

文章编号: 1000-0550(2007)03-0429-08

末次冰期东亚季风快速波动的模式与成因^①

管清玉¹ 潘保田¹ 邬光剑² 高红山¹ 李琼¹ 苏怀¹

(1 兰州大学西部环境教育部重点实验室 兰州 730000 2 中国科学院青藏高原研究所环境与过程实验室 北京 100085)

摘要 通过对位于东亚季风区中东部与西部边缘的两个高分辨率黄土剖面记录的对比研究,发现它们不仅捕捉到了 20 个 Dansgaard-Oeschger 事件与 6 个 Heinrich 事件,而且黄土记录与 GRIP 冰芯记录的这些快速气候波动基本上是同步的。暗示在整个末次冰期,东亚季风气候同样存在千年-一百年尺度上的快速波动。所不同的是,西面的沙沟剖面对这些快速气候波动的反应比东面的王官剖面敏感。结合末次冰期中国黄土记录的先前研究结果,我们发现,自西向东 Dansgaard-Oeschger 旋回的幅度逐渐变小,推测这主要是由西风与东亚夏季风共同作用所造成的。

关键词 末次冰期 东亚季风 气候波动 Dansgaard-Oeschger 事件 Heinrich 事件

第一作者简介 管清玉 男 1972 年出生 讲师 博士 第四纪沉积与环境 E-mail: guanqy@lzu.edu.cn

中图分类号 P534.63 P642.13⁺1 文献标识码 A

北半球高纬地区——北大西洋地区与格陵兰地区的研究^[1-3]首先揭示出末次冰期气候表现为一系列的快速气候突变事件(即 Heinrich 与 Younger Dryas 冷事件、Dansgaard-Oeschger 暖事件)。随后的研究表明,这些快速气候突变事件不仅仅局限于北大西洋地区,而且在北半球具有较大普遍性。众多的冰芯记录^[4-5]、孢粉记录^[6]、黄土记录^[7-10]、石笋记录^[11-12]、海洋记录^[13-14]中都有其踪迹。尽管在北大西洋以外地区这些快速气候波动事件表现得不如北大西洋地区强烈,但 Heinrich(简称为 H)与 Dansgaard-Oeschger(简称为 DO)事件的影响效应还是存在的。深入了解这些亚轨道时间尺度上的气候快速波动的真正原因与机制,有赖于全球气候系统各区域内高分辨率气候记录的研究。然而,迄今为止,能与冰芯 DO 旋回作良好对比的地质记录并不多见。中国的黄土研究在国际第四纪研究中占有极其重要的地位,末次冰期所发生的快速气候波动同样存在于中国的黄土记录中^[7-10],这很有可能是一个不争的事实。然而,以前的工作大多数只局限于黄土高原中部地区,并且取样的分辨率偏低。为了进一步查实末次冰期东亚季风变化特征及其与极地北大西洋、热带海洋等气候系统的关系,新的、高分辨率的黄土剖面研究就显得尤为重要。本文将分别位于东亚季风区中东部地区与西部边缘地区的王官剖面、沙沟剖面为研究对象(图 1),对上述问题加以探讨。

1 材料与方法

王官剖面位于河南省三门峡市东北约 6 km (34°47'N, 111°16'E) 王官村后,三门峡水库南岸黄河 T2 阶地之上,风成黄土厚约 30 m,其剖面详细信息见文献 15 与 16。甘肃武威沙沟剖面(37°33'N, 102°49'E)位于祁连山北麓最高一级洪积扇顶部,沙沟河第五级阶地(T5)之上,其详细信息参见文献 27。本文仅取该两剖面的 L1 地层进行分析研究。两黄土剖面在末次冰期都有较厚的黄土堆积(王官剖面 L1 厚约 16 m;沙沟剖面 L1 厚约 28 m)。在野外,我们以 5 cm 的间距采集散样(其中沙沟剖面 L1 上部 3.35 m 的采样间距加密为 2.5 cm);同时采集年代样,以进行年代控制(年代样测定结果及剖面年代序列的建立具体参见文献 15 与 16)。

所有样品经室内充分自然风干后,在兰州大学西部环境教育部重点实验室,采用 Mastersizer 2000 激光粒度仪(Malvern Instruments Ltd 制造,测量范围为 0.02~2000 μm)进行粒度分析。用荧光 X 射线法(所用仪器为荷兰 Philips Analytical Magix PW 2403 型 X 射线荧光光谱仪)进行化学元素全量分析(测试间距为 10 cm,常量元素分析结果以氧化物的形式给出,微量元素分析结果以单元素的形式给出,同一样品的测量标准差约为 2%)。

①国家重点基础发展计划(批准号:2005CB422001)、国家自然科学基金(批准号:40471016 40401007)与教育部高等学校博士点科研基金(20030730017)资助

收稿日期:2006-08-24 收修改稿日期:2006-10-13

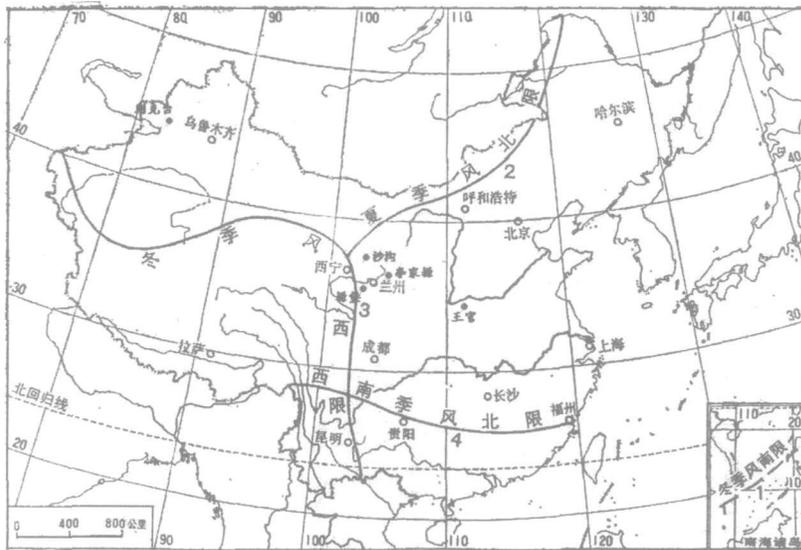


图 1 中国季风界限图 (据任美镔, 2004)^[17]

Fig 1 The map of Chinese monsoon boundary^[17]

虽然黄土的粗细与沙漠—黄土边界带的南北迁移或与粉尘源区距离有关^[9, 18], 但是考虑到沙漠的扩张—收缩也随冰期—间冰期转换(或和冬季风盛—衰)而呈现波动变化^[19, 20], 因此, 基于目前研究状况, 仍可以用粒度指标来反演东亚季风的变迁历史。在粒度指标中, 中值粒径 (Md) 是常用的冬季风替代指标^[10, 20~22], 本文采用其作为冬季风代用指标。

在中国第四纪黄土地层中, 化学元素组分及其在剖面上的分布与古气候环境密切相关, 某些化学元素在剖面上的变化, 可以作为古气候波动的标志。因此, 通过对黄土地层中化学元素的分布、迁移、富集等化学元素特征的研究, 可以重建黄土形成时的古气候环境^[19, 23]。

在化学风化过程中, $Al-Fe$ 性质特别稳定, 暖湿环境条件下, 因化学风化作用增强, 沉积物中的氯、硫、钾、钠、镁等易溶元素大量溶解迁移, 而 $Al-Fe$ 等迁移能力很弱的元素, 则以氧化物的形式残留在原地形成于新矿物——粘土矿物中。因此, 风成沉积地层中 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 含量的增加代表着气候的暖湿波动; 相反, 气候向干燥方向变化时, 地层多呈碱性, 易溶元素不易淋失, 致使 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 含量相对降低。在黄土风化成壤过程中, SO_2 本身的地化行为以迁移为主^[23], 由于 SO_2 比 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 活泼, 故其先于后者被淋失, 因此, 可用硅铁铝率 ($SO_2 / (Al_2O_3 + Fe_2O_3)$) 反映沉积物的风化程度^[24]。在地壳中, 钠多以硅酸盐或硅铝酸岩的原生矿物存在^[25], 这些矿物

经风化后, 大部分钠及其简单化合物极易被水带走, 因此, 钠是一种很容易发生迁移的元素^[19]。依据 Al_2O_3 、 Na_2O 化学风化过程中迁移性能的差异, 可用 Al_2O_3 、 Na_2O 来反映化学风化强度。在风化成土过程中, 土壤生物尤其是植物根系对 Zn 、 Cu 起富集作用^[25]。在沉积地层中, 腐殖质作为固相复合锌元素的一个重要载体, 可通过粘粒—腐殖质—锌元素的方式使锌得以富集。由于黄土的 pH 值呈碱性, 可通过有机质的吸附作用导致铜的富集。洛川剖面的研究也曾发现, Zn 、 Cu 在古土壤中平均含量确实比黄土层中的高^[19]。另外, Rb/Sr 也是一种比较常用的反映风化成壤强度的指标^[26]。

在沙沟剖面中, 我们发现硅铁铝率、 Al_2O_3 / Na_2O 、 Na_2O / Al_2O_3 、 Fe_2O_3 / Al_2O_3 相对于其它地化指标更能指示风化成壤强度的变化, 因此, 在沙沟剖面中, 我们采用这 5 个地化指标作为夏季风的代用指标。然而, 上述 5 个常量元素指标在王官剖面中却没有 Zn 、 Cu 、 Rb/Sr 这三个微量元素指标灵敏。因此, 在王官剖面夏季风代用指标的选择上, 我们采用的是 Zn 、 Cu 、 Rb/Sr 三个微量元素指标。

2 结果与讨论

2.1 结果

由王官剖面、沙沟剖面的地化指标与粒度指标测试结果可以明显发现(图 2), 整个末次冰期基本上可以划分成三个阶段, 分别对应于传统的末次冰期早期、

末次冰期间冰段、末次冰盛期。冬季风呈现为“增强—减弱—增强”的模式, 夏季风的情况刚好相反。更为重要的是, 在此 3 个阶段内, 依然存在一些千年尺度上的快速波动。在王官剖面中, 夏季风代用指标 (Rb δ_r , Zn, Cu) 与冬季风代用指标 (Md), 特别是 Rb δ_r 夏季风代用指标在上述 3 个阶段内都不乏一些亚轨道尺度上的快速波动, 并且它们在时间上基本上可以互相对应。在 3 个夏季风代用指标中, Rb δ_r 的波动幅度最大, Zn, Cu 的波动幅度基本相当。冬季风代用指标

(Md) 的波动幅度勉强与 Zn, Cu 夏季风代用指标相当, 甚至比它们小。沙沟剖面的各冬、夏季风代用指标曲线上千年尺度上的波动幅度要比王官剖面大得多。就冬、夏季风代用指标而言, 在沙沟剖面中, 夏季风代用指标的变化幅度要较冬季风代用指标的大, 这与王官剖面的情况相一致。就千年尺度上的气候事件的发生时段而言, 冬、夏季风代用指标对此具有较高的一致性, 并且这些亚轨道时间尺度上的气候事件在两黄土剖面中也是基本上可以互相对应的。

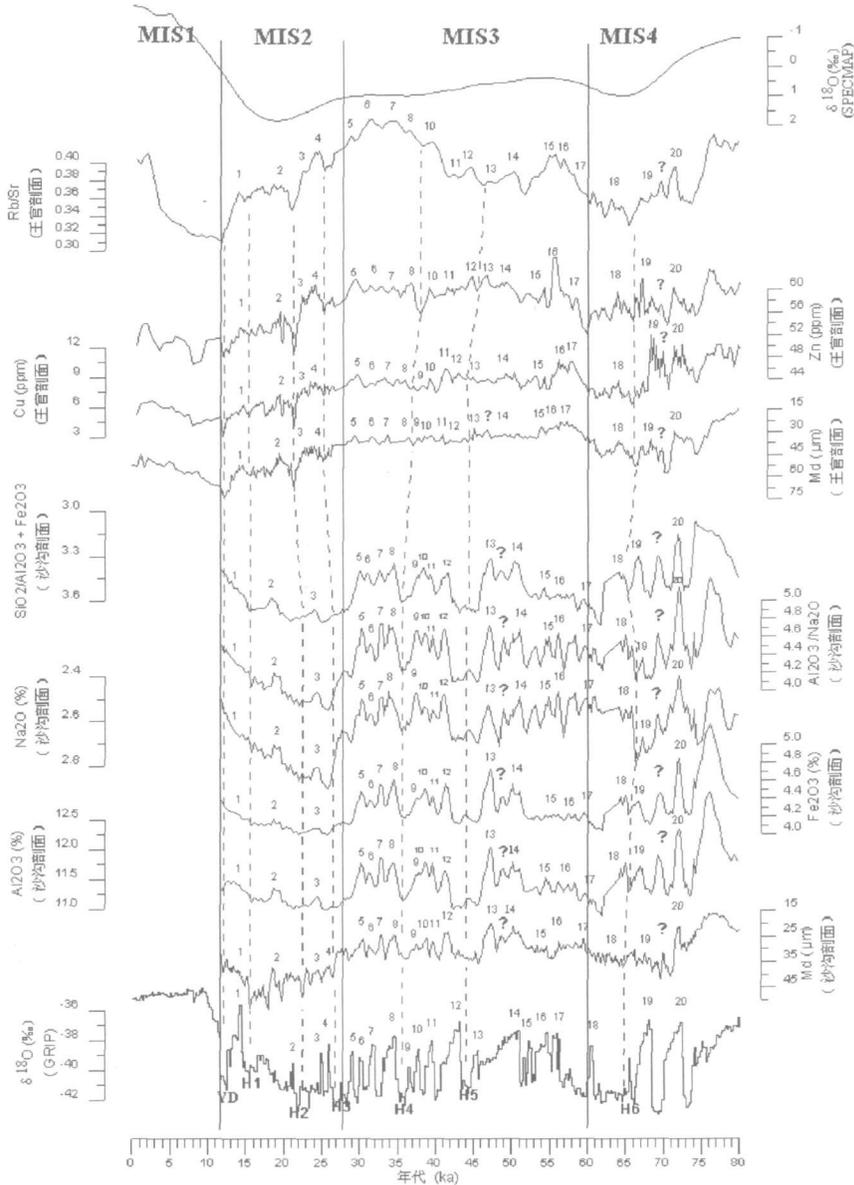


图 2 沙沟剖面、王官剖面末次冰期气候记录及其与 SPECMAP 及 GRIP 冰芯记录的对比 (1~20 为 DO 暖事件, H1—H6 为 Heinrich 冷事件)

Fig 2 Climatic records of the Wangguan loess section and the Shagou loess section during the last glacial compared with the SPECMAP record and the GRIP record (1~20 Dansgaard-Oeschger events, H1—H6 Heinrich events)

总之,在末次冰期,两黄土剖面中不仅存在亚轨道尺度上的快速气候波动,而且它们在时间上具有较高的一致性;两剖面(尤其是西面的沙沟剖面)夏季风代用指标的变化幅度要较冬季风代用指标的大;无论是冬季风代用指标还是夏季风代用指标,其在西面沙沟剖面中的变化幅度要比东面王官剖面中的大。

2.2 讨论

沙沟剖面与王官剖面的粒度记录、地化参数记录在末次冰期都具有 GRIP 冰芯所揭示的亚轨道尺度(图 2)上的波动,指示末次冰期的东亚冬、夏季风在亚轨道尺度上是极其不稳定的。与冰芯记录所不同的是,两黄土剖面的众代用指标记录都可划分为 3 个阶段,分别对应于 SPECMAP 的 MIS2、MIS3、MIS4。这说明东亚季风亚轨道尺度上的不稳定性是叠加在全球冰量变化之上的。

末次冰期早期(MIS4),在全球冰量增加,夏季风衰弱而冬季风增强的大背景下,气候仍然存在一些颤动。我们的两黄土剖面中都捕捉到了同期的 3 个 DO 暖事件(DO18、DO19、DO20)与 1 个 H(H6)极端冷事件,这些亚轨道尺度上的快速气候波动事件在两黄土剖面的各代用指标曲线上都得到了较好的体现。指示无论是在季风区的中东部地区还是季风区的西部边缘地带,在末次冰期早期,都有类似于北大西洋地区的气候不稳定性现象,初步推测这种现象极有可能普遍存在于东亚季风区内。所不同的是,东亚季风区的西部地区(武威地区)比东部地区(三门峡地区)对这些快速气候波动事件的响应要积极一些,即其波动的幅度要大一些。另外,我们的两黄土剖面(特别是沙沟剖面)还记录有 DO19 与 DO20 之间的一暖事件(图 2 其发生的时间段约为 69~70 ka),然而,该暖事件在冰芯记录中是缺失或者根本不存在的。

在末次冰期间冰阶即 MIS3 阶段,全球冰量较末次冰期早期、晚期明显减少,东亚夏季风显著增强,在黄土地层中一般发育有间冰段古土壤 Sm。即使在青藏高原及其周边地区,MIS3 阶段晚期(40~30 ka)出现了特强夏季风,在腾格里沙漠、巴丹吉林沙漠出现大湖期^[27]。此时的夏季风极锋深入西北的位置很可能与全新世大暖期时相似(山丹—雅布赖山一线),甚至更西北的巴丹吉林沙漠在 39~21 ka 之间也是湿润期^[28]。在气候格局整体偏暖的背景下,同期的沙沟剖面与王官剖面中都有一层弱古土壤(Sm)发育。然而,两剖面的粒度指标与众地化指标显示 MIS

3 阶段东亚季风并不稳定,依然存在可与北大西洋地区相对照的 DO5~DO17 暖事件、H4 与 H5 极端冷事件,并且黄土记录与冰芯记录的这些快速气候波动事件基本上是同步的(图 2)。与 MIS4 阶段一致的是,西面沙沟剖面所揭示的 MIS3 阶段的这些快速冷、暖事件的波动幅度显著比王官剖面中的大。另外,沙沟剖面还记录到了 DO13 与 DO14 之间的一暖事件,然而,该暖事件在王官剖面的大多数代用指标曲线上并没有体现。此外,王官剖面 MIS3 阶段的气候整体上比沙沟剖面的稳定、偏暖。

末次冰期最盛期,陆地冰量增多,因此导致气温急剧下降,在巴丹吉林沙漠东南缘的查格勒布鲁剖面、毛乌素沙漠的滴哨湾剖面与米浪沟湾剖面出现了冻融褶皱^[29~31],河西走廊西部地区的温度比现在低 6~15℃^[32]。在此寒冷气候驱动下,冬季风显著增强,沙漠急剧扩张,其时的沙漠—黄土边界带已经越过兰州^[33]。我们两黄土剖面的各代用指标曲线指示末次冰盛期的气候是整个末次冰期最为干、冷的时期,记录了 3 个寒冷的 H 事件(H1、H2、H3)。然而,即使在东亚冬季风占统治地位的形势下,东亚夏季风还是存在一些暖的(DO1、DO2、DO3、DO4)波动。

总起来看,冰芯记录所揭示的 20 个 DO 暖事件与 6 个 H 冷事件在我们的两高分辨率的黄土剖面中都有其痕迹,尤其是在西面的沙沟剖面中烙印较深(图 2;图 3);两黄土记录与 GRIP 冰芯记录所揭示的这些快速冷、暖事件基本上是同步的。

在中国的黄土沉积中,包括我们的两黄土剖面在内,不乏一些末次冰期的高分辨率记录^[9,34,35],它们都不同程度地捕捉到了发生于末次冰期的一些快速气候波动信息(图 3)。需要说明的是,由于图 3 中各黄土剖面在测年方法、年代转换等方面存在一些差异,因此我们尚不能对各 DO 事件、H 事件进行严格的对比,但这并不影响我们对其进行一些有益的探讨。从轨道尺度上来看,黄土记录(图 3)与 SPECMAP 记录基本上一致,指示了在万年尺度上全球冰量是气候的主要驱动因子。在亚轨道尺度上,黄土记录与北半球高纬地区(GRIP 曲线)联系得要相对紧密一些,但是自西向东这种联系呈减弱趋势,即:常年受西风影响的新疆伊犁则克台剖面的 D-O 旋回的幅度最明显^[34];沙沟剖面次之,而后依次为塬堡剖面^[35]、李家塬剖面^[9]、王官剖面。自西向东,虽然 D-O 旋回的幅度在减弱,但是夏季风的影响却逐渐增

强 (需要说明的是, 图 3 中的各黄土剖面由于在测年、年龄模式等方面存在差异, 所以我们不能对 D -

O 事件进行精确对比)。上述差异既体现在西风区与季风区之间, 同样也体现在季风区内部。

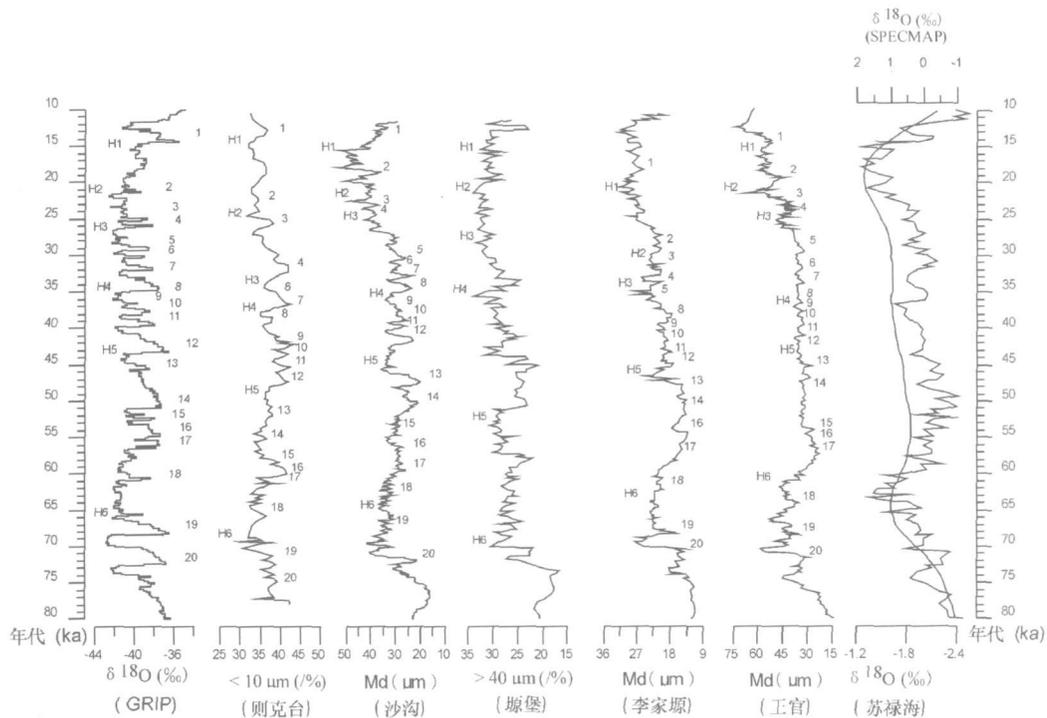


图 3 则克台^[34]、沙沟、塬堡^[35]、李家塬^[9]、王官剖面末次冰期黄土粒度记录与 GRIP 冰芯、SPECMAP 苏禄海^[36]记录的对比 (1~20 为 DO 暖事件, H1-6 为 Heinrich 冷事件)

Fig. 3 The grain size of the Zekehai^[34], Shagou Yuanbao^[35], Lijayuan^[9] and Wangguan bess section during the last glacial compared with the GRIP record SPECMAP record and the Sulakehai record

北半球高纬地区、热带西太平洋、青藏高原是影响我国气候的三大主控因子, 只不过是不同区域, 其权重有所不同。西风区与季风区虽然具有相同的全球冰量驱动大背景, 但是其气候分别属于两种变化模式^[37]。在西风区内, 其气候主要受控于西风, 热带西太平洋对其影响几乎是强弩之末, 甚至是鞭长莫及。而在东亚季风系统中, 末次冰期时冬季风占优势, 其影响强度甚至可以到达南中国海^[38]; 夏季风虽然较弱, 但其带来的影响同样是不容忽视的。北半球高纬地区 (北大西洋地区) 的快速气候波动事件, 通过驱动洋面温度与北大西洋深层水 (NADW) 的变化, 而后经由大气、洋流传送到其它地区。在中国黄土记录中, 北半球高纬地区的这种快速波动是由西风带传递而来的^[7, 9, 35]。但是在西风带上、下游, D - O 旋回的幅度是不等的, 即上游的波动幅度要比下游大 (图 3)。这也正是中国黄土记录中 D - O 旋回的幅度小于格陵兰记录 (GRIP 记录)、中国西部黄土记录的 D - O 旋回幅度大于东部黄土记录的原因所在 (图 3)。

以前有许多研究认为, 热带地区在冰期时的降温幅度要比高纬地区小得多。例如, CLMAP 模拟的结果认为热带海洋在冰期的降温幅度在 2°C 左右^[39]; 根据 $\delta^{18}\text{O}$ 与 alkenone 推算的结果显示热带地区降温幅度小于 3°C^[40]; 西太平洋暖池在末次冰期的降温幅度还要小^[36]。因此, 在过去中国的黄土研究中, 大家经常将黄土记录与北大西洋记录进行对比, 而忽略掉热带海洋对黄土区所带来的影响。然而, 有许多研究认为, 热带地区的降温幅度比上述结果要大^[41-46]。COHMAP members^[41]通过对澳大利亚、新西兰、新几内亚、南美的雪线与古植被研究后发现, 在 18~15ka 间, 上述地区的平均温度较现在要低 4~6°C; 巴巴多斯地区海水表面温度在 19 ka 时比现在低 5°C^[42], 巴西变冷幅度也可达到相同的程度^[43]; Thompson 等^[44]依据 Huascarani 冰芯记录及雪线的降低幅度认为末次冰期晚期温度较现在低 5°C 以上; Schrag 等^[45]在对 ODP925 的研究中指出热带大西洋末此冰盛期时降温幅度高达 4°C; 青藏高原古里雅冰芯记录的末

次冰期降温幅度甚至超过了 10°C ^[46]。如果热带地区尤其是热带海洋地区的确存在上述较大幅度降温的话,那么,在探讨东亚季风特别是东亚夏季风的演变历史及规律时,忽略热带海洋对其带来的影响是不合适的或者不全面的。过分强调北大西洋地区的记录对理解全球气候变化同样也是不完整的^[47]。

东亚季风区在末次冰期同样受来自热带海洋的影响,与其距离越近,影响越显著(图3)。另外,这种影响也部分抵消了西风或冬季风所带来的影响,削弱了D-O旋回在黄土记录中的强度。西风区内(如则克台地区)由于常年处于西风控制下,基本上不受夏季风的影响,因此也就不存在抵消作用,北大西洋地区的快速气候波动信号深刻地烙在其气候记录上(图3)。进入夏季风活动区,愈往东南,一方面由于西风带所传递来的北大西洋地区的快速气候波动信号逐渐减弱,另一方面由于夏季风的抵消作用逐渐增强,从而导致D-O旋回幅度逐渐变小(图3)。

3 结论

(1) 东亚季风区的西部边缘地区(武威地区)与中东部地区(三门峡地区),高分辨率的黄土地层都捕捉到了最先由北大西洋地区所揭示的20个DO暖事件与6个H冷事件。暗示在整个末次冰期,东亚季风气候同样存在千年-一百年尺度上的快速波动。

(2) 王官剖面、沙沟剖面与GRIP冰芯所揭示的20个DO暖事件、6个H冷事件基本上是同步的。

(3) 末次冰期所发生的一系列亚轨道时间尺度上的快速气候波动幅度在中国黄土记录中自西向东逐渐变小,推测这主要是由西风与东亚夏季风共同作用所造成的。

参考文献 (References)

- 1 Heinrich H. Origin and consequences of cyclic ice rafting in the north-east Atlantic Ocean during the past 130 000 years. *Quaternary Science Reviews* 1988 29: 143-152
- 2 Dansgaard W, Johnson S J, Clausen H B *et al*. Evidence for general instability of past climate from a 250 ka ice core record. *Nature* 1993 364: 218-220
- 3 Bond G, Broecker W, Johnson S *et al*. Correlations between climate records from North Atlantic sediment and Greenland Ice. *Nature* 1993 365: 143-147
- 4 姚檀栋, 徐柏青, 蒲健辰. 青藏高原古里雅冰芯记录的轨道、亚轨道时间尺度的气候变化. *中国科学 (D辑)*, 2001, (31): 287-294 [Yao Tandong, Xu Baiqing, Pu Jianchen. Climatic changes on orbital and sub-orbital time scale recorded by the Guliya ice core in Tibetan Plateau. *Science in China (Series D)*, 2001, 44 (Suppl): 360-368]
- 5 North Greenland Ice Core Project members. High resolution record of Northern Hemisphere climate extending into the last interglacial period. *Nature* 2004 431: 147-151
- 6 Benson L W, Lund S P, Burdett J W, *et al*. Correlation of late Pleistocene lake level oscillation in Mono Lake, California, with North Atlantic climate events. *Quaternary Research* 1998 49(1): 1-10
- 7 Porter S C & An Z S. Correlation between climate events in the North Atlantic and China during the last glaciation. *Nature* 1995 375: 305-308
- 8 张成君, 陈发虎, 王琪, 等. 西北干旱区石羊河流域末次冰期晚期气候不稳定性记录. *沉积学报*, 2000 18(4): 646-650 [Zhang Chengjun, Chen Fahu, Wang Qi *et al*. Instability record of late glacial later period in the Shiyang river basin of arid northwest China. *Acta Sedimentologica Sinica* 2000 18(4): 646-650]
- 9 丁仲礼, 任剑璋, 刘东生, 等. 晚更新世季风-沙漠系统千年尺度的不规则变化及其机制问题. *中国科学 (D辑)*, 1996 26(5): 385-391 [Ding Zhongli, Ren Jianzhang, Liu Dongsheng *et al*. Climatic changes on millennial time scale: evidence from a high resolution loess record. *Science in China (Series D)*, 1996 39(5): 449-459]
- 10 吕连清, 方小敏, 鹿化煜, 等. 青藏高原东北缘黄土粒度记录的末次冰期千年尺度气候变化. *科学通报*, 2004 49(11): 1091-1098 [Lü Lianqing, Fang Xiaomin, Lu Huiyu *et al*. Millennial scale climate change since the last glaciation recorded by grain sizes of loess deposits on the northeastern Tibetan Plateau. *Chinese Science Bulletin* 2004 49(11): 1157-1164]
- 11 汪永进, 吴江滢, 吴金全, 等. 末次冰期南京石笋高分辨率气候记录与GRIP冰芯对比. *中国科学 (D辑)*, 2000 30(5): 533-539 [Wang Yongjin, Wu Jiangying, Wu Jinquan *et al*. Correlation between high resolution climate records from a Nanjing stalagmite and GRIP ice core during the last glaciation. *Science in China (Series D)*, 2001 44(1): 14-23]
- 12 Genty D, Blamart D, Ouahdi R *et al*. Precise dating of Dansgaard-Oeschger climate oscillations in western Europe from stalagmite data. *Nature* 2003 24: 833-837
- 13 Schulz H, Radu V, Erlenkeuser H. Correlation between Arabian sea and Greenland climate oscillations of the past 110 000 years. *Nature* 1998 393: 54-57
- 14 David W L, Dorothy K B, Lamy C B *et al*. Synchronicity of tropical and high latitude Atlantic temperatures over the last glacial termination. *Science* 2003 301(5): 1361-1364
- 15 管清玉, 潘保田, 高红山, 等. 三门峡王官与武威沙沟黄土记录中的末次间冰期向末次冰期转换期的气候回返事件. *兰州大学学报 (自)*, 2005 41(4): 1-5 [Guan Qingyu, Pan Baotian, Gao Hongshan *et al*. A warm return event during the transition of last interglacial-glacial cycle. *Journal of Lanzhou University* 2005 41(4): 1-5]
- 16 管清玉, 潘保田, 高红山, 等. 高分辨率黄土剖面记录的末次间冰期东亚季风的不稳定性特征. *中国科学 (D辑)*, 2007 37(1): 86-93 [Guan Qingyu, Pan Baotian, Gao Hongshan *et al*. Instability characteristics of the East Asian Monsoon recorded by high res-

- lution bess sections from the last interglacial (MIS5). *Science in China (Series D)*, 2007, 37(1): 86-93]
- 17 任美镔主编. 中国自然地理纲要(修订第三版). 上海: 商务印书馆, 2004. 30 [Ren M E. The Compendium of Chinese Physical Geography. (3rd ed). Shanghai: Business Affairs Press, 2004. 30]
 - 18 丁仲礼, 孙继敏, 刘东生. 联系沙漠—黄土演变过程中耦合关系的沉积学指标. *中国科学(D辑)*, 1999, 29(1): 82-87 [Ding Zhongli, Sun Jimin, Liu Dongsheng. A sedimentological proxy indicator linking changes in loess and deserts in the Quaternary. *Science in China (Series D)*, 1999, 42(2): 146-152]
 - 19 刘东生, 等. 黄土与环境. 北京: 科学出版社, 1985. 1-207 [Liu Dongsheng et al. Loess and Environment (in Chinese). Beijing: Science Press, 1985. 1-207]
 - 20 An Z S, Kukla G, Porter S C et al. Late Quaternary dust flow on the Chinese loess plateau. *Catena*, 1991, 18: 125-132
 - 21 Chen F H, Feng Z D, Zhang J W. Loess particle size data indicative of stable winter monsoon during the last interglacial in the western part of the Chinese Loess Plateau. *Catena*, 2000, 39: 233-244
 - 22 Fang X M, Shi Z T, Yang S L et al. Loess in the Tian Shan and its implications for the development of the Guban tungan Desert and drying of northern Xinjiang. *Chinese Science Bulletin*, 2002, 47(16): 1381-1387
 - 23 刁桂仪, 文启忠. 黄土风化成土过程中主要元素迁移序列. *地质地球化学*, 1999, 27(1): 21-26 [Diao Guiyi, Wen Qizhong. The migration series of major elements during loess pedogenesis. *Geology Geochemistry*, 1999, 27(1): 21-26]
 - 24 文启忠, 刁桂仪, 贾蓉芬, 等. 黄土剖面古气候变化的地球化学记录. *第四纪研究*, 1995, 3: 223-231 [Wen Qizhong, Diao Guiyi, Jia Rongfen et al. Geochemical records of paleoclimate change in loess sections. *Quaternary Sciences*, 1995, 3: 223-231]
 - 25 王云, 魏复盛, 等. 土壤环境元素化学. 北京: 中国环境科学出版社, 1995 [Wang Yun, Wei Fusheng et al. Element Chemistry of Soil Environment. Beijing: Chinese Environment Science Press, 1995]
 - 26 陈骏, 仇刚, 鹿化煜, 等. 最近 130 ka 黄土高原夏季风变迁的 Rb 和 Sr 地球化学证据. *科学通报*, 1996, 41(21): 1963-1965 [Chen Jun, Chou Gang, Lu Huayu et al. Spatial and temporal changes of summer monsoon on the Loess Plateau of Central China during the last 130 ka inferred from Rb/Sr ratios. *Chinese Science Bulletin*, 1996, 41(21): 1963-1965]
 - 27 施雅风, 刘晓东, 李炳元, 等. 距今 40~30 ka 青藏高原特强夏季风事件及其与岁差周期关系. *科学通报*, 1999, 44(14): 1475-1480 [Shi Yafeng, Liu Xiaodong, Li Binyuan et al. A very strong summer monsoon event during 30~40 ka BP in the Qinghai-Xizang (Tibet) plateau and its relation to precessional cycle. *Chinese Science Bulletin*, 1999, 44(20): 1851-1857]
 - 28 杨小平, 刘东生. 距今 30 ka 前后我国西北沙漠地区古环境. *第四纪研究*, 2003, 23(1): 25-30 [Yang Xiaoping, Liu Dongsheng. Palaeoenvironments in desert regions of northwest China around 30 ka B. P. *Quaternary Sciences*, 2003, 23(1): 25-30]
 - 29 董光荣, 高全洲, 邹学勇, 等. 晚更新世以来巴丹吉林沙漠南缘气候变化. *科学通报*, 1995, 40: 1214-1218 [Dong Guangrong, Gao Quanzhou, Zou Xueyong et al. Climatic changes on southern fringe of the Badain Jaran Desert since the Late Pleistocene. *Chinese Science Bulletin*, 1996, 41(10): 837-842]
 - 30 董光荣, 王贵勇, 李孝泽, 等. 末次间冰期以来我国东部沙区的古季风变迁. *中国科学(D)*, 1996, 26(5): 437-444 [Dong Guangrong, Wang Guiyong, Li Xiaozai et al. Paleomonsoon vicissitudes in eastern desert region of China since last interglacial period. *Science in China (Series D)*, 1998, 41(2): 215-224]
 - 31 李保生, 靳鹤龄, 吕海燕, 等. 150 ka 以来毛乌素沙漠的堆积与变迁过程. *中国科学(D辑)*, 1998, 28(1): 85-90 [Li Baosheng, Jin Heliang, Lü Haiyan et al. Processes of the deposition and vicissitude of Mu Us Desert, China since 150 ka B. P. *Science in China (Series D)*, 1998, 41(3): 248-254]
 - 32 王乃昂, 王涛, 高顺蔚, 等. 河西走廊末次冰期芒硝和砂楔与古气候重建. *地学前缘*, 2000, 7(增刊): 59-66 [Wang Nai'ang, Wang Tao, Gao Shunwei et al. The sand wedge and mirabilite of the last ice age and paleoclimatic reconstruction in Hexi corridor, Gansu, west China. *Earth Science Frontiers*, 2000, 7(Suppl): 59-66]
 - 33 董光荣, 靳鹤龄, 陈惠忠. 末次间冰期以来沙漠—黄土边界带移动与气候变化. *第四纪研究*, 1997, (2): 158-165 [Dong Guangrong, Jin Heliang, Chen Huizhong. Desert loess boundary belt shift and climatic change since the last interglacial period. *Quaternary Sciences*, 1997, (2): 158-165]
 - 34 叶玮, 董光荣, 袁玉江, 等. 新疆伊犁地区末次冰期气候的不稳定性. *科学通报*, 2000, 45(6): 641-645 [Ye Wei, Dong Guangrong, Yuan Yujiang et al. The instability of climate in Yili area, Xinjiang since the last glaciation. *Chinese Science Bulletin*, 2000, 45(17): 1604-1608]
 - 35 Chen F H, Bloemendal J, Wang J M et al. High resolution multi-proxy climate records from Chinese loess: evidence for rapid climatic changes over the last 75 kyr. *Paleogeography, Paleoclimatology, Palaeoecology*, 1997, 130: 323-335
 - 36 Linsley B K. Oxygen isotope record of sea level and climate variation in the Sulu Sea over the past 150 000 years. *Nature*, 1996, 380: 234-237
 - 37 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)*, 1990(10): 1086-1094 [Li Jijun, Zhu Junjie, Kang Jiancheng et al. The comparison of Lanzhou loess profile with Vostok ice core in Antarctica over the last glaciation cycle. *Science in China (Series B)*, 1990(10): 1086-1094]
 - 38 Chen M T, Huang C Y. Ice volume forcing of winter monsoon climate in the South China Sea. *Paleoceanography*, 1998, 13(6): 622-633
 - 39 CLMAP member. Seasonal reconstructions of the Earth's surface at the last glacial maximum. *Geol. Soc. Am., Map and Chart Ser.*, 1981, MC-36, 1-18
 - 40 Rostek F, Ruhland G, Bassnot F G et al. Reconstructing sea surface temperature and salinity using $\delta^{18}\text{O}$ and alkenone records. *Nature*, 1993, 364: 319-321
 - 41 COHMAP members. Climatic changes of the last 18 000 years ob-

- servations and model simulations *Science* 1988 241: 1043-1052
- 42 Guilderson T B, Fairbanks R G, Rubenstone J L. Tropical temperature variations since 20 000 years ago: modulating interhemispheric climate change. *Science* 1994 263: 663-665
- 43 Stute M, Forster M, Frishkorn H, *et al*. Cooling the tropical Brazil (5°C) during the last glacial maximum. *Science* 1995 269: 379-382
- 44 Thompson L G, Mosley-Thompson E, Davis M E, *et al*. Late glacial stage and Holocene tropical ice core records from Huascaran, Peru. *Science* 1995 269: 46-50
- 45 Schrag D B, Hampt G, Murray DW. Pore fluid constraints on the temperature and oxygen isotopic composition of the glacial ocean. *Science* 1996 272: 1930-1932
- 46 Thompson L G, Yao T D, Davis M E, *et al*. Tropical climate instability: The last glacial cycle from a Qinghai-Tibetan ice core. *Science* 1997 276: 1821-1825
- 47 Stocker T F. The seesaw effect. *Science* 1998 282: 61-62

East Asian Monsoon Pattern and Cause of Rapid Climate Fluctuations During the Last Glacial

GUAN Qingyu¹ PAN Baotian¹ WU Guangjian² GAO Hongshan¹ LI Qiong¹ SU Hua¹

(1. National Laboratory of Western China's Environmental Systems, Lanzhou University, Lanzhou 730000

2. Laboratory of Environment and Process on Tibetan Plateau, Institute of Tibetan Plateau Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085)

Abstract Comparing the records of two loess profiles, which are located in mid-east and west margin of the East Asian Monsoon region, it is found that these records not only captured 20 Dansgaard-Oeschger events and 6 Heinrich events, but also were basically synchronous with those of GRIP ice core in the rapid climate fluctuations. And it also suggested that the climate in the East Asian Monsoon region had rapid fluctuations in millennium to century scales in the whole last glacial. But there were still some differences between Shagou Profile in west and Wangguan Profile in east, that is the former were more sensitive to climate change than the latter. With those previous studies of Chinese loess records in the last glacial, it is revealed that the magnitude of Dansgaard-Oeschger cycle decreased gradually from west to east and we suggested it was the effect of westerly and the summer monsoon combination.

Key words last glacial, East Asian monsoon, the rapid climate fluctuations, Dansgaard-Oeschger events, Heinrich events