兰州约 60 ka 以来夏季风千年 尺度不稳定性研究

方小敏 潘保田 管东红 李吉均 小野有五^④
福泽仁之^④ 大井圭一^④

(兰州大学地理科学系, 兰州 730000; ④日本北海道大学大学院地球环境科学研究科;
④日本东京都立大学地理系)

摘要 28 m 厚的兰州沙金坪黄土剖面高分辨率记录了末次冰期早期以来亚洲气候变化的历史. 土壤磁化率、CaCO₃ 含量和颜色夏季风指标变化表明, 约 60 ka 以来夏季风在千年尺度上表现为急剧的跨时约 1~ 2 ka 的一系列脉冲式增强变化, 并在低频上呈现先强后弱的准万年尺度波动; 土壤发育以颜色加深、有机质积累、生物孔道增多和一定的碳酸盐淋溶为特征, 其强度与夏季风上述增强变化基本对应, 可能共同反映了北大西洋地区末次冰期快速的气候变化对本区的影响.

关键词 末次冰期 夏季风 不稳定性

北大西洋地区末次冰期(12~ 74ka)气候经历了 20 个短期(约 1~ 2ka)的快速增暖(Dansgaard-Oeschger 事件)和 8 个长期(约 4~ 8 ka)的逐步变冷周期(Bond 旋回)^[1,2], 而在每个变冷周期的结尾为极端的严寒气候, 导致北美冰盖向北大西洋大规模倾泻冰筏和碎屑(Heinrich 事件)^[3]. 这种千年尺度上的气候不稳定性同时在其周边的欧洲及北美西部和东北太平洋有所记录, 而中国黄土高原中部黄土的粒度记录表明亚洲冬季风在 Heinrich 事件时期也受到了影响^[4], 说明北大西洋气候不稳定性不是局部现象, 至少在北半球中、高纬地区可能具有广泛的意义. 亚洲夏季风和北大西洋暖流是控制北半球气候变化的 2 个最主要的供热系统, 了解这 2 个系统的联系和变化规律对全球气候变化及预测具有非常重要的意义.

沙金坪剖面位于兰州市黄河北岸二级阶地上, 为一开挖的新鲜工程剖面. 剖面总厚约 28 m, 由顶部 2.45 m 全新世黄土和 3 层灰褐色(7.5YR 5/6)中等发育的古土壤组成, 中部为 19.75 m 末次冰期中、晚期马兰黄土和底部约 5m 河漫滩粉砂层组成, 粉砂层下为黄河砾石层. 马兰黄土中含 17 层 20~ 60 cm 厚、浅灰褐~ 灰褐色(10YR 6/3~ 4/3)的弱~ 中等发育的古土壤, 这些古土壤可以进一步组合成 8 个古土壤系列 PS 1~ 8(图 1). 每个系列以一层较厚而强的古土壤开始, 以较薄而弱的古土壤结束, 古土壤之间为约 10~ 20 cm 的黄土或风化黄土, 而分隔古土壤系列的为 60~ 100 cm 的厚层典型砂黄土. 下部的 4 个古土壤系列, 古土壤发育普遍相对较强, 可以和早先低分辨率地层中的末次大间冰段的 3~ 4 个古土壤(Smr 1~ Smr 3/Smr 4)^[5]相对比. 深度 18 m 以下的古土壤 14~ 17 层中发现有微扰动现象和波动纹层, 显示可能受到冰缘扰动和偶发大洪水影响.

早先¹⁴C 测年表明, 兰州黄河阶地上古土壤 S0 形成于约 2~ 10 ka, Sm 顶和中部形成于约 26~ 35 ka, 而热释光测年表明 Sm 底部为约 54~ 55 ka^[5]. 本次研究从 2.6 m 以下系统的采集了 17 个红外热释光(IRSL)年龄样, 目前已测量出的 4 个年龄^[6]与早先的测年非常吻合(图 1),

共同证实了上述土壤地层的对比断代. 基于 ^{14}C 和 IRSL 测年, 大致将 S0 底和 Sm 顶底部(具体取磁化率曲线最高与最低值的中值位置, 个别峰值参考 CaCO_3 曲线), 分别对比于深海氧同位素气候变化边界 MIS 1/2 (12.05 ka)、2/3 (24.11 ka) 和 3/4 (58.96 ka)^[7], 然后采用粒度-年龄模型^[4] 计算各样点层位年龄, 计算的各主要夏季风变化年龄与用 ^{14}C -IRSL 年龄点间和 MIS 边界点间线性内插, 以及格陵兰 GRIP 冰芯氧同位素气候变化年龄, 在误差范围内有很好的吻合(注意后者基于冰芯模型计算的年龄也有 1~4 ka 的误差^[1]) (表 1).

图1 时间域中兰州沙金坪黄土剖面记录的末次冰期亚洲夏季风增强(SME)和格陵兰 GRIP 冰芯记录 Dansgaard-Oeschger 事件暖期(IS)^[1]及 Bond 长期变冷旋回^[2]的对比

PS——古土壤系列; 粗短箭头: 主要的 > 40 μm 粗碎屑最大峰值位置; H——Heinrich 事件; YD——新仙女木事件; 方形和圆形符号代表 ^{14}C ^[5] 和 IRSL 年龄, 单位均为 ka BP

夏季风指标选用已被普遍接收的磁化率和碳酸盐含量, 以及新指标土壤颜色(色相), 因为土壤颜色是最常见和最重要的土壤发生特色, 与土壤组成如有机质、铁离子和粘粒含量及土壤介质环境密切相关. 采样间距为 2~5 cm, 总计 672 个样品, 分辨率为 40~100 年/个.

磁化率、 CaCO_3 和颜色的时间序列表明, 约 60 ka 以来末次冰期夏季风呈现明显的高频和高幅变化, 在千年尺度上大致表现为 17 个跨时约 1~2 ka 的主要增强时期, 并具有明显的约 4~8 ka 的长期变冷周期, 可以和北大西洋地区的主要暖期(间冰段)及 Bond 旋回变冷分别进行较好的对比(表 1 和图 1). 因 18m 以下古土壤 14~17 层可能受到非风成作用的部分影响, 对比只能在长周期上成立, 而暖锋的对比是非常初步的. 更为吃惊的是, 夏季风代用指标所指示的这 17 个暖期刚好对应于野外独立鉴定的 17 个古土壤层, 而长期变冷周期又刚好与强-弱

表1 不同测年方法所确定的沙金坪黄土-古土壤序列中主要最大磁化率区间年龄的比较

暖峰	最大磁化率区间 深度/cm	^{14}C 和 IRSL ^{a)} /kaBP	线性内插 ^{b)} /kaBP	粒度模型 ^{c)} /kaBP	GRIP 孔氧同位素最 低值区间 ^{d)} /kaBP
1	345 (322~ 440) ^{e)}	14.2 (13.5~ 17.3)	13.6 (13.2~ 15.7)	13.7 (13.3~ 15.3)	14.3 (12.6~ 14.7)
2	795 (752~ 820)	25.2 (24.3~ 25.7)	21.2 (20.5~ 21.6)	21.5 (20.8~ 21.9)	21.3 (20.6~ 21.7)
4	1 035 (972~ 1 050)	30.0 (28.7~ 30.3)	25.9 (24.1~ 26.3)	26.1 (24.1~ 26.7)	25.9 (25.7~ 26.4)
5	1 115 (1 110~ 1 133)	31.6 (31.5~ 32.0)	28.1 (28.0~ 28.6)	28.4 (28.1~ 28.9)	29.0 (28.6~ 29.4)
6	1 185 (1 155~ 1 192)	33.0 (32.4~ 3.1)	30.1 (29.2~ 30.3)	30.3 (29.8~ 30.4)	30.1 (29.8~ 30.5)
7	1 215 (1 207~ 1 243)	33.6 (33.4~ 34.3)	30.9 (30.7~ 31.7)	30.8 (30.6~ 31.4)	31.7 (31.3~ 32.2)
8	1 302 (1 278~ 1 365)	35.7 (35.2~ 37.2)	33.3 (32.7~ 35.1)	33.3 (32.4~ 35.2)	34.5 (32.8~ 35.0)
11	1 545 (1 530~ 1 565)	41.6 (41.2~ 42.0)	40.1 (39.7~ 40.7)	40.5 (40.0~ 41.1)	39.5 (38.6~ 39.8)
12	1 610 (1 580~ 630)	43.1 (42.4~ 43.6)	41.9 (41.1~ 42.5)	42.0 (41.6~ 42.5)	43.0 (41.5~ 43.3)
13	1 700 (1 680~ 1 732)	45.3 (44.8~ 46.0)	44.4 (43.9~ 45.3)	45.0 (44.6~ 45.7)	45.5 (44.9~ 45.6)
14	1 905 (1 858~ 1 945)	50.2 (49.1~ 51.2)	50.2 (48.9~ 51.3)	49.8 (48.4~ 50.8)	50.9 (48.3~ 50.0)
15	2 010 (1 993~ 2 032)	52.7 (52.3~ 53.2)	53.1 (52.6~ 53.7)	52.4 (51.8~ 53.1)	52.3 (52.2~ 52.6)
16	2 060 (2 048~ 2 123)	53.9 (53.6~ 55.4)	54.5 (54.2~ 56.3)	54.0 (53.6~ 56.0)	54.7 (53.9~ 55.1)
17	2 150 (2 147~ 2 165)	56.1 (56.0~ 56.4)	57.0 (56.9~ 57.4)	56.9 (56.7~ 57.5)	55.9 (55.4~ 56.3)

a) ^{14}C 和 IRSL 年龄点间线性内插. b) 深海氧同位素气候记录 MIS 1/2, 2/3 和 3/4 边界点间线性内插. c) MIS 1/2, 2/3 和 3/4 边界点间粒度-年龄模型^[4]内插. d) 氧同位素峰值确定和年龄引自文献[1]. e) 所有数据均表示为最大峰值和峰值区间

古土壤系列+ 厚层砂黄土组合相吻合(图1). 粒度分析进一步证实 $> 45 \mu\text{m}$ 粗颗粒部分(冬季风强度指标^[4])均毫无例外的落在这些厚层砂黄土中,可与北大西洋 Heinrich 事件时极端寒冷气候进行一致对比¹⁾(图1). 仔细对比粒度峰值与夏季风峰值还发现在每个 Bond 旋回开始的夏季风增强的最高值比粒度峰值晚约 1 ka. 土壤发生提供了进一步的证据,它表明虽然夏季风增强对应一个古土壤,但在古土壤内部,对应于夏季风最大值的土壤体比对应于夏季风增强初期的土壤体发育强,表现为前者比后者有更深的颜色、更多的粘粒、有机质、生物孔道和粪粒. 如果这种滞后不是由土壤发生造成,那么它一定反映了夏季风的固有变化. 由于控制夏季风主要水热的热带西太平洋暖池表层海水在末次冰期旋回中几乎没什么变化($< 2^\circ\text{C}$)^[8],因此,象冬季风一样^[4],夏季风的不稳定性可能应主要也由北大西洋的气候不稳定性^[1,2]造成,但是全新世夏季风呈现 3 次显著增强,而北大西洋却相对较稳定(图1). 因此,即使夏季风也受北大西洋的气候变化影响,其机制可能不完全等同于冬季风^[4],耦合的西风摆动与(青藏)高原热低压系统的变化可能是较为合理的可选机制之一. 或表明夏季风的变化在千年尺度上也是受冬季风的影响.

致谢 国家教委重点基金、日本 JSPS 基金、INQUA 1997 项目、国家自然科学基金(批准号:49401017)与中国科学院青藏研究基金共同资助项目.

参 考 文 献

- 1 Dansgaard W, Johnsen S J, Clausen H B, et al. Evidence for general instability of past climate from a 250 kyr ice core record. *Nature*, 1993, 364: 218~ 220
- 2 Bond G, Broecker W, Johnsen S, et al. Correlations between climate records from North Atlantic sediments and Greenland ice. *Nature*, 1993, 365: 143~ 147

1) Ono Y, Toshinori S, Fang Xiaomin, et al. Last glacial winter monsoon instability from the Chinese western Loess Plateau (手稿), 1998

- 3 Heinrich H. Origin and consequences of cyclic ice rafting in the Northeast Atlantic Ocean during the past 130 000 years. *Quat Res*, 1988, 29: 142~ 152
- 4 Porter S C, An Zhisheng. Correlation between climate events in the North Atlantic and China during the last glaciation. *Nature*, 1995, 375: 305~ 308
- 5 李吉均, 朱俊杰, 康建成, 等. 末次冰期旋回兰州黄土剖面与南极东方站冰岩芯的对比. *中国科学, B 辑*, 1990 (10): 1 086~ 1 094
- 6 Tsukamoto S. Infrared stimulated luminescence (IRSL) dating of Chinese loess deposits. *Abst An Conf Int Geogr Soc. Tokyo: Tokyo Metropolitan University*, 1997
- 7 Martinson D G, Pisias N G, Hays J D, et al. Age dating and the orbital theory of the ice ages: development of a high resolution 0 to 300 000-year chronostratigraphy. *Quat Res*, 1987, 27: 1~ 29
- 8 Linsley B K. Oxygen isotope record of sea level and climate variations in the Sulu Sea over the past 150 000 years. *Nature*, 1996, 380: 234~ 237

(1998-04-15 收稿, 1998-08-24 收修改稿)

东天山晚古生代火山岩区磁铁矿绿泥石建造金矿床 Sm-Nd 和 Rb-Sr 同位素年龄

姬金生 李华芹^④ 张连昌 杨兴科 丰成友

(西安工程学院资源系, 西安 710054; ④宜昌地质矿产研究所, 宜昌 443003)

摘要 东天山康古尔金矿床磁铁矿绿泥石建造地质地球化学以及 Sm-Nd 法和 Rb-Sr 法同位素年代研究表明, 该建造的 Sm-Nd 法等时线年龄为 $(290.4 \pm 7) \text{ Ma}$, Rb-Sr 法等时线年龄为 $(282.3 \pm 5) \text{ Ma}$, 成矿作用发生在海西晚期. 矿床的形成与塔里木板块同准噶尔板块碰撞引起的大规模逆冲、剪切、形成巨型黄山-秋格明塔什韧性剪切带有关.

关键词 金矿床 Sm-Nd 同位素, Rb-Sr 同位素 康古尔

新疆东天山地区晚古生代火山岩区内磁铁矿绿泥石建造型金矿是近几年发现的工业价值很大的新型金矿, 代表矿床为康古尔金矿, 作者在从事国家 305 项目研究中对矿石的 Sm-Nd 和 Rb-Sr 同位素年龄进行了测定, 两者年龄一致, 现通报如下.

1 矿床地质概况

该矿床位于塔里木地台东北缘的沟-弧体系、阿奇山-雅满苏岛弧北缘的火山岩带内. 矿区出露地层为下石炭统阿奇山组海相-海陆交互相中性-酸性熔岩、火山碎屑岩夹正常沉积碎屑岩. 矿区处于秋格明塔什巨型韧性剪切带南侧, 韧性变形强烈, 后期叠加有韧性-脆性和脆性变形(主要为东西向分布的继承性断裂以及 NW 和 NE 向断裂), 金矿分布于韧性剪切带内的脆-韧性断裂中(图 1). 矿带内热液活动强烈, 含有大量规模不一的石英脉.

金矿体主要产于千糜岩(原岩为火山岩)内, 矿体上盘原岩为安山岩, 下盘为酸性凝灰岩. 矿体长数百米到 1 km 以上, 宽 0.5 m 到数米, 矿体平行排列, 尖灭再现的现象常见. 矿石中金属矿物主要有磁铁矿(5%~15%), 黄铁矿(3%~10%), 赤铁矿(2%~4%), 自然金及银金矿