DOI:10.16262/j.cnki.1000-8217.2000.02.007

·学科进展·

中国黄土-古土壤序列与古全球变化研究

郭正堂 刘东生*

(中国科学院地质研究所,北京 100029)

[摘 要] 在近年来研究工作的基础上,简要介绍了中国黄土-古土壤序列及第三纪红土在古全球变化研究中若干方面的贡献。成果表明,中国北方风尘堆积在古全球环境演化研究的许多方面具有其独特性和不可替代性。

[关键词] 黄土,古土壤,季风环境,干旱化,古大气环流

以国际地圈-生物圈计划(IGBP)为主体的全球变化研究,是当前地球和环境科学领域规模最大、最为活跃的国际科学活动之一。它是继"大陆漂移-海底扩张-板块学说"之后,地球科学从"整体地球系统"角度的又一次全球性多学科攻关。全球变化研究的主要不确定因素是环境变化的机制和原因,对过去的全球变化研究是理解环境系统变化规律、驱动因素和机制的关键途径。因此,IGBP将古全球变化(Past Global Change)设立为核心项目(PAGES)。它自实施以来,为科学的发展做出了巨大的贡献,其中有关气候的自然变率、工业化前的全球大气成分、全球温室气体的自然变化及其与气候的关系、陆地生态系统对过去气候变化的响应、过去气候系统的突发性变化等方面的成果,被国际学术界认为是自然科学的重要进步。

我国的古全球变化研究是地球科学领域在国际上的一块"金牌",其中北方的风成黄土-古土壤序列是250万年来东亚环境变化的连续完整记录,一直与深海沉积和极地冰岩芯等一起,构成全球环境变化研究的重要支柱。长期以来,我国众多科研管理部门对该领域的研究给予了大力资助。国家自然科学基金委员会多年来一直将古全球变化研究作为重点领域,以不同层次的项目给予大力资助,项目的资助率和资助强度逐年增大,取得了一系列高水平的研究成果,培养了一支高质量的研究队伍。

本文基于近年来研究的一些新进展,简要介绍中国黄土-古土壤序列在古全球变化研究中若干方面的贡献。这些成果显示出我国的黄土研究无论在广度上和深度上都具有明显的优势,被国际学术界认为是古全球变化研究科学贡献的重要组成部分。

1 黄土的年代地层学研究的进展

古气候记录的年代地层学研究是其他研究的基础。黄土-古土壤序列年代地层学研究一直在不断进展和完善。目前,不同方法获得的结果有较好的统一性,证实了黄土-古土壤序列是250万年来古环境变化的连续完整记录。黄土地层与深海记录的对比方案已为国际学术界所广泛接受[1],二者均是全球环境变化研究中古气候对比的标准和经典记录。

在国家自然科学基金"八五"重大项目的支持下,黄土年代学研究的一个重要进展是对晚第四纪序列的热释光和^{14}C年代学测定,其中以渭南剖面的测年数量最多[2],从而使晚第四纪黄土-古土壤序列获得了一个基于年代测定的、较高分辨率的独立时间标尺,对研究东亚古环境演化与全球变化的关系具有重要意义。这些结果还揭示出,主要地层界限的年代与海陆对比的结果基本一致,但与深海氧同位素3期的下界却不一致:黄土年代测定为约5万年,而深海记录为6万年。这一点可能对理解海陆气候联系有重要意义,是今后黄土年代学研究值得重视的问题。

近年来,在国家自然科学基金面上项目、国家杰

---

* 中国科学院院士.

本文于1999年6月14日收到.

?1994-2017 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

出青年基金及其他一些部门经费资助下，我国北方古环境记录研究的一个重要进展是对下伏于第四纪黄土-古土壤序列的第三纪"红土"的磁性地层学研究[3,4]。结果显示出，该套记录是一套基本连续的环境记录，下界年龄可达 7 Ma 左右，从而与上覆第四纪黄土-古土壤序列一起，构成中新世晚期以来全球罕见的陆相环境记录，为国际学术界高度重视。初步研究结果[5]显示，红土可能是风尘物质经风化作用形成的一套红色堆积。我们对六盘山以东一些典型地区的研究显示出，较典型风尘黄土(但比第四纪黄土略细)在约 350 万年就已开始堆积。这样看来，黄土的下界年龄可以推至 350 万年前。第三纪红土的中、下部虽然与典型黄土有较大区别，但含有大量类似于黄土的风尘物质，表明中国北方风尘堆积至少在 600 万年前就开始了。

2 风尘堆积与西北和中亚地区干旱化的起源和发展

亚洲干旱化的起源和发展是国际古气候学界研究的热点。在"八五"期间，国家自然科学基金委员会将"15 万年来我国干旱-半干旱区环境演化的动态过程及发展趋势"列为重大研究项目，其成果进一步深化了对干旱区环境演化的认识。根据对第四纪风尘堆积的研究，西北干旱区是黄土物质来源区，是北方大面积风尘堆积的前提条件。因此，黄河中游地区的风尘堆积指示了中国西北和中亚地区干旱化的起源和演化历史。第三纪"红土"中含有大量风尘物质，表明中国西北地区至少在 650 万年前就开始出现相当规模的干旱区[6]。典型风尘堆积在约 350 万年前出现，表明当时干旱化的进一步加强。到 250 万年左右(第四纪黄土-古土壤序列的下界)，干旱程度更趋严重。上述特征与最近发表的北太平洋风尘记录[7]有高度的吻合性，表明黄河中游地区的风尘与北太平洋粉尘的主要物源相同，均来自中国西北和中亚地区的干旱区。黄土-古土壤序列记录表明在约 85 万年前后，冰期黄土堆积量显著加大，表明西北干旱化的进一步发展。这些重要的干旱化起源和发展的时代，与北极冰盖的发育历史有较好的吻合性，一些重要变化的年代界限又与亚洲以青藏高原隆升为主体的构造运动有较好的一致性。

3 黄土与新生代古大气环流演化

在 PAGES 的科学与执行计划中，将古大气环流的演化列为重点研究对象。黄土区地处全球大气环流的枢纽位置，降水主要由来自太平洋的东亚夏季风环流所携带；而形成黄土的风尘由亚洲冬季风环流和北半球西风带自北部荒漠地区搬运而来[8]。因此，黄土-古土壤序列中包含了东亚夏季风、亚洲冬季风和西风带 3 个重要大气环流分支在过去不同时间尺度上的演化及相互作用的信息，使黄土成为研究东亚冬、夏季风环流的关键记录。"九五"期间，国家自然科学基金委员会将"中国季风区环境演变机制及其与全球变化的动力学联系"列为重大研究项目，该项目被 PAGES 列入了其环球环境大断面(PEP-Ⅱ)的执行计划之中。

从黄土-古土壤序列中分离出不同古环流演化的信息是研究的关键，至今已取得相当大的进展。在长时间尺度上，获得了粒度变化[9,10]和磁化率[11]的时间序列，分别作为古冬、夏季风环流强度的替代指标。但由于对磁化率的气候意义在机制上一直有些争议，与成壤强度也有不吻合的地方，近来将古风化强度被用来反映古夏季风环流的强度[12]，获得不少新的信息。同时，黄土中铁含量的变化被用来探讨西风气流的演化强度[13]。在较短时间尺度上，生物[14]及其他地球化学指标[15]的研究也取得突破。这些重要进展为研究不同时间尺度的古大气环流演化奠定了基础。

3.1 古大气环流的长尺度演化

根据第三纪风尘堆积推测，亚洲冬季风至少在 650 万年前就已存在，以后总体上逐渐加强。250 万年来，黄土粒度变化反映的冬季风强度与全球冰量的演化有较好的吻合性，反映了后者对冬季风的驱动作用。85 万年前，冰期-间冰期的反差加大，表明此时冬季风强度显著增强[16]，此前以 4 万年为主导周期波动，此后以 10 万年为主导周期。但冬季风环流也有与全球冰量变化不一致的地方，其中在 250—160 万年时段，二者在周期上的可对比性较弱[9]；几个砂质黄土层反映了第四纪极端干冷的气候，而在深海同位素记录中却没有对应的特征。它们与北大西洋深层流强度的减弱有密切关系[12]。

东亚夏季风环流的起源远早于第三纪红土的下界年龄[6]。研究表明，250 万年来东亚夏季风环流经历了 4 次明显的增强过程，时间大致为 1.5 Ma，1.1 Ma，0.85 Ma 和 0.6 Ma。季风波动与全球性的冰期-间冰期旋回及地球轨道的参数变化(ETP)有一种整体上的一致性。但是，全球冰量在 900 ka 以前以 40 ka 周期为主，之后以 100 ka 为主，而夏季风从第四纪开始到 1 200 ka 都有明显的 40 ka 期[17]，其

?1994-2017 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

原因是今后值得重视的重要问题。另外,黄土中记录了多次极端季风增强事件(以 S4、S5-1 和 S5-3 为代表)(图 1),既不能用全球冰量的变化来解释,也不能用太阳辐射的变化来直接解释,但它们改变了海陆碳库的格局,已有研究表明,它们在成因上与北大西洋深层流(NADW)强度加强有关[12]。

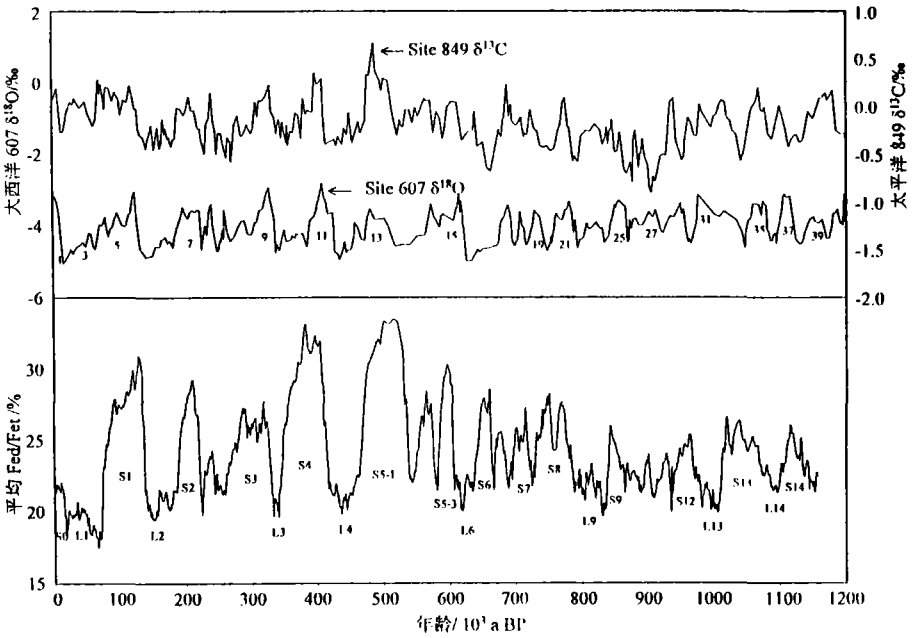

图 1　西峰和长武黄土-古土壤序列的平均古风化强度(游离 Fe_2O_3 与全 Fe_2O_3 比值 Fed/Fet)的变化及与太平洋 849 孔碳同位素[18]变化和大西洋 607 孔氧同位素[19]变化的对比

上述记录是迄今为止有关东亚冬、夏季风环流长尺度演化的最完整记录,为研究东亚古环境演化的历史、规律、动力因素和机制提供了重要依据。这些结果揭示出,东亚季风气候的长尺度演化不仅受全球冰期-间冰期旋回和由地球轨道变化引起的太阳辐射的变化的影响,而且与全球性的构造变动及北大西洋的变化密切相关。

3.2　古大气环流的千年尺度变化

近年对格陵兰冰岩芯及北大西洋深海沉积的研究[20]发现,气候系统在过去存在着一系列目前尚不明原因的、快速的、大幅度的变化(Dansgaard-Oechger 旋回及 Heinrich 事件)。如果类似事件发生,其速度之快足可危及人类社会,变幅之大足以造成灾难性后果。这些事件的发现使人们加深了对气候系统不稳定性的认识,并提出一系列重要科学问题:它们发生的原因是什么?能否引起全球性气候变化?如果能,是通过什么机制?在不同地区引起多大气候变幅?类似事件是否在其他时段也有发生?解决问题的关键是对世界不同地区此类事件的行为及其在空间上的差异进行研究。

中国黄土研究为研究东亚地区气候系统的不稳定性作出了重要贡献。这些研究表明,冬季风环流在末次冰期-间冰期旋回中曾发生过千年尺度变化,且与极地冰芯和北大西洋深海沉积记录有较好的可对比性[10]。类似事件在倒数第二次冰期中也很明显[21]。但古夏季风环流的演化与冬季风不大相同:在末次冰期期间,夏季风环流在千年尺度上的波动比较明显,而在更老的时段要相对平稳得多。与格陵兰冰岩芯记录进行对比,发现二者总体上在末次冰期的一致性较高,而在较老的时段耦合程度较低[22]。用原始风尘铁含量对西风环流演化的探讨[13]显示出,在最后 2 个冰期-间冰期旋回中,西风带北支气流的强度也明显存在着千年尺度的变化。这些结果,对理解千年尺度气候变化的发生原因、影响范围、影响方式和机制都有重要意义。

4　黄土与全球性生物地球化学循环

根据目前各方面的研究成果,形成中国黄土的风尘主要来自中国西北及中亚的干旱地区。亚洲风尘不仅影响中国,而且在世界不少地区都有踪迹。最近格陵兰冰芯中风尘分析表明[23],该地区风尘主要来自中国及亚洲干旱区,与中国黄土有密切的亲缘关系。北太平洋的风尘也主要来自该地区。这些结果说明,亚洲干旱区的风尘是北半球天然气溶胶

?1994-2017 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

的重要来源，而气溶胶对到达地表的太阳辐射有重要调节作用，从而对气候变化有明显的影响。

近年来出现的有关冰期-间冰期旋回气候变化的“铁假说”[24]，实质上也将中国黄土提高到全球生物地球化学循环研究的重要位置。对世界多数海域来说，铁的不足是海洋生物产率的一个重要限制因素，后者对大气 CO_2 有关键性的控制作用，海洋生物产率的提高将吸收大气 CO_2。而研究表明，落入海洋的风尘是远离陆地的海洋铁补充的主要途径。风从陆地干旱区裸露的地表吹扬起大量的风尘，含有大量铁的风尘随高空气流搬运后落入海洋，提高海洋生物产率，增加海洋对大气 CO_2 的吸收，促使全球变冷，相反则有利于变暖。由于亚洲干旱区是北半球风尘最重要的来源，它可能通过对海洋生物及 CO_2 的影响，在全球生物地球化学循环中有重要地位。这些结果同时表明，中国地质环境不仅受全球变化的控制，同时对全球环境变化有显著的驱动作用。

5 古气候参数定量化研究

古全球变化研究的重要任务是实现古气候定量估算。由于黄土是相对均匀的物质，在古气候参数定量化研究中具有许多优势。在国家自然科学基金“八五”和“九五”重大项目中，将古环境参数定量化研究列为重点内容，目前已获得了大量表土数据，建立了磁化率、生物指标与现代环境参数的定量-半定量关系，并初步应用于古环境参数的定量估算（图2）[25,26]。同时，发展了一套较完整的古气候定量估算的方法。这些成果弥补了我国过去在该方面研究的不足，是东亚地区古环境定量化研究的重要进展。

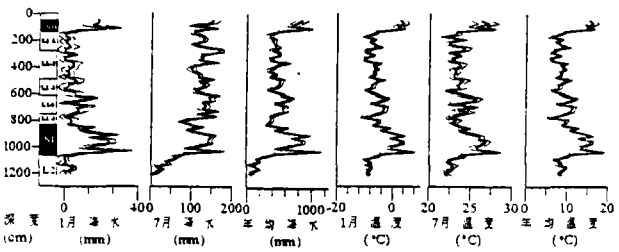

图 2 用植物硅酸体转换函数对宝鸡地区 15 万年来古气候参数的定量估算结果[26]

6 结 语

今天对中国黄土的研究，已形成一个活跃的研究领域，上述许多成果为学术界广泛接受，成为国际古全球变化研究科学贡献的重要组成部分；同时，大量新的进展处于逐步完善之中，也许还有争议。但正是这些争议，显示出黄土-古土壤序列在许多方面的独特性和不可替代性，孕育着其在未来古全球变化研究中的巨大潜力和生命力。PAGES 执行主席 Frank Oldfield 于 1998 年在英国召开的首届国际古全球变化学术大会期间，高度评价了中国科学家在古全球变化及国际环球环境大断面（PEP-Ⅱ）研究中的贡献，对中国国家自然科学基金委员会等科研管理部门对古全球变化和 PEP-Ⅱ研究给予的大力支持表示诚挚的感谢，并希望为这一新兴学科领域的发展共同努力。会后，PAGES 以专门一期研究通讯的版面，报道了中国黄土-古土壤序列各方面研究的最新成果。

中国科学家多年的不懈努力和各部门长期的连续资助，使我国在古环境研究方面取得了可喜的成果，不少方面进入了国际先进行列，在充满激烈竞争的国际古全球变化研究中占有了一席之地。国家应将古环境研究作为重要领域继续给予大力支持，巩固和不断发展我国在该领域的优势。

参 考 文 献

[1] Kukla G. Loess stratigraphy in central China. Quaternary Science Review, 1987, **6**: 191—219.

[2] Liu J Q, Liu T S, Chen T M. Loess dating progress. PAGES, 1998, **6** (1): 2.

[3] Ding Z L, Sun J M, Liu T S. Preliminary magnetostratigraphy of a thick eolian red clay-loess sequence at Lingtai, the Chinese Loess Plateau. Geophysical Research Letters, 1998, **25**: 1 225—1 228.

[4] Zheng H B, An Z S, Shaw J. New contributions to Chinese Plio-Pleistocene magnetostratigraphy. Physics of the Earth and Planetary Interiors, 1992, **70**: 146—153.

[5] 丁仲礼，孙继敏，朱日祥等．黄土高原红粘土成因及上新世北方干旱化问题．第四纪研究，1997，(2)：146—157.

[6] 刘东生，郑棉平，郭正堂．亚洲季风系统的起源和发展及其与两极冰盖和区域构造运动的时代耦合性．第四纪研究，1998，(3)：194—204.

[7] Rea D K, Snoeckx H, Joseph L H. Late Cenozoic eolian deposition in the North Pacific: Asian drying, Tibetan uplift, and cooling of the northern hemisphere. Paleoceanography, 1998, **13**: 215—224.

[8] Liu T S. Loess and the Environment. China Ocean Press, Beijing, 1985, 251.

[9] Ding Z L, Yu Z W, Rutter N W et al. Towards an orbital time scale for Chinese loess deposits. Quaternary Science Review, 1994, **13**: 39—70.

[10] An Z S, Porter S C. Millennial-scale climate oscillations during the last interglaciation in central China. Geology, 1997, **25**: 603—606.

[11] An Z S, Kukla G, Porter S C et al. Magnetic susceptibility evidence of monsoon variation on the loess plateau of central China during the last

?1994-2017 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

130,000 years. Quaternary Research, 1991, **36**:29—36.

[12] Guo Z T, Liu T S, Fedoroff N et al. Climate extremes in loess of China coupled with the strength of deep-water formation in the North Atlantic. Global and Planetary Change, 1998, **18**:113—128.

[13] 郭正堂,魏兰英,吕厚远等. 晚第四纪风尘物质成分的变化及其环境意义. 第四纪研究,1999,(1):41—48.

[14] Rousseau D D, Wu N Q. A new molluscan record of the monsoon variability over the past 130,000 yr in the Luochuan loess sequence, China. Geology, 1997, **25**:275—278.

[15] Guo Z T, Liu T S, Guiot J et al. High frequency pulses of east Asian monsoon climate in the last two glaciations: link with the North Atlantic. Climate Dynamics, 1996, **12**:701—709.

[16] Guo Z T, Liu T S, Fedoroff N et al. Shift of the monsoon intensity on the Loess Plateau at ca. 0.85 Ma. Chinese Science Bulletin, 1993, **38**:586—591.

[17] Guo Z T, Wei L Y, Biscaye P et al. New weathering records of summer monsoon variations over the last 1.2 Ma from the loess-soil sequences in China (submitted). 1999.

[18] Raymo M E, Opp D W, Curry W. The mid-Pleistocene climate transition: a deep-sea carbon isotopic perspective. Paleoceanography, 1997, **12**:546—559.

[19] Ruddiman W F, Raymo M E, Martinson D G et al. Pleistocene evolution: Northern Hemisphere ice sheets and North Atlantic Ocean. Palaeoceanography, 1989, **4**:353—412.

[20] Bond G, Broecker W S, Johnson S et al. Correlations between climate records from North Atlantic sediments and Greenland ice. Nature, 1993, **365**:143—147.

[21] 丁仲礼,任剑璋,杨石岭等. 最后两个冰期旋回季风-沙漠系统不稳定性的高分别率黄土记录. 第四纪研究,1999,(1):49—58.

[22] Guo Z T, Peng S Z, Wei L Y et al. Weathering signals of millennial-scale oscillations of the East-Asian summer monsoon over the last 220 ka. Chinese Science Bulletin. in press.

[23] Biscaye P E, Grousset F E, Revel M et al. Asian provenance of last glacial maximum dust in the GISP2 ice core, summit, Greenland. Journal of Geophysical Research. 1997, **102**:26 765—26 781.

[24] Martin J H. Glacial-interglacial CO_2 change: the iron hypothesis. Paleoceanography, 1990, **5**:1—13.

[25] Han J M, Lu H Y, Wu N Q et al. The magnetic Susceptibility of modern soils in China and its use for paleoclimatic reconstruction. Studia Geophysica and Geodaetica, 1996, **40**:262—275.

[26] Lu H Y, Wu N Q, Liu T S et al. Seasonal climatic variations recorded by phytolith assemblages from the Baoji loess sequence in central China over the last 150 ka. Science in China D, 1996, **39**:629—639.

THE LOESS-PALEOSOL SEQUENCES IN NORTHERN CHINA AND PAST GLOBAL ENVIRONMENTAL CHANGE

Guo Zhengtang　　Liu Tungsheng

(*Institute of Geology and Geophysics, CAS, Beijing* 100029)

Abstract This paper attempt to introduce some of the most significant progresses in the study of these eolian deposits in the recent years. These results indicate that the eolian record in northern China is unique in many aspects and has a great potential in the study of global environmental changes.

Key words loess, paleosol, monsoon environment, aridification, paleo-atmospheric circulations

?1994-2017 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net