳定氧同位素组成 ($\delta^{18}\text{O}$) 记录的气候环境变化及与 ENSO 活动的联系。结果发现，在过去 150 a 中，石笋 LFD-1 的 $\delta^{18}\text{O}$ 记录受当地有效降水变化控制，并与 ENSO 和太阳活动密切相关。El Niño 事件发生时，当地有效降水增加，石笋 $\delta^{18}\text{O}$

偏轻。La Niña 事件发生时则出现相反的情况。石笋将是研究这一地区 ENSO 活动的有力工具。

1 区域地理背景

石笋 LFD-1 采自南岭东部湖南宜章县白沙乡老虎洞 ($25^{\circ}11'N$, $112^{\circ}49'E$) (图 1), 该洞穴发育于二叠纪石灰岩中, 洞口海拔 ~ 220 m。该溶洞未开发, 洞口高约 2 m, 宽约 10 m, 石笋 LFD-1

采自距离洞口约 200 m 处。自洞口至采样点洞穴通道宽阔, 但从采样点往洞穴更深处的洞穴发育情况尚不清楚。当地植被发育良好, 以灌木和乔木为主。附近郴州市多年 (AD 1981—2010) 平均气温 18.4°C , 年降水量 1504 mm (数据来源: <https://data.cma.cn/>)。降水主要集中在春季 (3—5 月, 占 36%) 和夏季 (6—8 月, 占 32%)。属于典型的亚热带湿润季风气候。



虚线矩形为 Jiang et al (2006) 指示的长江中下游地区。虚线箭头代表季风水汽输送路径。
The dotted rectangle represents the lower and middle Yangtze River catchments discussed by Jiang et al (2006). The dashed arrows are paths of monsoon moisture transport.

图 1 老虎洞地理位置

Fig. 1 The location of the Tiger Cave

2 研究方法

石笋 LFD-1 呈圆柱形, 全长 156 mm (图 2)。沿石笋生长中心切开后发现, 除了深度 50—90 mm 处颜色偏暗之外, 其余部位颜色较浅且较为均一。在切面上可以观察到很多孔隙 (图 2), 放大后能在切面上大致看出生长层理。石笋 LFD-1 在采集时还在滴水。石笋孔隙中往往存在较多杂质 (包括继承 ^{230}Th) (贾蓉芬等, 2007), 影响 ^{230}Th 定年结果。因此采用了 ^{210}Pb 法对石笋 LFD-1 进行定年。 ^{210}Pb 测年在台湾成功大学地球科学系进行, 测年方法与 Liu et al (2018) 相同。用 micromill 沿石笋生长中心获取氧 - 碳稳定同位素 ($\delta^{18}\text{O}$ - $\delta^{13}\text{C}$) 样品, 采样分辨率为 0.25 mm, 每 0.5 mm 测试一个样品, 共分析样品 305 个。 $\delta^{18}\text{O}$ -

$\delta^{13}\text{C}$ 测量在中国科学院南京地质古生物所进行。标准为国家标准 GBW04405 和国际标准 NBS-19, 测量结果以相对于 VPDB 标准表示, $\delta^{18}\text{O}$ 测量误差 (2σ) 优于 0.1‰ 。

有效降水采用以下方法获得: 首先根据郴州市月降水量 (P_M)、月潜在蒸发量 (PET_M) 和径流系数 0.57 (α) (湖南省水利厅, 2017) 估算出月实际蒸发量 (AET_M), 用月降水量减去月实际蒸发量得到月有效降水 (EP_M) :

$$\text{AET}_M = (1-\alpha) \times P_M \times \frac{\text{PET}_M}{\text{PET}_Y} \quad (1)$$

$$\text{EP}_M = P_M - \text{AET}_M \quad (2)$$

式中: P_Y 和 PET_Y 为根据月降水量和月潜在蒸发量计算得到的年降水量和年潜在蒸发量。降水量和蒸发量单位均为 mm。

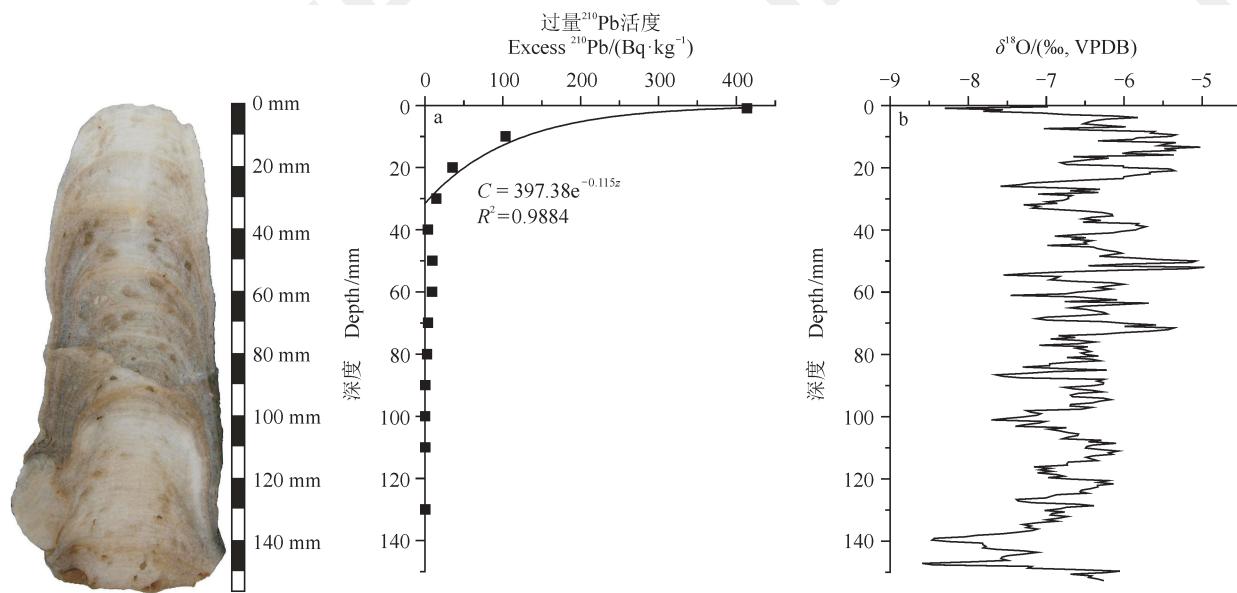


图 2 石笋 LFD-1 及其过剩 ^{210}Pb (a) 与 $\delta^{18}\text{O}$ (b) 随深度的变化
Fig. 2 Stalagmite LFD-1 and its measured excess ^{210}Pb (a) and $\delta^{18}\text{O}$ (b) profiles

3 结果

3.1 测年结果

图 2a 展示了石笋 LFD-1 中过剩 ^{210}Pb 随深度的变化。可以看到，在深度 40 mm 处过剩 ^{210}Pb 活度基本上达到了本底值 ($3.8 \text{ Bq} \cdot \text{kg}^{-1}$)。下面颜色偏深部分（对应深度 50 mm、60 mm、70 mm、80 mm 处）过剩 ^{210}Pb 活度有少量上升 (^{210}Pb 活度平均值 $6.5 \text{ Bq} \cdot \text{kg}^{-1}$ ），可能与石笋中这一段的有机质含量较高有关 (Wan et al, 2005)，不适用于用于 ^{210}Pb 年龄计算。因此只使用深度 40 mm 以上的样品进行年龄计算。对深度 (z) 和过剩 ^{210}Pb 活度 (C) 进行指数函数拟合 (图 2b)，得到：

$$C = 397.38e^{-0.115z} \quad (3)$$

$\ln C$ 与 z 的回归线斜率 b (-0.115) 的标准差为 0.008。由斜率 b 与生长速率 S 的关系 ($b = -\lambda/S$, λ 为 ^{210}Pb 衰变系数 0.0311) 得到 LFD-1 上部 40 mm 平均生长速率为 $(0.27 \pm 0.02) \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$ ，即 LFD-1 上部 40 mm 生长时间为最近 150 a。 $\delta^{18}\text{O}$ 数据的时间分辨率为 1.86 a。

3.2 氧稳定同位素结果

LFD-1 的 $\delta^{18}\text{O}$ 记录如图 2b 所示，其平均值为 $-6.61\text{\textperthousand}$ ，最大值 $-4.97\text{\textperthousand}$ 出现在深度 52.0 mm，最小值 $-8.59\text{\textperthousand}$ 出现在深度 147.2 mm。其中上部 40 mm 中 $\delta^{18}\text{O}$ 平均值为 $-6.34\text{\textperthousand}$ ，最大值 $-5.03\text{\textperthousand}$ 出现在深度 13.4 mm，最小值 $-8.30\text{\textperthousand}$ 出现在深度 0.88 mm。

4 讨论

4.1 石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 的气候意义

对于我国季风区内石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 的解释目前存在很大争议 (周厚云等, 2016)，Wang et al (2001b) 在葫芦洞的研究认为，石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 与东亚夏季风 (EASM, East Asian summer monsoon) 强度有关， $\delta^{18}\text{O}$ 较轻 (较重) 指示降水较多 (较少)、较为温暖 (寒冷)、EASM 较强 (较弱)。随后的一些研究中，如董哥洞、三宝洞和祥龙洞的研究也认为 $\delta^{18}\text{O}$ 与季风降水有关 (Yuan et al, 2004; Cheng et al, 2009; Tan et al, 2015a)。在对我国季风区石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 的各种传统解释中，一个基本的假设是石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 变化记录了大气降水 $\delta^{18}\text{O}$ 的变化 (周厚云等, 2016)。现在这一基本假设受到质疑，特别是发生在渗透带的蒸发作用和选择性补给及洞穴通风作用引起的洞穴内蒸发作用 (周厚云等, 2016; Baker et al, 2019)，都将对石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 信号产生影响。

Fairchild and Baker (2012) 认为器测数据显示石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 主要反映当地降水量，也有研究显示石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 主要反映当地有效降水 (Baldini et al, 2005; Tan et al, 2015b; Wang et al, 2015)。为探讨 LFD-1 的 $\delta^{18}\text{O}$ 的气候意义，将其与相距最近的郴州气象站的降水量、蒸发量及温度等指标进行了对比分析 (图 3)。结果显示：LFD-1 的 $\delta^{18}\text{O}$ 与温度的相关性最好 ($R=-0.72$)；而与降水量

和蒸发量的相关性弱很多(表1)。考虑到洞穴盖层对石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 记录造成延迟现象(Lachniet, 2009),本文将LFD-1的 $\delta^{18}\text{O}$ 记录向老的方向逐步移动并计算 $\delta^{18}\text{O}$ 与温度、降水量和有效降水量之间的相关性,结果发现移动2 a时总体的相关性达到最好, $\delta^{18}\text{O}$ 与温度、降水量和有效降水量的相关性都达到显著性水平(表1)。这里2 a可能反映了老虎洞洞穴盖层对LFD-1的 $\delta^{18}\text{O}$ 记录延迟效应(Lachniet, 2009)。无论在哪种情况下, $\delta^{18}\text{O}$ 与有效降水的相关性都高于与降水量的相关性(表1),这与大气降水中被蒸发掉的部分并没有参与岩溶过程是一致的。移动后的 $\delta^{18}\text{O}$ 与有

效降水和温度的二元回归相关系数达到0.82(表1),暗示温度和有效降水可能都是影响 $\delta^{18}\text{O}$ 的重要因素。其中,20世纪50年代以来 $\delta^{18}\text{O}$ 变轻幅度>3‰,同期温度上升幅度<2℃(图3e),如果仅考虑石笋碳酸盐沉积时的同位素分馏因子(O’Neil, 1977),则无法解释 $\delta^{18}\text{O}$ 的大部分变化。这说明虽然温度可能是影响石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 的重要因素,但有效降水可能是影响 $\delta^{18}\text{O}$ 变化的关键因素之一。这与最近Baker et al (2019)的研究结果一致,也与同期有效降水明显增加的总体趋势一致(图3b)。 $\delta^{18}\text{O}$ 偏轻反映有效降水增加,反之亦然。

表1 石笋LFD-1的 $\delta^{18}\text{O}$ 与其他指标的相关系数
Tab. 1 Correlation coefficients between the LFD-1 $\delta^{18}\text{O}$ record and other parameters

$\delta^{18}\text{O}$	降水量 Precipitation (n=27)	有效降水量 Effective Precipitation (n=27)	蒸发量 Evaporation (n=27)	温度 Temperature (n=27)	$\delta^{18}\text{O}$ 与有效降水及温度二元回归 Binary regression analysis of effective precipitation and temperature (n=27)
$\delta^{18}\text{O}$	0.03	-0.25	0.40*	-0.72**	0.73**
$\delta^{18}\text{O}_{2a}$	-0.43*	-0.60**	0.15	-0.75**	0.82**

**: 在0.01置信水平上相关, *: 在0.05置信水平上相关。用于分析的器测数据均为2 a滑动平均。 $\delta^{18}\text{O}_{2a}$ 为将 $\delta^{18}\text{O}$ 向偏老方向移动2 a。
**: at 99% confidence level, *: at 95% confidence level. Instrumental data are 2 a moving averages of monthly records. $\delta^{18}\text{O}_{2a}$ means a left shift of the $\delta^{18}\text{O}$ record by 2 a.

4.2 南岭东部有效降水变化

根据LFD-1的 $\delta^{18}\text{O}$ 记录,过去150 a南岭东部有效降水变化呈现出明显的年代际波动(图4b)。其中,AD 2000前后、AD 1980前后和20世纪60年代的有效降水峰值均与器测记录一致(图4b, 图3b),AD 1910前后及19世纪80年代也表现为有效降水峰值。伴随这种显著的年代际波动,南岭东部过去150 a有效降水变化的长期趋势可以划分为3个阶段:有效降水在19世纪90年代前表现为总体增加趋势,但之后至20世纪50年代中期则表现为总体减少趋势,最后一个阶段有效降水又表现出总体增加趋势(图4b)。最后一个阶段的总体趋势也与器测记录一致(图3b)。

(图4b, 图3b),AD 1910前后及19世纪80年代也表现为有效降水峰值。伴随这种显著的年代际波动,南岭东部过去150 a有效降水变化的长期趋势可以划分为3个阶段:有效降水在19世纪90年代前表现为总体增加趋势,但之后至20世纪50年代中期则表现为总体减少趋势,最后一个阶段有效降水又表现出总体增加趋势(图4b)。最后一个阶段的总体趋势也与器测记录一致(图3b)。

4.3 南岭东部有效降水变化的驱动因素

南岭东部过去150 a有效降水变化与ENSO和太阳活动存在良好的对应关系(图4a, 4b, 4c)。在年代际尺度上,有效降水增加对应于偏El Niño态,而偏La Niña态时则有效降水偏少。这种对应关系也与器测记录一致(图3a, 3b),反映了南岭东部有效降水在多年际至年代际尺度的变化主要与ENSO活动有关。在长期趋势上,

南岭东部有效降水在前2个阶段的长期趋势与太阳活动的总体趋势十分一致:太阳活动减弱时有效降水增加,反之亦然(图4b, 4c)。只是在最近~50 a来有效降水显著增加的趋势与太阳活动没有很好的对应(图4b, 4c)。

ENSO活动可能会通过以下机制影响我国东南地区的降水变化:(1)赤道太平洋的海表温度(SST)偏El Niño态时,由于海陆热力差降低导致EASM减弱,使得季风雨带更长时间停留在偏南位置,导致南方地区降水偏多(Ding et al, 2008, 2009; 钱维宏等, 2011),而赤道太平洋SST偏La Niña态则相反。(2)对于El Niño事件的北印度洋升温会增强赤道西北太平洋的反气旋(Xie et al, 2009, 2016),加强该反气旋西侧的南风,从南海携带更多水汽往北,并在该反气旋北侧受阻,导致长江中下游以南地区降水增加(Xie et al, 2016)。这两种解释都暗示El Niño发生时我国南方地区降水会相对增加。这与Jiang et al (2006)利用历史资料研究长江中下游地区过去~530 a旱涝灾害的结果一致,其发现El Niño发生时长江中下游发生洪水灾害频率更高,而La Niña时则更易发生干旱。

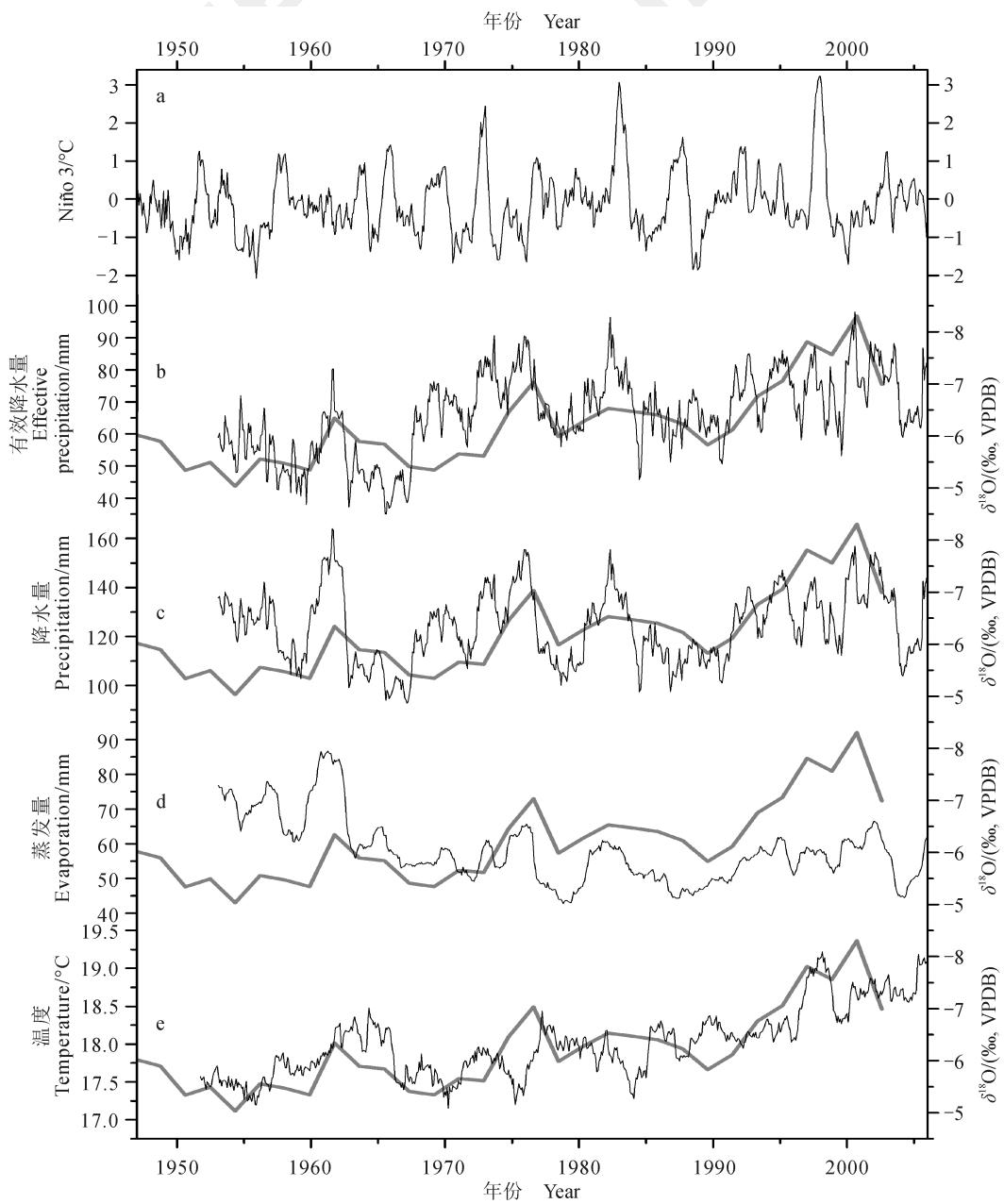


图 3 AD 1947—2006 器测数据与 LFD-1 的 $\delta^{18}\text{O}$ 的对比 (a 图为 Niño 3 表层海水温度 (SST) 距平 (Rayner et al., 2003) , b—e 图中的黑实线分别为 2 a 滑动平均的郴州月有效降水量、月降水量、月蒸发量及月均温度，灰色粗实线为向左移动 2 a 的 LFD-1 的 $\delta^{18}\text{O}$ 记录)

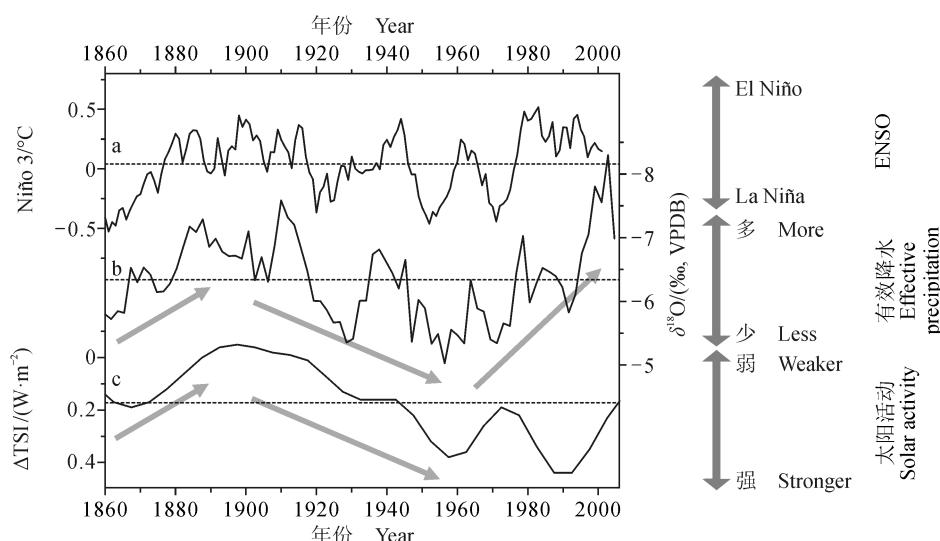
Fig. 3 Comparisons of the LFD-1 $\delta^{18}\text{O}$ record (thick solid gray line in b to e) with the Niño 3 SST anomalies from NOAA (Rayner et al., 2003) (a), monthly effective precipitation (b), precipitation (c), evaporation (d) and average temperature (e) at Chenzhou (the data at Chenzhou are 24-month moving averages, the LFD-1 $\delta^{18}\text{O}$ record was left-shifted by 2 a)

Asmerom et al (2007) 和 Park (2017) 认为, 太阳活动减弱(增强)会使得 El Niño 增强(减弱) (Mann et al, 2005), 导致亚洲季风 (AM, Asian monsoon) 减弱(增强)。此外, 太阳活动减弱(加强)时也会导致海陆热力差减少(增加)和 AM 减弱(增强) (Zeng et al, 2012)。因此, 这两种机制都指示太阳活动减弱时 AM 减弱, 我

国南方地区的降水将增加 (Ding et al, 2009; Xie et al, 2016)。这与南岭东部石笋记录所显示的一致 (图 4b, 4c)。最近 ~50 a 南岭东部有效降水的总体趋势似乎偏离了太阳活动的长期趋势。这一时期南岭东部有效降水呈现增加的总体趋势, 但太阳活动并没有显示对应的趋势变化 (图 4b, 4c)。石笋和观测记录显示的南岭东部地区最近 ~50 a 以

来的有效降水增加(图3b, 图4b)不知是否与当地人类活动有关。现代观测显示, 当地最近~50 a以来的气温明显上升(图3e), 与同期全球气温

急剧上升的背景一致(Mann et al, 2000); 但同期当地蒸发表现出减少的总趋势(图3d)。这些都是值得进一步研究的地方。



图中水平虚线代表自AD 1860以来的平均值。灰色箭头指示变化趋势。

Horizontal dashed lines represent the averages in the corresponding series from AD 1860. Gray arrows indicate overall trends.

图4 LFD-1的 $\delta^{18}\text{O}$ (b)与Niño 3表层海水温度(SST)距平(Cook et al, 2008)(a)、太阳总辐照度(TSI)(Steinhilber et al, 2009)(c)

Fig. 4 Comparisons of the LFD-1 $\delta^{18}\text{O}$ record (b) with the 10 a moving averaged Niño 3 SST anomalies (Cook et al, 2008) (a) and total solar irradiance (TSI) (Steinhilber et al, 2009) (c)

5 结论

基于对南岭东部老虎洞石笋LFD-1的 ^{210}Pb 年代学和 $\delta^{18}\text{O}$ 的气候意义研究, 得到以下主要结论:

(1) LFD-1的 $\delta^{18}\text{O}$ 记录了当地近150 a有效降水变化: $\delta^{18}\text{O}$ 偏重指示有效降水较少, 偏轻则反映有效降水较多。

(2) 南岭东部有效降水变化与ENSO和太阳活动存在密切关系。在年际至年代际尺度上, 有效降水增加和石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 变轻对应El Niño态, 有效降水减少和石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 变重对应La Niña态。有效降水变化的长期趋势则主要与太阳活动有关, 太阳活动减弱时南岭东部有效降水增加, 反之则减少。

(3) ENSO和太阳活动变化引起的雨带位置和西北太平洋副热带高压变化主导了南岭东部有效降水的变化。太阳活动减弱和El Niño态时雨带较长时间停留在偏南位置, 副高西侧气流加强导致更多水汽从南海输入, 都将使得我国南方地区降水增加。而太阳活动增强和La Niña态时则出现相反情况。

参考文献

- 湖南省水利厅. 2017. 2016年湖南省水资源公报 [M]. 长沙: 湖南地图出版社: 8–9. [Hunan Provincial Water Resources Department. 2017. Water resources bulletin of Hunan Province in 2016 [M]. Changsha: Hunan Map Publishing House: 8–9.]
- 贾蓉芬, 蔡炳贵, 班凤梅, 等. 2007. 北京石花洞石笋中有机质的赋存状态 [J]. 地球化学, 36(2): 193–199. [Jia R F, Cai B G, Ban F M, et al. 2007. Occurrence of organic matter in stalagmite from Shihua cave, Beijing [J]. Geochimica, 36(2): 193–199.]
- 钱维宏, 朱亚芬, 汤帅哥. 2011. 重建千年东亚夏季风干湿分布型指数 [J]. 科学通报, 56(25): 2075–2082. [Qian W H, Zhu Y F, Tang S Q. 2011. Reconstructed index of summer monsoon dry-wet modes in East Asia for the last millennium [J]. Chinese Science Bulletin, 56(25): 2075–2082.]
- 周厚云, 刘淑华, 彭小桃, 等. 2016. 中国季风区石笋氧同位素气候指示意义: 主要争议与几个重要问题 [J]. 热带地理, 36(3): 448–456. [Zhou H Y, Liu S H, Peng X T,

- et al. 2016. Paleoclimatic interpretations of speleothem $\delta^{18}\text{O}$ record in monsoonal China: controversies and some key issues [J]. *Tropical Geography*, 36(3): 448–456.]
- Asmerom Y, Polyak V, Burns S, et al. 2007. Solar forcing of Holocene climate: new insights from a speleothem record, southwestern United States [J]. *Geology*, 35(1): 1–4.
- Baker A, Hartmann A, Duan W H, et al. 2019. Global analysis reveals climatic controls on the oxygen isotope composition of cave drip water [J]. *Nature Communications*, 10(1): 2984. DOI: 10.1038/s41467-019-11027-w.
- Baldini J U L, McDermott F, Baker A, et al. 2005. Biomass effects on stalagmite growth and isotope ratios: a 20th century analogue from Wiltshire, England [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 240(2): 486–494.
- Cheng H, Edwards R L, Broecker W S, et al. 2009. Ice age terminations [J]. *Science*, 326(5950): 248–252.
- Cook E R, D'Arrigo R D, Anchukaitis K J. 2008. ENSO reconstructions from long tree-ring chronologies: unifying the differences? [C]// A special workshop on “Reconciling ENSO chronologies for the past 500 years”. Moorea, French Polynesia, April 2—3, 2008.
- Ding Y H, Wang Z Y, Sun Y. 2008. Inter-decadal variation of the summer precipitation in East China and its association with decreasing Asian summer monsoon. Part I : observed evidences [J]. *International Journal of Climatology*, 28(9): 1139–1161.
- Ding Y H, Sun Y, Wang Z Y, et al. 2009. Inter-decadal variation of the summer precipitation in China and its association with decreasing Asian summer monsoon. Part II : possible causes [J]. *International Journal of Climatology*, 29(13): 1926–1944.
- Fairchild I J, Baker A. 2012. Speleothem science [M]. New Jersey: Wiley-Blackwell: 27, 122–129, 319–321.
- Huang R H, Chen W, Yang B L, et al. 2004. Recent advances in studies of the interaction between the East Asian winter and summer monsoons and ENSO cycle [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 21(3): 407–424.
- Jiang T, Zhang Q, Zhu D M, et al. 2006. Yangtze floods and droughts (China) and teleconnections with ENSO activities (1470—2003) [J]. *Quaternary International*, 144(1): 29–37.
- Lachniet M S. 2009. Climatic and environmental controls on speleothem oxygen-isotope values [J]. *Quaternary Science Reviews*, 28(5/6): 412–432.
- Liu S H, Peng X T, Chen Q, et al. 2018. The 1997—1998 El Niño event recorded by a stalagmite from central China [J]. *Quaternary International*, 487: 71–77.
- Mann M E, Gille E, Bradley R S, et al. 2000. Global temperature patterns in past centuries: an interactive presentation [J]. *Earth Interactions*, 4: 4. DOI: 10.1175/1087-3562(2000)004<0001:GTPIPC>2.3.CO;2.
- Mann M E, Cane M A, Zebiak S E, et al. 2005. Volcanic and solar forcing of the tropical Pacific over the past 1000 years [J]. *Journal of Climate*, 18(3): 447–456.
- O’Neil J R. 1977. Stable isotopes in mineralogy [J]. *Physics and Chemistry of Minerals*, 2(1/2): 105–123.
- Park J. 2017. Solar and tropical ocean forcing of late-Holocene climate change in coastal East Asia [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 469: 74–83.
- Rayner N A, Parker D E, Horton E B, et al. 2003. Global analyses of sea surface temperature, sea ice, and night marine air temperature since the late nineteenth century [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 108(D14). DOI: 10.1029/2002JD002670.
- Steinhilber F, Beer J, Fröhlich C. 2009. Total solar irradiance during the Holocene [J]. *Geophysical Research Letters*, 36(19): L19704. DOI: 10.1029/2009GL040142.
- Tan L C, Cai Y J, Cheng H, et al. 2015a. Climate significance of speleothem $\delta^{18}\text{O}$ from central China on decadal timescale [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 106: 150–155.
- Tan L C, Cai Y F, An Z S, et al. 2015b. A Chinese cave links climate change, social impacts, and human adaptation over the last 500 years [J]. *Scientific Reports*, 5: 12284. DOI: 10.1038/srep12284.
- Tan M. 2014. Circulation effect: response of precipitation $\delta^{18}\text{O}$ to the ENSO cycle in monsoon regions of China [J]. *Climate Dynamics*, 42(3/4): 1067–1077.
- Wan G J, Chen J A, Wu F C, et al. 2005. Coupling between $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ and organic matter in sediments of a nutrient-enriched lake: an example from Lake Chenghai, China [J]. *Chemical Geology*, 224(4): 223–236.
- Wang Q, Zhou H, Cheng K, et al. 2015. The climate reconstruction in Shandong Peninsula, North China during the last millennia based on stalagmite laminae [J]. *Climate*

- of the Past, 11: 4643–4668.
- Wang Y F, Wang B, Oh J H. 2001a. Impact of the preceding El Niño on the east Asian summer atmosphere circulation [J]. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 79(1B): 575–588.
- Wang Y J, Cheng H, Edwards R L, et al. 2001b. A high-resolution absolute-dated late Pleistocene monsoon record from Hulu Cave, China [J]. *Science*, 294(5550): 2345–2348.
- Xie S P, Hu K M, Hafner J, et al. 2009. Indian Ocean capacitor effect on Indo-Western Pacific climate during the summer following El Niño [J]. *Journal of Climate*, 22(3): 730–747.
- Xie S P, Kosaka Y, Du Y, et al. 2016. Indo-Western Pacific Ocean capacitor and coherent climate anomalies in post-ENSO summer: a review [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 33(4): 411–432.
- Yin Y Z, Gemmer M, Luo Y, et al. 2010. Tropical cyclones and heavy rainfall in Fujian Province, China [J]. *Quaternary International*, 226(1/2): 122–128.
- Yuan D X, Cheng H, Edwards R L, et al. 2004. Timing, duration, and transitions of the Last Interglacial Asian monsoon [J]. *Science*, 304(5670): 575–578.
- Zeng Y, Chen J G, Zhu Z J, et al. 2012. The wet Little Ice Age recorded by sediments in Huguangyan Lake, tropical South China [J]. *Quaternary International*, 263: 55–62.
- Zhai P M, Yu R, Guo Y J, et al. 2016. The strong El Niño of 2015/16 and its dominant impacts on global and China's climate [J]. *Journal of Meteorological Research*, 30(3): 283–297.
- Zhang L, Sielmann F, Fraedrich K, et al. 2015. Variability of winter extreme precipitation in Southeast China: contributions of SST anomalies [J]. *Climate Dynamics*, 45(9/10): 2557–2570.
- Zong Y Q, Chen X Q. 2000. The 1998 flood on the Yangtze, China [J]. *Natural Hazards*, 22(2): 165–184.