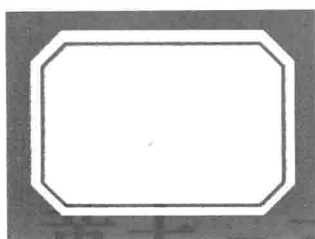


THE DISCUSSION

of Several Problems on Isotopes
Record of Loess-Paleosol

黄土-古土壤同位素 记录的若干问题讨论

张普 著



黄土—古土壤同位素记录的 若干问题讨论

**The Discussion of Several Problems
on Isotopes Record of Loess-paleosol**

张 普 著

海洋出版社

2013 年 · 北京

内 容 简 介

中国黄土高原黄土-古土壤序列的碳同位素研究对黄土高原古气候和古植被的重建具有重要意义。本书以黄土高原中部及秦岭南部黄土-古土壤沉积为研究对象,通过分析不同载体的有机碳同位素、碳酸盐碳、氧同位素、TOC 含量、碳酸盐含量、C/N 比值、MS、正构烷烃组分及碳同位素等地球化学和地球物理指标对我国黄土-古土壤碳同位素重建古气候中存在的问题进行了初步研究。研究结果对于利用黄土-古土壤重建古气候演化历史具有重要的学术意义。

本书内容丰富、资料翔实、系统性强、立论有据、富有创新。可供大专院校师生和科研单位的科技人员参考阅读。

图书在版编目(CIP)数据

黄土-古土壤同位素记录的若干问题讨论/张普著. —北京:海洋出版社, 2013. 2
ISBN 978-7-5027-8489-8

I. ①黄… II. ①张… III. ①同位素应用-黄土高原-古土壤-研究 IV. ①P597

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 009809 号

责任编辑:方 菁

责任印制:赵麟苏

海洋出版社 出版发行

<http://www.oceanpress.com.cn>

北京市海淀区大慧寺路 8 号 邮编:100081

北京画中画印刷有限公司印刷 新华书店发行所经销

2013 年 2 月第 1 版 2013 年 2 月北京第 1 次印刷

开本:787mm×1092mm 1/16 印张:5.25

字数:140 千字 定价:28.00 元

发行部:62132549 邮购部:68038093 总编室:62114335

海洋版图书印、装错误可随时退换

地理学陕西省重点建设学科项目

国家自然科学基金资助项目 (41203003)

大陆动力学国家重点实验室自主研究重点课题资助项目
(BJ12139)

西北大学博士科研启动金项目 (PR10056)

前 言

在过去的 20 年间,中国黄土高原黄土-古土壤序列的碳同位素研究已取得了一系列的成果,并被广泛应用到黄土高原古气候和古植被的重建研究。然而,为了更准确地利用碳同位素重建古气候和古环境,仍有一些基础问题需要我们细致考虑。本书以黄土高原中部及秦岭南部黄土-古土壤沉积为研究对象,通过分析不同载体的有机碳同位素、碳酸盐碳、氧同位素、TOC 含量、碳酸盐含量、C/N 比值、MS、正构烷烃组分及碳同位素等地球化学和地球物理指标,对我国黄土-古土壤碳同位素重建古气候中存在的问题进行了初步研究,得出以下主要结论:①对黄土高原同一地点竖井和天然剖面的碳同位素对比分析表明,竖井和天然剖面 $\delta^{13}\text{C}_{\text{TIC}}$ 和 $\delta^{13}\text{C}_{\text{TOC}}$ 的分布特征在冰期—间冰期尺度上呈现了一致的变化趋势。因此认为后期过程在冰期—间冰期尺度上不会对天然剖面的碳同位素组成造成明显影响。② 2.5 Ma 以来洛川和段家坡剖面有机碳同位素分布特征表明:研究区第四纪以来主要以 C_3 植物为主的 C_3 、 C_4 混合草原植被类型;黄土序列有机碳同位素 $\delta^{13}\text{C}$ 值在冰期—间冰期尺度上较好地记录了夏季风强度变化,该结果进一步证实了 An 等(2005)的观点。同时在两个剖面均出现了两次明显的转换,因而也记录了更长时间尺度上东亚夏季风阶段性变迁的转折点。③ $\delta^{13}\text{C}_{\text{TOC}}$ 反映了长期平均的生态系统状况,如果在没有原生碳酸盐干扰的情况下, $\delta^{13}\text{C}_{\text{CR}}$ 则指示中国黄土高原植物增长季的生态变化。它们的差值($\Delta^{13}\text{C}_{\text{CR}-\text{TOC}}$),结合 $\delta^{18}\text{O}_{\text{CR}}$ 则提供了季节性气候和生态变化的信息。然而,两个剖面 $\delta^{13}\text{C}_{\text{TIC}}$ 和 $\delta^{13}\text{C}_{\text{CR}}$ 值呈现一致的变化趋势和幅度,一致低且接近零值的 $\Delta^{13}\text{C}_{\text{CR}-\text{TIC}}$ 结果表明:中国黄土根茎体可能包含本底原生碳酸盐的贡献。④对黄土高原西峰和洛川竖井剖面末次间冰期以来土壤 TOC 和 TN 含量的时间分布规律的初步分析表明,研究剖面磁化率、TOC 和 TN 含量垂直分异趋势一致,均表现为古土壤时期相对黄土时期,TOC 和 TN 含量相对偏高,C/N 比值偏高,整体呈现一致的波动趋势,且 TN 含量值在整个序列均在 0.03% ~ 0.05% 的低值范围,波动很小。因此,我们初步认为 C/N 比值在干旱—半干旱的黄土沉积序列更多的指示上覆植物生物量的贡献。⑤通过洛南盆地上白川、刘湾剖面 and 黄土高原中部洛川、西峰剖面有机碳同位素组成的对比分析表明:在受东亚季风控制的半干旱—半湿润的黄土区,暖季节的降水对 C_4 和 C_3 植被相对比例增加的趋势和幅度均具有明显的影

响,主要表现为暖季节降水的增加有利于 C_4 植被相对比例的增高,且降水量的增多可能会影响植物有机碳同位素的组成。⑥利用紫荆剖面古土壤同位素和其他地球化学、地球物理指标组成变化解读了该区农业文明的发展历史。分析表明,紫荆剖面 $\delta^{13}C_{soc}$ 值指示了在仰韶到夏-商时期紫荆先民可能种植了约 50% 类似粟,黍的 C_4 作物。异常负的 $\delta^{13}C_{sc}$ 值指示了紫荆先民在仰韶和龙山文化期可能进行了大规模的家庭圈养。⑦对黄土-古土壤类脂物正构烷烃组分抽提方法进行了比较分析,结果表明:对于年代较老、有机质含量较低的古土壤样品,超声波溶剂萃取和加速溶剂萃取获得的类脂物正构烷烃组分分布和碳同位素值没有显著差别,但是前者的效率明显低于后者的。因此作者认为,对于年代较老、含量较低的地质样品,采用加速溶剂萃取方法更有助于获得充分的样品量并进行可靠的 GC-C-IRMS 分析;对于现代样品和含量较高的地质样品,超声波溶剂萃取就可以获得充分的测试样品量。

本书作者及其研究团队(黄土与第四纪国家重点实验室同位素课题组)从 2005 年开始,8 年来承担国家自然科学基金国家重点实验室专项(40523002)、国家自然科学基金项目(40673012,40873011)、中国科学院知识创新工程重要方向项目(KZCX3-SW-139)、国家重点基础研究发展规划项目(2004CB720200)、黄土与第四纪地质国家重点实验室开放基金资助项目(SKLLQG0823)等一系列有关土壤碳同位素与古环境重建的各级各类项目。本书主要是对这些研究工作的综合与提升,同时充分参考并引用了国内外同行专家在本领域的研究成果。它是目前关于黄土-古土壤同位素记录方面的一份系统、详细的科学研究成果。

8 年来,先后参加上述科研工作并做出实质性贡献的科技人员和研究生有 10 余人,本书所列作者仅是核心研究者和对本书的完成做出主要贡献者。另外,首先感谢我的导师刘卫国研究员无论在选题方向、构思,最初的实验分析、数据处理阶段,还是在论文撰写方面都给予我悉心的指导!感谢祝一志研究员及何亚怀先生在野外采样及室内分样工作给予的帮助!在日常实验、学习和生活中,非常感谢文启彬研究员、王政师兄、曹蕴宁师姐、何亚怀先生、王周峰师兄、王宁师姐、李祥忠师兄、付明义、师弟邢萌、魏杰、赵江涛、师妹胡婧、崔琳琳的帮助!感谢西北大学地质系岳乐平教授在研究过程及本书的出版过程给予的指导和帮助!感谢西北大学城市与环境学院领导及同事一直以来的关心和支持!

张普

2012 年 10 月于西安

目 次

第 1 章 导论	(1)
1.1 碳同位素示踪古环境研究现状	(1)
1.2 选题背景及意义	(13)
1.3 研究内容及技术路线	(13)
1.4 小结	(14)
第 2 章 区域地质概况和实验方法	(15)
2.1 秦岭以北黄土高原中部区域地质概况	(15)
2.2 秦岭以南洛南地区区域地质概况	(17)
2.3 材料	(20)
2.4 方法	(20)
2.5 小结	(23)
第 3 章 后期过程对古土壤碳同位素记录的古植被及古环境指示意义的影响	(24)
3.1 中国黄土 - 古土壤碳同位素研究进展	(24)
3.2 洛川竖井 - 天然剖面碳同位素分布特征对比	(25)
3.3 西峰竖井 - 天然剖面碳同位素分布特征对比	(27)
3.4 黄土 - 古土壤碳同位素的古植被及古环境指示意义	(27)
3.5 小结	(28)
第 4 章 长时间尺度古土壤有机碳同位素记录的植被和夏季风变化特征	(29)
4.1 中国黄土有机碳同位素记录特征、历史植被和夏季风变化关系研究	(29)
4.2 最近 2.5 Ma 洛川剖面有机碳同位素记录特征	(30)
4.3 最近 2.5 Ma 洛川与段家坡剖面有机碳同位素记录特征对比	(31)
4.4 最近 2.5 Ma 洛川剖面有机碳同位素记录的植被和夏季风变化特征	(32)
4.5 小结	(34)
第 5 章 中国黄土碳酸盐根茎体同位素分布特征及古环境意义探讨	(35)
5.1 根茎体成因	(35)
5.2 西峰、洛川剖面根茎体 $\Delta^{13}\text{C}_{\text{CR-TOC}}$ 分布特征及古环境指示意义	(35)
5.3 西峰、洛川剖面根茎体 $\Delta^{13}\text{C}_{\text{CR-TIC}}$ 分布特征及古环境指示意义	(39)
5.4 小结	(40)
第 6 章 黄土 - 古土壤碳、氮比值 (C/N) 指示意义	(41)
6.1 沉积物 C/N 比值指示意义	(41)
6.2 西峰、洛川剖面 TOC、TN 和 C/N 比值分布特征	(41)
6.3 黄土 - 古土壤 C/N 比值指示意义	(43)

6.4 小结 (44)

第7章 秦岭以南黄土剖面碳同位素分布特征及暖季节降水对其的影响 (45)

7.1 秦岭以南黄土剖面碳同位素分布特征 (45)

7.2 洛南剖面碳同位素记录的古植被和古气候变化特征 (46)

7.3 秦岭南北黄土剖面有机碳同位素对比研究 (47)

7.4 小结 (50)

第8章 碳酸盐碳同位素负异常的古文化指示意义 (51)

8.1 丹江上游盆地考古学研究 (51)

8.2 古土壤稳定同位素记录的古文化层气候及生境信息 (52)

8.3 小结 (54)

第9章 不同抽提方法比较黄土-古土壤类脂物中正构烷烃的分布特征 (55)

9.1 不同抽提方法比较黄土-古土壤类脂物中正构烷烃分布特征的意义 ... (55)

9.2 抽提次数和强度对超声波萃取效率的影响 (56)

9.3 超声波萃取土壤正构烷烃分布特征 (57)

9.4 加速溶剂萃取土壤正构烷烃分布特征 (59)

9.5 两种萃取方法获得的正构烷烃特征讨论 (59)

9.6 小结 (60)

第10章 结论与展望 (61)

10.1 结论 (61)

10.2 存在的问题与展望 (62)

参考文献 (65)

第1章 导 论

全球环境变化日益受到重视,各种地质记录都已被科学家尝试用来了解古气候和古环境变化。土壤是气候与环境变化的长期记录者,蕴藏着极其丰富的古气候、古地理和古植被信息。在我国西北地区广泛分布的黄土-古土壤沉积序列,具有较高的沉积速率以及较好的连续性,记录了晚中新世以来的气候变化和生态演化历史,是研究自第三纪晚期以来全球植被生态演化及全球气候变化的良好载体。现代分析测试技术的提高,使得稳定同位素在古环境研究中得以广泛应用。在过去的20年间,中国黄土高原黄土-古土壤序列的碳同位素研究已取得了一系列的成果,并被广泛地应用到黄土高原古气候和古植被的重建研究。

1.1 碳同位素示踪古环境研究现状

1.1.1 稳定碳同位素在陆相古环境研究中的应用的基本思路

陆生高等植物中主要存在 C_3 和 C_4 两种光合作用类型。由于生理过程的差别, C_3 和 C_4 植物的碳同位素($\delta^{13}C$)组成有明显区别, C_3 植物碳同位素组成一般在 $-22\text{‰} \sim -34\text{‰}$ 之间,其中以 -27‰ 附近出现的频率最高; C_4 植物碳同位素组成偏正,分布区间为 $-9\text{‰} \sim -19\text{‰}$,其中以 -13‰ 附近出现的频率最高(图 1-1)(Deines, 1980; Mohr and Schopfer, 1995)。

陆相沉积物中的有机质主要是来自陆生高等植物,陆相沉积物中有机质的 $\delta^{13}C$ 值与形成该有机质的植被 $\delta^{13}C$ 值基本一致。因此,如果已知某一地层中有机质的 $\delta^{13}C$ 组成,我们就可以估算出当时地表植被中 C_3 和 C_4 植物的相对生物量贡献,从而研究植被中 C_3 和 C_4 的变化。由于 C_3 和 C_4 植物所代表的生态环境有区别,因此通过沉积物中有机质的 $\delta^{13}C$ 就可以重建过去的环境。

陆相沉积物中碳酸盐 $\delta^{13}C$ 也可以用来恢复古生态和古环境。在中国黄土-古土壤中由于存在原生碳酸盐的影响,因此黄土-古土壤中碳酸盐 $\delta^{13}C$ 首先指示了上覆植被覆盖密度,其次一级的变化则受控于 C_3 和 C_4 的相对生物量贡献(Li and Liu, 2003)。土壤自生碳酸盐 $\delta^{13}C$ 主要由土壤 CO_2 的 $\delta^{13}C$ 决定,而土壤 CO_2 的 $\delta^{13}C$ 组成又受地表植被中 C_3 和 C_4 的相对生物量贡献和原生碳酸盐溶解部分的影响。因此,当原生碳酸盐的贡献较高时,则土壤碳酸盐的 $\delta^{13}C$ 主要受控于植被的覆盖密度的影响;当原生碳酸盐贡献较小或可忽略时,土壤碳酸盐 $\delta^{13}C$ 可体现出地表植被中 C_3 和 C_4 植物

的相对生物量的贡献(Cerling,1984; Li and Liu, 2003; Ning et al. , 2006)。在植物呼吸速率较高的情况下,由于 $^{12}\text{CO}_2$ 与 $^{13}\text{CO}_2$ 的扩散系数存在差别,使土壤 CO_2 的 $\delta^{13}\text{C}$ 要比土壤有机质的 $\delta^{13}\text{C}$ 偏重4.4‰(Cerling,1984)。 CO_2 与碳酸盐交换平衡时的分馏系数在25℃和0℃时分别是-9.8‰和-12.4‰,因此土壤中碳酸盐的 $\delta^{13}\text{C}$ 值要较土壤有机质 $\delta^{13}\text{C}$ 值偏重14‰(25℃)~17‰(0℃)(Cerling,1989)。然而,据Bottinga(1969)的研究结果, CO_2 与碳酸盐交换平衡时的分馏系数在20℃时是-10.7‰,如果分别取 C_3 和 C_4 植物的 $\delta^{13}\text{C}$ 值为-27‰和-13‰,那么可以推算出纯 C_3 和 C_4 植被环境下土壤碳酸盐的 $\delta^{13}\text{C}$ 值分别是-11.9‰和+2.1‰(20℃)。根据上述分析,在一定情况下土壤碳酸盐的 $\delta^{13}\text{C}$ 值也可用于计算地表植被中 C_3 和 C_4 植物的相对生物量贡献(Wang and Zheng,1989)。

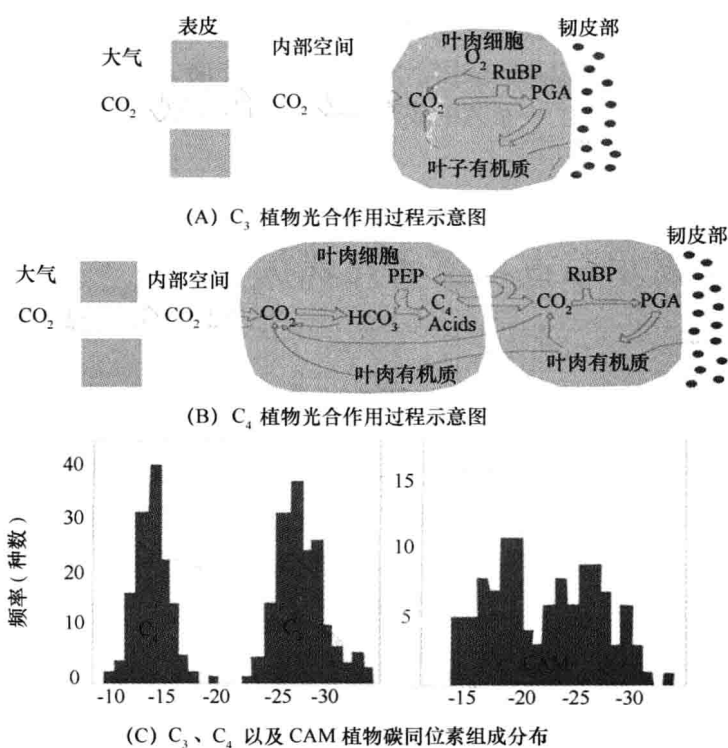


图 1-1 碳同位素组成/‰
(资料来源: Mohr 和 Schopfer, 1995.)

1.1.2 黄土-古土壤有机碳同位素示踪古环境研究进展

从20世纪80年代至今,黄土-古土壤有机碳稳定同位素在全球变化、古生态、古气候研究中已取得了大量成果(图1-2)(Lin et al. ,1991; He et al. ,2002; Gu et al. ,2003; Vidic and Montanez, 2004; Liu et al. , 2005a,b,c,d; 饶志国 等,2005; Chen et al. , 2006)。

Rochette (1999)通过土壤有机碳稳定同位素的研究发现土壤呼吸向大气排放的

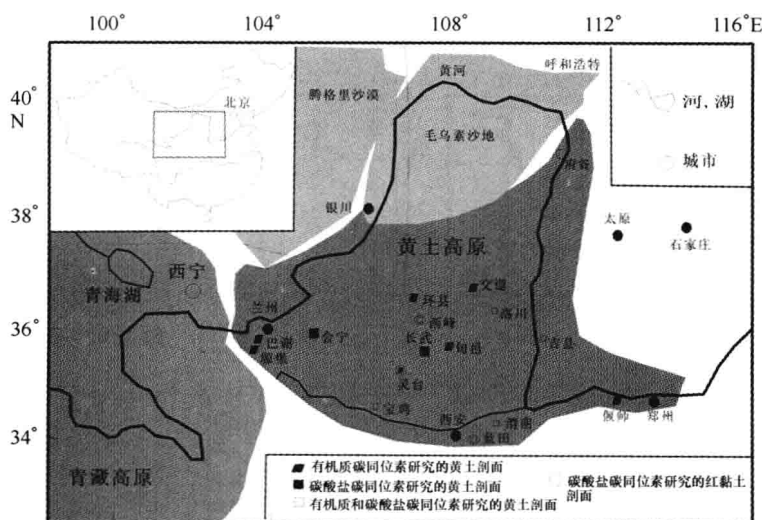


图 1-2 我国黄土高原地区进行有机质碳同位素、碳酸盐碳同位素研究的黄土剖面

CO₂ 中,主要以土壤有机质降解释放的 CO₂ 为主,土壤有机质通过微生物降解释放出的 CO₂ 对全球碳循环起着重要的作用。此外,大气 CO₂ 浓度的变化可以引起植物类型的变化,因此,保存在古土壤序列中这种植物转型的有机质同位素信号可以作为过去大气 CO₂ 变化的一种替代指标 (Pagani et al., 1999)。区域古生态重建是土壤有机质应用的重要领域。在 20 世纪 80 年代初期, Dzurec 等 (1985) 就通过测定土壤有机质的 $\delta^{13}\text{C}$ 来揭示历史时期以来美国犹他州 Curlew 山谷中的植被演替。土壤剖面有机质 $\delta^{13}\text{C}$ 值也已被广泛用于重建中国黄土高原历史时期的植被变化,揭示了末次间冰期以来该地区为以 C₃ 植物为主的 C₃ 和 C₄ 混合草原植被类型,同时发现暖湿的间冰期 C₄ 植物较相邻的冰期时高,并由黄土高原西北地区向东南地区递增,即土壤有机碳的 $\delta^{13}\text{C}$ 也可以作为气候变化的一个替代指标 (图 1-3 和图 1-4) (Lin et al., 1991; He et al., 2002; Gu et al., 2003; Vidic and Montanez, 2004; Liu et al., 2005b,d; 饶志国 等, 2005; Chen et al., 2006)。

利用土壤有机质碳同位素研究环境变化的假设前提与理论基础是区域环境、C₃ 和 C₄ 植物组成比例、土壤有机碳稳定同位素组成三者间一一对应关系,但目前有一些研究显示,这一前提受到一定挑战。Cerling (1997) 通过对亚洲、非洲、北美和南美牙齿珐琅质碳同位素研究得出,中新世—上新世转换时期, C₄ 植被突然大面积增加受控于大气 CO₂ 浓度的减少 (图 1-5)。

Street-Perrott 等 (1997) 通过对来自东非肯尼亚和埃尔刚山高海拔湖泊有机质碳同位素的研究也发现,冰期时较低的大气 CO₂ 浓度导致了 C₄ 草及淡水藻类的增加,进而造成该时期较大的有机碳同位素的正偏 (图 1-6)。

Pagani 等 (1999) 基于晚中新世大气 CO₂ 浓度的变化指出,该时期 C₄ 植物的全球性扩张不仅仅受大气 CO₂ 浓度驱动,同时也受其他因素的影响,如构造运动导致的低纬度干旱化的增加和/或季节性降水模式的变化 (图 1-7)。

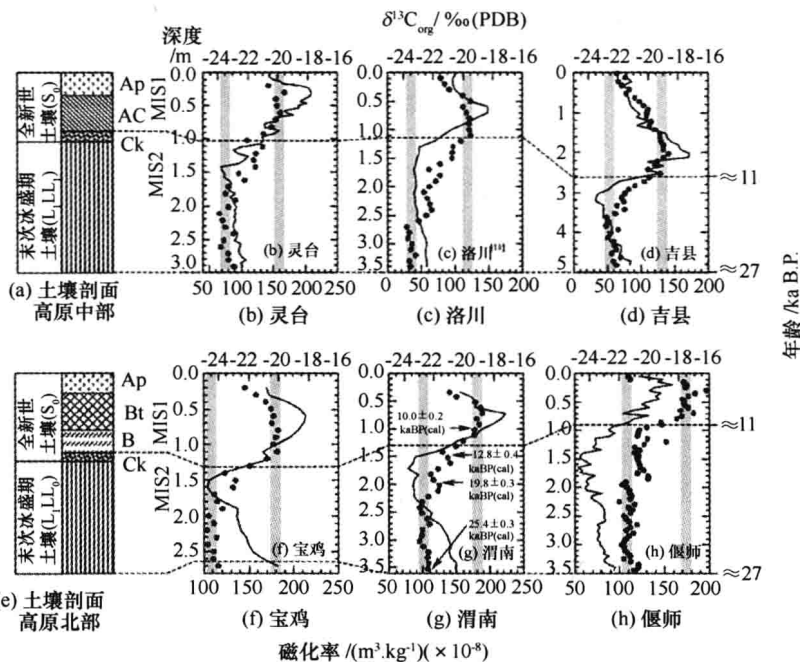


图 1-3 黄土高原中部和南部末次盛冰期以来黄土-古土壤序列有机碳 $\delta^{13}\text{C}$ 值 (黑点) 和磁化率的变化 (实线)

注: 图中左右两条阴影分别为 $\delta^{13}\text{C}_{\text{SOM}}$ 极小和极大值

资料来源: 顾兆炎等, 2003

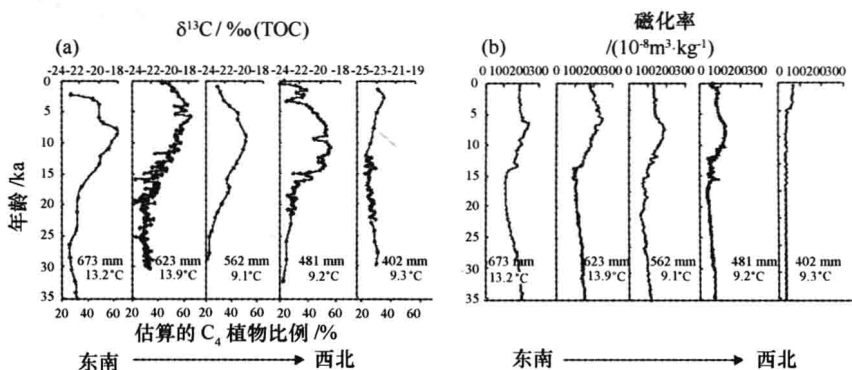


图 1-4 黄土高原 5 个黄土-古土壤剖面的土壤总有机质碳同位素组成与磁化率变化

注: 图中自左向右分别为蓝田、渭南、旬邑、西峰和环县 5 个剖面

资料来源: Liu et al., 2005b

Johnson 等 (1999) 通过对澳大利亚南部 Eyre 湖泊鹼鹼蛋壳碳同位素的研究表明: 受控于澳大利亚夏季风影响的暖季节降水的增加有助于 C_4 植被相对比例的增加 (图 1-8)。

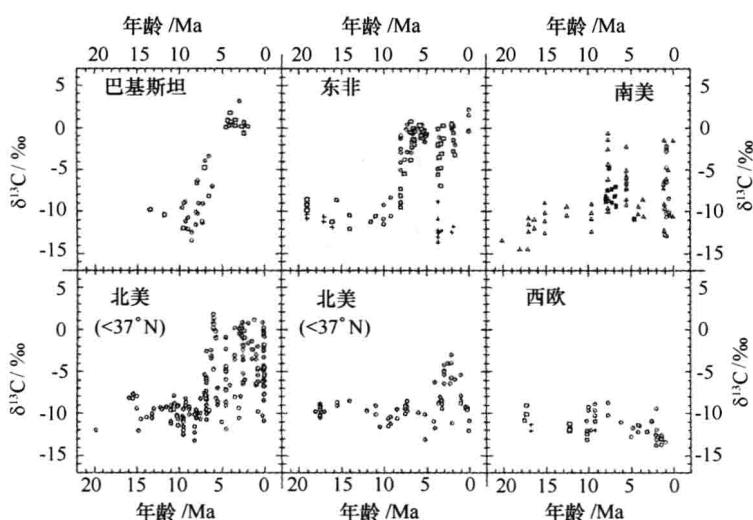


图 1-5 晚第三纪马科动物及哺乳动物牙齿碳同位素组成特征

资料来源: Cerling et al., 1997

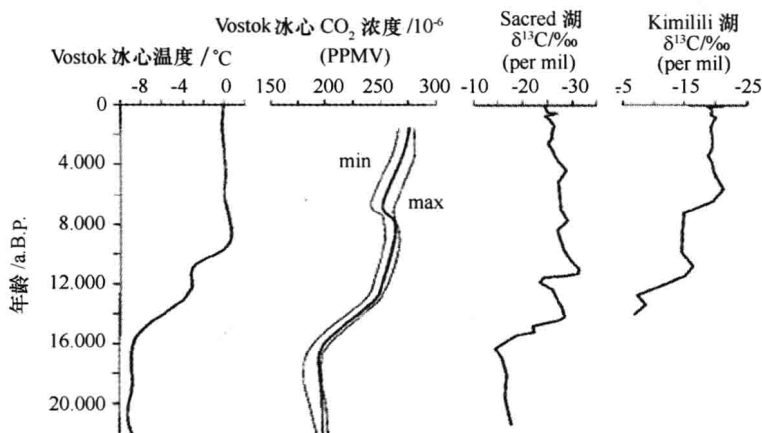


图 1-6 过去 22 ka 以来东非肯尼亚圣湖和埃尔刚山高海拔湖泊有机碳同位素分布特征及与南极冰心记录的古温度和大气 CO₂ 浓度的比较

资料来源: Street-Perrott et al., 1997

Huang 等(2001)通过对中美洲两个湖泊沉积钻孔叶腊正构烷烃碳同位素组成的研究得出,区域气候变化是冰期—间冰期尺度 C₃/C₄ 植物相对比例的主控因素,并且在缺乏支持植物生长的温度和湿度条件下,仅仅是低的大气 CO₂ 浓度还不足以驱动 C₄ 植物的扩张(图 1-9)。

Fox 和 Koch (2003)通过古土壤碳同位素重建北美大平原 23 Ma ~ 1 Ma 以来 C₄ 植被生物量的变化结果发现 C₄ 植物在 6.4 Ma 和 4.0 Ma 增加,直到 2.5 Ma 达到现代水平。因此,古土壤和动物记录的差异以及不同大陆古土壤记录的矛盾指示了区域因素是 C₄ 植

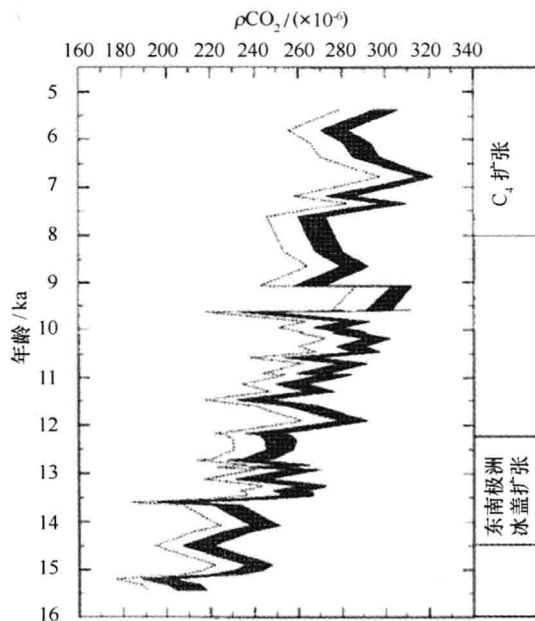


图 1-7 晚中新世大气 CO_2 浓度变化

资料来源:Pagani et al., 1999

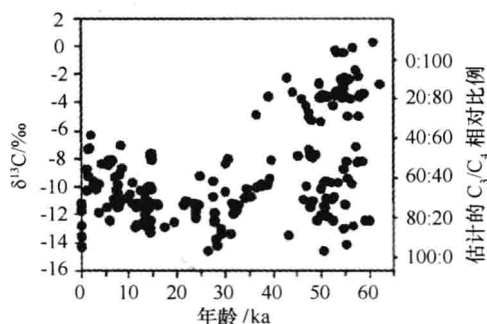


图 1-8 Eyre 湖泊鸕鹚蛋壳碳同位素和估计的 C_3/C_4 相对比例

资料来源:Johnson et al., 1999

被变化的控制因素。Gu 等(2003)通过对中国黄土高原 5 个黄土—古土壤序列末次冰期以来土壤有机碳同位素的研究也得出气候因素是 C_3/C_4 相对比例变化的主控因素,且温度是 C_4 植被增加的驱动因素。Wang 和 Deng (2005)通过对青藏高原东北缘临夏盆地动物化石牙齿珐琅质和古土壤碳同位素的研究发现 C_4 植物仅在 2 Ma ~ 3 Ma 才开始出现,同样指示了区域的气候因素(主要是东亚夏季风所带来的降水)是 C_4 植物扩张的主控因素(图 1-10)。

An 等(2005)研究了黄土高原两个高分辨率和长序列的黄土—古土壤剖面(蓝田和灵台)中的土壤有机质和成壤钙结核的碳同位素组成,并与现代 C_3/C_4 植被分布和土壤

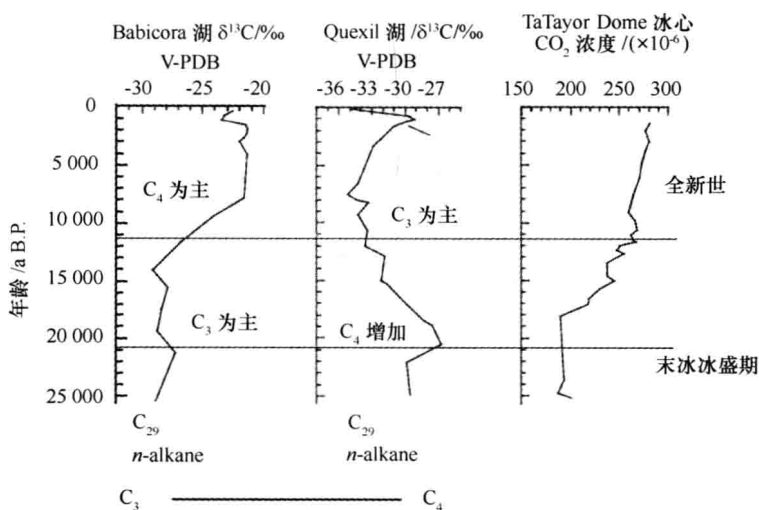


图 1-9 湖泊沉积钻孔过去 27 000 a 来叶腊正构烷烃碳同位素组成及与南极冰心记录的大气 CO₂ 浓度的比较

资料来源: Huang et al., 2001

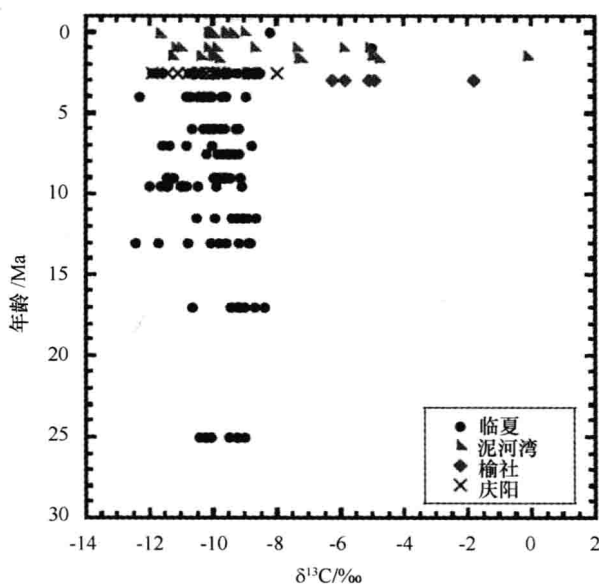


图 1-10 中国北部几个地点食草动物牙齿珐琅质碳同位素组成

资料来源: Wang 和 Deng, 2005

有机碳同位素记录以及植被模拟结果相比较,结果显示:7 Ma 以来,在半湿润的东亚季风区发生了 3 次明显的 C₄ 植被扩张,这些扩张事件与东亚夏季风循环吻合。提出东亚大陆晚中新世的 C₃/C₄ 植被变化主要是由与季风循环变化有关的暖季节降水和温度变化驱动的(图 1-11)。

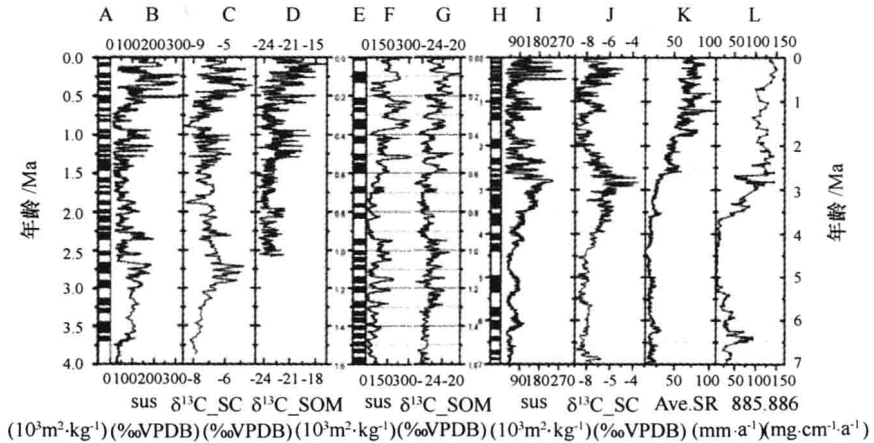


图 1-11 黄土高原气候指标和北大西洋粉尘通量的对比研究

资料来源: An et al., 2005

Liu 等(2005b)通过对黄土高原不同温湿梯度的黄土-古土壤序列 35 ka 以来的有机质和叶腊碳同位素组成的研究表明夏季风强度是 C_4 植物扩张的主要因素。Huang 等(2006)通过对佛罗里达州中部杜兰湖泊沉积物化合物单体碳同位素研究表明:末次冰期 C_4 植物量显著减少,末次冰盛期 C_4 植物量显著增加,主要是由于该地区末次冰期降水量的增加所导致,指出在重建 C_3/C_4 植物生物量相对比例时必须考虑降水量对植被类型的影响。Huang 等(2007)通过对西瓦利克、巴基斯坦古土壤、孟加拉扇海洋沉积物和阿拉伯海钻孔的碳同位素研究表明:干旱化是导致晚中新世喜马拉雅前陆和阿拉伯半岛 C_4 植物扩张的主要原因。Vonfischer 等(2008)对北美大平原土壤有机碳同位素的研究表明:区域的气候是 C_3/C_4 植物相对生物量的控制因素,且 6—8 月份日高温和月降水量有助于 C_4 植物的生长。从上述的不同地区的有机碳同位素研究结果来看, C_3/C_4 植物相对比例的变化所指示的气候意义不尽相同。表明植被变化与区域气候变化的对应可能要比目前所认识的要复杂。但是,整体上我们可以看出 C_4 植物的增加必须满足下面 3 个条件:即温度、干湿的季节变化和暖季节的降水(夏季降水); C_3 植物的增加更多的受控于春季降水。

1.1.3 黄土-古土壤碳酸盐碳同位素示踪古环境研究进展

现代土壤碳酸盐稳定同位素组成与气候、植被关系的研究表明:成土过程中形成的碳酸盐与大气降水和大气 CO_2 、土壤 CO_2 (植物根系和微生物的呼吸作用、生物残体的分解)以及土壤水有密切关系(Quade et al., 1989a,b,1994; Ehleringer et al., 1991; Cerling et al., 1993; Cole et al., 1994; Quade and Cerling, 1995; 顾兆炎等,2000; Fox and Koch et al., 2003)。所以,就黄土中碳酸盐碳氧同位素所指示的气候环境意义,Cerling (1984)测定了亚洲、非洲、美洲和欧洲等世界各地现代土壤样品的氧同位素组成,并把土壤碳酸盐的 $\delta^{18}O$ 值与当地大气降水的 $\delta^{18}O$ 值进行了相关分析,发现二者具有良好的线性关系。

Dansgaard(1964)的研究结果表明:大气降水 $\delta^{18}\text{O}$ 值与年均温呈正相关关系。所以,土壤或古土壤碳酸盐 $\delta^{18}\text{O}$ 值可以用来指示大气温度变化。

已有的土壤碳同位素研究表明:土壤有机质碳同位素可以很好地指示 C_3/C_4 植物相对比例,与其共存的土壤碳酸盐碳同位素同样也可以被用于古生态和古气候的重建(Cerling, 1984; Cerling et al., 1989; Quade et al., 1989; Wang et al., 1997),这是由于土壤碳酸盐和有机质碳同位素均受控于其形成时期上覆植被的同位素组成。但是,有机质碳同位素与植被的碳同位素值相近,而碳酸盐的碳同位素却较植物和有机质的偏正 $14\text{‰} \sim 17\text{‰}$ (Cerling et al., 1989, 1991; Quade et al., 1995)。两者之间这种差异出现的前提是土壤 CO_2 的分压远远大于大气 CO_2 的分压,从而克服大气 CO_2 的渗入和原生碳酸盐溶解所带来的干扰(Ning et al., 2006)。如 Cerling(1984)发现在现代无扰动土壤中, $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb}}$ 与地表植被中 C_4 植物的相对丰度具有良好的对应关系。他们对美国堪萨斯州土壤剖面 and 10 个北美现代土壤中共存的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb}}$ 和 $\delta^{13}\text{C}_{\text{TOC}}$ 的综合分析表明:现代无扰动土壤中,两者具有相似的变化趋势,且存在 $14\text{‰} \sim 16\text{‰}$ 的系统差异,这种差别来源于土壤 CO_2 和碳酸盐之间的同位素平衡和动力学分馏。而来自巴基斯坦晚中新世至更新世的 8 个古土壤中 $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb}}$ 和 $\delta^{13}\text{C}_{\text{TOC}}$ 也存在 $14\text{‰} \sim 16\text{‰}$ 的系统差异,这就表明后期影响并没有改变二者原始同位素组成,从而证实它们可应用于古生态的重建(Cerling et al., 1989)。同时,在利用碳酸盐 $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb}}$ 重建过去 C_3/C_4 相对丰度变化历史时,也得到了其他一些证据的支持。如 Quade 等(1994)利用希腊和土耳其的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb}}$ 重建过去 C_3/C_4 相对丰度变化的研究得到了一些动物牙齿化石碳同位素证据的支持。Fox 和 Koch(2003)在美国大平原以及 Kingston 等(1994)在肯尼亚裂谷进行的类似的研究中,也得到了与碳酸盐共存的有机质 $\delta^{13}\text{C}_{\text{TOC}}$ 数据的支持。

最为典型的是,Quade 等(1989a)最先报道的来自北部巴基斯坦 Siwalik 地层,基于碳酸盐 $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb}}$ 发现了大约 7 Ma 前发生的 C_4 植物扩张事件,在随后的研究中被来自哺乳动物化石碳同位素组成数据(Cerling et al., 1993; Morgan et al., 1994),土壤有机质碳同位素组成 $\delta^{13}\text{C}_{\text{TOC}}$ 数据(Sanyal et al., 2004),以及源于陆生高等植物的长链正构烷烃碳同位素组成 $\delta^{13}\text{C}_{n\text{-alkanes}}$ 数据(Freeman and Colarusso, 2001)所证实。

我国黄土高原地区黄土-古土壤序列 $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb}}$ 数据也经常被解释为过去历史时期 C_3/C_4 植物的相对丰度变化(Frakes and Sun, 1994; 韩家懋 等, 1995; Chen et al., 1996; Han et al., 1996, 1997; 姜文英 等, 2001)。但是在黄土沉积中,基于总碳酸盐和有机质碳同位素重建过去 C_3/C_4 相对丰度变化的历史完全矛盾和对立(图 1-12 和 图 1-13),黄土高原地区的土壤有机碳同位素研究结果表明:在古土壤发育阶段 C_4 植物相对比例增加;而在黄土沉积阶段 C_3 植物占有明显优势(刘卫国 等, 2002; Gu et al., 2003)。但土壤碳酸盐的无机碳同位素研究却显示,间冰期 C_3 植物的相对比例增加;而在冰期 C_3 植物的相对比例下降(Frakes and Sun, 1994)。例如,基于洛川剖面 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 数据重建的结果表明 C_4 植物的相对丰度由末次冰盛期至全新世上升了 40% (Gu et al., 2003);但是基于 $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb}}$ 数据重建的结果却表明: C_4 植物相对丰度下降了 15% (Frakes and Sun, 1994)。

相对于黄土-古土壤沉积中的有机质碳同位素研究,由于总碳酸盐物质受到风尘带