

中国西部环境和生态科学研究丛书

# 中国西部环境 演化集成研究

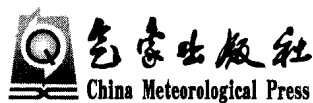
丁仲礼 等 编著

本书由国家自然科学基金委员会“中国西部环境和生态科学”重大研究计划资助

“中国西部环境和生态科学”研究丛书

# 中国西部环境演化集成研究

丁仲礼 等 编著



## 内容简介

本书是国家自然科学基金委“中国西部环境和生态科学研究计划”的资助成果之一。本书定名为《中国西部环境演化集成研究》，目的是对有关我国西部地区的气候、环境、生态演变历史和机制的研究成果作一总结。内容涵盖了地质、古气候、古生态各学科。全书共分四章，内容丰富、资料翔实，对构造尺度、地球轨道尺度、过去 2000 年及最近 100 年的古气候的新进展进行了集成，是有关中国西部环境演变全面、系统的一本综合专著。

本书可供地学等相关专业的科研工作者、高等院校师生参考。

## 图书在版编目(CIP)数据

中国西部环境演化集成研究/丁仲礼等编著. —北京:气象出版社,2010.9

(中国西部环境和生态科学研究丛书)

ISBN 978-7-5029-5045-3

I. ①中… II. ①丁… III. ①自然环境-演变-研究-西北地区②自然环境-演变-研究-西南地区 IV. ①X21

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 178666 号

Zhongguo Xibu Huanjing Yanhua Jicheng Yanjiu

## 中国西部环境演化集成研究

丁仲礼 等 编著

出版发行:气象出版社

地 址:北京市海淀区中关村南大街 46 号

总 编 室:010-68407112

网 址:<http://www.cmp.cma.gov.cn>

责任编辑:蔺学东 李太宇

封面设计:燕 彤

印 刷:北京中新伟业印刷有限公司

开 本:787 mm×1092 mm 1/16

字 数:615 千字

版 次:2010 年 9 月第 1 版

印 数:1~1500

邮政编码:100081

发 行 部:010-68409198

E-mail: [qxcbs@263.net](mailto:qxcbs@263.net)

终 审:章澄昌

责任技编:吴庭芳

印 张:24

印 次:2010 年 9 月第 1 次印刷

定 价:70.00 元

本书如存在文字不清、漏印以及缺页、倒页、脱页等,请与本社发行部联系调换。

# 前言

2001年,国家自然科学基金委员会启动“中国西部环境和生态科学”研究计划,其后启动了“全球变化与区域响应研究计划”。这两个研究计划主要针对气候、环境问题,通过“顶层设计、自由申请”的方式实施,来自全国高校和科研院所的许多同行参与其中。经过数年的工作,围绕我国及全球的气候变化问题和环境演化问题,积累了大量的资料,产生了一批有一定质量的研究论文。在此基础上,国家自然科学基金委员会的有关人员提出围绕一定的主题,对相关成果作一集成。本文集就是在这样的背景下产生的。

本文集定名为《中国西部环境演化集成研究》,目的是针对我国西部地区的气候、环境、生态演变历史和机制的研究成果作一总结。应该说,我国西部环境演化研究的历史比较长,由于研究材料比较丰富,从事这方面研究的人员比较多,有关研究成果的影响也比较大。在设计本文集编写时,我们的一个指导思想是尽可能将以前的研究成果同这三个研究计划产生的新成果集成在一起。在具体编写过程中,又充分考虑了时间尺度与空间分区问题。在时间尺度上,分构造尺度、轨道尺度与历史尺度分别总结。构造尺度的资料集成主要集中在晚新生代;轨道尺度则放在第四纪时期,同时将末次冰期—间冰期旋回过程中我国西部环境的空间变化作为重点内容;历史尺度的集成强调高分辨率,集中在替代性指标记录较丰富的过去两千年以及有器测记录的过去一百年。在空间上,原则上分西南季风区、黄土高原区和内陆干旱区分别集成资料,但到目前为止,西南季风区的资料相对较少,对相关问题的集成有难度,因此我们的工作重点放在北方。

本文集初稿完成以后,编写小组的成员开过一次交流会,有关章节的执笔人就如何选取资料、集成资料,以及主要结论和存在问题等方面做了介绍,并在共同讨论的基础上完成定稿工作。在交流过程中,一个重要的内容是如何从机制上理解我国西部气候、环境、生态变化同全球变化的动力学联系,我们试图在这个问题上有所突破或深入,并使本文集的质量有所提升。现在看来,我们达到了部分目的,一些章节的编写者确实在动力机制研究上有所收获。我在这里举三个例子。

一是关于东亚夏季风强弱变化的控制因素问题。在东亚古季风研究中,有关夏季风的指标很多,并且可以相互验证,故其强弱变化历史比较容易确定。从本文集总结的资料看,至少在千年以上时间尺度上,夏季风的变化都表现出一个

共同的特征,即全球性的温暖期夏季风加强,寒冷期夏季风减弱。如在构造尺度上,根据黄土高原红黏土记录以及西部夏季风边缘区河湖相记录,发现随着晚新生代全球气候变冷,夏季风强度整体上呈下降趋势。尤其在甘肃秦安红黏土沉积中,可以在中新世中早期发育的古土壤中见到大量的黏粒胶膜,表明当时的秦安地区存在季节性水分过剩现象,这个现象从中新世晚期起就不再出现;在轨道时间尺度上,夏季风强弱变化与温度的关系明显,它反映在黄土高原间冰期时发育红色土壤,冰期时堆积黄土,沙漠的界线间冰期时往北退,冰期时往南进等等;在末次冰期的 D-O 旋回时间尺度上,也表现为温暖期时黄土颗粒变细、寒冷期时变粗的规律;到了全新世,夏季风的变化也同全球温度变化有明显的相关性,比如大暖期时夏季风增强,从 4000 年前变冷起,夏季风呈下降趋势。到目前为止,我们可以比较肯定地说,在构造尺度到千年尺度这个范围内,这个规律是很明显的,至于在中世纪温暖期—小冰期这样的变化尺度上,是否有规律存在,现在还难以下结论。这样的变化规律表明,全球温度背景是东亚夏季风变化的首要控制因素。从机制上可以做出以下分析:全球温度增加时,表现为高纬地区的增温幅度远大于低纬区,从而导致极地到赤道的温度梯度变缓,大气环流格局作出调整,即气候带整体往北推移,有利于暖湿气流从南往北输送。或许我们从宏观上理解季风同全球变化的动力学联系时,事情就那么简单。这个模式对青藏高原隆升导致季风不断增强的假设是个挑战,因为青藏高原从晚新生代以来的隆升并没有导致夏季风整体增强,而是恰恰相反。

二是关于轨道尺度亚洲季风变化的动力机制问题。关于这个问题,目前主要有两派相互交锋的学说。一派的依据主要是黄土中起主导作用的 10 万年周期,这个周期同冰盖变化相一致,因此认为冰盖变化是季风变化的主要“相位锁定因子”,而冰盖变化的信号可能是通过对冬季风、海平面升降的影响而传导至季风系统;另一派的依据主要是南方石笋记录中强烈的 2 万年周期,此周期为岁差周期,控制低纬地区的太阳辐射变化,因此这一派认为是地球轨道变化导致的太阳辐射变化直接控制了季风的强弱变化。两派学说各有明确的证据,它们之间可否调和?这点在本文集写作过程中做了较多讨论。我们的初步观点是这两派观点或许都有道理,但可能只适用季风系统变化的某个部分,因此在文集中提出“相互作用”假说。这个假说认为太阳辐射和冰盖变化是控制季风变化的两个终端因子,这两个因子对控制季风变化而言,是相互竞争与相互作用的,太阳辐射对热带季风的控制作用比较明显,而冰盖变化则对副热带季风有更强的控制作用。这个假说可同前面两个假说一起,接受今后研究工作的检验。如果今后低纬地区陆相沉积中发现明确的十万年周期的存在,那么可以认为石笋的氧同位素记录不一定反映了季风变化,而应该接受冰盖控制假说;如果南方地区其他沉积中也发现强烈的岁差周期信号,则“相互作用”的假说可能是成立的。

三是关于内陆干旱区气候变化的动力机制问题。从本文集的集成成果可以看出,西部内陆干旱区在全新世的变化格局同季风区有很大的区别,主要表现在内陆区进入全新世适宜期的时间要晚得多。在早全新世,季风区进入湿润期时,内陆区尚处在暖干环境中,这个现象表明内陆区与季风区的气候变化驱动因子有很大的不同。本文集提出的一个观点是:北大西洋的水汽输送可能是控制内陆干旱区降水变化的一个重要因素。我们知道,北大西洋的海面温度受冰盖融水的影响很大,而海面温度又是大气水汽含量的决定性因素。当我们考虑我国内陆干旱区的干湿变化时,有两个因素需重点考虑,一是西风带的位置,它决定了大西洋和地中海水汽从西向东输送的路径,二是大西洋和地中海的水汽蒸发状况。可以想见,在北半球高纬区冰盖较大、温度较低时,西风带会相对南移,这就可以保证水汽输送通道的畅通,但如果海面温度较低时,可供输送的水汽量就会较小。因此,真实的“故事”可能是这样的:进入全新世暖期后,由于北半球冰盖融化过程的相对滞后,北大西洋的海面温度相对较低,大气的水汽含量亦相应较低,尽管该时期西风带位置会相对靠南,其强度亦可能较强,但还是不能保证较多水汽的从西往东输送,因此全新世早期我国内陆干旱区湿度相对较低。随着全新世大暖期的演进,北半球冰量在距今 6000 年前后达到最小值,我国内陆干旱区的降水随之而增加。

总之,我个人认为:除了将过去资料集成之外,探索区域气候、环境变化与全球变化的动力学联系是本文集的重要内容。

通过这个集成工作,我们也认识到,围绕中国西部环境系统演化这一命题,我们还有许多新的工作要做。比如说,距今 2000 年以来环境变化的重建对理解今后变化趋势非常重要,但受材料的限制,这一块工作还很难真正达到集成研究成果的程度。诸如气候、环境信号的提取,尤其是温度变化信号的提取很难做到,不同代用指标间的可对比性不强。显然,基础性工作还没有做到这一步。又比如,西部内陆干旱区完整的有关冰期—间冰期旋回过程中,气候、环境、生态的动态演化过程的完整记录迄今尚未获得,更毋论其空间格局的变化。还有,古气候变化的数值模拟工作做得很少,这对深入理解西部环境变化机制是一个限制因素。希望有关同行在今后研究中,能挑选真正有挑战性的问题,取得更有影响力的成果。

丁仲礼

中国科学院地质与地球物理研究所

2010 年 5 月

# 目 录

## 序

## 前言

|                                     |      |
|-------------------------------------|------|
| 第 1 章 晚新生代气候演变趋势 .....              | (1)  |
| 1.1 22—8 Ma 风尘沉积记录的季风演变历史 .....     | (1)  |
| 1.1.1 引言 .....                      | (1)  |
| 1.1.2 新生代早期西部的环境格局 .....            | (2)  |
| 1.1.3 亚洲季风主控环境和内陆干旱环境的起源 .....      | (4)  |
| 1.1.4 中新世亚洲季风环境和内陆干旱环境的大尺度演化 .....  | (8)  |
| 1.1.5 亚洲内陆干旱和季风环境演化的动力因素与机制探讨 ..... | (12) |
| 1.1.6 需深化研究的问题 .....                | (15) |
| 参考文献 .....                          | (16) |
| 1.2 8 Ma 以来风尘沉积记录的季风演变历史 .....      | (19) |
| 1.2.1 前言 .....                      | (20) |
| 1.2.2 黄土土壤地层 .....                  | (20) |
| 1.2.3 红黏土地层 .....                   | (26) |
| 1.2.4 时间标尺 .....                    | (30) |
| 1.2.5 8 Ma 以来东亚季风演化 .....           | (35) |
| 1.2.6 存在问题讨论 .....                  | (44) |
| 参考文献 .....                          | (44) |
| 1.3 晚新生代西部内陆干旱区环境演变 .....           | (49) |
| 1.3.1 引言 .....                      | (49) |
| 1.3.2 区域地质概况 .....                  | (50) |
| 1.3.3 塔里木盆地西南典型新生代剖面的沉积学记录 .....    | (51) |
| 1.3.4 塔里木盆地中新世末期出现干旱化加剧的动力学机制 ..... | (59) |
| 1.3.5 问题与展望 .....                   | (62) |
| 参考文献 .....                          | (62) |
| 1.4 中国西部晚新生代生态演化 .....              | (63) |
| 1.4.1 材料和方法 .....                   | (64) |
| 1.4.2 孢粉记录和晚新生代生态演化 .....           | (66) |
| 1.4.3 碳同位素记录和晚新生代生态演化 .....         | (79) |
| 1.4.4 讨论 .....                      | (89) |
| 参考文献 .....                          | (91) |

|                                    |       |
|------------------------------------|-------|
| <b>第2章 末次冰期旋回中的西部环境</b>            | (95)  |
| 2.1 黄土高原末次冰期气候不稳定性                 | (95)  |
| 2.1.1 引言                           | (95)  |
| 2.1.2 研究点和地层                       | (96)  |
| 2.1.3 粒度记录                         | (97)  |
| 2.1.4 时间标尺                         | (97)  |
| 2.1.5 黄土千年尺度事件集成序列及其与冰芯、石笋和海洋记录的对比 | (99)  |
| 2.1.6 末次冰期千年尺度气候变化的机制              | (100) |
| 2.1.7 存在问题和展望                      | (103) |
| 参考文献                               | (103) |
| 2.2 MIS3 阶段西部环境的空间特征               | (107) |
| 2.2.1 末次冰期间冰段气候的特殊性及其不稳定性          | (107) |
| 2.2.2 腾格里沙漠区古湖泊记录及研究               | (108) |
| 2.2.3 额济纳盆地及巴丹吉林沙漠区                | (111) |
| 2.2.4 柴达木盆地                        | (112) |
| 2.2.5 吉兰泰—河套地区                     | (116) |
| 2.2.6 黄土高原西部的记录                    | (117) |
| 2.2.7 存在问题及展望                      | (120) |
| 参考文献                               | (121) |
| 2.3 末次冰盛期我国北方沙漠空间分布                | (125) |
| 2.3.1 引言                           | (125) |
| 2.3.2 古沙漠范围的重建原则                   | (126) |
| 2.3.3 来自沙漠的证据                      | (126) |
| 2.3.4 黄土高原粒度空间变化所指示的末次冰盛期沙漠分布      | (130) |
| 2.3.5 问题和展望                        | (132) |
| 参考文献                               | (133) |
| 2.4 内陆干旱区全新世环境演变                   | (134) |
| 2.4.1 研究进展和意义                      | (135) |
| 2.4.2 亚洲内陆干旱区全新世气候与环境变化的地质记录       | (137) |
| 2.4.3 亚洲内陆干旱区全新世湿度变化集成             | (147) |
| 2.4.4 讨论和展望                        | (148) |
| 参考文献                               | (154) |
| 2.5 黄土高原及周边地区全新世适宜期生态格局            | (161) |
| 2.5.1 引言                           | (161) |
| 2.5.2 黄土高原全新世塬区植被                  | (162) |
| 2.5.3 黄土高原沟谷区全新世植被特征               | (164) |
| 2.5.4 黄土高原西部陇中地区全新世阶地剖面            | (169) |
| 2.5.5 黄土高原及周边地区全新世云杉林分布            | (171) |
| 2.5.6 黄土高原全新世植被特征与生态环境             | (176) |

|                                         |              |
|-----------------------------------------|--------------|
| 2.5.7 人类活动对黄土高原植被和生态环境的影响 .....         | (177)        |
| 参考文献 .....                              | (178)        |
| 2.6 气候变化下的史前人类适应 .....                  | (181)        |
| 2.6.1 引言 .....                          | (181)        |
| 2.6.2 中国早期农业起源考古发现 .....                | (182)        |
| 2.6.3 新仙女木气候事件——降幅、速率、变率 .....          | (183)        |
| 2.6.4 国内外对中国旱作农业起源相关问题的解释 .....         | (189)        |
| 2.6.5 西方农业起源理论简述 .....                  | (191)        |
| 2.6.6 农业起源模式——人口增长、气候突变、地理限制和气候变率 ..... | (194)        |
| 2.6.7 中国旱作农业起源——时间、地点和动因 .....          | (197)        |
| 2.6.8 存在问题及将来的工作重点 .....                | (200)        |
| 参考文献 .....                              | (201)        |
| 2.7 LGM 阶段气候特征的数值模拟 .....               | (206)        |
| 2.7.1 引言 .....                          | (206)        |
| 2.7.2 LGM 气候模拟的边界条件 .....               | (207)        |
| 2.7.3 模拟的 LGM 气候的基本特征 .....             | (207)        |
| 2.7.4 LGM 气候变化机理的模拟研究 .....             | (212)        |
| 2.7.5 讨论 .....                          | (215)        |
| 参考文献 .....                              | (216)        |
| <b>第 3 章 过去 2000 a 高分辨率气候变化记录 .....</b> | <b>(219)</b> |
| 3.1 过去 2000 a 来温度、降水变化的树轮记录 .....       | (219)        |
| 3.1.1 问题的提出 .....                       | (219)        |
| 3.1.2 我国西部地区树轮气候学研究回顾 .....             | (220)        |
| 3.1.3 我国西部地区过去 2000 a 来气候变化的树轮记录 .....  | (221)        |
| 3.1.4 我国北方中部地区过去 500 a 来气候变化的树轮记录 ..... | (225)        |
| 3.1.5 存在问题及未来工作展望 .....                 | (228)        |
| 参考文献 .....                              | (228)        |
| 3.2 过去 2000 a 高分辨率气候变化的石笋记录 .....       | (231)        |
| 3.2.1 引言 .....                          | (231)        |
| 3.2.2 单点记录举证分析 .....                    | (232)        |
| 3.2.3 “环流效应”分析 .....                    | (238)        |
| 3.2.4 最近 1500 a 东亚季风环流重建 .....          | (241)        |
| 3.2.5 结论和讨论 .....                       | (241)        |
| 参考文献 .....                              | (243)        |
| 3.3 过去 2000 a 高分辨率气候变化的湖泊记录 .....       | (246)        |
| 3.3.1 引言 .....                          | (246)        |
| 3.3.2 代用记录 .....                        | (246)        |
| 3.3.3 区域记录对比 .....                      | (253)        |
| 3.3.4 气候变化机制 .....                      | (254)        |

|                                      |              |
|--------------------------------------|--------------|
| 3.3.5 讨论 .....                       | (255)        |
| 参考文献 .....                           | (256)        |
| 3.4 过去 2000 a 高分辨率气候变化的冰芯记录 .....    | (257)        |
| 3.4.1 概述 .....                       | (257)        |
| 3.4.2 冰芯记录的过去 2 ka 气候变化 .....        | (259)        |
| 3.4.3 冰芯记录的气候变化重建 .....              | (263)        |
| 3.4.4 展望 .....                       | (266)        |
| 参考文献 .....                           | (267)        |
| 3.5 历史文献记录的中国西部过去千年气候变迁 .....        | (270)        |
| 3.5.1 引言 .....                       | (270)        |
| 3.5.2 过去千年的温度变化 .....                | (271)        |
| 3.5.3 过去千年的降水变化 .....                | (280)        |
| 3.5.4 主要结论 .....                     | (283)        |
| 参考文献 .....                           | (283)        |
| <b>第 4 章 过去 100 a 气候变化及其影响 .....</b> | <b>(285)</b> |
| 4.1 过去 100 a 中国西部气候记录集成 .....        | (285)        |
| 4.1.1 引言 .....                       | (285)        |
| 4.1.2 西部干湿变化集成 .....                 | (286)        |
| 4.1.3 西部温度变化集成 .....                 | (292)        |
| 4.1.4 西部环境变化的环流特征 .....              | (295)        |
| 4.1.5 总结和讨论 .....                    | (298)        |
| 参考文献 .....                           | (299)        |
| 4.2 过去 100 a 气候变化对中国西部水资源影响评价 .....  | (302)        |
| 4.2.1 评价内容和关键问题 .....                | (302)        |
| 4.2.2 水资源系统对气候变化的敏感性与脆弱性 .....       | (303)        |
| 4.2.3 预计的影响及主要结论 .....               | (310)        |
| 4.2.4 与其他部门的交互作用 .....               | (316)        |
| 4.2.5 气候变化对可持续发展的影响 .....            | (319)        |
| 4.2.6 解决水资源供需矛盾的适应对策 .....           | (321)        |
| 4.2.7 研究差距和优先领域 .....                | (323)        |
| 参考文献 .....                           | (325)        |
| 4.3 过去 100 a 气候变化对生态的影响 .....        | (327)        |
| 4.3.1 影响事实 .....                     | (327)        |
| 4.3.2 影响预估 .....                     | (332)        |
| 4.3.3 应对措施 .....                     | (334)        |
| 参考文献 .....                           | (337)        |
| 4.4 过去 100 a 气候变化对我国农业的影响 .....      | (340)        |
| 4.4.1 引言 .....                       | (340)        |
| 4.4.2 气候变化对我国粮食产量的影响 .....           | (341)        |

---

|                                |       |
|--------------------------------|-------|
| 4.4.3 气候变化对作物品质的影响 .....       | (348) |
| 4.4.4 气候变化对农作物生理生态适应性的影响 ..... | (351) |
| 4.4.5 气候变化对我国耕作制度的影响 .....     | (352) |
| 4.4.6 气候变化对农业气象灾害发生的影响 .....   | (355) |
| 4.4.7 气候变化对作物病虫害发生的影响 .....    | (356) |
| 4.4.8 气候变化对西部地区农业的影响 .....     | (358) |
| 4.4.9 结论与讨论 .....              | (361) |
| 参考文献 .....                     | (361) |

# 第1章 晚新生代气候演变趋势

## 1.1 22—8 Ma 风尘沉积记录的季风演变历史

郭正堂

(中国科学院地质与地球物理研究所)

### 摘 要

新生代期间,全球环境最显著的变化是以两极冰盖的起源和扩张为主要标志的全球变冷过程;同时期亚洲突出的环境变化包括季风环境和内陆干旱环境的形成与发展。已有研究表明,中新世是上述过程发展的关键时期之一。本节主要基于我国黄土高原西部中新世风成红土记录提供的环境信息及近年来的相关研究成果:(1)简要介绍古近纪(65—23 Ma)时期我国环境格局的宏观特征;(2)分析亚洲季风环境和内陆干旱环境的形成过程及风成红土中包含的相关证据;(3)根据风尘粒度、沉积速率、古土壤成壤强度的变化等,重建冬、夏季风环流及内陆干旱环境在 22—8 Ma 期间的大尺度演化历史;(4)在上述基础上,探讨区域构造因素和全球气候变化对亚洲季风和干旱环境演化的影响。

### 1.1.1 引 言

在地质历史上,全球环境经历了多次“温室状态”(greenhouse state)与“冰室状态”(icehouse state)的交替(Miller 等, 1991)。白垩纪的全球气温可能平均比现今高 3~10℃(Huber 等, 2002; Wilson 等, 2002)。直到新生代初期,全球气候仍然呈总体变暖的趋势,到始新世早期约 50 Ma 达到最暖,称为始新世大暖期(Zachos 等, 1993)。此后全球气候开始变冷,使地球再次进入“冰室状态”。晚始新世时期,南极可能出现了冰盖(Zachos 等, 1993; 2001),到约 34 Ma 的早渐新世,气温急剧降低,南极肯定出现了冰盖(Miller 等, 1991),罗斯海有大规模冰川的证据(Leckie 和 Webb, 1983),该事件被称为早渐新世冰盖增大事件。

此后的全球气候有过若干次波动,但总体上持续变冷。到中新世约 14 Ma 前后,东南极冰盖再次扩张(Miller 等, 1987)。多数学者认为,7 Ma 前北极一直没有冰盖,稍后格陵兰地区出现了冰盖,但可能不是永久性的;北极较大规模的冰盖在 3.6 Ma 才出现,并在 2.6 Ma 前后进一步扩张(De Menocal, 1993; Jansen, 1995)。进入第四纪以后,全球冰量进一步增大,其中在约 1.8 Ma 和 0.9 Ma 的两次扩张最为显著(Shackleton 等, 1990; 1995)。

北极地区的一些证据(Moran 等, 2006)显示,新生代期间两极变冷可能具有同时性。但最近的研究(Guo 等, 2009)揭示出,直到中更新世的一些时期,两极冰盖的演化仍然具有相对独立性,在约 500 ka BP 前后出现过北极冰盖大规模缩小、南极冰盖显著扩大或增厚、

两半球气候呈现强烈不对称的时期,且对海洋环境和季风气候均有重要影响。这就意味着,新近纪虽然有些变冷事件在两极具有同时性,但不能排除一些时期出现各种不对称、甚至反向变化的可能性(Guo 等, 2008)。

在上述全球总体变冷的背景下,亚洲地区突出的环境事件是季风环境、内陆干旱环境的形成。亚洲现代的环境格局包括了受东亚和南亚季风影响的湿润季风区和内陆的干旱区。那么,这种格局是何时形成的? 原因是什么? 形成以前亚洲具有怎样的环境格局? 东亚季风、南亚季风和内陆干旱环境的形成在时代上是否具有差异? 这些问题一直是学术界给予较多关注的问题。长期以来,我国学者在该方面做出了一系列出色的工作,并在近年来获得一批新证据,使我们在新生代早期环境格局的特征、古近纪乃至白垩纪干旱环境与现代内陆干旱区在本质上的差异、季风和内陆干旱环境形成的时代等方面的认识逐步趋于统一。本节将基于风成红土和各类其他地质记录提供的环境信息,对上述问题的认识现状进行集成分析。

亚洲季风环境和内陆干旱环境在形成以后的演化历史是理解其动力因素和机制的关键之一。自 20 世纪 90 年代起,各类地质、生物记录的研究为认识季风和干旱环境在构造尺度上的演化历史提供了一系列证据。近 10 a 来对我国北方中新世风成红土记录的研究,为认识上述历史获得了新的证据,使我们可以在时间上基本连续地考察冬、夏季风环流和内陆干旱程度的演化历史与相互关系。本节将根据目前获取的风尘红土的粒度特征、红土中古土壤的成壤强度变化、风尘沉积速率等,重建上述三者构造尺度上(百万年以上)的演化历史。

亚洲季风和内陆干旱环境的形成及其在构造时间尺度上演化的主要驱动因素一直是学术界较多关注的、有不同看法的问题之一。一些气候模式研究(Ruddiman 等, 1989; Ruddiman 和 Kutzbach, 1989; Kutzbach 等, 1989)认为,青藏高原隆升是亚洲季风和内陆干旱形成的主要原因,且高原隆升或伸展同时加强冬、夏季风环流和内陆干旱度。而另一些学者则强调,副特提斯海在渐新世晚期到中新世期间逐步关闭,与青藏高原一样可以加强季风环流和亚洲内陆的干旱程度(Ramstein 等, 1997)。最近的气候模式研究还显示,喜马拉雅山脉的隆升可能比青藏高原本身对南亚季风形成的作用更为重要(Boos 和 Kuang, 2010)。本节拟在中新世风成红土提供的证据的基础上,结合已有气候模式的输出结果,对亚洲季风环境的形成及其大尺度演化的主要因素进行探讨。

### 1.1.2 新生代早期西部的环境格局

新生代期间亚洲环境格局的变化一直是学术界关注的重要问题。我国学者从 20 世纪 70 年代起就对此提出过深入的看法。早在 20 世纪 70 年代,已有学者(曹家欣, 2008)认为我国大部分地区在第四纪时期一直为季风气候。周廷儒(1982; 1984)根据生物和沉积证据,认为第三纪晚期我国就以季风气候为主。张林源(1981; 1995)把新生代划分为早第三纪的基本无季风阶段、晚第三纪的古季风阶段和第四纪现代季风阶段。Wang(1990)对我国古近纪和新近纪地质环境记录的研究显示出,古近纪一条大致东西走向的带状干旱带控制我国南方和西北地区,而新近纪的干旱区则显示了与今天大致相似的宏观格局。

刘东生等(1998)根据我国第三纪动植物标志、盐类沉积(钾盐、石盐和石膏)和煤层等地质环境指标的分布,绘制了古新世、始新世、渐新世、中新世、晚中新世—上新世和上新世 6 个时段的古环境图,揭示出我国古近纪的气候主要受行星风系控制,南方目前受季风控制的湿润地区在当时则为干旱区。直到渐新世,气候格局基本上仍然为带状分布,但东南部的石

膏、石盐等干旱沉积减少,可能指示了东南季风锥形的出现。施雅风等(1998)把临夏盆地孢粉记录显示的约 22 Ma 前后的湿润化认为是南亚季风起源的标志。

近十多年来的研究工作积累了一批新的、有年代和环境意义的地质环境指标,使更精细尺度的环境格局变化研究成为可能。Sun 和 Wang(2005)汇总了中国大陆 125 个地点的古植物和沉积资料,揭示出早第三纪宽阔的干旱带由西向东横跨中国大陆,而晚第三纪至今的干旱带仅局限在中国西北部,反映了渐新世/中新世交界时的气候变化,并认为东亚季风系统的建立可能发生在晚渐新世时期。在重新整理新生代不同时期地质记录的基础上,把渐新世和中新世早、中、晚期的数据进一步分期,以研究这两个时代内部不同阶段环境格局的特征(张仲石和郭正堂,2005; Guo 等, 2008)。足够数量的指标显示早—中渐新世的干旱带依然呈大致东西向的带状分布,环境格局仍属于“行星风系主控型”。晚渐新世的数据在数量上偏少,不足以清晰地定义不同环境单元的确切界限,但更多地显示了带状格局的特点(Guo 等, 2008)(图 1.1.1)。

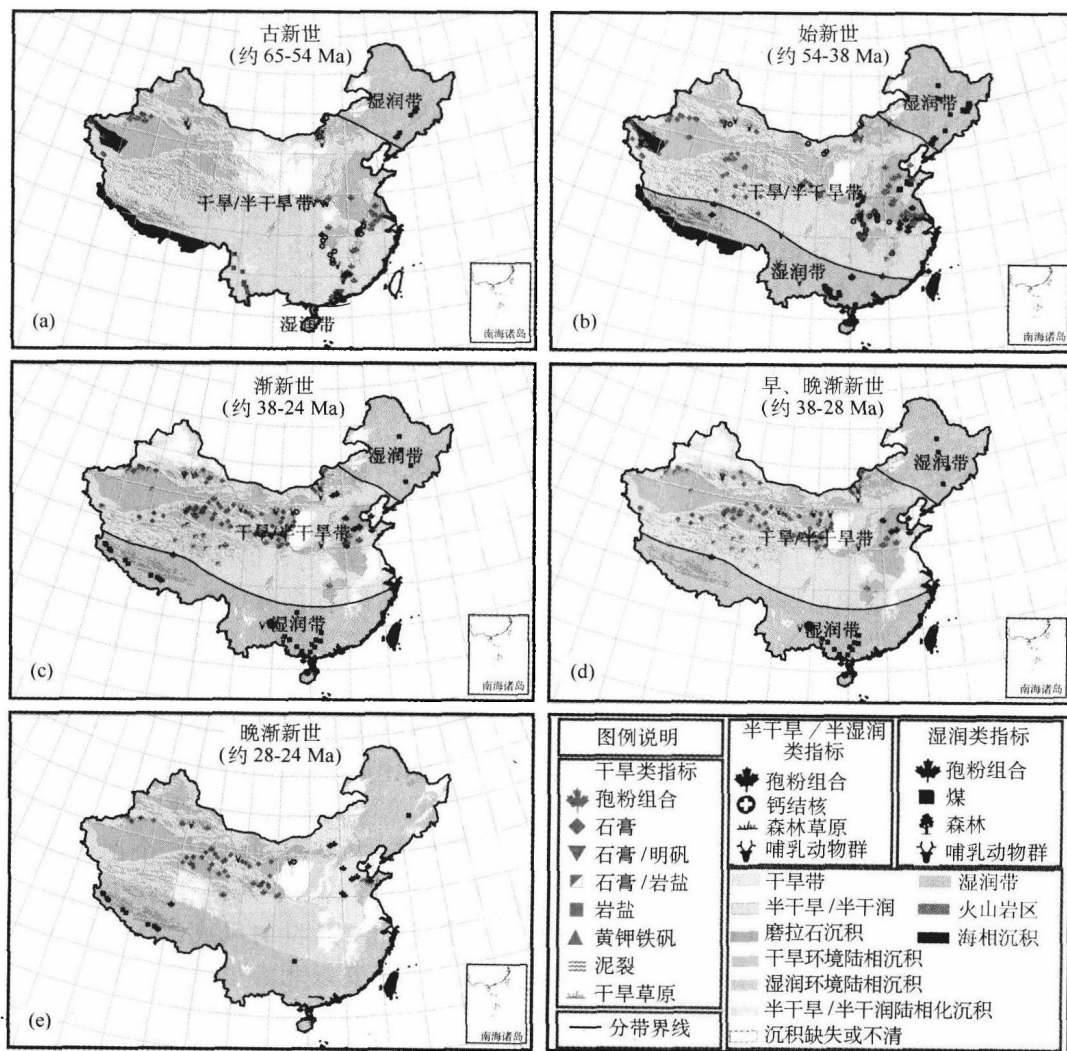


图 1.1.1 古近纪我国的古环境格局(Guo 等, 2008)

国际上对亚洲季风环境起源时代的研究晚于我国学者,大约始于 20 世纪 80 年代末期。一些研究揭示出,约 7—8 Ma 前后的中新世晚期,南亚地区的生态系统由  $C_3$  植物为主转变为  $C_4$  植物为主(Quade 等, 1989; Cerling 等, 1993),被认为是南亚季风起源或(和)加强的证据。这个观点得到大洋钻探在阿拉伯海获得的上升流证据的支持(Kroon 等, 1991)。这使亚洲季风环境可能形成于约 8 Ma 的说法一度成为学术界的主流观点。当时由于可靠地质记录的缺乏,对亚洲内陆荒漠形成的时代一直没有明确的说法。同时,东亚季风、南亚季风和内陆干旱环境的形成在时代上是同时性的还是有先有后,也有待进一步研究。这些问题表观上是一个年代问题,但实质上涉及季风和内陆干旱起源的动力学理解,包括海陆分布变化、喜马拉雅—青藏高原隆升的时代和幅度、全球变冷过程对季风和干旱环境的影响等问题。正因为如此,学术界对相关的观点和证据至今依然存在不同的看法。

但到目前,已有的证据使得可以明确两个基本的认识:

(1)古近纪大部分时期,亚洲的环境格局为“行星风系主控型”,表现为一种东西向的带状气候格局。当时的季风环流即便存在,也主要限于低纬度地区,不足以控制亚洲大陆的宏观环境格局。

(2)当时我国的干旱环境是东西带状分布的,在性质上与西北当今的干旱环境具有本质上的不同。当时的干旱源于行星风系的副热带高压控制,与当今分布于南北半球低纬的荒漠(如撒哈拉沙漠)的成因类似;而目前我国西北的干旱环境是典型的内陆型干旱。行星风系控制的干旱环境可以追溯到久远的地质历史,完全取决于大陆何时漂移到地球的副热带地区(Guo 等, 2008);而内陆型荒漠的形成则取决于其他因素,如山体对水汽的阻挡等。

### 1.1.3 亚洲季风主控环境和内陆干旱环境的起源

前已述及,虽然我国学者的古环境空间格局和地质记录研究显示亚洲季风环境可能形成于较早的时期,国际上也有学者根据古生物证据认为南亚在中新世初期可能就有季风环境(Ducrocq 等, 1994),但由于有精确年代控制的连续记录仍然相对缺乏,加之来自南亚地区研究结果的影响,直到 21 世纪初,国际上多数学者仍然认为亚洲典型季风环境形成于晚中新世约 8 Ma 前后。我国北方新近纪的风成红土研究,在亚洲季风环境和内陆干旱环境的起源问题上获得了新的证据。

对我国六盘山以西(西部黄土高原)的调查发现,在多成因的甘肃群沉积中,包含有保存完整程度不同的风尘堆积(Guo 等, 2002)。最初对甘肃秦安地区两个平行剖面的研究,确定了最长的 QA-I 剖面形成于 22—6.2 Ma(Guo 等, 2002)。近年来对更大区域的新近纪风尘堆积及其与其他沉积类型的关系进行了调查,共对不同地区 6 个剖面进行了年代地层学研究(Guo 等, 2002; 2008; Hao 和 Guo, 2004; 2007; 刘进峰等, 2005a)。这些工作一方面获得了空间可对比的序列,另一方面揭示出中新世的风成红土具有大范围分布的特征,从黄土高原以南的秦岭山间盆地到天水—秦安以北的华家岭山地方圆数百公里的范围均有完整程度不同的露头。近期其他学者的研究工作也揭示出,位于青藏高原东北边缘的西宁地区(鹿化煜等, 2004)、新疆的准噶尔盆地(孟津等, 2008)也保存有新世的风尘堆积。这些结果表明,中新世风成红土堆积披覆于上千公里范围的、海拔差异

很大的高地形上,只是因为后期的构造运动和侵蚀等作用使保存的完整程度差别较大。

目前,中新世红土堆积的风成成因已从多个角度得到进一步证实。主要证据包括:①数百层发育良好的古土壤及黄土层均具有典型的成壤特征(Guo 等, 2002),因而是气下环境的有力证据;②序列中(特别是黄土层)保存了壳体完整的旱生蜗牛化石,未发现任何水生和两栖种属(李丰江等, 2005, 2006),表明其是原地风尘堆积;③QA-I 剖面持续约 16 Ma, 厚达 253 m, 一直以细粉砂为主, 粒径  $>63\ \mu\text{m}$  的颗粒最多占 6.5%, 基本不含  $>120\ \mu\text{m}$  的组分, 中值粒径变化于  $6\sim14\ \mu\text{m}$ (Guo 等, 2002; 乔彦松等, 2006)(图 1.1.2), 不能用风力以外的任何其他沉积动力来解释;④在大范围内不同海拔的高地上披覆, 且岩性和磁性地层、磁化率、粒度等指标具有很好的空间可对比性(Hao 和 Guo, 2007; Guo 等, 2008), 是风尘堆积所独有的特征;⑤石英颗粒形态(Guo 等, 2002; 刘进峰等, 2005b)具有典型风尘沉积的特征;⑥常量、微量、稀土元素地球化学组成与第四纪黄土和上地壳平均成分的一致性(Guo 等, 2002; 梁美艳等, 2006; Liang 等, 2009)表明, 粉尘物质来源于广阔源区, 并高度混合, 显示出源自大范围沙漠粉尘的特征。中新世时期的粉尘也为当时的河湖相沉积提供了大量细物质, 使其在化学成分的若干方面与典型风尘堆积具有相似性(Garzzone 等, 2005)。

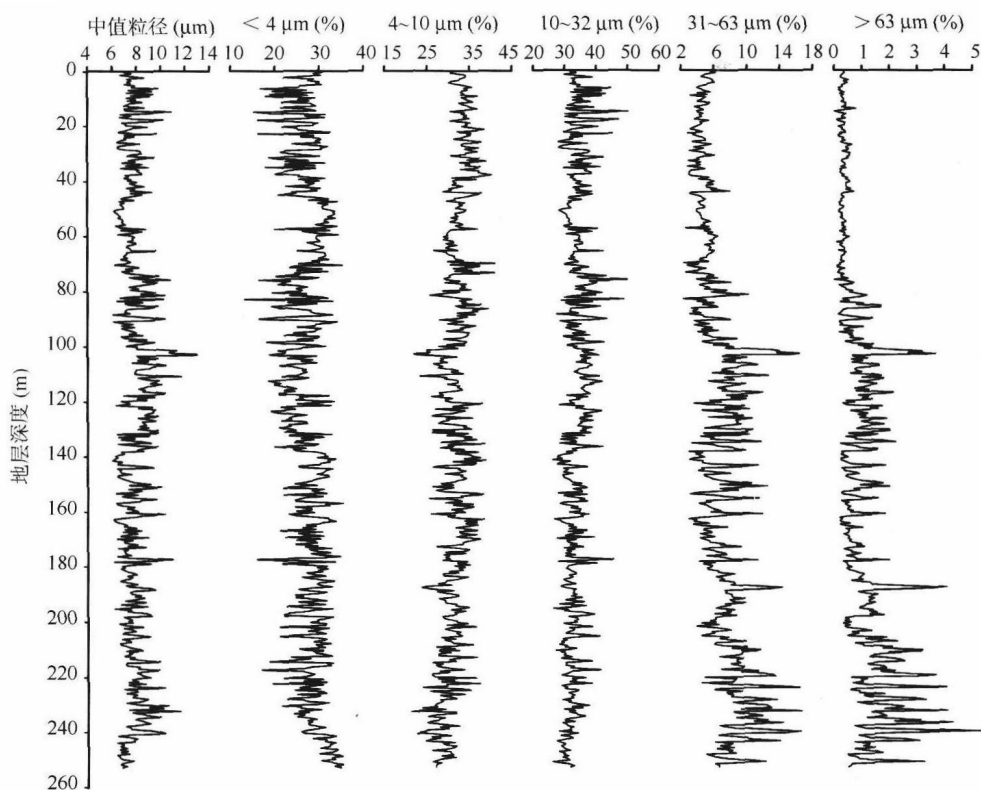


图 1.1.2 QA-I 剖面中值粒径及各粒级组分变化(乔彦松等, 2006)

如此大规模而稳定的风尘堆积即其中的数百层古土壤至少说明了 4 个基本事实:

(1) 由于风尘堆积、尤其是包含典型古土壤的序列需要相对平坦的正地形, 中新世初期以来基本连续的风尘堆积的存在指示了黄土高原的雏形至少在 22 Ma 前就开始形成, 当时

西部黄土高原发育风尘堆积的地形条件已经具备。

(2)提供风尘的物源区植被覆盖度必须很低,否则地面物质难以被吹扬起来。因此,中新世风尘堆积确切地指示了当时亚洲内陆大面积干旱区的存在,它们至少形成于 22 Ma 前。由于风尘物质来自荒漠,因此大面积风尘堆积的存在应视为荒漠存在的直接证据而非间接证据。

(3)风尘堆积必须要有足够强劲的风力将风尘吹扬起来,并从干旱区搬运到黄土高原。因此,这些风尘堆积指示了一支来自内陆荒漠环流的存在,携带大量风尘到达黄土高原堆积。

(4)中新世风成红土中发育的大量古土壤层多数为淋溶土,指示出当时有大量来自海洋的水汽。

从我国北方的地理格局来讲,携带水汽的环流和携带风尘的环流必须来自不同的方向、盛行于不同的季节,否则客观上是不能成立的。而这种大范围内盛行风向随季节变换,正是典型季风环境的特征;携带风尘和大量水汽的环流正分别是亚洲的冬、夏季风环流。中新世初期以来基本连续的风尘堆积的存在,指示出亚洲内陆干旱环境和亚洲季风主控环境至少形成于 22 Ma 前,且形成以后一直没有消失而持续发展至今。由于亚洲冬季风与西伯利亚高压密切相关,本节认为,西伯利亚高压系统在 22 Ma 前就已经形成。

为了进一步证实亚洲冬季风环流的存在,对位于秦岭山间盆地的 ML-V 剖面 and 位于北部的 QA-I 剖面的粒度梯度进行了研究(Guo 等, 2008)(图 1.1.3)。两剖面相距约 75 km,分析结果证实了风尘粒度具有北粗南细的特点,与第四纪黄土的粒度空间变化一致。这说明两个重要问题:第一,风尘物源区在黄土高原北部而非南部,正是亚洲内陆的荒漠;第二,风尘搬运风力是偏北气流,而冬季偏北气流的存在是亚洲冬季风系统的重要标志(Liu 和 Yin, 2002)。

同时,为了证明中新世风成红土中的古土壤与夏季风环流的关系,对古土壤的加积特性进行了研究。古土壤层与下伏黄土层相比,石英颗粒的粒度显著偏细,地球化学特征也指示了这些古土壤并非以下伏黄土层为母质发育而来,它们是典型的加积型土壤,即成壤期仍然有较细的风尘在不断堆积。这种风尘加积型土壤指示了季节交替的大气环流特征;因而可以作为季风环境的古土壤学标志。

过去对不同时期环境格局变化的研究多以“世”为单位,时间覆盖度较宽。为了从空间上确定环境格局转变的确切时间,曾对中新世内部不同时期有年代和环境意义的地质指标进行了重新收集和整理,把中新世早期、中期和晚期的环境指标分别制图(Guo 等, 2008)(图 1.1.4)。结果显示,中新世早、中、晚三个时期的环境格局基本相似,均以南方湿润、西北内陆干旱、黄土高原地区半干旱为特征,这表明季风环境至少在中新世早期已经建立,与中国北方风尘堆积的下界年龄大致相当。当时气候带的地理分布与第四纪已十分相像。风尘堆积与环境空间格局研究也指示了另一个十分重要的现象,即亚洲内陆荒漠与季风主控环境的起源是一种同时性的协同演化,不具有明确的先后顺序,表明它们受统一因素控制。上述重大转变对亚洲内陆地区来讲是一个干旱化过程,而对季风水汽能够到达的地区(季风区)来讲则是一个湿润化过程。