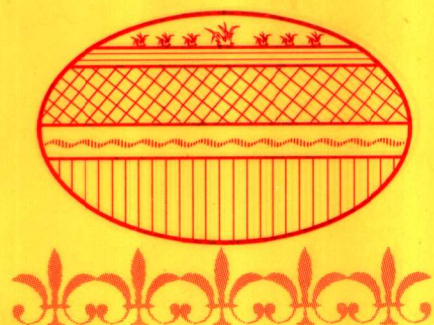




全新世黑垆土中 千年尺度的全球变化记录

魏明建 李虎侯 著

Scientist Press International, Inc.

Surry New York Hong Kong

1998

中国博士后科学基金, 国土部环境地质开放实验室联合资助

全新世黑垆土中 千年尺度的全球变化记录

魏明建 李虎侯 著

Scientist Press International, Inc.

Surry New York Hong Kong

1998

内 容 简 介

本书是探索研究中国黄土高原全新世黑垆土中古气候记录的研究成果。书中介绍了从黄土地层中提取定量的古气候信息的方法;建立了全新世高分辨率的全氧化铁和孢粉古植被序列。研究了千年尺度全球变化规律在中国黄土高原的表现形式,并对未来30年黄土高原气候变化的趋势作了预测。

本书可供地质、地理教学、研究人员及气候、农业、生态、水土保持等有关专业工作者参考。

ISBN 962-85072-1-4

COPYRIGHT ©1998 BY SCIENTIST PRESS INTERNATIONAL, INC. HONG KONG

ALL RIGHTS RESERVED

NO PART OF THIS PUBLICATION MAY BE REPRODUCED, STORED IN A RETRIEVAL SYSTEM,
OR TRANSMITTED IN ANY FORM OR BY ANY MEANS, ELECTRONIC, MECHANICAL,
PHOTOCOPYING, RECORDING, OR OTHERWISE, WITHOUT THE PRIOR WRITTEN PERMISSION
OF THE PUBLISHER,
SCIENTIST PRESS INTERNATIONAL, INC.

PRINTED IN CHINA

全新世界垆土中千年尺度的全球变化记录

魏明建 李虎侯 著

Scientist Press International, Inc.

Surry New York Hong Kong

1998

北京地大彩印厂印刷

787×1092毫米 16开本 5.5印张 12.6万字

1998年9月第1版 1998年9月第1次印刷

印数:001—200

ISBN 962-85072-1-4

定价:22.00元

序

中国黄土是连续性最好、蕴含信息最丰富的第四纪陆相沉积物,它系统而完整地记录了第四纪东亚季风气候和生态环境变化的全过程,是全球变化研究不可或缺的基本记录。近十多年来,黄土研究在探索更新世的环境演化规律方面取得了一系列重大成果,令世界瞩目。最近几年作者在黄土高原作了数十次路线调查,着重考察全新世界垆土发育及现代黄土堆积的特征,在重建全新世高分辨率气候序列和古气候代用指标定量转化为气候指标两方面作了新的探索,取得了重要成果。

作者对全氧化铁、现代花粉的稳定同位素、植物残体的稳定同位素这些前人没有研究过的替代性指标作了研究。求得了全氧化铁定量地转化为气候指标的关系、讨论了形成定量关系的机制、指出了满足定量关系的基本条件,使全氧化铁成为一种有效、实用的古气候代用指标。作者收集了黄土高原夏季开花的植物花粉,系统测定了花粉水、风干花粉、花粉壳的氢、氧、碳的稳定同位素,并研究了它们与当地气候条件的对应关系,发现花粉壳的 $\delta^{13}\text{C}$ 值与当地夏季气温有负相关关系。对植物残体的稳定同位素研究显示,其与气候条件的对应关系有分区的特点,且垂直方向变化明显,可形成高分辨率的序列。

作者在黄土高原大型塬面或宽缓分水岭上选择了 12 个全新世黑垆土的典型剖面,以 2 或 5cm 为间距,取样品 486 个,作了全氧化铁分析,形成了 12 个高分辨率的气候序列。对洛川剖面还作出了高分辨率的孢粉古植被序列。据此讨论了当地全新世环境演化的趋势,适宜期、最佳期的环境状况及千年尺度上的变化规律。

根据现代仪器观测气候记录、历史文献气候记录和地质古气候记录 3 者一致显示,黄土高原地区气候变化是高温和多雨同期的事实,作者指出在全球变暖的背景下,黄土高原将增温变湿。以全新世适宜期和最佳期的环境状况作为 2030 年环境状况的类比,今后 30 余年中,黄土高原的 1 月气温将增加 $2.4\sim 4.6^{\circ}\text{C}$,年平均降雨量将增加 $100\sim 200\text{mm}$ 。作者还分析了这种变化对黄土高原的生态环境及农、林、牧业的发展可能造成的积极和消极影响,可供规划当地经济发展和环境优化工作参考。

总之,作者经过数年的不懈努力,完成了这本创新性很强,特色鲜明,具有较高学术意义和应用价值的科技专著。对当前第四纪环境研究的难点、热点作了积极而有成效的探索研究;工作中注重第一手资料的代表性和可靠性;注重对条件的研究和限定等特点,对今后的黄土研究和全球变化研究将产生深远的影响。

中国科学院院士 郝诒纯

前 言

全球变化研究以对自然过程多学科交叉渗透研究为特点,成为众多基础学科生长点最多的研究领域之一,引起学术界的普遍关注;又以社会各界普遍关心的环境演变预测为目的,成为当前国际社会最密切关注的社会公益性研究项目;在近年来国际环境外交谈判中,它已成为关系到国家安全和地区经济发展的重大政治问题。

中国黄土高原的黄土堆积完整记录了 250 万年来当地的生态环境演化和东亚季风气候变迁的全过程。60 年代,特别是 80 年代以来开展的黄土研究工作,在黄土的岩石地层、年代地层、生物演化、气候序列与深海氧同位素序列对比等方面取得了一系列重大成果,并提出了古季风的辐射驱动和北半球冰体积驱动等理论。对东亚地区的古全球变化研究作出了重要的贡献。但在古气候指标的定量化和 1 万年来高分辨率气候序列的重建等方面进展不大。

为提高环境演变预测的准确性,在张宗祜教授的鼓励和支持下,我们承担了原地矿部“8·5”重点基础研究项目中的一个课题“晚第四纪堆积的古气候、古环境地质标志和物理化学指标及转化关系的研究”,探索从黄土地层中提取定量的古气候信息的途径。在黄土高原地带性气候地貌部位上寻找现代黄土堆积,研究其中的全氧化铁和植物残体的稳定同位素与当地气候条件的对应关系;求得了将全氧化铁转化为气候指标的定量关系及所需条件;了解了植物残体稳定同位素的特征。还研究了黄土高原夏季开花的花粉稳定同位素特征。由于花粉壳的化学性质稳定,埋藏后不会发生迁移,故其稳定同位素组成特征在古气候研究中意义重大。

在古气候指标研究过程中,发现黄土高原全新世黑垆土虽遭受侵蚀及人为耕作的影响往往保存不全,但只要作深入细致的工作就能找到保存完好的地质剖面,并可重建高分辨率的全新世气候序列。1994 年初在原地矿部环境地质开放研究实验室主任施德鸿的支持下及时将开放实验室资助的“91—03”课题调整为研究全新世黑垆土中千年尺度的全球变化记录。在黄土高原选择了 12 个全新世黑垆土剖面,作出了高分辨率的全氧化铁气候序列,研究了其统计特征;了解了适宜期、最佳期的环境状况及千年尺度的气候变化规律。

为检验和确证全氧化铁序列表现出的千年尺度上的规律,在郝诒纯教授的支持下争取到中国博士后科学基金资助的课题“洛川地区全新世黑垆土中高分辨率的孢粉序列与千年尺度的全球变化记录”。在洛川秦家寨全新世剖面上采样 100 个,作了详细的孢粉分析和鉴定。每样统计鉴定 200 粒以上,得到了高分辨率的孢粉古植被序列。在花粉浓度图式中黑垆土段存在 4 峰 3 谷的波动,确证了全氧化铁在千年尺度上波动的生物气候意义。

本专著即是对上述 3 个课题在定量气候信息提取及全新世黄土气候序列的重建方面所作的探索性研究工作的总结。用光断代方法与 ^{14}C 测年相结合建立高密度的全新世黑垆土年代序列,将黄土气候序列与“3 极”冰芯序列、深海氧同位素序列进行对比研究是我们下一步的目标。研究中我们深切的体会到这个领域的研究前景非常广阔。希望本专著能起到抛砖引玉的作用,把黄土高原全新世气候环境演化与未来趋势预测的研究引入深入。

作者感谢郝诒纯、张宗祜院士的热情指导和帮助。感谢邵时雄、施德鸿、万晓樵教授在立

项、争取经费方面的鼓励和支持。感谢张俊牌工程师在有机残渣提取及孢粉分析方面的大力帮助。段玉成高级工程师协助进行稳定同位素测试,吴乃琴、罗运来博士、何庆林工程师参加部分野外工作,丁旋博士协助绘制部分图件,在此一并表示衷心的感谢。

作者 1998.7.8

目 录

前 言	(1)
第一章 引 论	(1)
第一节 全球变化研究的提出及其研究现状	(1)
第二节 短期气候变化研究的历史回顾与现状	(2)
第三节 古气候代用指标转换研究的意义及其主要发展过程及现状	(7)
第四节 研究内容和方法	(9)
第二章 黄土地层中孢粉遗存的气候环境意义	(11)
第一节 黄土中孢粉古植被研究的历史回顾	(11)
第二节 黄土中孢粉遗存研究的问题及潜力	(12)
第三章 黄土氧化铁的气候意义及全氧化铁与气候指标间的量关系	(15)
第一节 黄土中不同赋存状态的氧化铁对气候反映程度的比较	(15)
第二节 全氧化铁曲线的生物气候意义	(17)
第三节 全氧化铁质量百分数与气候指标间的定量关系	(19)
第四节 全氧化铁记录古气候信息机理的讨论	(21)
第四章 黄土高原现代植物遗存的稳定同位素特征	(24)
第一节 黄土高原中部现代植被花粉稳定同位素的初步研究	(24)
第二节 黄土高原现代表层黄土植物残体稳定同位素的初步研究	(28)
第五章 黄土高原全新世黑垆土中千年尺度的环境演化记录	(31)
第一节 全新世黑垆土的地层特征	(31)
第二节 全新世黑垆土的年代问题	(38)
第三节 全新世黑垆土全氧化铁气候序列	(42)
第四节 全新世黑垆土的孢粉古植被序列	(48)
第六章 黄土高原全新世适宜期环境演化的典型序列与千年尺度的全球变化	(53)
第一节 黄土高原全新世黑垆土发育时期气候环境演化的趋势特征	(53)
第二节 黄土高原全新世适宜期气候环境演化型的典型性分析	(54)
第三节 洛川剖面全氧化铁序列与全球环境变化的关系	(55)
第四节 渭南型、大同型环境演化模式与南极 Vostok 冰芯序列的对比	(57)
第七章 全球变暖—黄土高原的机遇与挑战	(59)
第一节 全球变暖—黄土高原的机遇	(59)
第二节 全球变暖对黄土高原农业提供的机遇	(61)
第三节 黄土高原生态环境演化的机遇与危机	(65)
第八章 结论与讨论	(70)
参考文献	(73)
The Record of Millenarian Scale Global Change in the Holocene Black Loam	(77)

第一章 引 论

第一节 全球变化研究的提出及其研究现状

环境演化特别是灾害性变化及其对社会发展的影响已成为世界各国政府和科学家们所关注的重大问题。从1968年开始持续到1984年的大旱,使非洲许多国家遭受巨大灾难,造成本世纪最严重的粮食危机;60年代以来多次发生的厄尔尼诺事件使众多国家和地区出现气候异常和严重的旱涝灾害;1972年由于严寒给美国带来的能源危机造成经济损失达700亿美元;1988年美国中西部的严重干旱造成粮食减产30%,而孟加拉国却遭受空前未有的水灾。因此,能否准确预报环境的这些异常变化,成为迫切需要解决的重大科学问题。

除自然环境的变化外,由于人类活动所引起的全球气候和生态环境的变化,也日益引起人们的注意。人类活动使大气中 CO_2 、 CH_4 等温室气体含量增加,引起全球气温增高,初步估计到21世纪中叶由此原因可造成全球年平均气温增加 $1.5\sim 4.5^\circ\text{C}$,平均海平面增高70~140cm,这将使人类有可能面临最严重的气候剧烈变化。因此怎样正确估计人类活动对未来气候及人类生存环境的影响,亦成为亟待解决的重大科学问题。

面临这些问题的严峻挑战,70年代以来国际科学联盟理事会分别与下属的一些国际学术组织召开了一系列讨论有关问题的会议,并组织了若干个大型研究计划。其中与气候环境变化及预测紧密相关的有两个研究计划,一是“世界气候研究计划”,另一是“全球变化,国际地圈—生物圈计划”。

“世界气候研究计划”将“确定气候的可预报程度和人类活动对气候影响的程度”作为其总目标。具体目标定为:(1)建立月至季度的长期天气预报方法;(2)预报年际尺度的全球气候变化;(3)估计几十年期间内气候变化的趋势,特别是估计人类活动对气候的影响(WMO/IXSU1984,1985)。通过近十多年的研究人们认识到:气候的形成和变化不仅是大气内部状态和行为的反映,而且是与大气有明显相互作用的海洋、冰雪圈、陆地表面及生物圈等所组成的复杂系统,在太阳辐射能和地热能共同作用下的总体行为。该系统各子系统内部以及各子系统彼此之间的各种物理、化学乃至生物过程的相互作用,决定气候的长期平均状态以及各种时间尺度的变化。必须利用比较完善的、有坚实物理基础的气候模式,才能定量地考虑复杂气候系统中各个成员之间的各种相互作用,并展现气候变化过程,才能准确理解气候变化的机制,使气候预测的可能性得以实现(叶笃正等,1991)。由于记录过去气候变化的各种环境变化序列是检验和校正气候模式的重要基本资料,所以科学家们对过去气候序列的研究给予了高度的重视。他们对近100年仪器记录、对近500年物候观测记录、以及近数千年的树木年轮和有关气候的文献考古资料都进行了研究。从这些研究中人们对气候的短时间尺度变化规律有了相当程度的了解,如11年周期,22年周期,80~90年周期和200年周期;对更长时间尺度变化的规律则因受可用资料序列长度的限制而了解较少。

“全球变化、国际地圈—生物圈计划”的目的在于对未来几十年至百年的自然和人为的

全球环境变化进行预测。它主要是研究地球系统中生物的、物理的和化学的过程以及地球系统各组成部分(大气圈、水圈、岩石圈和生物圈)的相互作用过程。强调地球系统的整体行为对环境的影响、强调人与环境的相互作用(Earth System Sciences Committee, 1988)。其中一个重要的组成部分即是对“过去的全球变化”进行研究,而这一研究则是以“过去的全球气候变化”为中心开展工作的。众所周知,在地球历史上曾经历了四次大冰期,它们分别是寒武纪,奥陶—志留纪,石炭—二叠纪和晚新生代,这是亿年尺度的全球气候变化。其中晚新生代第四纪冰期又以约 10 万年为周期,经历着冰期、间冰期的变化。这种变化影响极为深刻,在地球系统的各子系统中都留下了深深的烙印。赤道海洋沉积、中纬度湖泊沉积、黄土堆积及极地冰盖都记录了这种变化(Shackleton et al. 1973; Kukla, G., 1987; D. Raynaud, 1993)。近年来广大第四纪工作者做了大量的工作(丁仲礼等, 1991; 余志伟等, 1992),证明了在约 10 万年周期中还迭加有万年尺度全球变化。表现为 1.4 万年周期和 2.3 万年周期。这就是著名的轨道驱动机制。

很显然,要对未来百年自然和人为全球环境变化进行预测,关键是要了解全球变化在轨道驱动的万年尺度全球变化规律背景下千年尺度的全球变化规律。只有清楚地了解最近 1 万年来千年尺度的全球变化规律,才能实现地质资料与仪器观测资料的续接和相互订正,真正能反映各时间尺度变化规律的具有坚实物理基础的气候模式才得以产生。

第二节 短期气候变化研究的历史回顾与现状

时间尺度短于轨道强迫周期(10 万 ~ 2 万年)的气候变化定义为短期气候变化(Goodess, 1992)。一般认为最近两万年以来的气候变化研究都属于短期气候变化研究,它包括对末次冰期极盛期(距今 1.8 万年前后)、冰消期(距今 1.5~1 万年前)和冰后期(距今 1.03 万年前至今)气候变化的研究。其中冰后期在地质上称为第四纪的全新世,其间气候经历了升温期、高温期和降温期这样一个完整的间冰期气候演化过程。也就是说短期气候变化研究包括了对典型冰期、典型间冰期及冰期向间冰期过渡等三种气候演化型细节的研究。这对于进一步深入了解更老时期的气候变化规律和预测未来气候变化都具有重要的理论和实践意义。有关这方面的研究成果较多,这里仅就某些主要方法或材料的典型研究工作做一概略的介绍。

一、全新世孢粉古植被气候序列研究

关于全新世孢粉古植被气候序列的详细分期,是由挪威植物学家 A. Blytt(1876~1909)首先进行的。他研究了北欧沼泽沉积中孢粉和植物化石,以树桩层代表干旱气候,以大量泥炭发育代表潮湿气候,划分出气候变动分期,揭示了全新世气候波动的规律。后经 R. Sernander、Godwin、Firbas、Iversen 等用¹⁴C 测定其年代,遂形成了现今国际上已普遍采用的所谓 Blytt—Sernander 冰后期气候方案。其中的气候期有北极期、下仙女木期、阿勒路德期、上仙女木期、前北方期、北方期、大西洋期、亚北方期和亚大西洋期,后五个气候期即属全新世。根据北欧等地区的研究,全新世各时期的变化如下:

前北方期(Pre-Boreal) 10300~9500 a B. P

此时北欧气候干而凉,植物以松、榛为主。属全新世的初期。

北方期(Boreal)9500~7500 a. B. P

北欧孢粉资料显示,气候具有冬季干冷而夏季较温暖的特点。植物在前期仍以松树林占优势,但逐渐被榛属、栎属、槲属和榆属等所代替,最后则发展到以阔叶林为代表的时期。

大西洋期(Atlantic) 7500~5000 a. B. P

当时陆地上生长着大量的常青藤、榉等喜暖阔叶林,形成了以栎、槲、榆等阔叶树为代表的森林植被。在高山上则有松树生长。大西洋期的气候以温暖潮湿为特征,平均气温较现今约高 2℃,又称最高温时期,其中包括气候最宜期。

亚北方期(Sub-Boreal) 5000~2500 a. B. P

此期植被先以栎树为主,继而被松树代替。此期气候较干凉而多变化,冬季相当寒冷,夏季温暖而干燥,显示出从前一时期的海洋性气候向大陆性气候转化。

亚大西洋期(Sub-Atlantic) 2500~0 a. B. P

这时期气候总的是以凉爽潮湿为特征,年平均温度降低,但湿度相当高,沼泽、泥炭普遍发育,植物以山毛榉为主。

Blytt-Sernander 方案在全新世气候研究方面影响深远,因为它正确的反映了全新世气候变化的大趋势。此后世界各地有关全新世古气候研究的孢粉古植被序列与其相比基本上大同小异。直到 20 世纪 80 年代,Webb、Bryson 和 Kutzbach(1974)将 Imbrie 和 Kipp 在研究海洋浮游生物的温度、盐度意义时所用的多元分析技术引进孢粉古植被的研究,开创了从孢粉古植物资料中提取定量的古气候信息的新时代。Sabatier 和 Can Campo(1984)用主要元素分析法从孢粉资料中提取定量的古气候信息;Overpeck 等(1985)用差异性系数的方法研究北美包括全新世在内的晚第四纪孢粉古植被资料;B. Huntley(1990)用差异性制图方法研究了北欧 13000 年以来每隔 1000 年的 13 个时间面植被状况与现代植被之间的差异性。所有这些工作都使得依据孢粉古植被来推断古气候状况的研究工作精度有所提高,但还没能在时间序列上提取出千年尺度的或百年尺度的气候变化规律。所以如何提高孢粉古气候序列的分辨率仍是一个亟待解决的问题。

二、短周期海洋微体古生物群落变化序列研究

自从 1925~1927 年的热带大西洋气象探险队首次获得了海底沉积物顶部 30 多厘米的泥芯以来,学者们就开始利用海洋微体古生物群落生态特征来推断古海洋、古气候变化的研究工作。Schott(1935)、Arrhenius(1952)、Emiliani(1955,1966)、Ericson 等(1954,1966)、Hays(1967,1969)、Kennett(1968,1970)等世界各地的一大批学者,从不同角度研究了海洋微体古生物对古气候、古海洋状况演化的记录,取得了大量有效的成果(见 Lamb, 1977)。至 1971 年,Imbrie 和 Kipp 集海洋微体古生物生态研究之大成,制定出详细系统的根据海洋微体古生物群落推算古海温、古盐度的方法,这就是著名的转换函数(Transfer Function)方法(对该方法的介绍见下节)。Imbrie 和 Kipp 对 54°15' N、16°50' W(深 2393 m)和 24°48' N、75°55' W(深 3110 m)两点的泥芯用转换函数的方法求得了包括全新世在内的最近 25000 年来的 8 月盛行海面水温变化序列和 2 月盛行海面水温变化序列;经谱分析研究,检出了三个准周期成分,分别为 370~380 年、1300 年和 2600 年。

这一成就是古海洋学研究的一个里程碑,对后来的古海洋学研究产生了深远的影响,使得短周期变化研究成为古海洋学研究中的一个新热点。80 年代末 90 年代初对 Younger

Dryas 冷事件的研究形成热潮。Broecker(1982)、Keigwin 和 Jones(1989)、Kudrase(1991)先后撰文报导这一冷事件在世界各地存在的证据。Broecker 和 Denton(1990)提出了解释 Younger Dryas 成因的海洋温、盐环流变化的理论。现在世界大洋温盐环流的特征是:表层暖水在北大西洋直至 800m 深度都是向北流动的,使大西洋欧洲沿岸的气候比同纬度其它地区暖 $6\sim 8^{\circ}\text{C}$;由于这支暖洋流沿途蒸发,使其盐度增加并变冷,在冰岛以南的海域内又遇上北极南下的冷空气使其进一步变冷,密度变大而下沉形成了冷的深水(NADW),在海洋深层向南运动;全球海洋的深水大部分最终发源于此。下沉的海水从这个源地涌进北大西洋深处,然后绕过非洲南端与环绕南极洲的深海洋流相连接,并将冷深水分散到其他大洋中去。Broecker 等的理论认为:北大西洋和北太平洋相对盐度的变化(由于海面温度和蒸发速度的变化,淡水和融冰水输入的变化,水汽输送的变化等原因)可以造成海洋温盐环流型的方向逆转。在北大西洋一旦失去向北流动的海面暖水团(即墨西哥湾暖流或热传送带系统),北欧的温度将下降 $6\sim 8^{\circ}\text{C}$,也就是说大量的淡水涌入北大西洋将降低它的盐度,使得深水制造停止,热传送带“断开”;反之,若无淡水涌入则盐度上升,深水制造恢复,表示热传送带“接通”。这种“接通”和“断开”的时间间隔构成了大约 2000 年的循环。最后一次间冰期中有 4 个时段发生北美大陆 Laurentide 冰盖的融冰水向北大西洋大量排放,致使热传送带断开,导致大西洋欧洲沿岸尤其是西北欧的气候迅速变冷,促使小仙女木冷事件加速形成。由于气候变冷,北美冰盖的凸角向前推进,越过从 Agassiz 湖(北美五大湖之一)流出的河流,堵塞了它的出海口,使融冰水转向南部的密西西比河流域,并从墨西哥湾流进低纬度的大西洋。于是北大西洋的盐度上升,深水制造开始,热传送带恢复自身的活动,使气候变暖。气候变暖后,冰盖的凸角被融解,整个冰盖的融冰水又开始从北部的圣劳伦斯涌入北大西洋,导致那里的盐度下降,深水制造停止,热传送带被断开,重新导致气候变冷,如此循环往复。Stocker 和 Wright(1991)模拟研究了温盐环流变化的特征,部分地支持了 Broecker 等的理论。于是有些研究者推测,全新世中观测到的冰川再次前进事件均伴随着类似于 Broecker 提出的海洋环流运行方式的改变(Bjerknes, 1968; Weyl, 1968),但对这种振荡为什么发生在千年的时间尺度上没有作出解释(章基嘉, 1995)。

三、极地冰芯短周期气候变化序列的研究

通过钻取极地冰盖的冰芯来研究气候变化的历史是一门新兴的学科。由于根据污化层定年方法确定的冰芯年代序列的时间分辨率极高且很准确,所以冰芯古气候环境的研究发展很快,逐步形成了一个大综合学科,对大气科学、古海洋学都产生了重大的影响。本节扼要介绍这方面的主要进展。

较早的冰芯 $\delta^{18}\text{O}$ 序列是 Langway(1967)用格陵兰北部(77°N , 56°W)一个长 400 米的冰芯材料测出的。当时他估计此序列记录了 1000 年来气候的季节性变化。此后 Dansgaard 等(1971, 1975)又继续对格陵兰 Camp century 和 Crete 两地的冰芯气候序列进行了谐波分析,并利用谐波分析结果合成的气候变化曲线尝试性的预报了未来 100 年的温度(见 Lamb, 1977)。

进入本世纪 80 年代,根据冰芯气泡分析研究大气成分变化史的工作蓬勃开展起来。Delmas 等(1980)、Neftil 等(1982)先后撰文报导了根据冰芯气泡分析得到的大气 CO_2 含量变化的时间序列。其结果表明:在最近一次冰川极大期,大气 CO_2 含量大约只有 $180\sim 240$

PPmv,约为现在(据 Houghton 等为 353PPmv)的 50%~70%。后来 Barnola 等(1987)分析了南极 Vostok 16 万年来的冰芯序列,得出了高分辨率的 CO₂ 变化序列。Jouzel 等(1987)通过分析该序列的氘(2H₂)含量变化得到了温度变化序列。Goodess (1992)将冰芯的 CO₂ 序列、温度序列与 65°N 7 月日射和海洋氧同位素反映的冰体积序列进行对比研究后发现:在增暖事件中 CO₂ 和温度的变化几乎是同时发生的,但落后于日射的变化;在变冷的事件中,CO₂ 和温度的变化再次落后于日射的变化,但 CO₂ 的变化明显落后于温度的变化。他认为这种位相关系表明,CO₂ 可能提供一种正反馈,而不是一种驱动机制。关于大气 CO₂ 浓度与气候变化的机制还涉及到海洋生物生产力的变化。当海洋生产力增大时,生物新陈代谢使海洋中的 CO₂ 浓度增加,大气中的 CO₂ 浓度减少。在变冷事件中由于海平面下降,暴露在大陆架上营养物丰富的有机沉淀物被侵蚀,这能增加洋面的营养物含量,从而导致冰期海洋生产力的增加。所以冰芯中 CO₂ 的序列间接反映了大气 CO₂ 浓度、极地冰盖体积及海洋生产力的演化史。

南极 Vostok 和 Byrd 两站冰芯序列反映:从冰期向间冰期过渡期间大气甲烷(CH₄)的浓度几乎增加了一倍,即从 350 PPbv 增至 650 PPbv(Stouffer 等,1988)。虽然 Vostok 同一冰芯的 CO₂ 和 CH₄ 记录呈正相关关系,但控制这两种气体浓度变化的过程是不同的。CO₂ 的变化主要受海洋环境及其化学属性变化的调制。而 CH₄ 的变化则很可能反映陆地过程,即 CH₄ 波动主要反映了湿地面积的波动,其中与季风强度变化相关联的低纬度湿地范围的变化极为重要。

Vostok 冰芯记录还提供了过去有关气溶胶的信息(Legrand 等 1988; Petit 等 1990)。来源于海洋和陆地的气溶胶在大气中的载荷,一般在冰期比间冰期要大。载荷增加与冰期中气溶胶源地和输送量增加有关。较大的风速、较强的经向环流、干旱陆面的扩大和因海平面下降而造成的陆架外露都对气溶胶的增加有贡献。

Lories 等(1990)通过多元分析得出结论,温室气体浓度变化、气溶胶载荷、日射变化、冰体积变化合在一起可以解释 Vostok 温度记录方差的 90%以上。可以预见,万年以内千年尺度的高分辨率冰芯序列的综合研究,将对揭示大气环流、大陆环境和古海洋环境在千年尺度上的变化规律做出重大的贡献。特别值得一提的是我国在世界第三极青藏高原上也开展了山岳冰帽冰芯气候学研究,取得了较好的研究成果(施雅峰等,1993)。

四、树木年轮气候学

最早报导树木年轮气候研究成果的是 Huntington(1913)。早在 1911~1912 年,他就在加利福尼亚国家红杉森林公园中对 451 棵红杉做了年轮测定,许多树木的树龄在 2000 年以上,有的则超过 3000 年,总共测定了 10500 个年轮,从中总结出加利福尼亚内华达山脉自公元前 1300 年以来降水量的变化序列。1937 年在 A. E. Douglass 的指导下,创立了从事这项研究工作的领导中心—亚利桑那大学树木年轮实验室,此后对树木年轮的研究工作逐渐在世界各地展开(见 H. H. Lamb, 1977)。

树木年轮的最突出特点是定年准确。它可利用不同树龄的树轮序列相互重叠的关系进行外延性续接,从而得到相当长的精确定年的高分辨序列。树木生长轮的宽窄受多种环境因子的影响。在高纬和高山的树木生长限附近,生长季温度的高低是树木生长的限制性因素,因此这里的树轮序列实际上就是当地夏季气温的序列;而在干燥地区的边缘,自然生长的树

木其限制性因素是降水量的多少,因而其树轮序列即为降雨量变化序列。

在芬兰北部(68~70°N, 22~29°E)地区, Siren(1961)建立了公元 1181~1960 年的树轮序列。对这一序列研究的结果, 诊断出 70 年、90 年和 200 年的三个主周期。Siren 认为这一结果可用于当地的气温预报。

Fritts 等(1971)和 La Marche 及 Fratts(1971)将多元统计分析应用到美国北部树轮资料中。着手鉴定那个地区的树木生长变化和海平面大气压分布变化的特征向量, 并根据这两组特征向量之间的相关关系推论北半球的大气环流型。具体做法是用 1900~1962 年的气压和树木年轮资料确定各自的最重要特征向量和它们之间的相关关系。然后将这种关系用到开始观测气压以前年份的树轮序列上, 并将其转化为气压和风场环流的序列, 最后通过延长后的气压、风场环流序列来研究大气环流类型的演变特征。

70 年代末到 80 年代, 学者们开始研究树轮稳定同位素与气候因素及大气 CO₂ 浓度变化的关系。T. Mazany 等(1980)和 P. P. Tans 等(1980)研究了树轮中的 $\delta^{13}\text{C}$ 后指出, 当气候条件利于树木生长时, 年轮较宽, 表明植物代谢活动加快, 使被树木大量吸收的 CO₂ 中的 ^{13}C 含量偏低。但 Francey, R. J.; Farquhar G. D. (1982)认为上述情况是不可能的。因为植物呼吸的 CO₂ 很快与大气混合了, 因而局部地区的 $\delta^{13}\text{C}$ 的变化不会产生。据刘荣漠等(1991)研究, 树木年轮的 $\delta^{13}\text{C}$ 值与树轮宽度基本上呈反对射关系(Anticorrelation), 但并不严格受控于树轮宽度, 它们是独立的气候指标; $\delta^{13}\text{C}$ 年轮序列可能提供大气 CO₂ 含量变化的记录。

相对于树轮稳定同位素气候的研究来说, 树轮的放射性同位素与太阳活动关系的研究要深入和成熟得多。现代太阳辐射研究指出, 太阳风(太阳输出的高能粒子流)的变化对高层大气中 ^{14}C 的生产有调制作用。在 11 年太阳循环中, 太阳风的磁性变化可能导致大气 ^{14}C 序列年生产量发生 20% 的变化, 且使得大气高 ^{14}C 与低太阳黑子数的周期相联系(见章基嘉, 1995)。树轮 ^{14}C 实际上是大气 ^{14}C 浓度的记录, 因此可以根据树轮 ^{14}C 序列来研究太阳黑子活动的变化情况。

Eddy(1976, 1986)从最近 700 年树轮的 $\delta^{14}\text{C}$ 记录中, 识别出 18 次太阳黑子活动极高或极低的事件。将这一序列与其他作者不同的气候指标变化序列进行对比研究, 结果得到在每个低太阳黑子活动(高 ^{14}C)事件中, 中纬度冰川前进, 温度下降; 在每个高太阳黑子活动(低 ^{14}C)事件中, 冰川后退, 温度上升。现在已经有比较长、且比较可靠的树木年轮 $\delta^{14}\text{C}$ 记录可用。从这些记录中已识别出与太阳活动有关的谱峰值是: 2400 年、1000 年、200 年和 80~90 年的周期(Suess, 1980、Hood and Jirikowic 1990、Sonett and Finny 1990)。Wigley(1988)研究太阳活动与全新世气候波动的关系, 结果发现冷气候事件和 ^{14}C 极大事件存在相关关系, 并达到了 0.05 的置信水平。

所有上述研究在短周期气候变化与太阳辐射变化间已建立起初步的关系。

总结本节可以看出, 在短期气候变化研究中, 能够明确提出千年尺度气候变化规律的研究成果不多, 能定量的描述千年尺度气候变化波动幅度的研究成果更少。这主要受到代用气候指标对气候环境变化敏感性的限制, 以及代用气候指标与气候指标间是否存在定量关系等问题的制约。因此有关代用气候指标敏感性及其与气候指标间数量关系的研究就成为深入开展“过去的气候变化研究”工作的重要核心问题之一。

第三节 古气候代用指标转换研究的意义及其主要发展过程及现状

一、古气候代用指标转换研究的意义

对过去气候环境变化研究的基本途径是研究沉积地层的各种生物的、物理的、化学的特性,寻找那些可直接测量的地层特征指标与气候环境之间的对应关系。然后通过测量这些指标获得有关气候、环境变化的信息。这些表征地层生物、物理、化学特性的可直接测量的指标,通常并不是直接表征气候、环境特征的指标。因而它们本身并不是气候指标或环境指标。但它们和形成地层时的气候、环境状况紧密相关,一般说来它们的变化在某种程度上可反映当时气候环境状况的变化,因而被称为古气候环境的代用指标。

当研究对象的空间尺度和时间尺度都较大时,气候环境变化的幅度也较大,因而只要了解各代用指标与气候环境状况之间定性的或半定量的对应关系,便可研究了解气候环境变化的规律,此时不存在古气候代用指标定量转换研究的问题。随着研究工作的深入要求了解气候环境变化的细节,人们希望了解千年尺度和百年尺度的气候环境变化规律。这种尺度的气候环境变化是在大尺度气候环境变化规律的背景上迭加的次一级的变化,其突出特征是变幅小。因此需要研究了解古气候环境代用指标与现代气候、环境指标间定量地相互转换的关系。一般把这种研究简称为古气候环境代用指标定量转换研究。

古气候环境代用指标定量转换研究,不仅要研究各种代用指标与气候指标间统计的定量关系,还要研究形成这种定量关系的过程及其机理(包括生物的、物理的、化学的机理),更要研究能够保证这些定量关系成立的基本条件。关于环境过程和机理的研究,不仅能为定量关系提供可靠的物理、化学基础,还有助于人们理解环境演化中各环境要素间相互作用、相互影响的反馈机制,是全球变化研究中有关建立环境演化概念模型的基础。定量转换研究中关于形成定量关系所需条件的研究对于人们选择适当的地质体和地质体中适当的物质材料进行研究具有指导意义。只有完成了上述三方面的研究,才能从满足条件的地质体中,用适当的方法(受形成定量关系的机理所限制)去测量某些代用指标,通过定量转换得到定量的气候环境指标随时间变化的序列。所以定量转换研究是客观地恢复和重建可靠性高的气候环境演化序列的基本保障;是全球变化研究的核心问题之一;在某种程度上对全球变化研究的深入和发展具有决定性的意义。

二、古气候定量研究的历史回顾与现状

在古气候、古环境研究中,人们总是在探索着获取定量的气候信息的方法,其中最早引起学术界普遍关注的是50~70年代的同位素古气候研究。这方面的研究以Emiliani(1955, 1966)和Shackleton(1976, 1977)的研究为代表,做出了著名的深海沉积氧同位素气候曲线;映证了Milankovitch冰期天文理论;对第四纪的海面温度、极地冰盖体积和全球海平面升降都做出了粗线条的定量地描述。经后来的深入研究,人们逐渐认识了大洋沉积中碳酸盐物质的稳定同位素取决于众多的地方环境因素,从中直接提取高精度的定量的气候信息比较困难(Alan. C. Mix, et al, 1984)。

Imbrie 和 Kipp (1971)提出了转换函数方法(Transfer, function),开辟了利用微体古

生物数据对古环境参数做定量分析的新途径。

Imbrie 和 Kipp 的基本思想是研究现代洋底表层沉积中的微体古生物区系特征,并将其与现代表层水域的平均温度和盐度作多元相关分析,从而求得将微体古生物群落组合的统计数据转换为气候数值的回归方程,即所谓的转换函数。他收集整理了大量现代大洋表层沉积的微体古生物群落统计数据,并将其归并为 5 个典型小群体。它们是:

(1) 热带小群体:现在在西部大西洋 30°N 和 30°S 之间及非洲近海 10°N 和 10°S 之间的范围内占优势。优势有孔虫种类为 *Globigerinoides ruber* 和 *G. Sacculife*。其次为 *Globorotalia menardi* 和 *Pulleniatina obliquiloculata*。

(2) 副热带小群体:现在在上述(1)与南北 40~45°纬度之间的范围占优势。优势有孔虫种类为 *Globigerinoides truncatulinoides*、*G. falconensis*、*G. inflata* 和 *G. calida*。

(3) 副极地小群体:现在大体上分布在(2)以北直到 66°N 的北大西洋漂流带和(2)以南远至南极辐合带地区。优势有孔虫种类为 *G. pachyderma*, *G. bulloides* 和 *Globigerinita glutinata*。

(4) 极地小群体:优势有孔虫种类为 *G. pachyderma*。

(5) 副热带边缘小群体:现在主要沿着南北大西洋的副热带及气旋的外围活动。最有代表性的有孔虫种类为 *Globorotalia menardi* 和 *Pulleniatina obliquiloculata*。

将各小群体在不同海区样品中的统计数据与当地表层海水的气候数据作多元回归分析,求得了拟合的回归方程即转换函数。研究工作中将地层柱中微体化石的含量带进转换函数,就可逆推估算古海温。用这种方法能够恢复冬、夏大洋表层古水温变化序列,使古气候定量研究有了长足的进展。但转换函数法也存在它自身的缺陷。转换函数中因子数目的多寡及有孔虫种、属数的增减对古温度的转换有相当程度的影响,具体应用过程中对这两方面的选择又没有客观的标准,具有某种程度的随意性。

Overpeck J. T, et al(1985)提出了现代相似型法。他们利用北美东部 1618 个现代湖沼表层样的孢粉组合,构造了八个差异性系数。以这些现代孢粉样为样本,检验了差异性系数的灵敏度,定义了每个系数的临界值。当差异系数不超过临界值时,即说明参加计算的这两个孢粉样是起源于同一植被区,属同一植被类型,代表了相同的气候环境条件。将化石孢粉序列与现代孢粉数据库结合计算差异性系数,就为化石孢粉找到最接近的现代相似型,从而确定了化石孢粉所代表的定量气候条件。现代相似型法使定量地重建古气候序列的物理机制更加明确,重建的定量序列可信度更高。但是它也有不完善的地方。Guiot(1987)注意到:①化石孢粉谱并不总有现代孢粉的相似型与之对应;②小区特性(如暴露情况、小气候、微地貌特征等差异)对古植被及其孢粉谱的影响;③一定时期的植被既是当时气候的函数,又是前期植被的函数,所以需要考虑植被演变史。最后,现代气候与植被的对应关系受到了人类活动的影响,这也会影响重建的古气候序列的精度。

除了上述三种影响较大的定量提取古气候信息的方法外,不同学者出于不同的考虑,针对不同的问题还发展了一些方法,如反应面法和目标因子分析法等(魏国彦,1993)。需要特别强调的一点是这些不同的方法都具有一个突出的特点,即区域性。不仅太平洋、大西洋、印度洋各有其自己的转换函数,而且对西太平洋来说,它的区域性转换函数比整个太平洋的转换函数更适用些。最近的研究表明(QinDahe, 1992),南极大陆东部现代表层雪的 $\delta^{18}\text{O}$ 的值与温度的对应关系就与西部的不同。对现代相似型法来说各大区域需要有自己的现代孢粉

(或微体古生物)组合与气候要素的对应关系的数据库则是不言而喻的事了。

从区域的角度看,东亚地区相对各大洋和欧、美大陆在古气候定量研究方面落后很多,80年代中期以前几乎没见到定量研究古气候的成果。1988年王律江、汪品先借用 Thompson 建立的西太平洋转换函数 EP12E,对南海北部陆坡下部的 V36-06-3 沉积柱状样进行推算古温度的尝试。他们讨论了南海作为边缘海在冰期时的行为特征与大洋行为特征的异同,取得了良好的效果。1990年吴锡浩等用计算化石孢粉的地带性概率分布的方法,尝试性的恢复了北京延庆盆地早更新世的定量古气温序列。东亚地区在古气候定量研究方面的落后局面引起了中国第四纪研究者的高度重视。90年代初地矿部水文所结合“八五”重点基础研究项目——“中国北方晚更新世以来地质环境演化及未来生存环境变化趋势预测”专门设立了“晚第四纪堆积的古气候、古环境地质标志和物理、化学指标及转换关系的研究”的课题,进行有关定量研究古气候的探索。中科院地质所也在国家自然科学基金和国家“八五”重大自然科学基金资助项目中作了安排。另有一些自由申请的基金课题也在定量研究古气候方面做了相应的工作。这些工作的一个最大特点就是特别注重基础工作,强调基本数据的代表性和可靠性,强调基本关系的物理化学机理。使我国定量研究古气候的工作从一开始就建立在坚实可靠的科学基础上。

第四节 研究内容和方法

本研究的最终目的是恢复和重建全新世黑垆土发育时期黄土高原定量的分辨率气候、环境演化序列,并通过研究这些序列了解千年尺度全球变化在黄土高原地区的表现特点。为此,首先需要进行古气候代用指标定量转化的研究。

就古气候、古环境的定量研究本身而言,不是为了定量而定量,而对是古气候、古环境研究的深化和精确化。因此必须要在大量较为深入的定性研究基础上,对大量可直接测量的地质指标进行筛选,找出那些与气候、环境指标可能存在定量关系的地质指标,并对其进行深入的研究,从而确定它们之间的定量关系。从某种程度上讲,它是一个寻找客观上存在着的定量关系的过程。

在东亚地区,第四纪以来发育的黄土、古土壤堆积序列是世界闻名的气候、环境演化历史记录的重要信息库之一。在60~80年代运用古地磁、ESR、热释光、光释光、 ^{14}C 等多种断代手段对其进行了年代学研究(刘东生等,1985;王永炎等,1985)。同时还运用重矿物、地球化学、古生物、稳定同位素及宇宙核素等方法对其进行了重建古气候序列的研究。出现了堪与深海氧同位素气候序列媲美的磁化率气候序列和全氧化铁气候序列(张宗祜等,1989;孙建中等,1991)。特别是魏明建(1991)突破了黄土孢粉分析的难关,首次做出了每样都有足够统计鉴定数的孢粉、古气候序列。使得对黄土地层开展古气候、古环境定量研究的时机已经成熟。所以我们在对黄土中全氧化铁的气候意义深入研究的基础上,做了黄土高原现代表层黄土中全氧化铁与现代黄土高原气候指标间定量关系的研究。探讨了有关形成定量关系的机理问题。提出了进行定量转换所需的基本条件。此外还探索研究了现代表土中植物残体的稳定同位素特征及黄土高原现代植被花粉的稳定同位素特征,发现了一些可能形成定量关系的良好苗头。

在定量转换研究的基础上,我们在黄土高原的不同地点做出了12个全新世黑垆土及其

以上黄土地层的高分辨率全氧化铁气候序列。通过研究这些序列各自本身纵向上的变化特征和各序列间横向上的变化特征,概括出黄土高原环境演化的典型模式。并将概括出的典型演化模式与全球演化序列进行对比,从而初步了解了千年尺度全球变化规律在中国黄土高原的表现。

具体做法是,在野外工作中用认识 S_1 及其以上地层的五个地层单元的方法,确保我们所研究的黑垆土是全新世的黑垆土。在对全新世黑垆土发育时期的气候变化特点进行研究时,用峰、谷之差的统计数据来证明该时期黄土高原的环境变化存在着变幅小,但变化明显而稳定的波动。其时间尺度约为 2 千年。然后通过各序列的绝对趋势分析,以及其所处地理位置的地理地带性和区域分异规律的分析,概括出气候环境演化的三种典型模式。最后将这三种典型模式与不同的全球变化序列进行对比研究,以阐明其在全球变化研究中的意义。