

山西
财经
大学
学术
文库

Shanxi University of Finance and Economics

岩溶洞穴

沉积物的现代过程研究

班凤梅◎著

〔山西财经大学学术文库〕



岩溶洞穴沉积物的 现代过程研究

班凤梅◎著

中国财政经济出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

岩溶洞穴沉积物的现代过程研究 / 班凤梅著. ——北京: 中国财政经济出版社, 2014.4

(山西财经大学学术文库)

ISBN 978 - 7 - 5095 - 5326 - 8

I. ①岩… II. ①班… III. ①溶洞—现代沉积物—石林—研究 IV. ①P931.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 074999 号

责任编辑: 雷 婷

责任校对: 周秀荣

封面设计: 张立娟

版式设计: 兰 波

中国财政经济出版社出版

URL: <http://ckfz.cfeph.cn>

E-mail: ckfz@cfeph.cn

(版权所有 翻印必究)

社址: 北京市海淀区阜成路甲 28 号 邮政编码: 100142

发行处电话: 010 - 88190406 财经书店电话: 010 - 64033436

北京厚诚则铭印刷科技有限公司印刷

787 × 1092 毫米 16 开 8.75 印张 140 000 字

2014 年 4 月第 1 版 2014 年 4 月北京第 1 次印刷

定价 20.00 元

ISBN 978 - 7 - 5095 - 5326 - 8 / P · 0014

(图书出现印装问题, 本社负责调换)

本社质量投诉电话: 010 - 88190744

打击盗版举报热线: 010 - 88190492、QQ: 634579818

总 序

何谓大学？囊括大典，网罗众学之学府也。大学既是教育机关，也是研究机关。它不仅要传授已有的知识，并且要产生新的知识。办好一所大学，关键在于抓好“五学”，即学科、学术、学者、学生、学风。其中，学科是龙头，它规定了学校发展的资源禀赋，决定了学校建设的质量和空间，而学科建设的关键在于培育一个共生共长、良性运转的学科生态系统。

山西财经大学作为一所多科性财经类大学，确立了“以生态规划布局、以布局凸显优势，以优势凝练方向、以方向组建团队，以团队配置资源、以资源优化生态”的学科建设发展思路，通过挖掘自身的学科优势与特色，准确定位，合理布局，促进学科间的交叉互融、共生共长，努力培育和营造出一个能良性运转和可持续发展的学科生态。

一、以生态规划布局、以布局凸显优势

学科生态这个概念是借助生态学的概念来阐释学科布局的，是指在学科布局上需要注意学科的学术特征和发展习性，将有发展优势的同类学科集聚为学科群落，并带动对优势学科发展起支撑作用的相关学科，构建起交叉互融、共生共长的学科有机体。这就要求我们在学科结构布局上求优，不唯全，扬优扶重，顺势而为，准确捕捉学科发展机遇。

因此，我校建设以经济学、管理学、法学为学科高地，进一步明确了重点学科、重点专业、重点创新平台，以及各个支撑学科与主干学科之间的内在联系，构建具有财经特色的学科生态。这样的布局不仅利于凸显我校学科特色，拓展我校和省内兄弟院校差异化竞争的发展空间，还有利于凸显我校的办学特色，提升财经类专业人才培养质量，加强服务地方经济建设能力。

二、以优势凝练方向，以方向组建团队

学科研究方向是体现学科优势的落脚点。在学科发展方向的选择上突出建

设重点，注重另辟蹊径，在学习他校成功经验的同时，加强消化、吸收、内化，务求通过创新形成突破，努力形成自身学科优势与特色。有了特色鲜明的研究方向，能否真正转化为实实在在的学科优势，关键在于学科团队。因此，学校特别重视学科团队建设，将其作为学科建设的主要工作来抓，长期坚持“引进与培养”并重的原则，稳步提升人才队伍的科研素养、学缘结构以及团队协作能力。

三、以团队配置资源，以资源优化生态

有了稳定的学科研究方向和高水平的学科研究团队，就具备了构建良好学科生态的硬件条件，想要收到预期的建设成效，还应合理配置学科资源，优化学科建设外环境。为此，学校将学科建设视为“一把手”工程来抓，通过成立学科群工作组，出台学科建设专项经费管理办法、启动中青年骨干教师提升工程等一系列措施进一步理顺学科管理机制，赋予学科工作组和学科带头人相应人、财、物的调动和支配权，促进学科团队成长和学科资源合理配置。

大学既是教书育人的圣地，又是科学研究的净土；既是社会进步引领者，又是社会发展助推器。我校办学历史悠久、财经特色鲜明，为山西乃至全国输出了大量高水平优秀人才，为服务地方社会经济建设不遗余力。面对当前高等教育发展的新形势，学校确定了由教学型大学向教学研究型大学转型的发展战略，坚持走以质量提升为核心的内涵式发展之路。组织出版《山西财经大学学术文库》不仅是对学校60多年学术文化和学术传统的历史性继承，也是学校在战略发展阶段所采取的重要举措。

本套学术文库是我校骨干教师的代表性学术成果，凝聚了作者们多年的研究心血，体现了我校的研究特色和学科优势。我们希望以此为契机，秉承“修德立信、博学求真”的校训，弘扬“明礼诚信、艰苦创业”的晋商精神，促进学校学科建设水平再上一个新台阶。

校长：郭泽光

2013年12月

前 言

全球变暖的事实让人们越来越关注我们赖以生存的地球的未来气候变化，围绕全球变暖成因与对策问题的争论已经从科学问题上升到国际政治层面。IPCC 的四次评估报告对气候及其成因的不同阐述，显示了科学界对气候变化的科学认识的发展。从 1990 年到 2007 年，全球气候变化的呈现出五个明显特征：全球大气升温明显；全球海洋升温并引起海平面上升；北极地区出现明显的变暖现象；极端天气事件日益频繁；区域降雨量发生显著变化。虽然 IPCC 报告代表着气候变化的主流观点，但关于气候变化还存在不少争论，其中两个重要的问题仍值得进一步的科学论证：其一，气候变化的趋势问题，即气候是变冷还是变暖；其二，气候变化的原因问题，全球变暖究竟是地球气候系统自身变化的节拍？抑或是人类活动影响的结果？也就是说人类活动导致的温室气体排放不断加剧是全球变暖的“罪魁祸首”还是“助封为虐”？回答这些问题的关键在于如何获得尽可能多的地球历史时期气候变化档案，从而客观地重建全球气候变化历史。由于现代仪器观测的气象资料最长不过数百年，对地球古气候变化的研究不得不借助于各种自然记录，如冰芯、深海沉积、湖泊沉积、黄土、珊瑚、树木年轮以及岩溶沉积等。

洞穴沉积物石笋作为高分率气候指标的记录体，因其自身的诸多优势，在古气候、古环境重建研究中发挥着重要作用。与其他材料相比，石笋具有以下一些优势：可以用放射性同位素测年方法 (Th230) 获得高精度的绝对年代，并可以高分辨率地取样分析，获得年际、甚至季节的气候变化信息；部分石笋具有自我计年和记录气候信息的微生长层（石笋微层），可以开展逐年定量重建的石笋微层气候学研究；地理分布广，从沿海到内陆，从南到北均有分布；沉积时间跨度长，从现在可以追溯至数十万年前。近年来，已有大量研究成果表明，石笋的碳和氧同位素、年层厚度甚至一些痕量元素均可作为古气候记录的良好

指标。但洞穴沉积物的形成机制的研究相对较少。本书主要针对洞穴沉积物形成过程中的通道、载体以及介质的影响作用，并引用了多年来作者对石花洞洞穴观测的第一手资料分析，希望与广大同行交流学习，为石笋气候学的向前推进尽绵薄之力！

作者

2013年9月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 全球气候变化与古气候变化	1
1.2 洞穴沉积物的古气候记录	2
1.3 岩溶洞穴沉积现代过程研究的意义	7
第 2 章 岩溶地质与方法手段	16
2.1 供试洞穴—北京石花洞地质概况	16
2.2 洞穴滴水类型及观测点的选取	22
2.3 观测内容与分析方法	22
第 3 章 洞穴上覆土壤环境及其有机碳变化	27
3.1 土壤的温度和湿度	27
3.2 土壤 CO ₂ 浓度	30
3.3 小结	41
第 4 章 洞穴滴水滴率变化及水文动力学过程	42
4.1 洞穴滴水滴率及地表降水的变化	43
4.2 滴水类型划分及补给通道	46
4.3 滴水滞后效应	49
4.4 小结	50
第 5 章 洞穴滴水地球化学特征	51
5.1 洞穴滴水酸度和电导率	52

CONTENTS

5.2 洞穴滴水钙、镁及其镁钙比	54
5.3 滴水碳酸氢根	61
5.4 洞穴滴水硫酸银	63
5.5 洞穴滴水硅	71
5.6 洞穴滴水镁钙比和硅钙比的指示意义	74
5.7 小结	75
第 6 章 滴水方解石沉积速率及其影响因素	76
6.1 方解石饱和指数与沉积量	77
6.2 洞穴环境	81
6.3 石笋沉积量的影响因素	82
6.4 小结	87
第 7 章 滴水 DOC 的时空变化及其意义	88
7.1 滴水可溶性有机碳	89
7.2 滴水 DOC 变化与土壤 DOC 信号传输	98
7.3 滴水 DOC 与石笋古气候记录	100
7.4 小结	101
第 8 章 现代气候和环境变化与石笋沉积	102
8.1 气候环境信号的传递	102
8.2 总结与展望	105
参考文献	108
后记	129

第 1 章 绪 论

1.1 全球气候变化与古气候变化

全球气候变暖是近年来各国科学杂志和新闻媒体出现频率最高也是最为关注的焦点之一，其事例不胜枚举：非洲乞力马扎罗山的雪已经融化了 82%，欧洲阿尔卑斯山的“雪帽子”在缩小，中国北方的冻土面积也在减少。有学者指出，全球气候变暖可能会使极端气候出现的频率和强度不断增加。在一些地区，龙卷风、强雷暴以及狂风和冰雹会增多，世界许多地区将遭受更频繁、更持久或更严重的干旱。这些极端事件在过去几年中已在一些地区得到验证。导致全球变暖的主要原因是自然驱动还是人为干扰，目前还存在争论。因此，深入了解气候变化的原因和规律是十分必要的，而对于气候变化的原因及规律的研究就离不开对古气候的研究。由于仪器测量记录在 20 世纪以前很少，因此要研究过去几千年内的气候变化就必须借助于间接的气候指—可记录过去气候变化的“自然时钟”，即具有年、季旋回界面因而能够自我记年，同时能对气候或环境变化信息按年记录的自然材料。洞穴石笋是继树轮、珊瑚、纹泥和冰芯之后较晚发现的一种自然时钟，与其他气候记录指标相比，洞穴石笋具有可准确定年、分布广泛（从沿海到内陆，从热带到寒带都能找到）、时间跨度大（可从现代追溯到数千、数万年前）以及代用指标丰富（生长速率、微层厚度、灰度、微量元素、荧光强度等）的优点，对高分辨率气候记录研究有重要意义。

1.2 洞穴沉积物的古气候记录

早在 20 世纪 60 年代初, Broecker 等用 ^{14}C 方法证明在温带气候区, 一些快速生长纹层是年轮 (Broecker et al., 1960)。1993 年, Baker et al. (1993) 首次通过高精度 TIMS-U 系定年技术 (^{238}U - ^{234}U - ^{230}Th) 对 Sutherland 的 Tartair 洞一个全新世石笋的发光条带进行了年代测定, 并发现通过计数得到的石笋时间跨度在误差范围内与 TIMS 结果吻合。确定石笋荧光微层是年生长层, 这为利用石笋进行精确的年代控制提供了可能。随后, Shopov et al. (1994) 在确定了一个石笋的发光微层是年层后, 认识其可能反映了当地的水文事件; Genty 和 Quinif (1996) 利用 ^{14}C 和铀系定年方法确定了比利时的一些石笋具有年层, 并通过一些地方的现代沉积实验来确定石笋微层是年生长层 (Genty, 1992, 1993; Genty et al., 1995; Baker and Smart, 1995)。1997 年, 刘东生等在中国首次发现石笋微层 (刘东生等, 1997)。随后, 通过高精度的 TIMS 定年结果对比, 发现了透光的石笋微层为年层 (Tan et al., 2001; Hou et al., 2002; 谭明等, 2000; 侯居峙等, 2001; 汪永进等, 2002) 并且在中国北方石笋中建立了年层标志 (侯居峙等, 2001; Hou et al., 2001; Hou et al., 2002)。可见, 石笋已经成为高分辨率气候—环境变化研究的一种理想的自然载体。各国学者纷纷从石笋的稳定碳、氧同位素组成 (Gascoyne, 1992; Dorale et al., 1992; Wang et al., 2001, 2005; McDermott et al., 2001; Yuan et al., 2004; Hou et al., 2003)、微量元素含量及其相互比值 (Geode et al., 1991; Roberts et al., 1998; Huang et al., 2001; Musgrove and Banner, 2004) 以及年层厚度 (Baker et al., 1993; Brook et al., 1999; Proctor et al., 2000; Tan et al., 2003; Frisia et al., 2003)、有机质性质 (Baker et al., 1996, 1998, 1999a, b; Shopov et al., 1994; McGarry and Baker, 2000; Baker and Bolton, 2000) 等多方面综合研究洞穴碳酸盐所记录的气候和环境变化。下面分别对石笋碳、氧同位素、年层厚度、有机酸性质以及微量元素含量及其比值的古气候意义进行阐述。

1.2.1 石笋氧、碳同位素

洞穴石笋稳定同位素尤其是氧 ($\delta^{18}\text{O}$) 和碳 ($\delta^{13}\text{C}$) 同位素可作为古气候记录的重要代用指标。早在 1968 年, Hendy 等 (1968) 在《自然》(Nature) 上报道了利用 ^{14}C 定年对新西兰北岛的洞穴碳酸钙所做的氧同位素序列及其温度转换分析, 标志着从洞穴碳酸钙检索古气候信息工作的开始 (谭明等, 1996)。而

1988年 Winograd 等在《科学》(Science)上发表了关于利用 TIMS-U 系高精度定年研究 Devils 洞—方解石脉氧同位素序列的成果 (Winograd, 1988), 紧接着, 他于 1992 年继续通过对 Devils 洞的方解石脉研究, 表明它的氧同位素记录了 60 ~ 566kaBP 的气候变化 (Winograd, 1992)。虽然如此, 高分辨率石笋氧同位素 ($\delta^{18}\text{O}$) 序列在古气候因子的解译中存在不同。在温带地区, 影响大气降水氧同位素的主要因素是冰期—间冰期尺度的水汽源的纬向运移, 石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 表现出与大气温度变化良好的相关性, 常被作为温度指标 (Lauritzen et al, 1995; Dorale et al, 1992; Johnson et al, 2004; Mangini et al, 2005)。然而, 在热带地区或典型的季风控制区, 大气降水 $\delta^{18}\text{O}$ 主要受降雨量控制, 因此石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 主要反映了季风降雨量的变化 (Ayalon et al, 1998; Bar-Matthews et al, 1998; Fleitmann et al, 2003; 2004), 因此, 石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 也被作为降雨量指标。在国内, 石笋氧同位素古气候记录也取得丰硕的成果。我国季风气候区的石笋氧同位素记录多数都反映了降雨的变化。Wang 等 (Wang et al, 2001) 对南京葫芦洞石笋的研究表明降雨同位素的变化, 而且东亚季风千年尺度的气候突变事件具有全球可对比性; 袁道先等将贵州董哥洞石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 的波动解释为降雨量效应 (Yuan et al, 2004)。Hu 等 (2008) 通过对比贵州董哥洞与湖北和尚洞全新世石笋 $\delta^{18}\text{O}$, 指出两地石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 的差定量的记录了降雨量变化。

与氧同位素相比, 石笋碳同位素 ($\delta^{13}\text{C}$) 影响因素复杂, 因此其信号也较难捕捉。Hendy (1971) 系统地研究了洞顶植被、洞穴系统、同位素分馏机理等对石笋 $\delta^{13}\text{C}$ 的影响, 指出在同位素平衡条件下, 不同的植被类型对石笋 $\delta^{13}\text{C}$ 的影响最大。覃嘉铭等 (2001) 研究也表明全球气候的变化对洞穴石笋的影响, 比 C3/C4 值所引起的植被变化带来的影响要小得多, 而研究表明, 石笋碳同位素可以反映地表植被的变化 (李红春等, 1997)。但在一些理想环境下, 石笋 $\delta^{13}\text{C}$ 也能够反映降水或温度的变化, Genty 等通过对法国洞穴石笋 $\delta^{13}\text{C}$ 及地表植被的研究, 发现在地表植被类型不变条件下, 土壤植被根系的 CO_2 气体产率变化也可引起石笋 $\delta^{13}\text{C}$ 值从 -4‰ 变化至 -12‰ (Genty et al, 2003)。

虽然石笋氧、碳同位素尤其是氧同位素的古气候记录取得瞩目成果, 但是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, 因此还需要进一步的对比研究予以讨论。

1.2.2 石笋年层厚度

从一般沉积学理论知道, 由于某种周期性的沉积环境或沉积条件的改变, 会引起沉积物性质的变化或发生沉积间断, 从而形成由物质界面或间断界面所确定的沉积旋回。据此, 石笋微层厚度的韵律变化也必定是在石笋沉积过程中响应某一稳定自然周期变化的结果(谭明等, 1998)。

近年来石笋微层应用于高分辨率古气候研究已有了长足的进步: Brook et al. (1999) 则通过对马达加斯加地区石笋的研究, 讨论了石笋年生长层与 EN-SO 记录的相关性, 认为降雨量大, 年层厚度大, 南方涛动指数低(SOI), 年蒸散量(AET)高, 并进一步表明 SOI 和厄尔尼诺事件有关的降雨量决定了年层的厚度。Proctor et al. (2000) 利用英国石笋年层厚度的变化, 重建了十年尺度平滑的降水纪录。基于微层厚度与器测气象资料的相关关系, Tan et al. (2003) 利用微层层厚的变化重建了北京过去 2650 年(665B.C.-1985A. D.) 的 5 ~ 8 月的平均温度。几乎与此同时, Frisia et al. (2003) 也发表了关于意大利石笋重建了冬季温度变化研究结果。

可见, 石笋微层不但为古气候时间序列提供了高分辨率的时间标尺, 而且其本身的厚度变化在一定条件下也记录了气候变化。石笋微层是一种独特的年季旋回的洞穴沉积物现象, 其层厚变化除了受气候影响外, 还深受洞穴上方不同的地质、地貌、水文地质、植被、土壤的综合影响, 这些影响因素也导致了国内外仅有少数石笋年层厚度可用来定量重建气候。气候信号与沉积之间在某些条件下存在简单关联, 信号强于噪音, 而大多数时候, 气候信号和沉积之间存在着复杂关联, 致使噪音掩盖了信号。因此, 我们就应该从石笋微层形成的机理入手, 去揭示这种简单关联的条件。这就需要通过长期对洞穴滴水及上覆土壤的观测研究, 了解石笋微层厚度与气候或土壤信号之间可能存在的某种关系。

1.2.3 石笋中有机质的性质

自 More (1952) 首先用“speleothem”一词来描述洞穴化学沉积物以来, 石笋荧光特征就一直受到关注。Gilson et al. (1954) 指出, 洞穴碳酸盐中存在有机质, 它们是一种激活剂, 受紫外线照射后能变成发光体。后来, Gascoyne (1978) 指出, 洞穴碳酸钙条纹的颜色是其中存在的粘土和有机质所赋予的。20 世纪 80 年代后, 不断有实验证实了荧光物质是胡敏酸和富里酸的钙盐以及一些小分子有机脂(Shopov, 1987; White, 1989; Ramseyer et al., 1997)。由于富里酸分子量较

小且具有亲水性等特征,洞穴碳酸盐中富里酸的相对含量比胡敏酸高 (Beynen et al., 2001)。况且其发光强度也比胡敏酸强 (Senesi et al., 1991), 因此富里酸是洞穴碳酸盐荧光的主要贡献者。石笋中的有机酸源自洞穴滴水所带来的上覆土壤层的有机质组分。地表植被的变迁、土壤层成分对外界的响应,以及受大气降水补充的洞穴滴水的动态变化等气候环境信息,理论上都可以通过石笋中有机质的荧光特征得到反映。事实也证明如此,如: Baker et al. (1996) 在苏格兰 Sutherland 的 Uamh Tartair 洞的研究表明,该地区石笋的发光强度与同一地区孢粉记录显著相关,石笋微层的荧光强度与植被存在明显关系,并可为覆被沼泽系统的波动提供一种高分辨率记录;而苏格兰西北部 Traligill 盆地洞穴石笋荧光微层的激发光、发射光的波长和洞穴上覆土壤中有机组分的腐殖度有关,可指示泥炭表面的干湿波动,并可能记录了太阳活动周期 (Baker et al., 1999a); 法国 Grotte de villars 地区一生长较快的石笋荧光发射波长变化与同一地区的降雨器测记录显著相关,但石笋荧光发射波长的变化曲线滞后降雨变化 5 ~ 20 年,这可能是由于有机质的分解速度不同,土壤有机质从产生到迁移沉淀至洞穴碳酸盐的时间差所造成的 (Baker et al., 1998); Baker et al. (1999b) 对英格兰中部 Poole 洞穴石笋的进一步研究,发现了石笋年层的双微层结构,并分析其由年内间隔达 4 ~ 5 月的两次较高的月降雨量 (>250mm) 或者日降雨量 (>60mm) 引起。太阳辐射对土壤微生物活动的影响在石笋荧光微层中也有记录,如 Shopov et al. (1994) 发现石笋微层荧光强度有着与太阳黑子活动类似的周期性 (11 年) 变化尺度。

虽然石笋中所含有机质量很少,不易被提取,但有机质分子水平的分析也逐渐引起科学家的关注。Xie et al. (2003) 于 2003 年报道了湖北清江上游的和尚洞中石笋中与地表土壤生态系统有关的正构脂肪醇和脂肪酮具有很好的古气候意义,可靠地鉴别出新仙女木 YD, B/A 暖事件, H1 等事件,并可与亚热带海水表面温度相对比。而来源于土壤生态系统和洞穴生态系统的脂肪酸指标仅指示了 H1 事件的存在,其他气候事件并未反映出来,这可能与不同类脂物分子的地球化学行为差异有关 (谢树成等, 2005)。

1.2.4 石笋中微量元素及其相互比值

早在 1983 年, Gascoyne et al. (1983) 就提出洞穴沉积物中微量元素动态可能具有古气候意义。微量元素在方解石中的沉积不仅取决于土壤及母岩中的原始物质,而且受到地表环境 (温度、pH、Eh、有机酸等)、岩溶水的运移途径及与其

母岩作用时间的长短,同时与这些微量元素固液之间的分配系数(K_x)有关,即

$$K_x = (X/Ca)_{\text{Calcite}} / (X/Ca)_{\text{Water}}$$

X—微量元素

不同的微量元素 K_x 的干扰因素不同,如镁(Mg)的 K_x ,主要受温度的控制。Gasgoyne (1983, 1993) 计算了温度对 Mg 的分配系数的影响,认为每升高 1°C , Mg 浓度可增加 7%。但在洞穴方解石沉积过程中,洞内温度变化幅度较小,温度对沉积物中 Mg 含量的变化的驱动作用已被其他过程掩盖了。渗流水中的镁钙比(Mg/Ca)反映了水体中 Mg/Ca 的变化(Fairchild et al., 2001),而水体过程如碳酸钙的优先沉积、在白云岩的存在情况下旱季较长的滞留时间都可导致水中 Mg/Ca 升高。可见,石笋中沉积的微量元素受到较多的干扰因素,但在一定条件下,通过分析洞穴化学沉积物中微量元素的组成,可反映一定的气候与生态环境状况,如温度、降雨、植被等。

使用最多的指标为镁(Mg)、锶(Sr)、钡(Ba)含量及其与钙(Ca)的比值。其中, Mg/Ca 的季节性变化通常由温度变化以及水在母岩中的滞留时间(Roberts et al., 1998; Fairchild et al., 1996; Musgrove and Banner, 2004; Johnson et al., 2006),这是由 Mg 的溶解特性决定的,因此石笋中的 Mg/Ca 可作为一些地区干旱的代用指标(Mcmillan et al., 2005)。除此之外,方解石在表层带岩溶区的优先沉积也是控制洞穴滴水 and 石笋 Mg/Ca 、 Sr/Ca 的重要因素(Fairchild et al., 2000; Huang et al., 2000, 2001; Johnson et al., 2006),石笋沉积的动力因素尤其是沉积物生长速率的变化对文石中微量元素(如 Sr 和 Ba 含量及其与 Ca 的比值)起着关键作用(Adrian et al., 2003; Johnson et al., 2006)。

近年来,洞穴沉积物中硅(Si)、磷(P)及硫(S)等痕量元素也不断被证明可作为良好的气候和环境的代用指标。如:石笋中的 Si/Ca 可能反映上覆土壤的风化程度,进而作为降雨量的代用指标(Hu et al., 2005),石笋中硫的升高可能反映了人类活动的增强以及火山活动(Frisia et al., 2005)。P 主要受上覆植被的影响,可以反映温度和降水的变化(Baldini et al., 2002),Huang et al. (2001) 还认为 P 含量呈年际旋回,可作为石笋年层的划分标志。

在古气候重建中,石笋已经成为一种不可或缺的替代指标,但还存在不少问题,其中石笋的沉积及其反映气候变化的机理是首要也是最基本待解决的问题。

1.3 岩溶洞穴沉积现代过程研究的意义

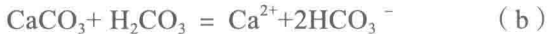
1.3.1 洞穴沉积物的形成机理

石笋是洞穴碳酸钙滴石类的一种典型沉积形态。洞穴石笋的形成包括三个基本过程（如图 1.1）：

1. 降水进入土壤，溶解土壤的 CO_2 ，使水显弱酸性并具有侵蚀性：



2. 含 CO_2 的弱酸性水沿碳酸盐岩裂隙下渗，溶解碳酸盐（主要是碳酸钙镁）在溶液中形成饱和的 Ca^{2+} 和 HCO_3^- ：



3. 含饱和 CaHCO_3 的溶液渗入洞穴后，经洞顶裂隙渗水滴落在洞底或其他沉积物上溅落变成极薄水膜，由于溶液中 CO_2 分压远高于洞内大气 CO_2 分压，溶液中 CO_2 逸出，或水份蒸发导致 CaCO_3 过饱和而析出沉积：

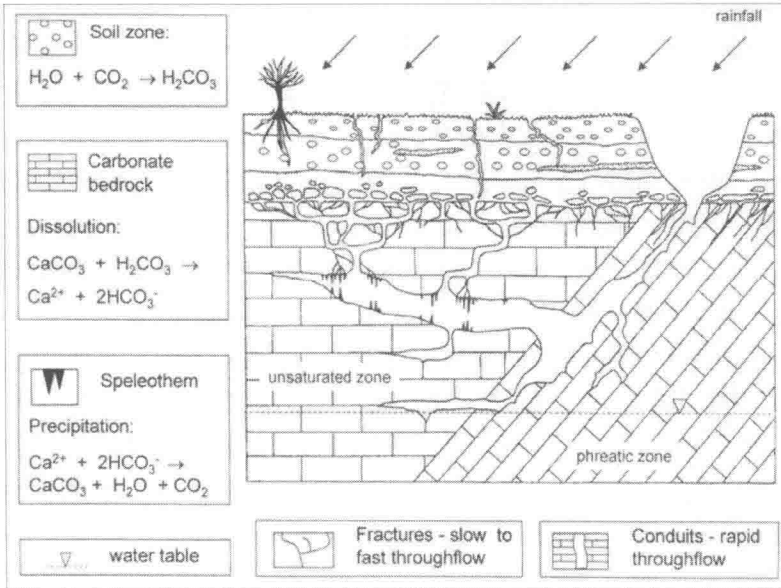


图 1.1 洞穴沉积物形成示意图（引自 Fairchild et al., 2006）

在这个过程中，气候、环境变化作为信号输入端，石笋气候、环境替代指标

的变化作为信号的输出端,滴水是整个信号传输过程的载体和动力。从大气降雨开始,水流经过土壤层、洞穴顶板层,以洞穴滴水的形式逐渐沉积为洞穴次生化化学沉积物。土壤中 CO_2 气体、水分及土壤中 Ca^{2+} 、 HCO_3^- 、 H^+ 浓度的制约对岩溶有重要的驱动作用,因而土壤首先表现为岩溶作用的化学场 (Pan et al., 1998)。

由于气候年季旋回和相应的土壤地球化学旋回,造成了滴水地球化学行为的规律性变化,进而沉积造成碳酸盐沉积不连续边界构成石笋微层。而不同的气候、土壤、岩石和水文条件决定了不同的石笋沉积类型和剖面图式,根据物质成分和结构的差异,目前洞穴碳酸盐年生长层主要有以下几种类型:(1) 发光和不发光方解石组合构成年层,称发光年层 (Shopov 层, luminescent lamina) (Baker et al., 1993; Shopov et al., 1994)。White 和 Brennan (1989) 发现在 253.7 ~ 365nm 的紫外光激发下,洞穴碳酸盐微层可以发出蓝—绿荧光, Lauritzen et al. (1986) 认为这是由有机酸 (胡敏酸和富啡酸) 所产生的。但是,石笋微层的荧光变化由有机酸的含量变化所导致的假设一直未得到证实,并且尚无法区别它们来自不同植被系统的哪些植物酸。这类年层一般在温带气候下形成,热带石笋中发育较少,可能由于温度等因素导致可溶有机质季节性变化强烈所形成;(2) 白色疏松沉积 (white porous lamina) 与暗色紧密沉积 (dark compact lamina) 的碳酸钙互层构成年层 (Genty 和 Quinif, 1996), 这是一种在显微镜下利用自然光的反射就可直接观察到的微层,所以也称可见年层 (visible lamina), 它主要形成于降雨和温度季节性变化明显的地区;(3) 方解石与文石互层构成的年层,形成于白云质岩层,沉淀的矿物质发生季节性变化,在雨季的后期,由于蒸发作用的加强造成溶液中 Mg/Ca 比值的增大产生文石沉淀 (Railsback et al., 1994); d. 由透光的方解石条带和不透光的有机质条带组成的透射光可见微层 (Tan et al., 1999)。

我国南北方气候差异明显,因此石笋微层类型也呈现出各自的特点。谭明等 (1999) 根据南北方石笋微层的特点将其分为北方型石笋和南方型石笋,并分别归纳了其特征。北方型石笋:石笋微层韵律由很薄的不透光层面与较厚的透光方解石层构成;组成石笋的矿物主要为“放射状纤维晶方解石”;方解石晶束垂直于微层层面生长,在电镜下纤维晶面可见而微层层面不可见;微层界面在普通透射光下呈不透光暗面,在紫外光照射下呈蓝色发光面,具有双重光性 (Tan et al., 1999)。南方型石笋:在透射光下明暗条带有规律地相间排列 (互层),边界比较清晰,通常暗带厚而亮带薄,在紫外光照射下暗带发光而亮带不发光。石花洞石笋是典型的北方型石笋,与其它地方最大的不同在于其具有双重光性。