

洞穴石笋指标量化研究进展

刘殿兵

南京师范大学地理科学学院, 南京, 210023

内容提要:洞穴石笋因分布广、可精确测年、 $\delta^{18}\text{O}$ 信号可进行区域对比等优势逐渐成为重要的陆相地质载体。然而, 由于量化研究不足, $\delta^{18}\text{O}$ 气候环境意义解译尚处于经验化阶段, 特别是亚洲季风区石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 指标解释存在诸多争议。本文试通过总结已有石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 、 $\delta^{13}\text{C}$ 、微量元素、年层厚度等指标量化研究成果, 石笋生长机理模拟实验及相关技术方法, 分析其存在问题。结合其它地质材料量化方法, 从现代器测资料校准、多指标开发、集成树轮材料等方面提出加强现代监测, 促进机理研究, 定量认识现代洞穴石笋年~季节尺度沉积旋回与洞穴环境关系, 建立量化经验模型, 以发挥石笋年代学优势, 推动区域或全球对比。

关键词: 洞穴石笋; 多指标研究; 量化重建; 经验模型

近年来, 随着众多高分辨率石笋氧同位素 ($\delta^{18}\text{O}$) 序列在古环境研究中应用, 洞穴石笋材料逐渐成为国内、外古气候学界关注热点。然而, 由于其气候意义存在不同解释 (Maher, 2008; Clemens et al., 2010; Dayem et al., 2010), 制约了石笋氧同位素记录区域对比及气候变化机制诊断。目前, 无论将石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 解释为“温度” (Boch et al., 2009)、“降雨同位素组成” (Wang Yongjin et al., 2001; Yuan Daoxian et al., 2004; Cheng Hai et al., 2006, 2009)、“降雨量” (Fleitmann et al., 2003a; Zhang Pingzhong et al., 2008) 或“季风强度” (Wang Yongjin et al., 2008), 其大范围空间重现性很难得到现代气象观测、数理模型研究等支持, 反映石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 量化研究的薄弱。一般来说, 石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 对大气降水同位素组成具有继承性, 而现代气象资料分析发现 (Dayem et al., 2010), 亚洲季风的年际和雨季降雨总量仅在约 500 km 范围内呈现较高相关性, 远远小于不同洞穴之间的空间距离。但是, 这些洞穴石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 序列却吻合很好, 从而质疑了石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 作为“雨量变化指标”。Maher (2008) 认为中国南方与印度季风区石笋记录变化一致, 与中国其他区域降水记录存在显著差异, 由此推断中国南方石笋记录并不反映季风降水量变化, 可能反映水汽来源, 因为水汽同位素组成比绝对降水量更具有区域一致

性 (Vuille et al., 2005)。模拟和观测研究也显示, 大气降水同位素组成并不受降雨量控制 (Aggarwal et al., 2004; Schmidt et al., 2007), 往往受控于区域大气环流形势 (Sturm et al., 2007; 谭明, 2009, 2011)。早期研究认为, 高纬地区降水同位素组成受控于温度变化 (Dansgaard, 1964), 而在低纬地区, 水汽传输掩盖了温度效应 (Rozanski et al., 1993)。特别是受强夏季风控制区域, 降水同位素主要依赖雨量 (Johnson and Ingram, 2004), 这或许是亚洲季风区石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 作为“雨量或季风强度”经验解释的理论基础。

石笋其它指标, 如年纹层厚度也可对区域温度 (Tan Ming et al., 2003)、降雨水平 (Proctor et al., 2000; Polyak and Asmerson, 2001) 具有指示作用。然而, Betancourt 等 (2002) 对比发现美国西南部石笋年层厚度指示的降水量变化 (Polyak and Asmerson, 2001) 与当地树轮重建结果差异显著, 由此质疑石笋纹层的“年沉积性质”及年层厚度与当地雨量响应关系。由此可见, 石笋微层与气候之间量化响应关系尚需要大量的观测及模拟实验论证。该报道引起 Baker 和 Genty (2003) 强烈反应, 并引发关于石笋微层年代学和气候学的激烈讨论 (Baker and Genty, 2003; Betancourt et al., 2003; Asmerson and Polyak, 2004)。因为石笋年层厚度与岩溶地化

注: 本文为国家自然科学基金 (编号 41172148)、高等学校博士学科点专项科研基金 (编号 20113207120012)、江苏高校优势学科建设工程资助项目, 南京师范大学高层次人才科研启动基金项目 (编号 2011105 XGQ 01 02) 的成果。

收稿日期: 2012-08-17; 改回日期: 2013-06-28; 责任编辑: 章雨旭。

作者简介: 刘殿兵, 男, 1972年生。讲师, 主要从事洞穴古气候研究。电话: 025-85891653; Email: ldb9921@njnu.edu.cn。

循环过程密切相关,这些非气候过程可能导致石笋微层与树轮气候信号之间有显著差异。因此,亟待建立石笋指标与气候要素之间经验函数模型。未来研究必须加强石笋指标环境机理研究,探明洞穴次生碳酸盐沉积过程中外界气候环境信号输入、岩溶地球化学循环与石笋气候信号输出之间量化关系。

1 洞穴次生碳酸盐古温度量化重建

利用石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 提取古温度信号一直是国际学术界关注热点,也是洞穴古气候研究难题。模拟实验发现,在同位素平衡分馏情况下,石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 主要受控于洞穴滴水 $\delta^{18}\text{O}$ 组成和洞内温度的变化 (Hendy, 1971)。在石笋发育期间,水-岩之间同位素分馏系数 α 达 $-0.24\text{‰}/\text{°C} \sim -0.26\text{‰}/\text{°C}$ (O'Neil et al., 1969; Kim and O'Neil et al., 1997),成为地质测温基础。因此,若了解历史时期洞穴滴水同位素组成,则为发展直接测温法提供可能。目前,古岩溶水信息提取主要依靠洞穴附近地下水和石笋液相包裹体。前者很容易与现代水混合,难以直接获取;后者圈闭的古岩溶水可记录当时大气降水信号,有利于获取石笋生长母液 $\delta^{18}\text{O}$ 信息,因此成为首选研究目标。

对比石笋包裹体古岩溶水及周围方解石同位素组成,van Breukelen 等(2008)发现秘鲁气温在 13.5 ka 以来变化很小,全新世以来降雨增加 15% ~ 30%。然而,较大的液相包裹体在石笋中极为稀缺 (Genty et al., 2002),现有技术方法无论热爆法 (Matthews et al., 2000; McGarry et al., 2004),还是冷轧法 (Dennis et al., 2001; Fleitmann et al., 2003b; Vonhof et al., 2006)均很难获取足够的测试水量。同时,包裹体圈闭的古岩溶水不断与周围碳酸钙发生同位素交换,很难代表石笋发育时段大气降水真实信息。为解决这一难题,洞穴古气候界采取测试岩溶水 δD 方法。因为石笋碳酸盐不含氢,与岩溶水不发生氢同位素交换。进一步结合全球或地方大气雨水线方程可间接计算降水 $\delta^{18}\text{O}$,从而评估古温度变化 (Matthews et al., 2000; Dennis et al., 2001)。通过石笋包裹体 D/H 分析,Matthews 等(2000)和 McGarry 等(2004)发现,地中海东部末次冰期雨水线与全球雨水线相同,而间冰期降水遵循地方雨水线关系,反映冰期蒸发量降低。法国 Villars 洞穴研究显示,依据 $\delta\text{D} - \delta^{18}\text{O}$ 评估的古温度与孢粉、海洋、冰芯记录一致 (Genty et al., 2002)。在早全新世,包裹体 D/H 比率指示的加拿

大年均温变化达 11°C (从 1°C 上升到 10°C),在适宜期比现代高 3°C ,约在 8.7 ka 达到现代值 (Zhang Rong et al., 2008)。在现有技术条件下,氢同位素在分析过程中分馏高达 -30‰ (Matthews et al., 2000),难以避免实验过程中萃取损耗和分馏影响。而且,岩溶水 δD 、 $\delta^{18}\text{O}$ 组分分析精度较低 (δD 为 3‰ , $\delta^{18}\text{O}$ 为 0.4‰ , Dennis et al., 2001)制约了古气温精确评估。更为重要的是,现代全球雨水线与地方雨水线存在显著差异,也很难假定现代雨水线在历史时期保持不变 (Lachniet, 2009)。因此,运用包裹体恢复古岩溶水信号,在机理上受到多种因素干扰,尚难满足直接测温要求。为此,亟待研发适于古气温直接测试的代用指标。惰性气体在包裹体圈闭时溶解于石笋母液中,并与洞穴大气达到平衡,其溶解度直接受控于洞穴气温,成为古气温良好的示踪对象,从而克服其他地质测温法多源性困扰 (Stute et al., 1992)。德国 Bunker 洞包裹体惰性气体 (Ne、Ar、Kr、Xe) 测试显示 (Kluge et al., 2008), Younger Dryas 结束时温度比现代低约 6.6°C , 1.30 ka BP 比现代低 2.4°C ,两个研究时段气温差 4°C ,与欧洲孢粉重建结果较为一致。多洞穴调查显示,也门年均温在 2 ka BP 接近现代水平,土耳其在 6 ~ 5 ka BP 与现代一致 (Scheidegger et al., 2011)。显然,包裹体研究有助于厘清 $\delta^{18}\text{O}$ 指标信号复杂性问题(温度和降水)。但石笋包裹体分布不均匀,提取技术难度大,仅能揭示古气温变化趋势,无法满足高分辨率气候突变事件研究需求,直接获取与 $\delta^{18}\text{O}$ 指标相似分辨率的古气温信息成为关键。最近,新发展了“二元同位素测温法 (clumped isotope thermometry)” (Ghosh et al., 2006; Schauble et al., 2006)通过测试含重同位素 CO_2 ($^{13}\text{C}^{18}\text{O}^{16}\text{O}$) 分子丰度变化直接获取温度变化信息(简称为 Δ_{47} 法)。相对于早期的 $\delta^{18}\text{O}$ 古温度法, Δ_{47} 指标直接受温度变化控制,不需要了解古岩溶水 $\delta^{18}\text{O}$ 信息。洞穴石笋已开展研究显示 (Afeck et al., 2008; Daëron et al., 2011),重同位素 $^{13}\text{C}^{18}\text{O}^{16}\text{O}$ 分子占 Δ_{47} 信号的约 96% (Schauble et al., 2006)。据此获取以色列地区温度在末次盛冰期比现代低 $6 \sim 7\text{°C}$,早全新世气温略高于现代值,晚全新世期间略低于现代气温 (Afeck et al., 2008)。同时,石笋方解石沉积过程中,母液溶解的 Mg、Sr、Ba 等微量元素会以离子形式进入方解石晶格,取代 Ca^{2+} 离子,其分配系数取决于温度、水文等条件变化 (Huang Yiming and Fairchild, 2001)。因此,可依据石笋微量元素与环境因子之

间量化关系重建高分辨率气候变化历史。研究显示,石笋微量元素在轨道尺度上可反映太阳辐射变化(Cruz et al., 2007),在百年尺度上可记录气候突变事件振荡细节(Baldini et al., 2002),在季节尺度上可清晰记录洞穴环境及外界气候季节性变化(Huang Shaopeng et al., 2000; Treble et al., 2003; Johnson et al., 2006; Matthey et al., 2008),反映微量元素具有古气温重建的潜力。

2 现代器测记录校准研究

现代气象资料对同期地质体代用指标量化解读具有重要意义。对于正在发育的年纹层石笋而言,其指标在年轻时段可运用器测资料进行校正,且能将指标与气候量化关系延伸到器测期以外,在时标控制、指标解释方面具有天然优势。显然,这种集成研究以石笋纹层的“年层性”和发育的“活动性”为前提,即正在发育。而囿于各种测年方法的误差和精度,很难准确界定石笋顶部碳酸盐为现代沉积。在野外调查中,常见到石笋顶部现代沉积发生“反溶蚀”(张会领等,2012),也影响了器测资料与石笋指标的之间参比。

洞穴次生碳酸盐微层的“年层性”首次发现于20世纪60年代(Broecker et al., 1960),国内研究始于北京石花洞(刘东生等,1997)。“石笋年层”不仅是各类指标年际时标研建的基础,同时,其厚度变化也可保存洞穴水文、气温等重要信息。目前,验证石笋微层“年层性”手段有:与放射性测年结果对比、在已知年龄的事件层之间统计纹层、洞穴监测以及将纹层厚度变化与模拟累积速率对比(Tan Ming et al., 2006; Baker et al., 2008)。现代器测历史仅达百年左右,同期发育的石笋材料为年轻地质体,适于该类碳酸盐的测年方法有U/Th、 ^{137}Cs 、 ^{210}Pb 、 ^{14}C 等。研究表明,对于近120 a以来的石笋材料, ^{210}Pb 法具有独特的优势(Baskaran and Illife, 1993; Condomines and Rihs, 2006)。其次,如果洞穴围岩“老碳”贡献率维持不变(Hoffmann et al., 2010), ^{14}C 测年法同样适于年轻石笋样品年龄判定(Genty et al., 1998; Yadava and Ramesh, 2005)。基于 ^{137}Cs 测年结果,洪都拉斯石笋 $\delta^{13}\text{C}$ 清晰记录了1973~2000年期间降水变化(Frappier et al., 2002), $\delta^{18}\text{O}$ 则记录了热带气旋活动频率(Frappier et al., 2007)。谭明等(2000)利用高精度TIMS- ^{230}Th 测年与微层计数结果对比,确认了中国南方石笋微层的年旋回性质,使得国内微层年代学在区域上进一步

拓展。四川黄龙洞近100 a来石笋研究显示(杨勋林等,2007,2010),两套独立测年方法(^{210}Pb 和 ^{230}Th)建立的累积速率在误差范围内完全一致,而且近50 a内,石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 变化与现代器测资料建立的夏季风指数相关系数达-0.58,证实测年结果的可靠性。湖北清和尚洞石笋顶部110多个微层厚度变化与东亚夏季风强度指数相关达0.83(刘浴辉等,2005),支持了石笋微层理的“年层性”。已有研究发现,石笋年层厚度变化适于保存低频气候信号(Pauling et al., 2003; Moberg et al., 2005; Smith et al., 2006),可有效解决单株树轮持续时间短及低频信号(气候变化趋势)提取难等问题。石花洞年层厚度与北京地区旱涝指数存在很强的相关性(刘东生等,1997),近2650 a以来,年层厚度提取的中国北方热季(5~8月)温度变化与北半球温度重建结果吻合(Tan Ming et al., 2003)。在最近1 ka内,与祁连山树轮集成的温度及GCM模拟结果相关性达0.61(Tan Ming et al., 2009),并通过 $\delta^{13}\text{C}$ 恢复了北京地区3 ka以来的植被面貌(李红春等,1998)。末次盛冰期南京葫芦洞石笋微层厚度也揭示夏季风降雨存在显著的2~7 a周期,类似于现代ENSO信号(孔兴功等,2003),说明年层石笋在历史气候重建方面具有重要意义。由此,可通过器测气候资料与年层厚度数据集成,建立两者之间量化关系。现代ENSO记录与马达加斯加石笋微层厚度对比发现,降雨量大,年层厚度增大,南方涛动指数(SOI)降低,可能SOI和厄尔尼诺事件相关的降雨量决定了年层厚度变化(Brook et al., 1999)。经1951~1992年器测记录校准后,作者重建了公元1550年以来降水及ENSO变化历史。苏格兰西北石笋年层厚度在器测期内与当地的年均温呈正相关($r=0.49$)和降水量呈反相关($r=-0.53$),反映近1 ka以来北大西洋涛动(NAO)对欧洲气候影响显著(Proctor et al., 2000)。谱分析进一步发现在1~3 ka BP期间欧洲气候以50~70 a为周期,而最近1 ka以来以72~94 a为周期(Proctor et al., 2002)。美国北部石笋年层厚度反映的洪水事件和当地降水异常具有很好的相关性,经50 a气象数据校正后,Dasgupta(2010)重建了近3 ka以来降水异常历史,分析发现19世纪以来极端洪水事件发生频率呈上升趋势。

但是,年层形成机理复杂,不同环境下形成的年层性质不同(谭明等,2002; Tan Ming et al., 2006; Baker et al., 2008)。一般来说,具有季节变化的区

域和局地环境因子决定了石笋生长发育的年季轮回。与树轮不同,在共同的限制性环境因子作用下,树轮的宽度变化一致,利于树轮交叉定年。对于石笋微层而言,即便在同一个洞穴,地质、地貌、水文条件、植被、土壤、渗水通道、洞室大小、石笋顶部粗糙度等差异会造成厚度不同,这些复杂过程导致洞穴次生碳酸盐发育非线性响应于外界气候要素,故年层厚度作为气候信号输出端尚需要沉积校正(谭明等,2002),找出敏感因子,评估其敏感度(谭明,2005)。

尽管石笋微层气候学尚需要观测及模拟研究进一步证实,但年层序列为精确时标研建提供了重要支撑。对比埃塞俄比亚年层石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 与月降水关系, Baker 等(2007)重建了1989~2004年期间4月与7月降水比率变化,发现重建结果与观测记录在变率上基本一致。通过1961~2004年期间冬季降水记录校正,土耳其年层石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 在 $\pm 31\text{mm}$ 的误差范围内与实测降水记录很好吻合(Jex et al., 2010),其中,1938~2004年期间,秋—冬季降水与石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 呈反相关,据此重建了土耳其地区公元1500年以来冬季降水变化序列(Jex et al., 2011)。近780 a以来,印度石笋的 $\delta^{18}\text{O}$ 、 $\delta^{13}\text{C}$ 、年层厚度在器测期内与当地降水异常总体特征极为相似(Burns et al., 2002), $\delta^{18}\text{O}$ 变化 0.6‰ 相当于降水异常约 75 mm ($1\text{‰}/125\text{ mm}$),年层厚度与 $\delta^{18}\text{O}$ 之间相关系数达 -0.4 。近53 a来,直布罗陀半岛年层石笋分析显示,微量元素、同位素可反映季节性降水、温度变化(Matthey et al., 2008),甚至可记录天、月降水变化(Baker et al., 1999),说明石笋可清晰记录不同尺度气候波动。西班牙石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 数据重建的冬季(10~3月)降水与1951~2004年间实测冬季降水相关达 $r^2 = 0.47$ 。在10年际尺度上,冬季滴水 $\delta^{18}\text{O}$ 反映了冬季平均温的长期演化(Matthey et al., 2008)。南阿曼三支年层石笋显示,在印度季风影响下,年层石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 与现代降雨量相关达 -0.62 。经器测数据校正后发现,近330 a来降雨量在公元1666年最大,公元1900年最小(Yadava et al., 2004)。在约公元1320年印度季风降水衰减进入小冰期(公元1320~1660年),不仅记录了20世纪60年代季风减弱事件(Fleitmann et al., 2004),也进一步发现早期记录低估了小冰期期间印度季风区干旱程度(Sinha et al., 2007)。

由于洞穴滴水形式及来源极其复杂(Fairchild et al., 2006),降水、渗流水等不同时间尺度水源混

合,对短尺度气候信号影响很大。发育于1911~1992年期间一支澳大利亚石笋显示,离子探针获取的氧、碳同位素季节性振荡显著,但10年际趋势与当地气温、降水吻合较差(Treble et al., 2005)。所以,无论现代石笋与同期器测记录之间采用线性拟合(Fischer and Treble, 2008)或者正演模拟(forward modeling, Baker and Bradley, 2010)应充分考虑这种“岩溶水库效应”的贡献。在器测期以外,其它经验模式也在不断发展。如阿尔卑斯山石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 与当地温度异常对比显示,距今17 ka以来,当地平均温上升 1°C 对应于石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 增加 2.85‰ ($r^2 = 0.38$, $r = -0.61$)(Frisia et al., 2005)。Bar-Matthews 等(2003)假定以色列现代降雨量及其同位素组成经验关系式 [$d(\delta^{18}\text{O}_p)/dP$ 梯度为 $-1.02\text{‰}/200\text{ m}$] 在间冰期保持不变,据此推算当时古降雨量水平。显然,这种经验关系在间冰期是否类似于现代尚缺乏大量研究证实。在亚洲季风区, Hu Chaoyong 等(2008)创造性地运用贵州董哥洞与湖北和尚洞石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 记录残差定量评估全新世中国西南大气降水变化,并发现全新世适宜期大气降水比现代高 8% 。

3 现代观测研究及生长动力模拟实验

现代观测研究是定量解释石笋气候指标的关键手段。已开展的洞穴监测多侧重水文状况、生长动力及水化学等方面研究。澳大利亚东部 Koorringa 洞持续2.5 a水化学监测发现,在干旱时段,滴水及其 Ca^{2+} 浓度降低 50% ,而 Mg/Ca 及 Sr/Ca 比增加 50% ,并清晰记录了 El Niño-La Niña 信号(McDonald and Drysdale, 2004)。美国德州西南爱德华兹高原3个洞穴观测揭示,在不同滴水点方解石生长速率表现出相似的年周期,且与当地温度季节变化呈反相关,秋季至春季生长,夏季几乎不发育。水化学研究进一步发现,这种季节性生长可能与区域温度对洞穴—大气 CO_2 浓度或滴水 CO_2 含量控制作用有关(Banner et al., 2007)。石花洞系统监测发现(Cai Binggui et al., 2011),方解石沉积速率年内变化显著,夏季(7~8月)生长最慢,秋季到春季达到最大。沉积速率时间变化与滴率、洞内大气 $p(\text{CO}_2)$ 、Ca 离子浓度呈反相关;与滴水的 pH 值呈正相关。由此作者认为石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 信号可能代表季节性信号。该洞穴滴水对大气降水表现出两种响应模式:即时快速响应和滞后响应。滴水的年内变化大于年际变化,其中溶解无机碳(DOC)在年内和

年际尺度上均有变化,高值出现在7~8月,在旱季较低、含量变化较小,在观测期DOC伴随强降水出现(Ban Fengmei et al., 2008)。云南洞穴调查发现(Duan Wuhui et al., 2012),中国南方文石石笋年层由致密亚层和多孔亚层组成,致密层形成于冬季,此时滴率中等,去气缓慢、连续、耗时长;疏松层形成于春季,滴率慢,Mg/Ca比值较高。直布罗陀洞穴4年观测显示,年层石笋中浅色柱状方解石形成于冬季较高 $p(\text{CO}_2)$ 条件下,此时方解石 $\delta^{13}\text{C}$ 值最小;而暗色微晶方解石发育于夏季低 $p(\text{CO}_2)$ 条件下, $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^{13}\text{C}$ 值升高。滴水无机碳 $\delta^{13}\text{C}$ 在4~5月间最小,此时, $\delta^{18}\text{O}$ 信号主要指示冬季降水(Matthey et al., 2008)。爱尔兰洞穴滴水情况调查发现(Baldini et al., 2006),不同滴率对石笋气候信号的保存有显著影响。缓慢滴水($<0.1\text{ mL/min}$)发育的石笋仅能记录气候的长期变化,次级振荡几乎没有;中等滴率($0.1\sim 2\text{ mL/min}$)供水的石笋适于研究气候季节信号;快速滴率($>2\text{ mL/min}$)生成的石笋不适于高分辨古气候研究,因为过水通道变化及较大的滴率变化可能导致石笋发育间断和方解石的反溶蚀。在法国Villars洞,滴率变化滞后大气降水约2个月,与气压呈反相关。洞穴深处滴水的微量元素浓度较高,洞内大气 CO_2 浓度变化和土壤 CO_2 一致且与石笋 $\delta^{13}\text{C}$ 相关(Genty, 2008)。桂林地区观测发现,降雨 $\delta^{18}\text{O}$ 值随着气温升高和雨量增加而减小,并与月均温相关。洞穴滴水 $\delta^{18}\text{O}$ 继承降雨同位素信息, $\delta^{13}\text{C}$ 则似乎指示当地植被变化(李彬等, 2000)。贵州荔波凉风洞大气水、土壤水、滴水监测显示,洞穴次生碳酸盐氧同位素可继承大气降水同位素变化,其变幅在岩溶水传输过程中受混合作用影响显著减小(罗维均和王世杰, 2008)。珠江水系4个洞穴体系监测表明,滴水对大气降雨响应略滞后,不同水动力条件、水-土和水-岩接触时间、作用方式、水运移路径等差异影响洞穴次生碳酸盐物质来源及其环境指标解译(周运超等, 2004)。这些研究表明,特定洞穴的实地观测研究为理解和认识洞穴温度、降水 $\delta^{18}\text{O}$ 、碳酸盐 $\delta^{18}\text{O}$ 等之间关系提供宝贵信息。然而,当多种控制因子,如方解石母液饱和指数、温度、滴率、 CO_2 去气速率等变化方向一致时,很难严格检出石笋生长动力学机制及各种地化参数的贡献率。此时,动力模型及模拟实验研究可有效补充这方面的缺憾。

早期碳酸钙溶解和沉淀动力模型发现 CaCO_3 含量、石笋表面水膜厚度及水动力条件、温度、 CO_2 分

压等因素变化对石笋生长起到主控作用(Dreybrodt, 1980, 1981; Buhmann and Dreybrodt, 1985a, 1985b; Dreybrodt et al., 1997)。后期模拟发现,在石笋发育过程中,供水速率、化学动力、水流状况等均可影响石笋生长及形态,且这些影响因素可能相互抵消,导致复杂响应(Dreybrodt, 1999)。其中,石笋生长的主控因素是温度和土壤 CO_2 浓度变化,降水与石笋的直径相关(Kaufmann, 2003)。但是,洞穴实际环境很难在室内模拟试验中控制,石笋生长层序很难直接转化为相应的气候信号。尽管如此,石笋生长速率及直径是气候变化的函数(林玉石等, 2005),可以从这些参数中获取过去气候变化信息。进一步模拟结果显示,尽管温度影响很难识别,但可从石笋生长层序中评估 CO_2 浓度(作为土壤覆盖指标)与滴水时间(作为降水指标)变化(Kaufmann and Dreybrodt, 2004),该思想得到模拟结果(Romanow et al., 2008)和洞穴观测支持。通过多洞穴现代年纹层石笋调查及理论模型对比发现,自然环境下石笋生长速率与理论预测结果基本一致(Baker et al., 1998)。欧洲6个洞穴31个滴水点监测显示,纹层统计获取的累积速率与理论预测相关度达 $R^2=0.69$,其中,5个洞穴观测发现的实际生长速率与年均温($R^2=0.63$)、滴水钙离子浓度($R^2=0.61$)有关,但与滴率($R^2=0.09$)无关(Genty et al., 2001)。在石笋沉积过程中,同位素信号对降水同位素组成的响应、与累积速率、洞穴环境变化关系一直备受关注。滴水模型及德国西部两洞穴观测表明,冬季降雨对该区洞穴滴水同位素组成影响显著,方解石 $\delta^{18}\text{O}$ 与地表年均温呈反相关(Wackerbarth et al., 2010)。由于石笋母液水文来源复杂(Lachniet, 2009)及洞穴体系开放-封闭程度不同,在方解石溶解沉积模型中,滴水 $\delta^{13}\text{C}$ 值变化不仅响应于体系闭合程度,也随着土壤 $p(\text{CO}_2)$ 升高而降低(Fohlmeister et al., 2011),同时,滴水时间间隔、温度、渗流水混合系数也可能对石笋 $\delta^{13}\text{C}$ 影响显著(Mühlinghaus et al., 2007)。

目前,真正模拟出洞穴石笋生长环境的室内模拟实验很少(Fantidis and Ehhalt, 1970; Huang Yiming and Fairchild, 2001; Wiedner et al., 2008; Day and Henderson, 2011),在众多实验中母液饱和度和碳酸盐生长是用 CaCl_2 结合 NaHCO_3 控制,而在真实环境中是通过 CO_2 去气导致母液中 Cl^- 和 Na^+ 浓度增加实现的。其次,传统模拟中供水采用管道方法而非滴水控制,与真实生长环境相差很大。在

改进滴水方式、增加生长基质(在毛玻璃片上安置种晶)等设置后,Day和Henderson(2011)发现在低温条件下,温度是方解石生长量的主控因子,滴率变化影响很小;高温条件下,滴率与生长量之间不存在线性关系。

4 讨论和展望

上述研究表明,尽管石笋材料在古气候研究领域具有显著优势,但在技术方法方面也面临诸多挑战。一般来说,气候动力与土壤过程的年季旋回会造成石笋碳酸盐沉积不连续界面或矿物、结构交替转换,从而形成石笋微生长层(Genty et al., 2001; Tan Ming et al., 2006; Baker et al., 2008)。与树轮、湖泊纹泥、珊瑚、冰芯年层一样,可通过微层计数方法研建精细时标。然而,受到岩溶地化循环过程复杂性制约,石笋材料中各指标量化工作存在不同程度的滞后,在古气候、古环境研究中的优势尚未得到充分体现。作为石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 主要来源,大气降水同位素观测网络尚不完善。初步工作显示,中国东部降水 $\delta^{18}\text{O}$ 在南部和东北地区年内周期显著,在不同地区主要的地理控制因子不同(Liu Jianrong et al., 2008; 柳鉴容等, 2009)。而模拟工作常考虑大气降水 $\delta^{18}\text{O}$ 信号与其气候模态背景联系,如Langebroek等(2011)发现,在年内尺度上降水 $\delta^{18}\text{O}$ 模型(ECHAM5-wiso)模拟的1954~1999年欧洲中西部冬季降水 $\delta^{18}\text{O}$ 分布场与北大西洋涛动密切相关。在石笋指标量化解释方面,区域气候与降水 $\delta^{18}\text{O}$ 时间关系极为重要,因为在不同时间尺度上,两者之间关系可能有变化(Schmidt et al., 2007)。大气环流模型(Atmospheric General Circulation Model-AGCM)ECHAM-4表明,1979~1980年期间,模拟的降水 $\delta^{18}\text{O}$ 与亚洲夏季风指数及达索普冰芯 $\delta^{18}\text{O}$ 变化一致(Vuille et al., 2005)。GISS Model E-R模拟结果显示,在全新世10 ka以来,模拟的南亚降水 $\delta^{18}\text{O}$ 与亚洲季风区石笋记录千年尺度变化相似(LeGrande and Schmidt, 2009)。由于大气降水同位素时空变化机理复杂,现有模型采用不同输入边界,模拟结果存在一定差异,制约长序列模拟结果推广运用(Schmidt, 1999)。

洞穴实测可进一步认识雨水—石笋母液—现代沉积之间关系,建立石笋指标对气候、环境响应的经验模式,是定量解释石笋各指标气候环境意义的关键手段。然而,站点设置难、观测周期短、现代沉积缺等因素使得获取统计学意义上有效数据存在一定

难度。在气候量化重建中,树轮因精确交叉定年、分辨率高、量化程度高等特点备受关注。最近,亚洲季风区327个树轮序列编制的干旱图谱显示,区域内的干/湿变化和热带印度洋—太平洋海表温异常紧密相关(Cook et al., 2010),1876~1878年期间的维多利亚大干旱恰逢极端El Niño事件。7200余个欧洲树轮宽度记录发现,尽管现代升温剧烈,但水文变化在幅度和持续时间方面均大于气温变化(Büntgen et al., 2011),在公元250~600年罗马帝国灭亡期间气候变率逐渐增大。然而,树轮的发育受控于外部环境中限制性因子季节变化,特别是在东亚大陆内部,大多分布于温带和寒带(刘晓宏等, 2004; 邵雪梅等, 2007; 刘禹等, 2009),典型季风区存在较大空白(Cook et al., 2010)。而且,树轮宽度仅对高频气候信号较为敏感,主要反映温暖的生长季气候变化(Briffa, 2000),很难记录千年至百年尺度气候振荡(Cook et al., 1995; Esper et al., 2004)。因此,完善石笋指标量化体系不仅是树轮等陆相记录的重要补充,也是石笋微层古气候学自身发展的需要。

集成器测数据、历史气候资料、当地树轮资料可进一步校正同期石笋气候信号。由于现代器测资料以“月、季、年”为特征,因此,需要为石笋指标序列建立精确时标。“自然档案”中“年沉积性质”的微层理统计时,误差可达10%。对于近100 a石笋样品而言,可能存在 ± 10 a统计误差,尽管落在测年误差范围内,但却很难与以“月、季、年”为特征的气象记录进行有效对比,特别是石笋微层统计过程中“缺年”、“伪年层”等问题亟待解决。一般来说,石笋生长速率年际突变较小,厚/薄层耦递变特征显著,可在多年内维持相似速率。相邻(或同一洞穴)石笋受到相同气候信号影响,微层厚度可能表现出相似的变化趋势。因此,可借鉴树轮年表方法,绘制同一洞穴(或相邻滴水点)“石笋微层骨架图”,多样本集成确定年层时标并评估其误差。其次,石笋微层与冰芯年层、海洋湖泊纹泥同具有多参数分析潜力(如灰度、微量元素等)(Fairchild and Treble, 2009)。在连续发育过程中,不存在冰年层的压融和流变以及湖泊海洋纹泥的生物扰动,可依据多指标参比进一步提高年层统计的准确性。早期研究发现,石笋微层的氧、碳同位素(Burns et al., 2002; Liu Dianbing et al., 2008)、微量元素(Huang Shaopeng et al., 2000; Treble et al., 2003; Johnson et al., 2006; Matthey et al., 2008)可以反映洞穴温

度、水文条件季节性变化信息。因此,开展季节性多参数研究,扩大统计的样本量,对比和诊断洞内及不同洞穴石笋敏感参数季节性特征,采用多参数、多区域、多手段等交叉定年方法,建立石笋沉积与气候信号之间简单关联,可有效解决“缺年”、“伪年层”对年层统计造成的干扰。在器测记录中,1976/77年期间气候突变极为显著(Miller et al., 1994),可以此作为石笋各参数序列重要“参考点”进一步验证石笋年表。同时,在运用现代器测记录校正石笋指标时,要充分评估洞穴所在地的土壤—岩溶带“库效应”影响,因为渗流水的滞留时间会导致石笋指标滞后于气候变化。多个洞穴监测结果表明,洞穴滴水对外部大气降水响应时间一般不超过2个月甚至更短(李彬等;2000;周运超等,2004;Johnson et al., 2006; Ban Fengmei et al., 2008; 罗维均和王世杰;2008;Genty et al., 2008),说明洞穴上覆土壤和岩溶带对岩溶水的调蓄作用(“库效应”)微弱,不影响洞内微环境季节性变化,仅削弱季节性变化幅度。在“月、季”尺度上,洞穴碳酸盐沉积与气候信号之间可能存在简单关联,因此,石笋微层气候学具有高精度、高分辨率、信号保真度高潜力。

提高信/噪比,实现高分辨率是发展微层气候学的必要条件,也是获取与器测记录相似分辨率的石笋多参数序列的关键。对于厚约100~300 μm 的石笋年层,氧、碳同位素传统采样方法(如钻取法和刀削法)不仅手工控制存在难度,也很难避免相邻样混合,无法提高真实分辨率。离子探针(Treble et al., 2007)和激光熔融(Fairchild et al., 2006)等直接测试法会导致较大的测试误差(0.5‰~1.5‰),掩盖真实气候信号或造成同位素动力分馏。基于数控技术的微距法(micro-milling, Wurster et al., 1999)采样分辨率达到10 μm ,与传统质谱分析手段(MAT253)结合,样点分辨率和测试精度均满足季节尺度分析需要。几种方法对比分析显示(Spötl et al., 2006; Fairchild et al., 2006, 2009; Hoffmann et al., 2009),尽管离子探针和激光熔融等直接测试方法分析速度较快,但机理尚不成熟,获取的气候信号重现性较弱,特别是在分析精度上不及MAT253质谱分析(0.03‰~0.06‰)。在现有条件下,离子探针直接测试法缺乏标准控制,无法对异常测试结果进行评估。今后如能得以解决,则该方法可具有较广的应用前景。微量元素高分辨率采样及分析常采用ICP-MS、SIMS等方法,分辨率可达10~20 μm (Fairchild et al., 2006, 2009)。尽管微量元素在碳

酸钙中分配系数控制因子具有多源性(温度、降水、晶体形状)以及母液组成特征,大量分析揭示了显著的季节性响应(Treble et al., 2003; Johnson et al., 2006; Matthey et al., 2008),说明这些元素与洞穴环境及外界气候之间存在某种关联,对于石笋年层气候环境信号分析具有潜力。技术障碍和机理研究薄弱是石笋年代学和气候学面临的瓶颈,随着国际古气候界关注度提高和洞穴古气候界不懈努力,抓住并解决迫在眉睫的几个关键问题,洞穴石笋在古气候、古环境研究中必将焕发应有的活力。

参 考 文 献 / References

- 孔兴功,汪永进,吴江滢, Cheng Hai. 2003. 末次盛冰期连续3 ka 南京降水记录中 ENSO 周期. 科学通报, 48 (3): 277 ~ 281.
- 李彬,袁道先,林玉石,覃嘉铭,张美良. 2000. 桂林地区降水、洞穴滴水及现代洞穴碳酸盐碳同位素研究及其环境意义. 中国科学, 30 (1): 81 ~ 87.
- 李红春,顾德隆,陈文寄,袁道先,李铁英. 1998. 高分辨率洞穴石笋中稳定同位素应用——北京元大都建立后对森林资源的破坏— $\delta^{13}\text{C}$ 记录. 地质论评, 44 (5): 456 ~ 463.
- 林玉石,张美良,覃嘉铭,朱晓燕,程海. 2005. 再论洞穴石笋的沉积速率. 地质论评, 51 (4): 435 ~ 442.
- 刘东生,谭明,秦小光,赵树森,李铁英,吕金波,张德二. 1997. 洞穴碳酸钙微层理在中国的首次发现及其对全球变化研究的意义. 第四纪研究, 1: 41 ~ 51.
- 刘晓宏,秦大河,邵雪梅,陈拓,任贾文. 2004. 祁连山中部过去近千年温度变化的树轮记录. 中国科学, 34 (1): 89 ~ 95.
- 刘禹,安芷生, Linderholm H W, Chen Deliang, 宋慧明,蔡秋芳,孙军艳,田华. 2009. 青藏高原中东部过去2485年以来温度变化的树轮记录. 中国科学, 39 (2): 166 ~ 176.
- 刘浴辉,胡超涌,黄俊华,谢树成,陈正洪. 2005. 长江中游石笋年层厚度作为东亚夏季风强度代用指标的研究. 第四纪研究, 25 (2): 228 ~ 234.
- 柳鉴容,宋献方,袁国富,孙晓敏,刘鑫,王仕琴. 2009. 中国东部季风区大气降水 $\delta^{18}\text{O}$ 的特征及水汽来源. 科学通报, 54 (22): 3521 ~ 3531.
- 罗维均和王世杰. 2008. 贵州凉风洞大气降水—土壤水—滴水的 $\delta^{18}\text{O}$ 信号传递及其意义. 科学通报, 53 (17): 2071 ~ 2076.
- 邵雪梅,王树芝,徐岩,朱海峰,许新国,肖永民. 2007. 柴达木盆地东北部3500年树轮定年年表的初步建立. 第四纪研究, 27 (4): 477 ~ 485.
- 谭明,程海, Edwards R L, 侯居峙, 刘东生. 2000. 甚年轻石笋的TIMS- ^{230}Th 定年及其年层确定. 第四纪研究, 20 (4): 391.
- 谭明,侯居峙,程海. 2002. 定量重建气候历史的石笋年层方法. 第四纪研究, 22 (3): 209 ~ 219.
- 谭明. 2005. 石笋微层气候学的几个重要问题. 第四纪研究, 25 (2): 164 ~ 169.
- 谭明. 2009. 环流效应: 中国季风区石笋氧同位素短尺度变化的气候意义—古气候记录与现代气候研究的一次对话. 第四纪研究, 29 (5): 851 ~ 862.
- 谭明. 2011. 信风驱动的中国季风区石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 与大尺度温度场负耦合—从年代际变率到岁差周期的环流效应. 第四纪研究, 31 (6): 1086 ~ 1097.
- 杨勋林,张平中,陈发虎,扈治安,李红春,程海, Johnson K R, 刘

- 敬华, 安春雷. 2007. 近 50a 来青藏高原东部高海拔洞穴现代石笋氧同位素组成及其含义. 科学通报, 52 (6): 698 ~ 706.
- 杨勋林, 张平中, 袁道先, 程海. 2010. 黄龙洞年轻石笋的²¹⁰Pb 测年研究. 地质论评, 56 (4): 543 ~ 548.
- 张会领, 姜光辉, 林玉石, 殷建军, 覃嘉铭, 张美良, 张强, 韦丽丽, 朱晓燕. 2012. 洞穴石笋形成过程中的溶蚀作用研究. 地质论评, 58 (6): 1091 ~ 1100.
- 周运超, 王世杰, 谢兴能, 罗维均, 黎廷宇. 2004. 贵州 4 个洞穴滴水对大气降雨响应的动力学及其意义. 科学通报, 49 (21): 2220 ~ 2227.
- Affek H P, Bar-Matthews M, Ayalon A, Matthews A, Eiler J M. 2008. Glacial/interglacial temperature variations in Soreq cave speleothems as recorded by 'clumped isotope' thermometry. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 72: 5351 ~ 5360.
- Aggarwal P K, Fröhlich K, Kulkarni K M, Gourcy L L. 2004. Stable isotope evidence for moisture sources in the asian summer monsoon under present and past climate regimes. *Geophysical Research Letters*, 31, L08203, doi: 10.1029/2004GL019911.
- Asmerson Yand Polyak V J. 2004. Comment on Betancourt et al. (2002) "A test of annual resolution in stalagmites using tree rings." *Quaternary Research*, 61: 119 ~ 121.
- Baker A, Genty D, Dreybrodt W, Barnes W L, Mockler N J, Grapes J. 1998. Testing theoretically predicted stalagmites growth rate with recent annually laminated samples; Implications for past stalagmite deposition. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 62: 393 ~ 404.
- Baker A, Proctor C J, Barnes W L. 1999. Variations in stalagmite luminescence laminae structure at Poole's Cavern, England, AD 1910 ~ 1996: calibration of paleoprecipitation proxy. *The Holocene*, 9: 683 ~ 688.
- Baker A and Genty D. 2003. Comment on "A test of annual resolution in stalagmite using tree rings." *Quaternary Research*, 59: 476 ~ 478.
- Baker A, Asrat A, Fairchild I J, Leng M J, Wynn P M, Bryant C, Genty D, Umer M. 2007. Analysis of the climate signal contained within $\delta^{18}\text{O}$ and growth rate parameters in two Ethiopian stalagmites. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 71: 2975 ~ 2988.
- Baker A, Smith S L, Jex C, Fairchild I J, Genty D, Fuller L. 2008. Annually laminated speleothems: a review. *International of Journal of Speleology*, 37: 193 ~ 206.
- Baker A and Bradley C. 2010. Modern stalagmite $\delta^{18}\text{O}$: Instrumental calibration and forward modeling. *Global and Planetary Change*, 71: 201 ~ 206.
- Baldini J U L, McDermott F, Fairchild I J. 2002. Structure of the 8200-year cold event revealed by a speleothem trace element record. *Science*, 296: 2203 ~ 2206.
- Baldini J U L, McDermott F, Fairchild I J. 2006. Spatial variability in cave drip water hydrochemistry: Implications for stalagmite paleoclimate records. *Chemical Geology*, 235: 390 ~ 404.
- Ban Fengmei, Pan Genxing, Zhu Jian, Cai Binggui, Tan Ming. 2008. Temporal and spatial variations in the discharge and dissolved organic carbon of drip waters in Beijing Shihua Cave, China. *Hydrological Processes*, 22: 3749 ~ 3758.
- Banner J L, Guilfoyle A, James E W, Stern L A, Musgrove M. 2007. Seasonal variations in modern speleothem calcite growth in Central Texas, U. S. A. *Journal of Sedimentary Research*, 77: 615 ~ 622.
- Bar-Matthews M, Ayalon A, Gilmour M, Matthews A, Hawkesworth C J. 2003. Sea—land oxygen isotopic relationships from planktonic foraminifera and speleothems in the Eastern Mediterranean region and their implication for paleorainfall during interglacial intervals. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 67: 3181 ~ 3199.
- Baskaran M and Iliffe T M. 1993. Age determination of recent cave deposits using excess ²¹⁰Pb —A new technique. *Geophysical Research Letter*, 20: 603 ~ 606.
- Betancourt J L, Grissino-Mayer H D, Salzer M W, Swetnam T W. 2002. A test of "annual resolution" in stalagmites using tree rings. *Quaternary Research*, 58: 197 ~ 199.
- Betancourt J L, Grissino-Mayer H D, Saltzer M W, Swetnam T W. 2003. Reply to Baker and Genty's comments on "A test of annual resolution in stalagmite using tree rings." *Quaternary Research*, 59: 479.
- Boch R, Spötl C, Kramers J. 2009. High-resolution isotope records of early Holocene rapid climate change from two coeval stalagmites of Katerloch Cave, Austria. *Quaternary Science Reviews*, 28: 2527 ~ 2538.
- Briffa K R. 2000. Annual climate variability in the Holocene: interpreting the message of ancient trees. *Quaternary Science Reviews*, 19: 87 ~ 105.
- Broecker W S, Olson E A, Orr P C. 1960. Radiocarbon measurements and annual rings in cave formations. *Nature*, 185: 93 ~ 94.
- Brook G A, Rafter M A, Railsback L B, Sheen S-W, Lundberg J. 1999. A high-resolution proxy record of rainfall and ENSO since AD 1550 from layering in stalagmites from Anjohibe Cave, Madagascar. *The Holocene*, 9: 695 ~ 705.
- Buhmann D and Dreybrodt W. 1985a. The kinetics of calcite dissolution and precipitation in geologically relevant situations of karst areas: 1. Open system. *Chemical Geology*, 48: 189 ~ 211.
- Buhmann D and Dreybrodt W. 1985b. The kinetics of calcite dissolution and precipitation in geologically relevant situations of karst areas: 2. Closed system. *Chemical Geology*, 53: 109 ~ 124.
- Büntgen U, Tegel W, Nicolussi K, McCormick M, Frank D, Trouet V, Kaplan J O, Herzog F, Heussner K-U, Wanner H, Luterbacher J, Esper J. 2011. 2500 years of European climate variability and human susceptibility. *Science*, 331: 578 ~ 582.
- Burns S J, Fleitmann D, Mudelsee M, Neff U, Matter A, Mangini A. 2002. A 780-year annually resolved record of Indian Ocean monsoon precipitation from a speleothem from South Oman. *Journal of Geophysical Research*, 107, D20, 4434, doi: 10.1029/2001JD001281.
- Cai Binggui, Zhu Jian, Ban Fengmei, Tan Ming. 2011. Intra-annual variations of the calcite deposition rate of drip water in Shihua Cave, Beijing, China and its implications for palaeoclimatic reconstructions. *Boreas*, 10. 1111/j. 1502 - 3885. 2010. 00201. x. ISSN 0300 - 9483.
- Cheng Hai, Edwards R L, Wang Yongjin, Kong Xinggong, Ming Yanfang, Kelly M J, Wang Xianfeng, Gallup C D. 2006. A penultimate glacial monsoon record from Hulu record and two-phase glacial terminations. *Geology*, 34: 217 ~ 220.
- Cheng Hai, Edwards R L, Broecker W S, Denton G H, Kong Xinggong, Wang Yongjin, Zhang Rong, Wang Xianfeng. 2009. Ice age terminations. 326: 248 ~ 252.
- Clemens S C, Prell W L, Sun Youbing. 2010. Orbital-scale timing and mechanisms driving Late Pleistocene Indo-Asian summer monsoons: Reinterpreting cave speleothem $\delta^{18}\text{O}$. *Paleoceanography*, 25: PA4207, doi: 10.1029/2010PA001926.
- Condomines M and Rihs S. 2006. First ²²⁶Ra—²¹⁰Pb dating of a young speleothem. *Earth and Planetary Science Letters*, 250: 4 ~ 10.
- Cook E R, Briffa K R, Meko D M, Graybill D A, Funkhouser G. 1995. The 'segment length curse' in long tree-ring chronology development for paleoclimatic studies. *The Holocene*, 5: 229 ~ 237.
- Cook E R, Anchukaitis K J, Buckley B M, D'Arrigo R D, Jacoby G C,

- Wright W E. 2010. Asian monsoon failure and megadrought during the last millennium. *Science*, 328: 486 ~ 489.
- Cruz Jr F R, Burns S J, Jercinovic M, Karmann I, Sharp W D, Vuille M. 2007. Evidence of rainfall variations in Southern Brazil from trace element ratios (Mg/Ca and Sr/Ca) in a Late Pleistocene stalagmite. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 71: 2250 ~ 2263.
- Daëron M, Guo Weifu, Eiler J, Genty D, Blamart D, Boch R, Drysdale R, Maire R, Wainer K, Zanchetta G. 2011. ^{13}C — ^{18}O clumping in speleothem: Observations from natural caves and precipitation experiments. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 75: 3303 ~ 3317.
- Dansgaard W. 1964. Stable isotopes in precipitation. *Tellus*, 16: 438 ~ 468.
- Dasgupta S, Saar M O, Edwards R L, Shen Chuan-Chou, Cheng Hai, Alexander Jr E A. 2010. Three thousand years of extreme rainfall events recorded in stalagmites from Spring Valley Caverns, Minnesota. *Earth and Planetary Science Letters*, 300: 46 ~ 54.
- Day C C and Henderson G M. 2011. Oxygen isotopes in calcite grown under cave-analogue conditions. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 75: 3956 ~ 3972.
- Dayem K E, Molnar P, Battisti D S, Roe G H. 2010. Lessons learned from oxygen isotopes in modern precipitation applied to interpretation of speleothem records of paleoclimate from eastern Asia. *Earth and Planetary Science Letters*, 295: 219 ~ 230.
- Dennis P F, Rowe P J, Atkinson T C. 2001. The recovery and isotopic measurement of water from fluid inclusions in speleothems. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 65: 871 ~ 884.
- Dreybrodt W. 1980. Deposition of calcite from thin films of natural calcareous solutions and the growth of speleothems. *Chemical Geology*, 29: 80 ~ 105.
- Dreybrodt W. 1981. The kinetics of calcite precipitations from thin films of calcareous solutions and the growth of speleothems: revisited. *Chemical Geology*, 32: 237 ~ 245.
- Dreybrodt W, Eisenlohr L, Madry B, Ringer S. 1997. Precipitation kinetics of calcite in the system CaCO_3 — H_2O — CO_2 : The conversion to CO_2 by the slow process $\text{H}^+ + \text{HCO}_3^- \rightarrow \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$ as a rate limiting step. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 61: 3897 ~ 3904.
- Dreybrodt W. 1999. Chemical kinetics, speleothem growth and climate. *Boreas*, 28: 347 ~ 356.
- Duan Wuhui, Cai Binggui, Tan Ming, Liu Hong, Zhang Yong. 2012. The growth mechanism of the aragonitic stalagmite laminae from Yunnan Xianren Cave, SW China revealed by cave monitoring. *Boreas*, 41: 113 ~ 123.
- Esper J, Frank D C, Wilson R J S. 2004. Climate reconstruction: Low-frequency ambition and high-frequency ratification. *Eos Trans. AGU*, 85(12), 113, doi:10.1029/2004EO120002.
- Fairchild I J, Smith C L, Baker A, Fuller L, Spötl C, Mathey D, McDermott F, E I M F. 2006. Modification and preservation of environmental signals in speleothems. *Earth-Science Reviews*, 75: 105 ~ 153.
- Fairchild I J and Treble P C. 2009. Trace elements in speleothems as recorders of environmental change. *Quaternary Science Reviews*, 28: 449 ~ 468.
- Fantidis J and Ehhdalt D H. 1970. Variations of the carbon and oxygen isotopic composition in stalagmites and stalactites: evidence of non-equilibrium isotopic fractionation. *Earth and Planetary Sciences*, 10: 136 ~ 144.
- Fischer M J and Treble P C. 2008. Calibrating climate- $\delta^{18}\text{O}$ regression models for the interpretation of high-resolution speleothem $\delta^{18}\text{O}$ time series. *Journal of Geophysical Research*, 113, D17103, doi: 10.1029/2007JD009694.
- Fleitmann D, Burns S J, Mudelsee M, Neff U, Kramers J, Mangini A, Matter A. 2003a. Holocene Forcing of the Indian Monsoon Recorded in a Stalagmite from Southern Oman. *Science*, 300: 1737 ~ 1739.
- Fleitmann D, Burns S J, Neff U, Mangini A, Matter A. 2003b. Changing moisture sources over the last 330,000 years in Northern Oman from fluid-inclusion evidence in speleothems. *Quaternary Research*, 60: 223 ~ 232.
- Fleitmann D, Burns S J, Neff U, Mudelsee M, Mangini A, Matter A. 2004. Palaeoclimatic interpretation of high-resolution oxygen isotope profiles derived from annually laminated speleothems from Southern Oman. *Quaternary Science Reviews*, 23: 935 ~ 945.
- Fohlmeister J, Scholz D, Kromer B, Mangini A. 2011. Modelling carbon isotopes of carbonates in cave drip water. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 75: 5219 ~ 5228.
- Frappier A, Sahagian D, González L A, Carpenter S J. 2002. El Niño events recorded by stalagmite carbon isotopes. *Science*, 298: 565.
- Frappier A B, Sahagian D, Carpenter S J, González L A, Frappier B R. 2007. Stalagmite stable isotope record of recent tropical cyclone events. *Geology*, 35: 111 ~ 114.
- Frisia S, Borsato A, Spötl C, Villa I M, Cucchi F. 2005. Climate variability in the SE Alps of Italy over the past 17000 years reconstructed from a stalagmite record. *Boreas*, 34, 445 ~ 455.
- Genty D, Vokal B, Obelic B, Massault M. 1998. Bomb ^{14}C time history recorded in two modern stalagmites—importance for soil organic matter dynamics and bomb ^{14}C distribution over continents. *Earth and Planetary Science Letters*, 160: 795 ~ 809.
- Genty D, Baker A, Vokal B. 2001. Intra-and inter-annual growth rate of modern stalagmites. *Chemical Geology*, 176: 191 ~ 212.
- Genty D, Plagnes V, Causse C, Cattani O, Stievenard M, Falourd S, Blamart D, Ouahdi R, Van-Exter S. 2002. Fossil water in large stalagmite voids as a tool for paleoprecipitation stable isotope composition reconstruction and paleotemperature calculation. *Chemical Geology*, 184: 83 ~ 95.
- Genty D. 2008. Paleoclimate research in Villars Cave (Dordogne, SW-France). *International Journal of Speleology*, 37: 173 ~ 191.
- Ghosh P, Adkins J, Affek H, Balta B, Guo Weifu, Schauble E A, Schrag D, Eiler J M. 2006. ^{13}C — ^{18}O in carbonate minerals: A new kind of paleothermometer. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 70: 1439 ~ 1456.
- Hendy C H. 1971. The isotopic geochemistry of speleothems—I: The calculations of the effects of different modes of formation on the isotopic composition of speleothems and their applicability as paleoclimate indicators. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 35: 801 ~ 824.
- Hoffmann D, Spötl C, Mangini A. 2009. Micromill and in situ laser ablation sampling techniques for high spatial resolution MC-ICPMS U-Th dating of carbonates. *Chemical Geology*, 259: 253 ~ 261.
- Hoffmann D L, Beck J W, Richards D A, Smart P L, Singarayer J S, Ketchum T, Hawkesworth C J. 2010. Towards radiocarbon calibration beyond 28 ka using speleothems from the Bahamas. *Earth and Planetary Science Letters*, 289: 1 ~ 10.
- Hu Chaoyong, Henderson G M, Huang Junhua, Xie Shucheng, Sun Ying, Johnson K R. 2008. Quantification of Holocene Asian monsoon rainfall from spatially separated cave records. *Earth and Planetary Science Letters*, 266: 221 ~ 232.
- Huang Shaopeng, Pollack H N, Shen Poyu. 2000. Temperature trends over the past five centuries reconstructed from borehole

- temperatures. *Nature*, 403: 756 ~ 758.
- Huang Yiming and Fairchild I J. 2001. Partitioning of Sr^{2+} and Mg^{2+} into calcite under karst-analogue experimental conditions. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 65: 47 ~ 62.
- Jex C N, Baker A, Fairchild I J, Eastwood W J, Leng M J, Sloane H J, Thomas L, Bekaroglu E. 2010. Calibration of speleothem $\delta^{18}\text{O}$ with instrumental climate records from Thurkey. *Global and Planetary Change*, 71: 207 ~ 217.
- Jex C N, Baker A, Eden J M, Eastwood W J, Fairchild I J, Leng M J, Thomas L, Sloane H J. 2011. A 500 yr speleothem-derived reconstruction of late autumn-winter precipitation, northeast Turkey. *Quaternary Research*, 75: 399 ~ 405.
- Johnson K R and Ingram B L. 2004. Spatial and temporal variability in the stable isotope systematics of modern precipitation in China: implications for paleoclimate reconstructions. *Earth and Planetary Science Letters*, 220: 365 ~ 377.
- Johnson K R, Hu Chaoyong, Belshaw N S, Belshaw N S, Henderson G M. 2006. Seasonal trace-element and stable-isotope variations in a Chinese speleothem; The potential for high-resolution paleomonsoon reconstruction. *Earth and Planetary Science Letters*, 244: 394 ~ 407.
- Kaufmann G. 2003. Stalagmite growth and paleo-climate: the numerical perspective. *Earth and Planetary Science Letters*, 214: 251 ~ 266.
- Kaufmann G and Dreybrodt W. 2004. Stalagmite growth and paleo-climate: an inverse approach. *Earth and Planetary Science Letters*, 224: 529 ~ 545.
- Kim A-T and O'Neil J R. 1997. Equilibrium and nonequilibrium oxygen isotope effects in synthetic carbonates. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 61: 3461 ~ 3475.
- Kluge T, Marx T, Scholz D, Niggemann S, Mangini A, Aeschbach-Hertig W. 2008. A new tool for paleoclimate reconstruction: Noble gas temperatures from fluid inclusions in speleothems. *Earth and Planetary Science Letter*, 269: 408 ~ 415.
- Lachniet M S. 2009. Climatic and environmental controls on speleothem oxygen-isotope values. *Quaternary Science Reviews*, 28: 412 ~ 432.
- Langebroek P M, Werner M, Lohmann G. 2011. Climate information imprinted in oxygen-isotopic composition of precipitation in Europe. *Earth and Planetary Science Letters*, 311: 144 ~ 154.
- LeGrande A N and Schmidt G A. 2009. Sources of Holocene variability of oxygen isotopes in paleoclimate archives. *Climate of the Past*, 5: 441 ~ 455.
- Liu Dianbing, Wang Yongjin, Cheng Hai, Edwards R L, Kong Xinggong, Wang Xianfeng, Wu Jiangying, Chen Shitao. 2008. A detailed comparison of Asian monsoon intensity and Greenland temperature during the Allerød and Younger Dryas events. *Earth and Planetary Science Letters*, 272: 691 ~ 597.
- Liu Jianrong, Song Xianfang, Yuan Guofu, Sun Xiaomin, Liu Xin, Wang Zhimin, Wang Shiqi. 2008. Stable isotopes of summer monsoonal precipitation in southern China and the moisture sources evidence from $\delta^{18}\text{O}$ signature. *Journal of Geophysical Sciences*, 18: 155 ~ 165.
- Maher B A. 2008. Holocene variability of the East Asian summer monsoon from Chinese cave records: a re-assessment. *The Holocene*, 18: 861 ~ 866.
- Mattey D, Lowry D, Duffet J, Fisher R, Hodge E, Frisia S. 2008. A 53 year seasonally resolved oxygen and carbon isotope record from a modern Gibraltar speleothem; Reconstructed drip water and relationship to local precipitation. *Earth and Planetary Science Letters*, 269: 80 ~ 95.
- Matthews A, Ayalon A, Bar-Matthews M. 2000. D/H ratios of fluid inclusions of Soreq Cave (Israel) speleothems as a guide to the Eastern Mediterranean Meteoric Line relationships in the last 120 ky. *Chemical Geology*, 66: 183 ~ 191.
- McDonald J and Drysdale R. 2004. The 2002 ~ 2003 El Niño recorded in Australian cave drip waters: implications for reconstructing rainfall histories using stalagmites. *Geophysical Research Letters*, 31, L22202. doi:10.1029/2004GL020859.
- McGarry S, Bar-Matthews M, Matthews A, Vaks A, Schilman B, Ayalon A. 2004. Constrains on hydrological and paleotemperature variations in the Eastern Mediterranean region in the last 140 ka given by the δD values of speleothem fluid inclusions. *Quaternary Science Reviews*, 23: 919 ~ 934.
- Miller A J, Cayan D R, Barnett T P, Graham N E, Oberhuber J M. 1994. The 1976 ~ 77 climate shift of the Pacific Ocean. *Oceanography*, 7: 21 ~ 26.
- Moberg A, Sonechkin D M, Holmgren K. 2005. Highly variable Northern Hemisphere temperatures reconstructed from low-and high-resolution proxy data. *Nature*, 433: 613 ~ 617.
- Mühlinghaus C, Scholz D, Mangini A. 2007. Modelling stalagmite growth and $\delta^{13}\text{C}$ as a function of drip interval and temperature. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 71: 2780 ~ 2790.
- O'Neil J R, Clayton R N, Mayeda T K. 1969. Oxygen isotope fractionation in divalent metal carbonates. *Journal of Chemical Physics*, 51: 5547 ~ 5558.
- Pauling A, Luterbacher J, Wanner H. 2003. Evaluation of proxies for European and North Atlantic temperature field reconstructions. *Geophysical Research Letters*, 30, doi: 10.1029/2003GL017589.
- Polyak V J and Asmerson Y. 2001. Late Holocene climate and cultural changes in the southwest United States. *Science*, 294: 148 ~ 151.
- Proctor C J, Baker A, Barnes E L, Gilmour M A. 2000. A thousand year speleothem proxy record of North Atlantic climate from Scotland. *Climate Dynamics*, 16: 815 ~ 820.
- Proctor C J, Baker A, Barnes E L. 2002. A three thousand year record of North Atlantic climate. *Climate Dynamics*, 19: 449 ~ 454.
- Ramanov D, Kaufmann G, Dreybrodt W. 2008. Modeling stalagmite growth by first principles of chemistry and physics of calcite precipitation. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 72: 423 ~ 437.
- Rozanski K, Araguas-Araguas L, Gonfiantini R. 1993. Isotopic patterns in modern global precipitation. *Geophysical Monograph*, 78: 1 ~ 36.
- Schauble E A, Ghosh P, Eiler J M. 2006. Preferential formation of ^{13}C — ^{18}O bonds in carbonate minerals, estimated using first-principle lattice dynamics. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 70: 2510 ~ 2529.
- Scheidegger Y, Brennwald M S, Fleitmann D, Jeannin P Y, Wieler R, Kipfer R. 2011. Determination of Holocene cave temperature from Kr and Xe concentrations in stalagmite fluid inclusions. *Chemical Geology*, 288: 61 ~ 66.
- Schmidt G A. 1999. Error analysis of paleosalinity calculations. *Paleoceanography*, 14: 422 ~ 429.
- Schmidt G A, LeGrande A N, Hoffmann G. 2007. Water isotope expressions of intrinsic and forced variability in a coupled ocean-atmosphere model. *Journal of Geophysical Research*, 112, D10103, doi: 10.1029/2006JD007781.
- Sinha A, Cannariato K G, Stott L, Cheng Hai. 2007. A 900-year (600 to 1500 A. D.) record of the Indian summer monsoon precipitation from the core monsoon zone of India. *Geophysical Research Letters*, 34, L16707, doi: 10.1029/2007GL030431.

- Smith C L, Baker A, Fairchild I J, Frisia S, Borsato A. 2006. Reconstructing hemispheric-scale climates from multiple stalagmite records. *International Journal of Climatology*, 26: 1417 ~ 1424.
- Spötl C and Mathey D. 2006. Stable isotope microsampling of speleothems for palaeo-environmental studies: A comparison of microdrill, micromill and laser ablation techniques. *Chemical Geology*, 235: 48 ~ 58.
- Sturm C, Vimeux F, Krinner G. 2007. Intraseasonal variability in South America recorded in stable water isotopes. *Journal of Geophysical Research*, 112, D20118, doi: 10.1029/2006JD008298.
- Stute M, Schlosser P, Clark J F. 1992. Paleotemperatures in the southwestern United States derived from noble gases in groundwater. *Science*, 256: 1000 ~ 1003.
- Tan Ming, Liu Tungsheng, Hou Juzhi, Qin Xiaoguang, Zhang Hucui, Li Tiejing. 2003. Cyclic rapid warming on centennial-scale revealed by a 2650-year stalagmite record of warm season temperature. *Geophysical Research Letters*, 30. doi: 10.1029/2003GL017352.
- Tan Ming, Baker A, Genty D, Smith C, Esper J, Cai Binggui. 2006. Applications of stalagmite laminae to paleoclimate reconstructions; Comparison with dendrochronology/climatology. *Quaternary Science Reviews*, 25: 2103 ~ 2117.
- Tan Ming, Shao Xuemei, Liu Jian, Cai Binggui. 2009. Comparative analysis between a proxy-based climate reconstruction and GCM-based simulation of temperatures over the last millennium in China. *Journal of Quaternary Science*, 24: 547 ~ 551.
- Treble P, Shelley J M G, Chappell J. 2003. Comparison of high resolution sub-annual records of trace elements in a modern (1911 ~ 1992) speleothem with instrumental climate data from southwest Australia. *Earth and Planetary Science Letters*, 216: 141 ~ 153.
- Treble P C, Chappell J, Gagan M K, McKeegan K D, Harrison T M. 2005. In situ measurement of seasonal $\delta^{18}\text{O}$ variations and analysis of isotopic trends in a modern speleothem from southwest Australia. *Earth and Planetary Science Letters*, 233: 17 ~ 32.
- Treble P C, Schmitt A K, Edwards R L, McKeegan K D, Harrison T M, Grove M, Cheng Hai, Wang Yongjin. 2007. High resolution Secondary Ionisation Mass Spectrometry (SIMS) $\delta^{18}\text{O}$ analyses of Hulu Cave speleothem at the time of Heinrich Event 1. *Chemical Geology*, 238: 197 ~ 212.
- van Breukelen M R, Vonhof H B, Hellstrom J C, Wester W C G, Kroon D. 2008. Fossil dripwater in stalagmites reveals Holocene temperature and rainfall variation in Amazonia. *Earth and Planetary Science Letters*, 275: 54 ~ 60.
- Vonhof H B, van Breukelen M R, Pastma O, Rowe P J, Atkinson T C, Kroon D. 2006. A continuous-flow crushing device for on-line $\delta^2\text{H}$ analysis of fluid inclusion water in speleothems. *Rapid Communications in Mass Spectrometry*, 20: 2553 ~ 2558.
- Vuille M, Werner M, Bradley R S, Keimig F. 2005. Stable isotopes in precipitation in the Asian monsoon region. *Journal of Geophysical Research*, 110, D23108, doi: 10.1029/2005JD006022.
- Wackerbarth A, Scholz D, Fohlmeister J, Mangini A. 2010. Modelling the $\delta^{18}\text{O}$ values of cave drip water and speleothem calcite. *Earth and Planetary Science Letters*, 299: 387 ~ 397.
- Wang Yongjin, Cheng Hai, Edwards R L, An Zhisheng, Wu Jiangying, Shen Chuanchou, Dorale J A. 2001. A high-resolution absolute-dated Late Pleistocene monsoon record from Hulu Cave, China. *Science*, 294: 2345 ~ 2348.
- Wang Yongjin, Cheng Hai, Edwards R L, Kong Xingong, Shao Xiaohua, Chen Shitao, Wu Jiangying, Jiang Xiuyang, Wang Xianfeng, An Zhisheng. 2008. Millennial-and orbital-scale changes in the East Asian monsoon over the past 224,000 years. *Nature*, 451: 1090 ~ 1093.
- Wiedner E, Scholz D, Mangini A, Polag D, Mühlinghaus C, Segl M. 2008. Investigation of the stable isotope fractionation in speleothems with laboratory experiments. *Quaternary International*, 187: 15 ~ 24.
- Wurster C M, Patterson W P, Cheatham M M. 1999. Advances in micromilling techniques; a new apparatus for acquiring high-resolution oxygen and carbon stable isotope values and major/minor element ratios from accretionary carbonate. *Computers & Geosciences*, 25: 1159 ~ 1166.
- Yadava M G, Ramesh R, Pant G B. 2004. Past monsoon rainfall variations in peninsular India recorded in a 331-year-old speleothem. *The Holocene*, 14: 517 ~ 524.
- Yadava M G and Ramesh R. 2005. Monsoon reconstruction from radiocarbon dated tropical Indian speleothems. *The Holocene*, 15: 48 ~ 59.
- Monsoon reconstruction from radiocarbon dated tropical Indian speleothems. *The Holocene*, 15: Yuan Daoxian, Cheng Hai, Edwards R L, Dykoski A C, Kelly M J, Zhang Meiliang, Qing Jiaming, Lin Yushi, Wang Yongjin, Wu Jiangying, Dorale J A, An Zhisheng, Cai Yanjun. 2004. Timing, duration, and transitions of the last interglacial Asian monsoon. *Science*, 304: 575 ~ 578.
- Zhang Pingzhong, Cheng Hai, Edwards R L, Chen Fahu, Wang Yongjin, Yang Xunlin, Liu Jian, Tan Ming, Wang Xianfeng, Liu Jinghua, An Chunlei, Dai Zhibao, Zhou Jing, Zhang Dezhong, Jia Jihong, Jin Liya, Jonsson K R. 2008. A test of climate, sun, and culture relationships from an 1810-year Chinese cave record. *Science*, 322: 940 ~ 942.
- Zhang Rong, Schwarzer H P, Ford D C, Schroeder F S, Beddows P A. 2008. An absolute paleotemperature record from 10 to 6 ka inferred from fluid inclusion D/H ratios of a stalagmite from Vancouver Island, British Columbia, Canada. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 72: 1014 ~ 1026.

Quantitative Studies on the Multi-proxies from the Stalagmites

LIU Dianbing

College of Geography Science, Nanjing Normal University, Nanjing, 210023

Abstract: The cave deposits, especially the stalagmites, are widely distributed and precisely dated terrestrial archives for paleoclimate studies, the stable oxygen isotope sequences from which were believed to duplicate well between spatially-separated caves. Nevertheless, climatic interpretation of oxygen isotope from the stalagmites, particularly in the Asian monsoon regions, has been challenged due to insufficient quantitative studies. Thus, previous investigations on quantitative studies of speleothem indicators, i. e. $\delta^{18}\text{O}$, $\delta^{13}\text{C}$, trace element, layer

thickness and growth dynamics are summarized in this paper. Compared with other geologic records, some urgent issues are tentatively put forward involving calibration with monitoring data, multi-proxy studies and combination with the regional tree-ring data. The aim for this paper is to further understand the quantitative relationship between stalagmite proxies and climate, and promote the regional and global comparison with the speleothem records.

Key words: Stalagmite; Multi-proxy studies; Quantitative reconstruction; Empirical model

《地质论评》、《地质学报》(中、英文版) 征稿简则

《地质论评》、《地质学报》是中国地质学会主办的地质科学学术刊物。《地质论评》主要登载各种探讨、争鸣、评述类论文和新技术、新方法论文。《地质学报》反映地质科学各分支学科及边缘学科中最新、最高水平的基础理论研究和基本地质问题研究成果。《地质学报》(中文版)和《地质学报》(英文版)分别独立刊载论文。

三刊在国内、外地学界均有很高的影响力,被国内外多家、多文种文献索引、文摘、全文数据库和出版网站收录(如万方、CNKI、维普、《中国地质文摘》、SCI、CA、BIG等),曾获国家和中国科协等多个奖项,《地质论评》和《地质学报》(中文版)均为中文核心期刊。

自2001年起,《地质学报》(中文版)和《地质论评》均改版为大16开(210mm×297mm)。《地质论评》和《地质学报》(英文版)为双月刊;2006年起,《地质学报》(中文版)改为月刊。2012年起《地质论评》每期页码增加至200页。

1 《地质学报》、《地质论评》编辑部与作者的约定

(1) 作者应对所投稿件拥有无可争议的著作权。作者应保证稿件没有一稿多投:投稿我刊之前未投给任何其他期刊,或虽曾投给其他期刊,但已被拒绝刊用。投稿我刊起的90日内,不要再投给任何其他期刊,除非收到我刊拒稿信息。作者必须保证我刊的首发权:在我刊刊出之前(我刊自收到您的稿件到正式发表,一般需要6~10个月;若稿件特殊,需在更短的时间内见刊,请与编辑部联系)不得以任何文种在任何国家或地区以任何形式发表(但可以在学术交流会口头交流并可向学术交流会提供不超过1000字的摘要)。稿件一旦被本刊录用,作者即将论文整体及附属于论文的图、表等可许可使用的著作权——包括但不限于复制权、发行权、信息网络传播权、翻译权、汇编权和上述权利的许可使用权转交本刊。许可期限为论文著作权的法定保护期为限,许可地域范围为全世界。作者依著作权法行使上述权利,或向第三方转让上述权利时,不得损害本刊利益(例如,汇编入其他论文集时,可以去掉本刊的刊头、书眉等,并可作文字、图件和版式等修改,但必须注明曾在本刊刊出,并注明刊载的卷、期、页码和责任编辑等信息)。

(2) 为适应我国信息化建设,扩大本刊及作者知识信息交流渠道,本刊已被国内外多家、多文种文献索引、文摘、全文数据库和出版网站收录,作者著作权使用费与本刊稿酬将在我刊刊出时一次性给付。如作者不同意文章被第三方摘录、索引,或不同意被网刊收录、传播,请在来稿时声明。

(3) 为了更高效地办刊,《地质论评》、《地质学报》、《地质学报》(英文版)开通了网上投稿、审稿、稿件处理状况查询系统。本系统中,作者可以网上投稿、查询稿件处理进度,专家可以网上审稿。《地质论评》的网址为: <http://www.geojournals.cn/georev>。《地质学报》中文版的网址为: <http://www.geojournals.cn/dzxb>。《地质学报》(英文版)的网址为: <http://www.geojournals.cn/dzben>。作者投稿时请自留底稿。

(4) 考虑只有极少数读者和专家尚不方便在线审稿、在线投稿,《地质论评》编辑部建议,为了审稿更方便快捷,请您尽量将稿件投送至网上系统中。但我们仍将接收少数老专家的 email 赐稿(请发至 georeview@cags.ac.cn 或编辑的个人邮箱)。《地质学报》中、英文版均只接受网上系统投稿。请将文、图、表放入同一个 Microsoft Word

文件或制作一份 PDF 文件,大小不宜超过 15 M,最好小于 10M(送审稿中可插入分辨率较低的图件,接收后再提供高分辨率的图件供印刷用),若为 PDF 文件,须同时提交一份可供批注的文本文件。

(5) Email 投稿的被接收与否以编辑部网上回信为准(请注意,我们收到您的 email 赐稿时一定会给您一个明确的收妥并进入审稿程序的答复,若您未收到明确答复或只收到自动回覆,请继续联系。对于较大附件的投稿,最好在投稿 email 之外同时发送一个不带附件的 email,因为较大附件的邮件常会在途中丢失)。

(6) 编辑部承诺一般在 90 日内给出刊用与否的通知。作者在 90 日内未收到退稿通知时不应将稿件另投他刊,否则视为一稿多投。对一稿多投的稿件,本刊无条件弃用;对其作者及其所在团队,编辑部保留有关权利。

(7) 对决定录用的稿件,作者应根据编辑部提供的修改意见修改后,向编辑部提交论文全文和图件的全部电子文件。《地质论评》和《地质学报》(中文版)录用的稿件正文以用方正(或华光)系统排版最好,若为 Microsoft Word 文件也很好,若为其他系统也没关系,请在原系统文件之外再拷贝一份纯文本文件。《地质学报》(英文版)则以 Microsoft Word 排版为好。必须提供单独的图形格式文件,若为 CorelDraw 编辑的文件,最好,直接提供即可,编辑部可代为修改;若为其他系统编辑的文件,请提供 600dpi 的 TIF 文件(压缩后发送)。

(8) 稿件文责自负,若进行实质性修改,须征得作者同意。

2 《地质学报》(英文版)

投向《地质学报》(英文版)的稿件,请尽量附相应的中文稿,以备审、编、校时准确理解英文稿的含意。英文稿的行文必须规范、通顺,且提供完整的电子文件,以便及时送国内外专家审阅。图件用英文标注,但尽量附中文标注的草图,以备审、校。

3 对投稿内容的要求

(1) 题目:文章标题要力求精炼、准确,一般不超过 25 个汉字。

(2) 作者:作者署名及署名顺序由作者自行确定,每一位作者应是文章真正的著作权人。

(3) 作者单位:是作者完成本文时的所在单位,请用全称,并注明所在城市及邮政编码。

(4) 内容提要:一般应写成报道性文摘,交代清楚论文的目的、方法、主要证据、结果和结论等。但综述、评论性论文可写成指示性文摘。

(5) 关键词:必须是意义明确的术语,鉴于地质学论文的特点,关键词应选取能准确反映研究方向、研究领域及研究地点的词。

(6) 引言:本刊不标“引言”字样,但必须有引言节,交代清楚本文(研究)的目的,简要介绍本文研究领域的研究历史、现状、存在问题;本文的方法、目标及创新之处等。

(7) 正文:一般应有地质背景、研究方法、研究结果、讨论、结论等几个部分(尤其对投向英文版的论文,必须包含这些内容)。

(8) 图和表:为了使论文清晰明了,应多用图和表。注意,首次发表的数据必须列表给出,不得以图代替。凡涉及国界的图件必须绘制在地图出版社公开出版的最新地理底图上。设计图的宽度时应优先选择以下 3 个尺寸:80mm(单栏)、168mm(通栏)、240mm(卧排),最大尺寸为 168mm×240mm。

(下转第 961 页)