

洞穴石笋的 $\delta^{13}\text{C}$ 记录研究*

Study on $\delta^{13}\text{C}$ Isotope Records from Stalagmites

张美良,朱晓燕,林玉石,覃嘉铭,章程,罗贵荣,杨琰

ZHANG Mei-liang, ZHU Xiao-yan, LIN Yu-shi, QIN Jia-ming, ZHANG Cheng, LUO Gui-rong, YANG Yan

(中国地质科学院岩溶地质研究所,岩溶动力学重点实验室,广西桂林 541004)

(Karst Dynamics Key Laboratory, Institute of Karst Geology, CAGS, Guilin, Guangxi, 541004, China)

摘要:分别采集贵州荔波董哥洞、荔浦丰鱼岩、桂林响水洞的石笋,研究三个洞穴分辨率达1000年、100年、10年级的石笋 $\delta^{13}\text{C}$ 记录。结果表明,石笋 $\delta^{13}\text{C}$ 值可以系统地记录地表岩溶作用过程与植被生态变化的历史。在冰期或干旱寒冷期,岩溶不发育,成壤条件差而缓慢,不利于植被生长, $\delta^{13}\text{C}$ 值偏重,以 C_4 植物(禾本科植物)为主。在温暖湿润期,岩溶发育好,成壤条件好而且速度快,利于植被生长, $\delta^{13}\text{C}$ 值偏负或偏轻,以 C_3 (木本植物)植物为主。晚全新世以来,人类活动持续不断地破坏森林植被,草类植被得以生长,石笋的 $\delta^{13}\text{C}$ 值急速上升、偏重,以 C_4 植物为主,石漠化增强,水土流失严重。此后,升高的 $\delta^{13}\text{C}$ 值很难再恢复到中全新世以前的水平。自然因素和人类活动因素等对生态环境的影响,均会导致植被变化,成倍放大 $\delta^{13}\text{C}$ 值,特别是人类活动对自然生态的影响更为严重。

关键词:石笋 碳同位素 记录 植被

中图法分类号:P642.25 **文献标识码:**A **文章编号:**1005-9164(2006)01-0048-04

Abstract: High resolution $\delta^{13}\text{C}$ isotope records from three stalagmites in millennial, centennial and decade timescale were obtained from Dongge Cave of Libo, Guizhou, Fengyu cave of Lipu, Guangxi and Xiangshui Cave of Guilin, respectively. The results indicate that karst is lack of development, the condition of the soil-forming is poor and slow, which hampered vegetation grow, resulting in C_4 plant dominant with the heavier $\delta^{13}\text{C}$ value in the glacial period or cold-dry period. Otherwise in warm-humid stage karst is well development, soil-forming is fast with good conditions, vegetation grow well, thus C_3 plant has predominant with the negative value. Since late Holocene, human activity may predominate over the nature, the forest vegetation is destroyed continuous but grass grows well, which C_4 plant become the dominant vegetation, the $\delta^{13}\text{C}$ value of stalagmites increase rapidly, rock desertification aggravate because of serious water and soil erosion. Since then, it is very difficult to make heavier $\delta^{13}\text{C}$ value back to the level before middle Holocene. By discussing the effect factors of $\delta^{13}\text{C}$ value change from stalagmites, we considered that the influence of the ecological environment from the nature factor or human activity could result in the vegetation change, and $\delta^{13}\text{C}$ value change could make enlargements of double, decade times, and hundred times. In particular, human activity affects nature ecological environment more severely. The influence of human activity only brings about the degeneration of forests and vegetation, leads to $\delta^{13}\text{C}$ value change from stalagmites, and also accelerates aggravation of rock desertification, serious water and soil erosion in karst region.

Key words: stalagmite, carbon isotopic, record, vegetation

收稿日期:2005-09-06

作者简介:张美良(1956-),男,研究员,长期从事区域岩溶、古岩溶及全球变化研究。

* 中国科学技术部“中国洞穴石笋样品保护库的建造”项目(编号:2003DEB6J069)和国家自然科学基金(批准号90511004和40231008)资助。

岩溶洞穴的次生化学沉积物位于地表以下,它可以系统地记录岩溶作用过程与植被生态及石漠化演化历史。与其它地表环境记录的载体相比,它不受或少受地表短期天气的干扰(如气温和降水的短期高频

变化)、保存的信息完整,因此,能比较正确地记录千年、百年、十年、年际尺度的气候和生态环境的变化,从而成为综合研究几十万年、几千年以来气候与生态环境变化的理想载体。

Hendy^[1]全面地阐述了洞穴碳酸盐(钙)的 $\delta^{13}\text{C}$ 来源、控制因素及其地质意义。洞穴石笋碳酸盐(钙)的碳同位素组成,主要取决于降水中溶解的大气 CO_2 ,土壤中由植物光合作用在根部呼出的 CO_2 以及植物体腐烂放出的 CO_2 的 $\delta^{13}\text{C}$ 值。大气 CO_2 的浓度很低(仅 $300 \times 10^{-6} \sim 350 \times 10^{-6}$),而土壤中的 CO_2 浓度($800 \times 10^{-6} \sim 10000 \times 10^{-6}$ 不等)却比大气 CO_2 的浓度高出1~2个数量级。桂林丫吉村试验场的研究结果^[2]证明,岩溶作用输入端大气降水及土壤 CO_2 浓度变化直接控制着其输出端岩溶水的水化学特征的变化,在夏半年湿热的情况下,生物活动性强,土壤 CO_2 浓度达到最高值,泉水的pH值及硬度高;而冬半年则相反。Quade等^[3]的研究表明,由于土壤 CO_2 和土壤溶液中的溶解的碳酸氢根(HCO_3^-)处于完全的同位素平衡,因此,石灰岩的溶蚀不会在次生沉淀的碳酸钙的碳同位素组成留下痕迹。这意味着作为岩溶作用输出端产物的洞穴碳酸钙的 $\delta^{13}\text{C}$ 值的变化直接反映了土壤 CO_2 的 $\delta^{13}\text{C}$ 的变化。

陆生植物的 $\delta^{13}\text{C}$ 组成主要受其光合作用控制,同时它又受气候环境因子的影响,而降水是影响植物的 $\delta^{13}\text{C}$ 组成的一个重要气候因子^[4,5]。其中, C_3 植物(主要是指木本植物,如乔木、灌木等)、 C_4 植物(主要是指禾本科植物,如莎草、牧草、小米、玉米、高粱等)的 $\delta^{13}\text{C}$ 值是不同的(C_3 植物的 $\delta^{13}\text{C}$ 值为 $32\text{‰} \sim -23\text{‰}$,平均值约 -25‰ ;而 C_4 植物的 $\delta^{13}\text{C}$ 值为 $-14\text{‰} \sim -8\text{‰}$),所反映的气候环境也不相同。 C_3 植物遵循Calvin的 C_3 循环,在湿润气候条件下植物的生长是根据 C_3 途径固碳, $\delta^{13}\text{C}$ 值随水分的增加而降低或变轻, $\delta^{13}\text{C}$ 值偏负的程度与气候的湿热程度相对应; C_4 植物遵循Hatch-Slack的 C_4 循环,在干旱气候条件下植物的生长是根据 C_4 途径固碳, $\delta^{13}\text{C}$ 值也随水分的减少而增加或变重,反映为干旱的气候环境。因此,碳酸盐记录的 $\delta^{13}\text{C}$ 值的高低波动是当地植物生长繁茂程度的直接反映,间接反映了气候的温暖、干冷的波动,是气候与生态环境变化的一个替代指标^[3,4]。由此可见,植物的 C_3/C_4 比例的改变对土壤 CO_2 的 $\delta^{13}\text{C}$ 值的影响最为显著^[6~8]。土壤 CO_2 的 $\delta^{13}\text{C}$ 值主要取决于不同气候条件下 C_3/C_4 比例的改变,暖湿气候条件下, C_3/C_4 升高, $\delta^{13}\text{C}$ 变轻 $\rightarrow \text{C}_3$ 植被增加, C_4 植被减少 \rightarrow 石漠化减弱;而干冷条件下, C_3/C_4 降低, $\delta^{13}\text{C}$ 变重 $\rightarrow \text{C}_3$ 植被减少, C_4 植被增加 \rightarrow 石

漠化增强。

目前由于石漠化逐步扩大,水土流失、生态退化等问题严重制约了岩溶石山地区经济的可持续发展,中国西南石漠化地区还有约1000万人口没有越过温饱线。近年来我国学术界对岩溶石漠化的特点及生态治理对策做了大量的研究,在生态重建中也找到了一些成功的经验。但是由于过去对岩溶生态及石漠化的演化历史研究不够,特别是对其驱动机制的认识不够,没有弄清哪些是自然因素的影响,哪些是人类活动因素的影响,以及其在影响生态环境格局变化中所占的份额,石漠化为何仍在继续加重。这是一个有待解决的关键问题。因此,本研究分别采集董哥洞、响水岩及丰鱼岩的石笋,研究三个洞穴的石笋 $\delta^{13}\text{C}$ 记录,为深入研究各个地区石漠化的演化历史过程及导致石漠化的根本原因,制定有针对性的生态治理和重建措施提供参考。

1 样品采集和分析方法

董哥洞位于贵州省荔波县东40km的桐塘乡老场村,由中上层组成;董哥洞周缘的森林植被至今覆盖良好,主要为喀斯特森林地貌。响水洞位于广西桂林市东南72km的灌阳县观音阁乡,现今洞穴的顶部及周缘为灌木丛或灌丛草被,个别山峰呈现石漠化,为残存的峰丛(簇)地貌。丰鱼岩在距广西省桂林市南部100km的荔浦县境内,现今洞穴的顶部及周缘山地均为稀疏林或灌木丛组成的峰丛地貌类型。3个洞穴的顶板覆盖层厚度均大于80m,洞内气温稳定,与地面年均气温一致。董哥洞、响水洞与丰鱼岩石笋高分别为194cm、70cm及14cm,沿纵向切开,并沿轴心自下而上采集年龄测定及稳定同位素样品。年龄测试采用TIMS-U系及 ^{210}Pb 法。石笋TIMS-U系年龄由美国明尼苏达大学地质地球物理系同位素实验室完成。碳同位素分析表明:董哥洞全石笋分辨率达35~110a,局部时段的分辨率为7a。响水洞全笋共采样74个(其中4个为平行样品),样品平均年龄分辨率为87a。丰鱼岩石笋顶部在采样时仍在沉积,顶部以 ^{210}Pb 法定年,并求出其沉积速率,中、下部以TIMS-U系定年为500a以来;碳同位素分析共计98件,(分2次采样,第1次为47件,第2次为51件),验证结果的一致性,说明分析数据是可信的;石笋平均分辨率达11a。

据2000~2004年,对各个洞穴内的现代沉积碳酸盐的 $\delta^{13}\text{C}$ 分析结果^[9~11],董哥洞中碳酸盐的 $\delta^{13}\text{C}$ 为 $-5.2\text{‰} \sim -6.2\text{‰}$,响水洞中碳酸盐的 $\delta^{13}\text{C}$ 为 $-5.88\text{‰} \sim -6.06\text{‰}$ 。现代沉积碳酸盐的 $\delta^{13}\text{C}$ 值代

表示了现代正常气候条件下的生态环境, 碳酸钙的 $\delta^{13}\text{C}$ 值增加或偏重反映了当地的 C_3/C_4 植物比例下降, 草本植物增多, 指示气候变冷或变凉, 显示降水减少或相对偏干, 反之, 显示降水增多, 气候变暖, 湿度偏大。因此, 本研究以现代的 $\delta^{13}\text{C}$ 值作为 C_3 、 C_4 植物相对丰度的临界值或判别值。

2 洞穴石笋的 $\delta^{13}\text{C}$ 记录

2.1 荔波董哥洞石笋 $\delta^{13}\text{C}$ 记录

图 1 显示董哥洞石笋碳同位素曲线的波动特征与石笋沉积旋回以及形态变化具有较好的对应关系。在 15470a B.P. 以来, $\delta^{13}\text{C}$ 的平均值为 -5.23% , 当大于这一平均值的时期, 降水减少或相对偏干, C_4 植物增加; 反之, 降水增多, 气候变暖, C_3 植物增加。图 1 中董哥洞石笋 $\delta^{13}\text{C}$ 值的变化趋势, 大体可将本区 15000a 以来的降水及生态环境变化分为三大时期(段): (1) 15000~9000 a B.P. 表现为半湿润的气候环境, 由于经受了 H1 事件(Heinrich event H1) 和新仙女木冷事件(Younger Drays event) 的影响^[9], 本阶段东亚冬季风强盛, 有效大气降水相对减少, 不利于木本植被生长, 所以, 以 C_4 植物为主, $\delta^{13}\text{C}$ 的平均值为 -3.6% , 因为岩溶石山地区的成壤和植被的发育都要经历较长的孕育过程, 特别是在干旱寒冷期更是如此。本阶段植被在总体上表现向好方向发展, 仍在不断恢复。(2) 9000~3500 a B.P. 间, 表现为温暖湿润的气候环境。本阶段反映东亚夏季风相对强盛, 气温升高, 有效降水相对较大, 利于木本植被生长, 以 C_3 植物为主(C_3 植物占 95% 以上), $\delta^{13}\text{C}$ 的平均值为 -6.23% 。在这个温暖湿润期间, 没有发现剧烈的气候波动和寒冷事件, 仅在 4770~4600 a B.P. 期间有一短暂的(约 170a 温凉干旱)气候变化, 同时, 也影响到生态环境-植被发生了变化($\delta^{13}\text{C}$ 值增高到 -2.5% ~ -3.5%)。(3) 3500 a B.P. 以来, 由于在 3500 a B.P. 左右再次出现了一次干旱寒冷期(3500~2000 a B.P.), 相当于第三新冰期, 气温再次下降, 达到新仙女木事件的寒冷程度, 生态环境再次发生变化, $\delta^{13}\text{C}$ 值由 -6.23% 突然增加到 -3% ~ -4.5% , 由森林植被快速退化为 C_4 植物; 从 2000 a B.P. 以来, 表明东亚冬季风有所减弱, 夏季风有所增强, 气温回升, 冬季有效降水相对增大, 利于木本植被生长, $\delta^{13}\text{C}$ 值再次降到平均以下, 为 -6.18% , 以 C_3 植物为主, 生态环境得到了再次恢复, 目前, 洞穴上部盖层的植被较好, 为常绿落叶阔叶混交林区。

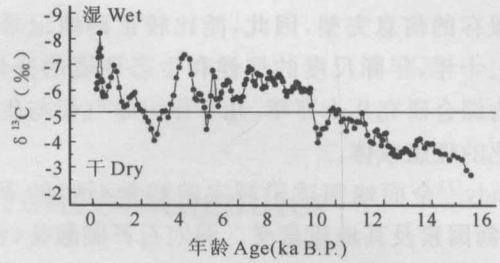


图 1 荔波董哥洞石笋碳同位素记录

Fig. 1 The records of carbon isotope from stalagmite of Dongge cave, Libo

2.2 桂林响水洞石笋 $\delta^{13}\text{C}$ 记录

图 2 中, $\delta^{13}\text{C}$ 值呈现锯齿状的波动特征, 与石笋沉积旋回具有较好的对应关系。在 6000 a B.P. 以来的全新世, $\delta^{13}\text{C}$ 的平均值为 -8.29% , 与 1997 年测得现代沉积碳酸盐的 $\delta^{13}\text{C}$ (-8.96%) 非常接近。 $\delta^{13}\text{C}$ 平均值可作为 C_3 、 C_4 植物相对丰度的分界点。

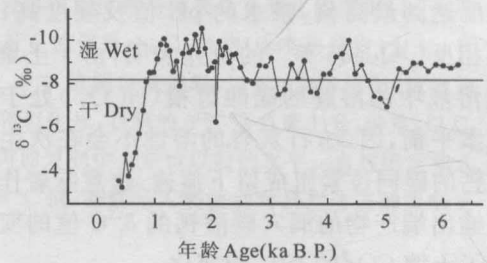


图 2 桂林响水洞石笋碳同位素记录

Fig. 2 The records of carbon isotope from stalagmite of Xiangshui cave, Guilin

据图 2 响水洞石笋 $\delta^{13}\text{C}$ 值的变化趋势, 大体可将本区 6000a 以来的降水及生态环境变化分为两大时期(段): (1) 6000~1000 a B.P. 期间, $\delta^{13}\text{C}$ 的平均值为 -9.12% , 明显趋向于偏负或偏轻, 表明森林植被茂盛, 主要为 C_3 植物。但在此阶段仍存在有 6 个低谷($\delta^{13}\text{C}$ 高值区), $\delta^{13}\text{C}$ 显示偏正或偏重, 显示生态环境发生了一些小的波动变化。特别是从 3800~1000 a B.P. 间 $\delta^{13}\text{C}$ 记录化曲线^[10,11], 揭示出 5 个生态环境变化亚阶段, 并以 400a 为一周期, 反映生态环境主要是受自然因素的影响。(2) 从 1000 a B.P. 开始(即相当于宋朝, 公元 1000 年)到 373 a B.P. (即相当于元朝末至明朝末, 公元 1343~1577 年), $\delta^{13}\text{C}$ 从 -9.02% 突然增大到 -6.75% ~ -3.81% , $\delta^{13}\text{C}$ 值突然偏重, 自那以后石笋的 $\delta^{13}\text{C}$ 值只在 -3% ~ -5% 波动, 这主要是由于人类活动的影响造成的, 反映当时人口的增多, 森林被大量砍伐, 大量垦荒耕植, 导致森林植被 C_3 植被开始退化, 自那以后生态环境就再也无法恢复。目前, 洞穴上部的盖层植被较差, 主要由草地或保存的少量灌丛组成, 局部地段由于白云质灰岩暴露于地表而产生白云岩化, 导致水土流失, 由于

受人为活动因素的影响,持续地对森林植被的破坏,草类植被得以生长,石漠化增强, $\delta^{13}\text{C}$ 值急速上升以后,很难再恢复到全新世中期的水平。

2.3 荔浦丰鱼岩石笋 $\delta^{13}\text{C}$ 记录

由图 3 可见,丰鱼岩石笋的 $\delta^{13}\text{C}$ 记录是,在小冰期早期(1530~1790A. D.), $\delta^{13}\text{C}$ 值已开始缓慢上升及至 1790A. D.,乾隆后期^[12,13],盛世带来的人口增长,还有小冰期气温下降,由于建筑御寒需要不断砍伐的结果, C_3 植物退化,而 C_4 植物增长,因此,石笋的 $\delta^{13}\text{C}$ 值迅速上升,95a 内上升幅度达 5.8‰。直到 20 世纪初以后,现代暖期的开始, C_3/C_4 的比例才有所提高,然而人类对植被持续破坏, C_3/C_4 比值难以再次提高,以致 20 世纪 70 年代至今全球升温的时期内,石笋的 $\delta^{13}\text{C}$ 值不但没有降低,反而提高了约 2‰。由此可见,全球气候的变化对洞穴石笋 $\delta^{13}\text{C}$ 的影响(指反应温度而言),比 C_3/C_4 由此而引起的植被变化的影响要小得多。而植被的变化因素起到了 $\delta^{13}\text{C}$ 成倍的放大。

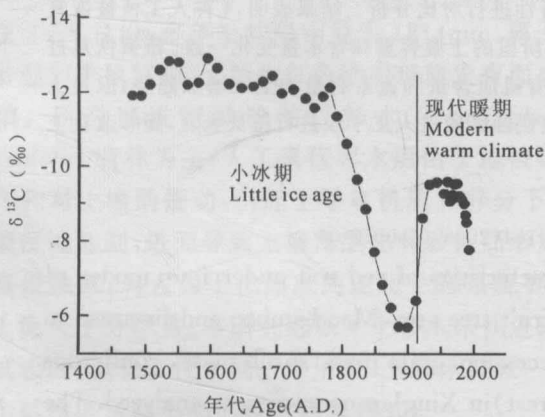


图 3 荔浦丰鱼岩石笋碳同位素记录

Fig. 3 The records of carbon isotope from the stalagmite of Fengyu cave, Lipu

3 结束语

洞穴石笋作为岩溶系统中二氧化碳—有机碳—碳酸盐体系中的产物,其 $\delta^{13}\text{C}$ 值主要受土壤 CO_2 的 $\delta^{13}\text{C}$ 值所制约,而土壤 CO_2 则主要受洞穴上部地表植被变化和植被分配格局所控制,因此,石笋的 $\delta^{13}\text{C}$ 值可以系统地记录地表岩溶作用过程与植被生态及石漠化演化历史,可以作为古气候环境、古生态变化的重要研究手段。

本研究表明,自 15000 a B. P. 以来,石笋的 $\delta^{13}\text{C}$ 值记录了生态环境中植被变化经历了由兴盛→退化→恢复、兴盛的三个阶段,这主要反映了气候冷、暖变化及自然灾害与人为因素的影响过程。(1)在冰期或干旱寒冷期,由于经受了 H1 事件和新仙女木冷事

件,干旱寒冷期(3500~2000a B. P)——第三新冰期的影响,洞穴石笋的 $\delta^{13}\text{C}$ 值升高、偏重,记录了生态环境发生变化,植被由兴盛变为退化,利于草本植被生长;(2)在温暖湿润的气候适宜期(9000~3500a B. P.),水热条件好,利于岩溶发育,其成壤条件好、速度快,利于植被生长,洞穴石笋的 $\delta^{13}\text{C}$ 值偏负或偏轻,森林植被兴盛,生态环境较好;(3)晚全新世以来人类活动的影响(1000 a B. P. 以来),这一时期由于人类活动的影响占主导地位,持续地对森林植被的破坏,草本植被得以生长,石漠化增强,水土流失严重,洞穴石笋的 $\delta^{13}\text{C}$ 值急速上升、偏重,生态环境恶化,至此以后, $\delta^{13}\text{C}$ 值很难再恢复到中全新世以前的水平。

综上所述,尽管洞穴石笋的 $\delta^{13}\text{C}$ 值的形成受诸多因素的控制,但在适宜的条件时,仍能较可靠地反映地表的植被变化,尤其是对在气候变化较大或有人类活动影响的条件下的生态变化记录更为敏感。因此,人类活动造成森林植被的破坏和退化,则加速了岩溶山区的石漠化和水土流失,对自然生态的影响是十分严重的。所以,利用高分辨率的石笋记录重建洞穴地表植被生态演化历史,找出导致石漠化的根本原因,区分自然与人类活动影响因素,为岩溶地区石山治理、生态重建提供科学的理论依据,具有重要科学意义。

参考文献:

- [1] HENDY C H. The isotopic geochemistry of speleothems—Pt. I. the calculation of the effects of different model of formation on the isotopic composition of speleothems and their applicability as paleoclimate indicators[J]. *Geochim et Cosmochim Acta*, 1971, 35: 801-824.
- [2] 何师意,徐胜友,张美良. 岩溶土壤中 CO_2 浓度、水化学观测及其与岩溶作用关系[J]. *中国岩溶*, 1997, 16(4): 319-324.
- [3] QUADE J, CERLING T E, BOWMAN J R. Development of the Asian monsoon revealed by marked ecologic shift in the latest Miocene of northern Pakistan [J]. *Nature*, 1989, 342: 117-119.
- [4] 王国安,韩家懋. C_3 植物碳同位素在旱季和雨季中的变化[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2001, 21(4): 43-47.
- [5] 孙建中,赵景波. 黄土高原第四纪[M]. 北京: 科学出版社, 1991: 46-77.
- [6] 李红春,顾德隆,陈文寄,等. 利用洞穴石笋的 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^{13}\text{C}$ 重建 3000a 以来北京地区古气候和古环境: 石花洞研究系列之三[J]. *地震地质*, 1997, 19(1): 77-86.

(下转第 57 页 Continue on page 57)

问题,4种植被恢复模式继续生长的状况,还需作长期的土壤理化性状定位监测,并有待于进一步的研究分析。

参考文献:

[1] 史德明,周伏健,徐朋.我国南方土壤侵蚀动态与水土保持发展趋势[J].福建水土保持,1993(3):9-13.
[2] 李庆逵.中国红壤[M].北京:科学出版社,1983.
[3] 唐克丽.中国土壤侵蚀与水土保持学的特点与展望[J].水土保持学报,1999,6(2):2-7.
[4] 吕仕洪,向悟生,李先琨,等.红壤侵蚀区植被恢复研究综述[J].广西植物,2003,23(1):83-89.
[5] 程彤.红壤丘陵生态系统恢复与农业持续发展研究(第二集)[M].北京:气象出版社,1998.
[6] 中国科学院南京土壤研究所.土壤理化性质分析[M].上海:上海科学技术出版社,1987.

[7] 国家林业局.森林土壤分析方法[M].北京:中国标准出版社,1999.
[8] 北京林学院.土壤学(上册)[M].北京:中国林业出版社,1982.
[9] 全国土壤普查办公室.中国土壤[M].北京:中国农业出版社,1998:95-160.
[10] 金继运.土壤钾素研究进展[J].土壤学报,1993,30(1):94-101.
[11] 姜培坤,周国模,钱新标.侵蚀型红壤植被恢复后土壤养分含量与物理性质的变化[J].水土保持学报,2004,18(1):12-15.
[12] 周厚诚,任海,向言词,等.南澳岛植被恢复过程中不同阶段土壤的变化[J].热带地理,2001,21(2):104-107.

(责任编辑:邓大玉)

(上接第 51 页 Continue from page 51)

[7] 李红春,顾德隆,陈文寄,等.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[J].地质论评,1998,44(5):456-463.
[8] COPLEN T B, WINOGRAD I J, LANDWEHR J M, et al. 500000 year stable carbon isotopic record from Devils Hole, Nevada[J]. Nature, 1994, 263: 361-365.
[9] 张美良,程海,林玉石,等.贵州荔波 15000 年以来石笋高分辨率的古气候环境记录[J].地球化学,2004,33(1):65-74.
[10] 张美良,袁道先,林玉石,等.桂林响水洞 6000a 以来石笋高分辨率的气候记录[J].地球学报,2003,24(5):439-444.

[11] 袁道先,覃嘉铭,林玉石,等.桂林 20 万年石笋高分辨率古环境重建[M].桂林:广西师范大学出版社,1999:32-56.
[12] LI BIN, YUAN DAOXIAN, LIN YUSHI, et al. Oxygen and carbon isotopic characteristics of rainwater, drip water and present speleothems in a cave in Guilin area, and their environmental meanings[J]. Science in China (Series D), 2000, 43(3): 276-285.
[13] 覃嘉铭.古气候变化的石笋同位素记录研究——以桂林盘龙洞为例[J].地球学报,1996,8(31):255-265.

(责任编辑:邓大玉)