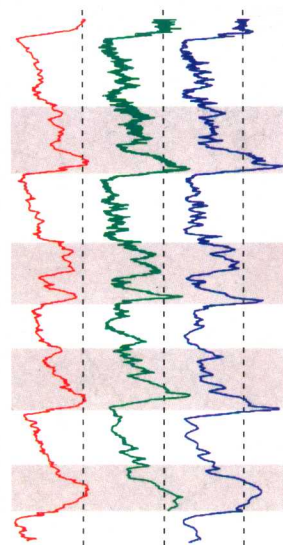


Geographic Differentiation of the Paleosol S1
in the Chinese Loess Plateau

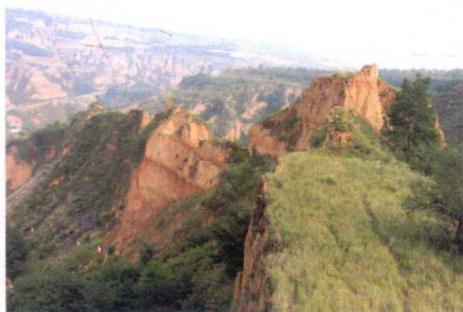
Disputation on Paleoclimatic Reconstruction of the Last Interglacial

黄土高原古土壤S1的地理分异 ——末次间冰期古气候重建置疑

汪海斌 冯兆东 / 著



兰州大学出版社



黄土高原 古土壤S1的地理分异

——末次间冰期古气候重建置疑

汪海斌 冯兆东 / 著

Geographic Differentiation of the Paleosol S1
in the Chinese Loess Plateau

Disputation on Paleoclimatic Reconstruction of the Last Interglacial



兰州大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

黄土高原古土壤S1的地理分异:末次间冰期古气候重建置疑 / 汪海斌, 冯兆东著. — 兰州: 兰州大学出版社, 2014. 7

ISBN 978-7-311-04500-5

I. ①黄… II. ①汪… ②冯… III. ①黄土高原—古气候—古土壤—研究 IV. ①P531

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第158341号



策划编辑 施援平 王曦莹
责任编辑 郝可伟 施援平
封面设计 管军伟

书 名 黄土高原古土壤S1的地理分异
——末次间冰期古气候重建置疑

作 者 汪海斌 冯兆东 著

出版发行 兰州大学出版社 (地址:兰州市天水南路222号 730000)

电 话 0931-8912613(总编办公室) 0931-8617156(营销中心)
0931-8914298(读者服务部)

网 址 <http://www.onbook.com.cn>

电子信箱 press@lzu.edu.cn

印 刷 甘肃兴方正彩色数码快印有限公司

开 本 787 mm×1092 mm 1/16

印 张 15.25(插页4)

字 数 334千

版 次 2014年10月第1版

印 次 2014年10月第1次印刷

书 号 ISBN 978-7-311-04500-5

定 价 60.00元

(图书若有破损、缺页、掉页可随时与本社联系)



冯兆东

Feng Zhaodong

1955 年生于甘肃定西，现任中国科学院新疆生态与地理研究所特聘研究员（2012 年起）。1982 年获得兰州大学地理学硕士，1987 年获得美国 Vashington University 地质学硕士，1992 年获得美国 Kansas University 地理学博士；1992—1994 年在美国 Columbia University Lamont-Doherty 地球研究中心从事博士后研究工作。1982—1985 年任兰州大学地理系讲师；1994—1996 年任美国 Utah University 地理系助理教授，1996—2008 年任美国 Montclair State University 地球环境系助理教授、副教授、教授；2000 年被聘为教育部“长江学者奖励计划”特聘教授（兰州大学）。



汪海斌

Wang Haibin

1976 年生于浙江金华，生前任兰州大学西部资源与环境学院副教授。2001 年获得兰州大学地理学硕士学位；2005 年获得兰州大学地理学博士学位；2005—2008 年在北京师范大学资源学院从事博士后研究工作，2006 年在美国 Montclair State University 做访问学者。

主要从事黄土与气候变化研究，主讲自然地理学研究方法、专业外语等课程。曾主持自然科学基金项目 1 项，参加科技部“973”重大项目 1 项，参与自然科学基金重点项目 1 项；共发表 SCI、核心文章十余篇。2008—2011 年在兰州大学西部资源与环境学院先后任讲师和副教授。

前言

这本书的立意是:批判地审视“基于黄土高原末次间冰期古土壤S1的高分辨率气候重建”。

虽然An(安芷生)和Porter(1997)关于末次间冰期冬季风存在千年尺度剧烈变化的报道是很有影响力的(见:An and Porter. *Geology*, 1997, 25 (7): 603-606),但他们报道的黄土高原中部地区S1中表达气候剧烈变化的粉尘事件是值得怀疑的。他们重建的末次间冰期风尘气候序列存在两个主要问题:(1)黄土高原末次间冰期古土壤S1年代的可靠性问题;(2)气候代用指标的可靠性问题。

记得那是1998年12月的一个周末,我(冯兆东)在我当时任教的美国新泽西蒙特克莱尔州立大学(Montclair State University)办公室赶写NSF的基金申请书(关于蒙古高原全新世的),突然接到任教于美国路易安娜州立大学的廖淦标教授的电话,他问我有没有读过An和Porter1997发表于《*Geology*》的文章。在知道我没读过的情况下,廖淦标立即传真了一份给我。我十分认真地读了那篇文章,并激动地认为:在黄土高原中部和东部地区的S1中重建高分辨率气候事件是不大可能的。于是,我激情地撰写了关于中国黄土高原末次间冰期古土壤S1问题的NSF申请书(题目:Geographic Differentiation of the Last Interglacial Paleosol S1 in the Chinese Loess Plateau)。出乎意料的是:在我的关于蒙古高原全新世的NSF申请两次被毙的低迷情况下,我的关于中国黄土高原末次间冰期古土壤S1问题的NSF申请书于1999年竟然一举成功(批准号:NSF BCS-0078577)。2000年我开始在兰州大学做教育部“长江学者奖励计划特聘教授”,接着又从教育部获得了重点项目基金(批准号:MOE-2000-65)的支持,这些都给我深入研究黄土高原末次间冰期古土壤S1问题创造了良好的条件。

出版这本书的动机是:纪念本书的第一作者——汪海斌博士。

本书的核心是汪海斌的博士论文——《黄土高原末次间冰期古土壤S1的地理分异及其气候和年代学意义》。早在2008年,我和汪海斌博士就计划要将他的博士论文整理出版。可是万分痛惜的事发生在我们的计划实现之前:汪海斌博士于2011年

11月8日因车祸殉职于去昆仑山北麓采样的路上！汪海斌的去世给我们所有了解他的人留下了难以抹去的心理阴影。作为他的导师和朋友，我在这个阴影下痛苦地生活了两年有余。汪海斌博士去世的第二天，我和我的同事马玉贞教授在网上交流回忆汪海斌时，我们的归纳是：那么聪慧、那么勤奋、那么谦和、那么有前程的一个小伙子怎么说没就没了呢？他才35岁呀！汪海斌博士实际上是“中国黄土高原末次间冰期古土壤S1问题”项目的具体执行人。这个项目的顺利完成完全是他刻苦努力的结果，这个项目的顺利完成也将他造就成为一名同行信任的黄土地层与古土壤学者。“同行信任”是有据可查的：无论是从上海来的同行，还是从西宁来的同行，无论是从德国来的同行，还是从美国来的同行，他们都特意请汪海斌博士带他们去野外考察，帮他们描述黄土剖面。写到这里，汪海斌博士的许多往事浮现在我的眼前：我们多次一起去黄土高原野外考察的情景；我们多次一起去蒙古高原野外考察的情景；我们在离贝加尔湖不远的Gun Nuur湖畔玩扑克牌的情景；我们一起在兰州大学榆中校区萃英山顶放声狂吼的情景……

汪海斌博士有三个宝贵的品质是我这辈子忘不了的：诚实；勤奋；谦逊。第一，他的诚实。我和他频繁地打交道有十年之久，没有一件事让我对他有不信任的感觉。我和汪海斌之所以从师生关系演化为朋友关系是因为我们俩有共同的生活底线：从来不以不诚实的态度和别人打交道。第二，他的勤奋。他在做我的研究助手时，无论是实验分析，还是图件制作，他完成的速度总比我预期的速度要高出至少一倍。而且他总是让人放心，因为他的实验数据是经得起检验的，他做出来的图件是完美得无须再作任何修改的。第三，他的谦逊。许多人问过我：老冯，你的风格怎么可能带出这么谦逊的学生呢？他不卑不亢的谦逊很是讨人喜欢。他去世后有那么多的人来向他告别就足以说明这一点。

这本书的结论是：复杂的成壤过程往往使得S1高分辨率气候重建成为不可能。

我们的研究表明，沉积前黄土源区的风化程度控制着黄土粒度分布的第一级变化与次一级变化，这对粒度作为冬季风强度指标的正确性提出了强有力的挑战。至于磁化率，它确实主要受成壤因素的影响，但成壤过程并不是导致磁化率增强的必然条件。具有消磁作用的碳酸盐的聚集、导致磁性加强的淋溶过程、植物残体分解过程中产生的超细磁性颗粒以及对磁化率进行改造的氧化还原反应都属于成壤作用。因此，要作为夏季风强度的定量指标，磁化率信号必须被订正。从地理分异的角度看，在中国黄土高原西北边缘地带，与氧同位素亚阶段5a、5c和5e对应的三层古土壤（S1S1、S1S2、S1S3）和其中相间的与氧同位素亚阶段5b和5d对应的两层黄土（S1L1和S1L2）保存完整。向东南到黄土高原中部和东部，S1L1和S1L2被后期发育的土壤所吞并，三层古土壤部分地融合在一起，S1剖面是多次成壤事件的结果，而且古土壤伸入到了下伏的更老黄土（L2）。我们的研究结果证明：S1古土

壤的形成年代与其母质的形成年代是不一致的。这警示我们：在进行高分辨率气候重建时，必须充分理解S1的土壤发生学和土壤地貌学意义。

致谢：

汪海斌的博士学位论文完成于2005年5月，在论文评审和答辩过程中得到了以下同行的学术指导：陈发虎教授、方小敏教授、郭正堂教授、潘保田教授、肖举乐教授、姚檀栋教授、郑洪波教授。

我自己也想借着这个机会感谢我的四位导师，因为是他们把我带到“黄土与第四纪气候研究”这条学术道路上的。首先，兰州大学的李吉均教授在我学术生涯的早期给予了我巨大的支持。第二，美国华盛顿大学的Stephen Porter教授耐心地让我完成了我的第二个硕士学位的学习。第三，美国堪萨斯大学的William Johnson教授以及他的同事们给予了我完整的“土壤发生学和土壤地貌学”方面的训练，也让我有机会深入地研究了美国大平原地区的黄土地层（我还在堪萨斯大学接受了完整的地理信息系统和遥感方面的训练）。第四，美国哥伦比亚大学的George Kukla教授的严谨的治学风格与Lamont-Doherty Earth Observatory的活跃的学术氛围让我彻底理解了：做科学研究既需要一丝不苟的严谨态度，也需要“宗教狂般”的追求精神。

本书的出版经费来自新疆生态与地理研究所提供的所长基金（时任所长是陈曦博士）。

冯兆东

2014年5月8日

于新疆生态与地理研究所

摘要

An 和 Porter (Geology, 1997, 25 (7): 603-606) 报道了末次间冰期洛川地区 2.5 m 厚的 S1 记录了 9 次高粉尘事件, 前 6 次可以同北大西洋 V29.191 深海钻孔记录的寒冷事件相比, 后 3 次可与 GRIP 冰芯记录的强烈降温事件对照。然而, 土壤发生过程的复杂性令年代上的对比并不可靠。为了考察 S1 土壤发生的复杂性, 我们选择了黄土高原东、西两个断面对土壤形态、粒度、磁化率等进行观测或分析。结果表明: 从黄土高原的西北端到东南端, 由于粉尘的堆积速率呈递减趋势而成壤作用逐渐加强, 造成了末次间冰期古土壤 S1 从 3 层土壤逐渐融合为一个单一的土壤剖面。具体地说, 沿黄土高原西部 S1 的断面, 在西北边缘, 对应于 MIS 5 中 3 个暖的亚阶段 (5a、5c、5e) 的 3 层古土壤 (S1S1、S1S2、S1S3) 以及对应于 MIS 5 中两个冷的亚阶段 (5b、5d) 的两层黄土都完整地保存下来了 (如兰州剖面 and 定西剖面)。向东南来到秦安剖面, S1L2 受到后期的成壤改造而被 S1S2 吞并了。而且秦安剖面的 S1S1、S1S2、S1S3 的发育程度都比兰州剖面或定西剖面的高。继续向东南便是天水剖面, 不仅 S1L2 而且 S1L1 皆为后期的土壤发育 (S1S2, S1S1) 所吞噬, 故 3 个土壤 (S1S1、S1S2、S1S3) 部分地融合到一起。沿黄土高原的东部断面, 环县剖面 S1 的土壤地层与定西剖面相似, 3 层古土壤嵌两层黄土的结构也被完整地保存了下来, 而发育程度最高的 S1S3 伸入到了下伏的 L2 黄土。庆阳剖面 and 旬邑剖面是天水剖面的“压缩版”, 即, S1L1、S1L2 由于受到后期的成壤改造而分别成为 S1S1、S1S2 的组成部分; 3 个土壤 (S1S1、S1S2、S1S3) 完全地融合在一起, 形成一个类似软土状的加积型土壤复合体。在东南端, 宝鸡剖面 and 蓝田剖面的 S1 亦为经多次成壤 (S1S1、S1S2、S1S3) 作用形成的土壤复合体, 并且呈现为单一的土壤剖面, Bt 层发育得很好。从所有考察的剖面看, 中值粒径和 $>63\ \mu\text{m}$ 粗颗粒组分可以相当好地确定古土壤 S1 岩性的上下界限, 我们可以用此来估计 S1 古土壤的穿时性特征。土壤融合, 土壤发生过程中的生物扰动、物质转化和迁移都使得黄土高原东南部的 S1 无法保存详细的、高分辨率的气候变化信息。

关键词: 末次间冰期; 气候变化; 中国黄土高原; 古土壤

Abstract

An and Porter (1997) reported nine high dust - influx events of millennial timescales recovered from the last interglacial paleosol S1 and correlated them to six cool events of millennial timescales in the North Atlantic. However, the complexity of soil forming processes may have made the chronological correlation with the North Atlantic records inadequate. To examine the complexity of the S1 formation, the S1 paleosol was traced laterally and identified based on the preserved characteristics observed in the field and analyzed in the laboratory. Our data show that from the northwest to the southeast, the S1 paleosol gradually converges from three distinctive soil profiles into a single welded profile because the net rate of loess accumulation was attenuated to the southeast and pedogenic development intensified southeastward during the last interglacial. Three soil - forming events within the S1 paleosol (S1S1, S1S2 and S1S3) separated by two loess units (S1L1 and S1L2) in the northwestern part of the Loess Plateau are stratigraphically coeval with a single soil profile in the southeastern margin of the Loess Plateau. In the southeast, the S1 paleosol developed into underlying older loess L2 (e.g., at the Lantian section). The three paleosols (S1S1, S1S2 and S1S3) are partially welded in the central part of the Chinese Loess Plateau (e.g., at the Tianshui section) where the lower portion of S1 paleosol developed in the underlying older loess unit L2. In the northwestern margin of the Chinese Loess Plateau (e.g., at the Lanzhou section), the preservation of the soil - loess sequence (S1S1, S1L1, S1S2, S1L2, S1S3) continuously documented the climatic events of the last interglacial. Our data also show that the magnetic signatures and particle - size information are more or less acceptable climatic proxies only for the northwestern sections where the degree of pedogenesis was lower and the rate of eolian influx was greater during the last interglacial. It appears that in all cases investigated, the median grain size and the coarse fraction ($>63\ \mu\text{m}$) content define the upper and lower boundaries of the S1 paleosol reasonably well and can be used to estimate the time - transgressive nature of the S1 paleosol relative to its parent material. Soil welding, bioturbation and material translocation within the S1 soil profiles make it impossible to preserve the detailed and high - resolution information of climate changes in those S1 profiles in the southeastern part (including the central part) of the Chinese Loess Plateau.

Key Words: Last Interglacial; Climate Change; Chinese Loess Plateau; Paleosols

目 录

摘 要	1
1 绪 论	1
1.1 末次间冰期气候不稳定性的国际争论	2
1.2 中国黄土高原末次间冰期古土壤S1的研究现状与问题	5
1.3 选题依据和研究思路	18
2 野外采样策略和实验方法	36
2.1 中国黄土高原现代自然背景及野外采样策略	36
2.2 常用气候代用指标以及释光年代的实验室测量	40
3 末次间冰期古土壤S1的岩石地层、土壤地层以及年代学	49
3.1 岩石地层和土壤地层的划分说明	49
3.2 各个剖面的岩石地层和土壤地层	50
3.3 S1的土壤地层和年代地层	60
4 中国黄土高原末次间冰期古土壤的粒度分布	64
4.1 粒度作为冬季风指标的潜在问题	64
4.2 粒度分布的地理分异	65
4.3 小结	73
5 影响末次间冰期土壤磁化率的成壤过程和成壤因素	78
5.1 黄土-古土壤磁化率研究进展	78

5.2 成壤过程对黄土高原末次间冰期古土壤S1的磁化率的影响	85
6 定西剖面、天水剖面、蓝田剖面S1地理分异的进一步研究	99
6.1 定西剖面、天水剖面、蓝田剖面的土壤微形态特征	99
6.2 定西剖面、天水剖面、蓝田剖面的土壤地球化学特征	104

附 录

附录一 黄土高原西部地区黄土粒度的环境指示意义	
汪海斌, 陈发虎, 张家武 / 117	
附录二 Chronological discord between the last interglacial paleosol (S1) and its parent material in the Chinese Loess Plateau	
Z.D. Feng, H.B. Wang, C. Olson, G.A. Pope, F.H. Chen, J.W. Zhang, C.B. An / 127	
附录三 Pedogenic factors affecting magnetic susceptibility of the last interglacial paleosol S1 in the Chinese Loess Plateau	
Z.-D. FENG, H. B. WANG, C. G. OLSON / 147	
附录四 Pedostratigraphy and carbonate accumulation in the last interglacial pedocomplex of the Chinese Loess Plateau	
Z.-D. Feng and H. B. Wang / 169	
附录五 Geographic variations in particle size distribution of the last interglacial pedocomplex S1 across the Chinese Loess Plateau: Their chronological and pedogenic implications	
Z.-D. Feng, H.B. Wang / 186	
附录六 Spatiotemporal variations of Zr/Rb ratio in three last interglacial paleosol profiles across the Chinese Loess Plateau and its implications for climatic interpretation ...	
WANG HaiBin, LIU LianYou, FENG ZhaoDong / 212	

后 记	汪海斌 / 231
我的家庭	汪悦扬 / 232
写在海斌论文出版之前	李世萍 / 233

1 绪 论

国际地圈-生物圈计划 (International Geosphere Biosphere Programme, 简称 IGBP) 的总体目标是: “阐明并理解调控整个地球系统的物理的、化学的以及生物的交互过程, 阐明并理解这些过程影响之下的供养生命的独一无二的环境系统、正在该系统内发生的变化以及它在人类活动的影响下以何种方式发生变化……” 人类活动对气候系统的影响自 19 世纪中叶以来日益增强, 大量的观测数据和证据表明: 地球正在变暖, 伴随气候系统的其他变化, 20 世纪全球平均表面温度增加了 0.6°C 左右; 20 世纪全球的海平面上升了 $0.1\sim 0.2\text{ m}$; 20 世纪是过去千年最暖的一个世纪, 20 世纪 90 年代是过去千年最暖的一个年代。人类活动产生的温室气体和气溶胶改变了大气状况进而影响着气候系统。不过, 我们到目前为止还不甚清楚温室效应的作用到底有多大、人为气溶胶的反馈究竟如何 (Anderson 等, 2003; Houghton 等, 2001)。在这种背景下, 理解地球系统的关键是要尽可能定量地理解并界定气候的自然变化过程, 然后区分和评估叠加在其上的人为影响。而要理解气候变化的自然过程和自然驱动因子, 我们必须超越非常有限的仪器记录到的、短暂的、深受人类活动影响的气候历史, 向更早的时期寻求古气候变化记录 (Bradley, 2000)。

米兰柯维奇理论为我们揭示了地球气候 400/100 ka (与偏心率相关, ka 代表千年)、41 ka (与倾角相关) 以及 23/19 ka 的变化周期 (与岁差相关) (Berger, 1988), 而且揭示了 65°N 的夏季太阳辐射是控制全球冰量变化的因子, 比较成功地解释了冰期-间冰期的转换 (见图 1.1)。但是, 这个理论仍存在一些不完满的地方, 而且它不能用于解释亚轨道尺度的气候变化事件, 例如 Heinrich 事件、Dansgaard-Osleger (D-O) 事件和 Younger Dryas (新仙女木) 事件等。换言之, 米兰柯维奇理论不能直接提供给我们关于未来千百年中气候变化趋势的清晰图景。人类目前正处在现代间冰期——全新世 (对应于深海氧同位素 1 阶段, 即 MIS1), 由于 100 ka 的主导周期在最近 0.8 Ma 表现强烈, 0.8 Ma 以来的间冰期都可以作为现代

间冰期气候变化趋势的参比对象。部分气候模拟和气候记录显示,深海氧同位素11阶段(简称 MIS11)的气候情形是全新世及未来气候的最佳参照物(Loutre 和 Berger, 2003; Loutre, 2003; EPICA community members, 2004)。但是目前可靠的高分辨率的 MIS11 气候记录非常有限,更老的间冰期记录更是罕见。在这种情形下,距离现代间冰期最近的一次间冰期——末次间冰期是我们理解间冰期气候自然变化过程的最佳参比对象(Kukla, 2000)。(注:Ka=千年;Ma=百万年前)

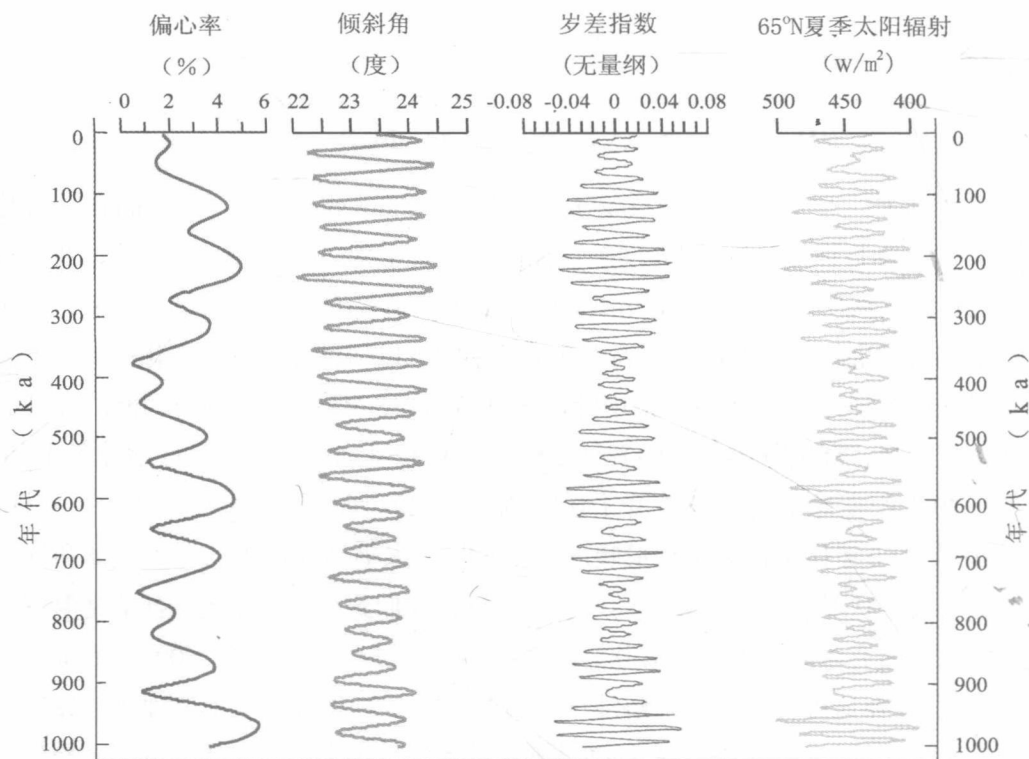


图 1.1 100 万年以来地球轨道参数以及北纬 65°N 夏季太阳辐射的变化

(数据来源于 <http://www1.ncdc.noaa.gov/pub/data/paleo/insolation/>, 由 Berger(1988)提供)

1.1 末次间冰期气候不稳定性的国际争论

关于末次间冰期的定义,存在着两种意见:第一,末次间冰期对应于 MIS 5e (Shackleton, 1969)。在欧洲, MIS 5e 对应于 Eemian, 年代大致相当于 130~116 ka BP; 在北美, MIS 5e 对应于 Sangamon 土壤发育期。第二,整个 MIS 5 都属于末次间冰期 (Bowen, 1978)。在中国,通常将整个 MIS 5 称作末次间冰期,对应于黄土-古

土壤序列中的S1发生期(大约128~73 kaBP)。(注: kaBP=千年前)

首先, 对末次冰期千年尺度(亚轨道尺度)的气候快速变化(Heinrich, 1988; Broecker等, 1992; Broecker, 1994; Bond等, 1992, 1993, 1995)的探讨几乎引领了20世纪整个90年代古气候研究的风尚。Andrews (1998)形象地说, 自1992年始, 研究Heinrich事件成了人人都在从事的“家庭手工业”, 相关数据层出不穷。冰期内部的千百年尺度事件, 在格陵兰冰芯中早已发现, Dansgaard等(1993)指出了冰芯中 $\delta^{18}\text{O}$ 与粉尘含量的变化及其与欧洲湖泊记录的对应性。海洋和冰芯记录均显示, 末次冰期(MIS 2-4: 7.3~1.0 kaBP)发生了一系列准周期为5000~6000年的Heinrich事件, 每两个相邻的Heinrich事件是一个逐渐升温的过程, 被称为Bond旋回(Bond Cycles)。每个Bond旋回又包含准周期为1300~1500年的Dansgaard-Oeschger (D-O)事件(Broecker, 1994)。

1.1.1 末次间冰期气候不稳定的证据

GRIP members (1993)率先向末次间冰期的稳定观点提出挑战。从格陵兰Summit钻取的3000 m长的冰芯记录中的氧同位素($\delta^{18}\text{O}$)以及粉尘 Ca^{2+} 浓度表明, MIS 5e中温度变化非常剧烈。MIS 5e中的3个暖阶段的 $\delta^{18}\text{O}$ 平均值较全新世的平均值高出1.4‰, 折算成温度差为2.1℃。Dansgaard等(1993)研究了GRIP冰芯记录的250 ka BP以来的气候变化, 认为气候不稳定性贯穿了最近两个冰期旋回。这些结果和推论无疑增加了我们对全球变暖后果的忧虑。

格陵兰冰芯揭示出的“气候不稳定性”霎时激发了学者们对末次间冰期的特殊兴趣。由于北半球高纬度地区对气候的敏感性更高, 科学家们首先在北半球的高纬度地区寻找末次间冰期内的气候突发事件。来自北大西洋的深海钻孔资料显示 MIS 5e 中期海水表面温度(SST)下降了2~3.5℃(Cortijo等, 1994; Seidenkrantz等, 1995; Fronval和Jansen, 1996, 1997; Cortijo等, 1999, 2000)。需要指出的是, 总体说来, 从海洋记录中检测到的气候快速变化事件持续的时间比从GRIP冰芯中检测到的要短些, 在幅度上也不像GRIP冰芯中检测到的那么极端。来自欧洲内陆湖泊沉积的孢粉和磁化率记录显示, Eemian时期也存在着气候快速变化(Thouveny等, 1994; Field等, 1994)。最近, 贝加尔湖地区的两个钻孔也记录到了Eemian中期的一次显著的降温事件(Karabanov等, 2000; Prokopenko等, 2002)。Heusser和Oppo (2003)报道了亚热带大西洋西岸(美国东南海岸)的ODP 1059大洋钻孔记录到了千年尺度的寒冷事件。

1.1.2 末次间冰期气候稳定的证据

尽管有如此多的记录显示了末次间冰期气候千年尺度的快速变化,可是争论与分歧也始终存在(Kukla, 2000)。距离GRIP Summit以西28 km处的GISP2冰芯记录显示,GRIP记录到的MIS 5e内的突然变化在这里一概不见(Taylor等, 1993; Grootes等, 1993)。通过与南极洲东方站冰芯中的甲烷和 $\delta^{18}\text{O}$ 等指标的对比,Chappellaz等(1997)推测,GRIP和GISP2冰芯的底部曾经发生过扰动。最新的被认为是北半球第一个详细记录了Eemian后期和末次冰期早期气候且未受扰动的冰芯——NGRIP冰芯的 $\delta^{18}\text{O}$ 记录表明,MIS 5e中期(123 ka BP)的气候是稳定的(NGRIP members, 2004)。这个结果对末次冰期气候不稳定的先前推论(GRIP members, 1993)产生了严重的冲击。南极的Vostok冰芯(Petit等, 1999)和Dome C冰芯(EPICA community members, 2004)也表明,MIS 5e内部没有发生气候突变。南极另外一个冰穹(Taylor)的 $\delta^{18}\text{O}$ 记录也佐证,MIS 5e的气候是稳定的(Grootes等, 2001)。

来自北大西洋的另外的一些证据表明,MIS 5e北大西洋深层水和(或)表层水均没有剧烈的变化(McManus等, 1994, 1999; Adkins等, 1997; Oppo等, 1997; Rasmussen等, 1999; Matthiessen和Knies, 2001; Tzedakis等, 2003)。气候模拟的结果显示末次间冰期北大西洋的温盐环流仅衰减了5%,这种轻微的变化不足以对北半球高纬度地区的热量平衡造成任何显著的影响(Crucifix和Loutre, 2002)。在欧洲内陆,更多的证据表明,Eemian时期的气候是稳定的。这些记录包括希腊西北部(Frogley等, 1999; Tzedakis等, 2002)和德国中部的孢粉记录(Böettger等, 2000),法国Ribains玛尔湖泊记录(Rioual等, 2001; Shemesh等, 2001)以及地中海西部的钻孔记录(ODP-977A)(Martrat等, 2004)。对于法国La Grandle Pile与德国Bispingen和Gröbern湖泊的孢粉数据,Kühl和Litt(2003)使用不同于孢粉转换函数的概率密度函数重建了Eemian时期的温度变化,结果显示温度变化平缓。美国西部Carp湖过去125 ka的孢粉记录也表明,末次间冰期气候没有表现出强烈的波动(Whitlock和Bartlein, 1997)。

1.1.3 千年尺度气候变化的驱动机制的两个假说

除了对末次间冰期的气候情形有争议外,科学家对气候突变的驱动机制也未取得一致的意见。目前,存在两种不同的设想:第一,大洋温盐环流状态的转换(Brocker, 1994)。由于大量的淡水输入到北大西洋的北部,温盐环流因此而关闭。

温盐环流关闭的信号通过海洋内部的机制（相对迟缓地）传播到其他地区。这种观点的支持者主要来自古气候学家和搞模拟的海洋学家。该驱动的缺陷在于缺乏引起快速、剧烈、广泛的气候效应的链条。第二，热带海洋的 ENSO 活动（Cane, 1998）。这一假说主要是由大气物理学家和年代际气候变化研究者倡导的。支持者认为，热带的对流系统是构成地球气候系统的控制性要素，ENSO 确实解决了困扰基于海洋无法解释的遥相关问题，但是，还没有足够的证据表明地球热带海洋-大气耦合系统存在多种分立的调节模式。也就是说，除非考虑海洋的调节作用，目前还缺乏证据表明大气可以在一个状态稳定几百年。在高纬度气候波动传播、气候系统内部反馈放大作用及气候变化南北半球耦合方面，亚洲季风区的水汽、粉尘变化可能是被忽视的重要因子（冯兆东等，2000）。

1.2 中国黄土高原末次间冰期古土壤 S1 的研究现状与问题

1.2.1 中国黄土研究历史简述

从第四纪科学的角度出发，黄土研究有几大被广泛关注的焦点：（1）黄土的来源问题，包括黄土的搬运动力和源区；（2）黄土的地层；（3）黄土记录的古气候和古环境信号。

1.2.1.1 中国黄土的来源

Lyell 可能是对黄土（loess）最早开展科学研究的地质学家。根据欧洲莱茵河流域和美国密西西比河流域的黄土研究，Lyell（1834, 1847）提出了黄土的“水成说”。自称为“孤独旅人”的冯·李希霍芬基于自己在中国的多年考察和对沙尘暴的亲身经历提出了黄土的“风成说”（Von Richthofen, 1882）。刘东生和他的团队从 20 世纪 60 年代开始，通过对黄土高原大范围、多学科的研究，进一步完善、发展了黄土的风成说（刘东生，1964, 1965, 1985）。张德二（1984）对历史时期降尘文献的过滤和对现代降尘的研究为黄土风成说提供了天气过程依据。Pye（1987）为中国黄土高原大致为西北到东南的砂黄土（中值粒径 Md 介于 $30\ \mu\text{m}$ 和 $16\ \mu\text{m}$ 之间）—典型黄土（ $15\ \mu\text{m} < Md < 25\ \mu\text{m}$ ）—黏黄土（ $Md < 15\ \mu\text{m}$ ）的带状分布提供了有益的风动力学解释。张小曳等（1991, 1994a, 1994b, 1996a, 1996b）对现代粉尘的研究为黄土的风成说提供了地球化学证据。近年来对黄土-古土壤的地球化学分析表明，黄土是高度混合的物质，为黄土的风力搬运说再添力证（Jahn 等，2001）。