

萨拉乌苏河流域 MGS5 层段 CaCO_3 记录的 末次间冰期东亚季风与沙漠环境演化*

杜恕环¹ 李保生^{1,2**} David D. Zhang³ 牛东风¹ 温小浩¹

陈德牛⁴ 欧先交¹ 杨 艺¹ 司月君¹ 赵欣楠¹

1. 华南师范大学地理科学学院, 广州 510631; 2. 中国科学院地球环境研究所黄土与第四纪地质国家重点实验室, 西安 710061;

3. 香港大学地理及地质系, 香港; 4. 中国科学院动物研究所, 北京 100080

摘要 毛乌素沙漠萨拉乌苏河流域米浪沟湾剖面时代上属末次间冰期的 MGS5 层段可以进一步划分为 5a—5e 亚段。其中 5a, 5c 和 5e 亚段以河湖相和古土壤为主要特征, 其 CaCO_3 含量主体呈现峰态; 5b 和 5d 亚段以风成沙丘砂沉积为主, CaCO_3 含量主体呈现谷态。研究表明, 末次间冰期毛乌素沙漠冬季风盛行时期, 沙丘砂强烈堆积, CaCO_3 大量迁移; 夏季风盛行时期河湖相和古土壤发育, CaCO_3 大量聚集。研究还发现, MGS5 各个亚段 CaCO_3 记录的冬夏季风环境与格陵兰冰芯氧同位素 5a—5e 亚段在时间—气候性质上的变化节奏相当一致。这可能说明, 末次间冰期毛乌素沙漠的演化主要受北半球冰量增减导致的东亚冬、夏季风强弱所控制。

关键词 萨拉乌苏河流域 MGS5 层段 末次间冰期 CaCO_3 环境演化

自 20 世纪 90 年代以来, 国内外学者从极地冰芯^[1-3]、海洋^[4-6]及大陆沉积中^[7-11]研究了大量相当于 MIS5 或末次间冰期气候波动的信息。Yuan 等^[15]的石笋记录显示 MIS5d 东亚夏季风最弱, 5c 夏季风呈现“增强—衰减—增强”的波动, 5e 夏季风比较稳定; 管清玉^[16]等通过对六盘山以东和以西两个剖面的研究发现, 该地 MIS5 存在 5 次强夏季风事件和 4 次强冬季风事件。NGRIP 冰芯记录了末次间冰期高频度 D/O 事件, 但其反映晚 Eemian 间冰期气候比较稳定; 方小敏等^[8,12]对兰州—临夏地区末次间冰期黄土的研究认为, MIS5e 表现为夏季风的三次突然爆发和两次明显的冬季风增强, 类似于 GRIP 相同时期所具有的 5 个短时间尺度、快速变化的特点。

然而, 迄今为止, 末次间冰期的中国沙漠环境

如何响应东亚冬夏季风的变化研究尚少。位于鄂尔多斯高原东南部洼地的毛乌素沙漠南部边缘的萨拉乌苏河流域, 蕴藏着丰富的晚第四纪气候与沙漠环境变化的地质信息, 自 70 年代末以来, 对其的研究不断深入^[17-29]。近年我们的研究发现, 该地米浪沟湾剖面晚第四纪萨拉乌苏组—即大致与末次间冰期或 MIS5 相当的 MGS5 层段风成的沙丘砂与河湖相和古土壤相互叠覆构成的沉积序列具有明显的 CaCO_3 沉积旋回, 且这些旋回与大陆冰芯的时间—气候过程有较好的对应关系。为此作者在本文中以该剖面 MGS5 层段作为研究对象, 结合对其的年代测定, 主要以 CaCO_3 作为古气候代用指标, 并结合一些相关的古生物化石指示的古生态资料初步探讨 MIS5 即末次间冰期毛乌素沙漠环境演化与东亚季风变化的关系。

2009-04-07 收稿, 2009-07-03 收修改稿

* 国家自然科学基金(批准号: 40772118, 49971009)、国家重点基础研究发展计划(批准号: 2004CB720206)和香港政府研究基金(批准号: HKU 7243/04H)资助项目

** 通信作者, E-mail: libsh@scnu.edu.cn

1 米浪沟湾剖面 MGS5 层段划分及其年代地层学

1.1 MGS5 层段概述

米浪沟湾剖面位于萨拉乌苏河中游流域米浪沟湾村 NE 约 500 m 的河流左岸(图 1), 37°45'47.2" N, 108°33'05.4"E, 剖面顶部海拔 1290 m, 堆积厚度约 83 m. MGS5 层段指堆积深度 36.95—51.93 m 的一套沉积序列(图 2), 共计 24 个层序, 即 61 LS—84 S, 含 10 层风成的古流动和古半固定—固定沙丘砂, 9 层河湖相, 5 层古土壤, 它们相互迭

覆. 古流动沙丘砂为棕黄色(10YR 5/8), 以细砂为主, 次为极细砂, 松散、分选较均匀, 具明显的风成砂丘沉积层理, 有的层位可见显著的沙丘休止角; 古半固定—固定沙丘砂, 浅灰黄色(2.5Y 6/2), 粉砂质细砂, 致密, 垂直节理发育, 含钙质结核; 河湖相, 浅灰—黄灰色(2.5Y 5/1), 粉砂质细砂—粉砂质极细砂, 含较多植物根系、钙板和铁质锈斑; 古土壤, 棕褐色(2.5YR 4/2)土, 粘土质极细砂—粉砂.

为了查明 MGS5 诸层序的岩性, 我们对该层段进行了 310 个样品的粒度分析, 实验使用 Malvern

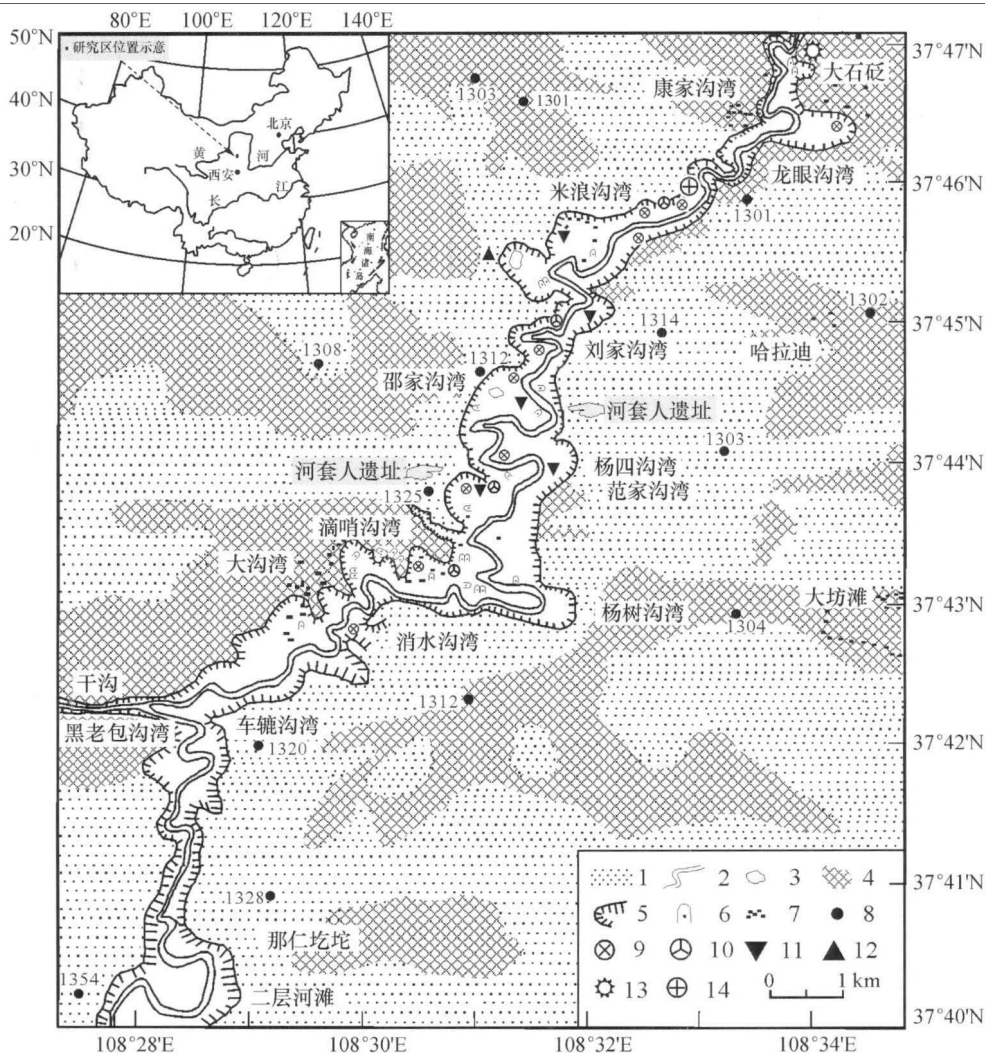


图 1 米浪沟湾地层剖面位置及其所在萨拉乌苏河流域概况

- 1—毛乌素沙漠沙丘; 2—萨拉乌苏河; 3—湖泊或池塘; 4—由黑垆土或湖沼相构成的鄂尔多斯高原面;
- 5—陡崖; 6—窑洞; 7—居民点; 8—海拔高程(米); 9—脊椎动物化石; 10—人类化石;
- 11—旧石器地点; 12—新石器地点; 13—古城遗址; 14—米浪沟湾地层剖面位置

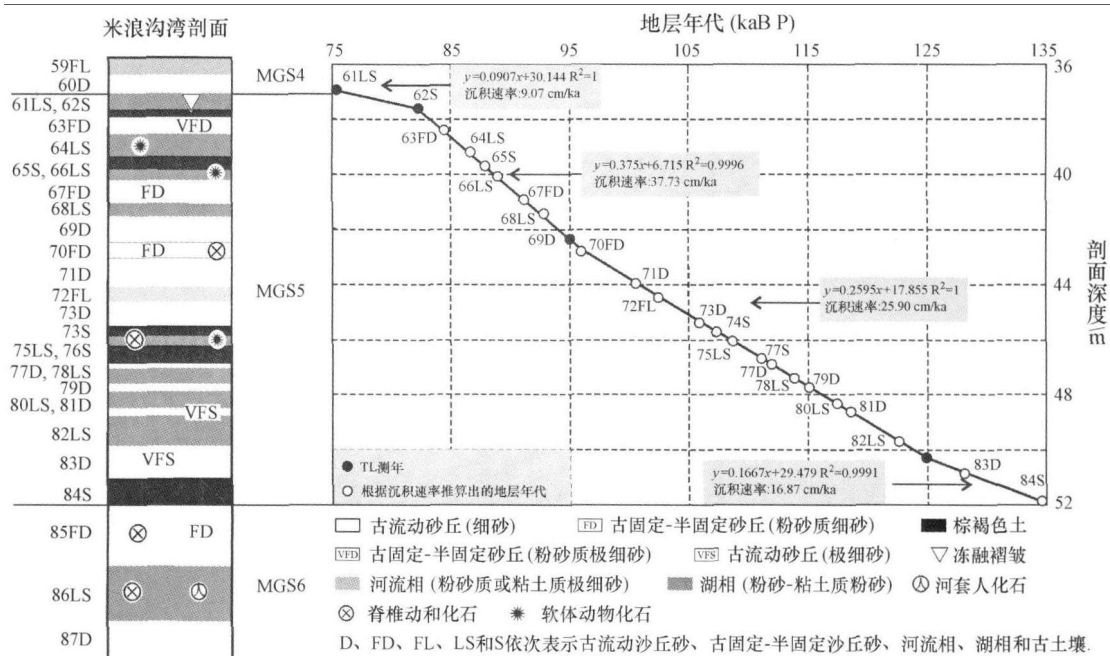


图 2 米浪沟湾剖面 MGS5 沉积序列与时间标尺

Mastersizer 2000 M 激光粒度仪(测量范围 0.02—2000 μm), 实验流程参考黄土粒度分析方法^[30], 数据经计算机处理. 粒度分析结果显示, 沙丘砂(139 个样品)几乎全部是以细砂级为主的砂质沉积物组成, 粉砂和粘土含量甚微乃至为零. 相比较而言, 河湖相(113 个样品)和古土壤(58 个样品)虽然砂质含量亦高, 但细砂含量明显降低(0.54%—76.5%, 平均 38.32%), 极细砂和粉砂含量相应增高(分别为 3.47%—47.99%, 0—68.65%, 平均分别为 23.33%, 26.03%), 且具少量或一定比例的粘土(0—18.27%, 平均 6.49%). 按 Folk 和 Ward^[31] 制定的 M_z (平均粒径)和 σ (标准离差)公式

$$M_z = (\phi_{16} + \phi_{50} + \phi_{84})/3$$

$$\sigma = (\phi_{84} - \phi_{16})/4 + (\phi_{95} - \phi_5)/6.6$$

表示沉积相的粒度特征. 沙丘砂 M_z 和 σ 分别为 2.07—3.66 ϕ 和 0.46—1.98, 平均值依次为 2.56 ϕ 和 0.73; 河湖相 M_z 和 σ 分别为 2.07—4.55 ϕ 和 0.52—2.69, 平均值依次为 3.55 ϕ 和 1.37; 古土壤 M_z 和 σ 分别为 2.86—5.76 ϕ 和 1.10—2.63, 平均值依次为 4.17 ϕ 和 1.93. 这表明, 沙丘砂颗粒相对

较粗、分选相对较好, 反之, 河湖相和古土壤颗粒相对变细, 分选相对较差. 显然, 沙丘砂至其上覆的河湖相或/和古土壤, 颗粒由粗变细, 构成一个粗细变化也即沉积相变化的旋回.

为了便于阐述, 古流动沙丘砂、古半固定—固定沙丘砂、河流相、湖沼相和古土壤分别以 D, FD, FL, LS 和 S 表示在层序号之后(见图 2).

上述地层中一些含化石层位见于: 70FD 含安氏鸵鸟(*Stuthio anderssoni*)蛋碎片, 75LS 含披毛犀(*Coelodonta antiquitatis*)化石; 64LS、66LS 和 75LS 含一定的甚至是大量的(如 75LS)软体动物化石.

1.2 MGS5 的年代地层学

对 MGS5 的 62S, 71FD, 83D 和该层段之上覆的 60D 和下伏 85FD 进行了 5 个层位的 TL(热释光)年代测定. 测试材料均采用从样品中提取的小于 10 μm 石英细粒. 实验由中国科学院地球环境研究所和广州地球化学研究所热释光实验室张景昭 and 卢良才完成. 所用仪器为英国牛津 Littlemore 科学仪器公司生产的 711 型热释光断代仪. 样品测试各个参数列于表 1.

表1 MGS5及相关的一些层位的热释光年龄测定结果

层位—实验室编号	深度/m	U/ 10^{-6}	Th/ 10^{-6}	K/%	年剂量/mGy	总剂量/Gy	TL/ka BP
60D-TGD 784	36.95	0.11±0.01	10.06±0.20	2.10±0.02	2.48±0.08	186.20±13.96	75.08±7.40
62S-TGD 785	37.60	1.07±0.05	12.09±0.24	2.03±0.016	2.31±0.07	190.00±14.25	82.25±8.50
71FD-TGD 786	42.75	0.75±0.04	6.50±0.13	1.99±0.016	2.02±0.06	193.80±14.53	95.90±9.46
83D-TGD 787	50.29	1.50±0.04	6.10±0.15	1.94±0.018	2.66±0.10	332.27±35.56	124.940±15.84
85FD-TGD 788	54.18	0.62±0.03	6.94±0.14	2.42±0.019	4.36±0.13	646.80±40.75	148.00±12.50

TL 测试结果: MGS5 上覆的属 MGS4 层段的 60D 之底部的年代为 75.08 ± 7.40 ka BP, 这一年代相当于 MGS4/MGS5 层段的界面(也即 60D/61LS 之界面)的时间界限. MGS5 沉积序列的下限即 84S/85FD 之间的界面, 相当于 MGS5/MGS6 层段之界面, 目前尚无直接的年龄数据, 但从 84S 上覆(83D)和下伏(85FD)地层的 TL 测试结果可知, 其年代应在 148—125 ka BP 范围, 在这两个年龄之间若按其沉积速率—16.87 cm/ka 计算, 则其界面的年代为 134.90 ka BP. 由此可以看出, MGS5 的年代基本上相当于大陆冰芯或深海 132—73 ka BP 的 MIS5 阶段^[32], 即通常所称的末次间冰期.

为了便于进行气候变化对比, 根据 GRIP 冰芯和深海 MIS5 的划分方案, 将 MGS5 首先划分为 5 个亚阶段, 按照已有的测年并运用线性内插方法计算(图 2), 依各年龄段不同的沉积速率得出各个亚段的时代. 结果为: MGS5a(61LS—66LS)75.00—86.50 ka BP; MGS5b(67FD—71D)86.50—100.53 ka BP; MGS 5c(72FL—76S)100.53—111.03 ka BP; MGS5d(77D—79D)111.03—114.44 ka BP 和 MGS5e(80LS—84S)114.44—134.90 ka BP. 各个亚段依次与 MIS5a—MIS5e 的时间基本一致.

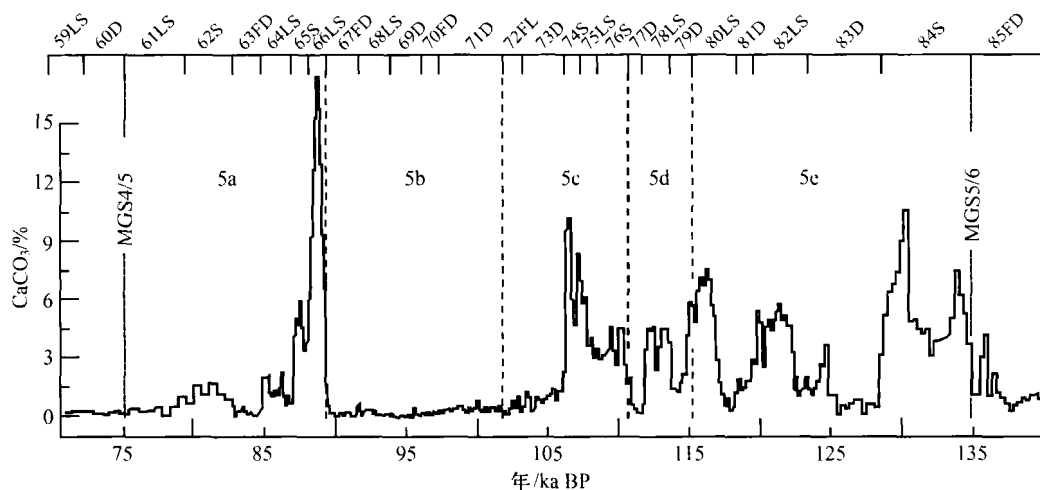
2 MGS5 之 CaCO_3 分布

对米浪沟湾剖面 MGS5 自上而下共采集 310 个样品进行了 CaCO_3 分析, 采样间距按 5 cm(个别 3 cm 或 6 cm). 样品分析在华南师范大学地理科学学院沉积物实验室完成. 实验方法采用气量法, 使用希腊产的 Boscomb Calcimeter 仪器平均测试 3—4 次^[33]. 其步骤, 称取一定量样品与过量的 HCl 作用后, 记录其产生的 CO_2 气体的体积和温度, 依据理想气体方程 $PV=nRT$ 计算出 CO_2 的物质量, 再推算出碳酸盐含量.

CaCO_3 分析结果表示于图 3. 现将 CaCO_3 含量在 MGS5 不同层位上的变化特征阐述如下:

(1) CaCO_3 含量在不同层位变化较大, 分布范围在 0—17.39% 之间, 平均值为 2.23%. CaCO_3 含量在 MGS5 表现出不规则的锯齿状波动曲线(图 3).

(2) 不同亚阶段 CaCO_3 含量具有不同的变化趋势. 从总体上来看, 在 5a, 5c, 5e 主体呈现峰态, 其平均值分别为 2.82%(63 个样品), 2.58%(53 个样品)和 3.51%(86 个样品). 这三个亚段的高峰层位分别出现在 66LS, 74S 和 84S, 依次为 17.39%, 10.20% 和 10.57%; 在 5b, 5d 亚段主体呈现谷态,

图3 MGS5 层段 CaCO_3 含量及其变化

其平均值分别为 0.22% (85 个样品) 和 2.53% (23 个样品)。这两个亚段的低谷层位分别出现在 69D 和 77D, 分别为 0 和 0.18%。

(3) 不同沉积相 CaCO_3 含量差别明显。沙丘砂 (139 个样品) CaCO_3 含量低, 变化于 0—4.19%, 平均值为 0.62%; 河湖相 (113 个样品) 0.05%—17.39%, 平均值为 3.11%; 古土壤 (58 个样品) 0.05%—10.57%, 平均值为 4.40%。为了进一步说这几类沉积相的粒度与 CaCO_3 旋回之间的关系, 绘制了 Mz - CaCO_3 散点图 (图 4)。由图所示, 除个别样点的河湖相外, 随着沙丘砂、河湖相和古土壤的 $Mz(\Phi)$ 值增大—颗粒变细 CaCO_3 含量相应增高。该图各沉积相的大部分样品均表现出相对集中的分布区域。

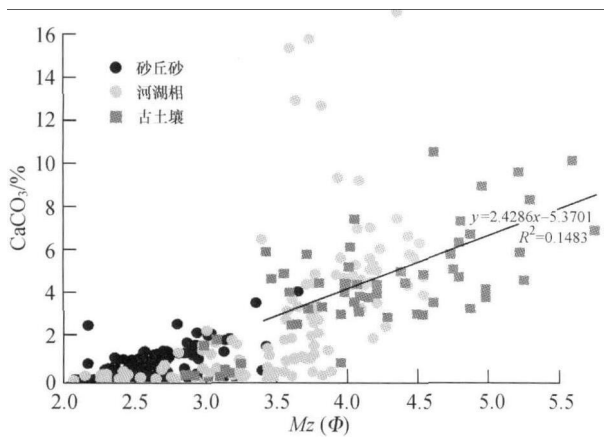


图 4 MGS5 不同沉积相 $Mz(\Phi)$ - CaCO_3 (%) 散点图

3 结论

毛乌素沙漠现代沙丘砂 57 个样品的 CaCO_3 分析结果显示, 其含量范围为 0—2.8%, 平均含量 0.58%。如果将其与 MGS5 的沙丘砂做一对比, 无论 MGS5 沙丘砂还是现代流动沙丘砂, 其 CaCO_3 含量都存在 0 值, 且两者在平均值含量上几乎是一致的。所不同的是, 前者 CaCO_3 含量的极高值明显高于后者, 这可能与这些老的砂丘受到嗣后沉积的河湖相或者是古土壤对 Ca 的淋溶与聚集有关。但 MGS5 的河湖相和古土壤 CaCO_3 含量却明显高于沙丘砂。从 MGS5 的 Mz - CaCO_3 散点图 (见图 4) 上不难看出, 河湖相和古土壤在 CaCO_3 含量上与沙丘砂虽具有相同的分布区间但相异之处更为突出, 表现为: 在沙丘砂样点集中的 $Mz/2.00$ — 3.32Φ - $\text{CaCO}_3 < 2\%$ 区间, 也有少部分河湖相与个别古土壤的样点散布其中; 到

$Mz/>3.32\Phi$ - $\text{CaCO}_3 > 2\%$ 时, 沙丘砂样点几乎殆尽; $Mz/3.80\Phi$ - $\text{CaCO}_3 \geq 4\%$, 则全部为河湖相和古土壤样点。总的看来, $Mz/3.32\Phi$ - $\text{CaCO}_3 / 2\%$ 似乎是河湖相、古土壤与沙丘砂样点的显著分野; 自此河湖相与古土壤样点随 $Mz(\Phi)$ 值变大 CaCO_3 含量与之大体呈现出线性关系而增高 (图 4)。

综上所述, 现代沙丘和古沙 (砂) 丘砂大量样品 CaCO_3 含量的平均值十分一致, 表明 MGS5 沙丘砂沉积时可能与毛乌素沙漠现代沙丘的形成环境类似, 如果这一看法正确, 那么从 $Mz/2$ — 3.32Φ - $\text{CaCO}_3 < 2\%$ 到 $Mz/> 3.32\Phi$ - $\text{CaCO}_3 > 2\%$, 河湖相、古土壤样点相对增多并最终替代古沙丘砂的现象, 则可以解释为这是驱动沙丘砂的冬季风动力的逐渐衰减所致。因此, MGS5 散点在 $Mz/> 3.32\Phi$ - $\text{CaCO}_3 / > 2\%$ 范围显示的冬季风对 CaCO_3 增长的贡献是非常有限的。这就是说, 只有在抑制冬季风携带 $Mz/<3.32\Phi$ 能力的气候条件下, 才有利于滋生较高含量的 CaCO_3 。对于现代风沙流的观测表明, 中国沙漠由小于 3.32Φ 颗粒即由细砂及更粗粒级为主体构成的下垫面其起沙风速为 $\geq 5 \text{ m/s}$, 由此揭示 MGS5 的河湖相和古土壤沉积与发育期间风沙流已经不是沉积物贡献的主要的地貌营力。大量研究表明, 第四纪以来我国北方东部地区东亚冬夏季风是两个对立统一的主体气候, 表现为互为消长的关系^[17 29,34-37]。据此进一步推论, MGS5 河湖相和古土壤形成时应该主要受到东亚夏季风环境的影响。随着夏季风向我国西北的推进, 不仅大大削弱了冬季风的风力作用, 同时还给萨拉乌苏河流域及至毛乌素沙漠带来更多的雨泽, 气候温暖潮湿, 河湖沼泽发育、流沙趋于固定并形成棕褐色古土壤。

从上述认识出发, 似乎可以将 CaCO_3 含量分布在 MGS5b, MGS5d 所呈现的谷态和在 MGS5a, MGS5c, MGS5e 所呈现的峰态视为这是分别由东亚冬夏季风增强的体现。显然, 这也与 MIS5a-MIS5e 各个亚阶段的气候性质耦合。

由于 MGS5 中的沙丘砂是冬季风产物, 据此可以进一步将其中的 CaCO_3 含量基本上视为一种机械的侵蚀—搬运—堆积过程的结果。而相同和不同层位沙丘砂在 CaCO_3 含量上的不同, 则反映其物源区与搬运途中“母岩”的差别, 其堆积之后所受到的化学风化作用的影响应该是非常有限的。陈雅婷

等¹⁾对萨拉乌苏河流域上更新统沙丘砂进行了18个样品的矿物分析,结果表明,碎屑矿物中石英含量最高,可以高达82.10%,平均值也在66.00%以上;含Ca的碳酸盐矿物如方解石、白云石都极其少见,但含Ca的硅酸盐矿物含量并不低:斜长石含量占绝对优势(>10%),余仅为微量分布的重矿物(<1%)中较为常见的普通角闪石、辉石、绿帘石。这一分析结果可能说明两种情况:一是源自母岩区域的含Ca的碳酸盐矿物硬度(3—4)极低,在风沙流作用下其机械破碎度达到 $M_z / > 3.32\Phi$ 时,极易表现为跳跃—悬浮的搬运状态(并继续在气流运动中颗粒间相互碰撞),随风逐流到下风向的黄土堆积范围。这也许是因为黄土中CaCO₃主要分布于4.32—6.64 Φ 粒级,且含量通常大于10%,更高达>20%的原因,如洛川黄土^[38]、渭南黄土^[39]等皆无例外。有趣的是,在上述矿物中,其硬度的大小似乎与之含量的多寡存在某种联系,表现为石英(含量高,硬度7)—斜长石(含量次高,硬度6.0—6.5)—绿帘石、普通角闪石和辉石(微量,硬度依次为6.0—7.0, 5.0—6.0, 5.0—6.0),即随着硬度的降低,含量相应减少。然而,更值得注意的是,这些矿物的硬度都大于5.0,其之所以能够富集是否恰恰说明了其时气候极为干寒多风,强烈的物理风化作用导致低硬度的含Ca的碳酸盐矿物难以保存的原因?二是这些含Ca的硅酸盐矿物虽然硬度较大,但在化学风化作用下极易分解,当它们的含量较高(>10%)时,除了其抗物理风化能力强之外,还说明其堆积期间化学风化作用弱,这也从另一个角度说明了当时的气候干寒多风,适宜沙丘砂发育。

有意义的是,MGS5中一些生物化石指示的古生态与CaCO₃含量的峰谷具有很好的对应:含安氏鸵鸟(*Stuthio anderssoni*)蛋碎片化石的70FD,指示当时的干冷荒漠,与CaCO₃含量谷相对应;含软体动物(腹足纲和瓣鳃纲)化石的64LS, 66LS, 75LS,其属种(表2)指示当时气候相当温暖湿润,与CaCO₃含量处于上升趋势或者与之峰态相对应,特别是大量出现在75LS中的*Gyraulus convexiusculus*化石,或许反映出当时曾一度具有更加温暖湿润的暖温带—亚热带气候,其现生种主要生活于我国江苏、浙江、福建、

台湾、广东、广西及云南的极喜温暖水域,而其分布的最西北界线尚未越过属暖温带的陕西的南泥湾(36° 19'N, 109° 39'E)。另外,其中的陆生蜗牛*Succinea erythrophana*和水生的*Galba perversa*也是气候温暖湿润的一个明显的信号,其现生种虽然在我国南北皆有分布,但在长江流域及至两广地区则更为广泛。

表2 米浪沟湾剖面 MGS5 软体动物化石

化石种类	层位		
	64 LS	66 LS	75 LS
凸旋螺 <i>Gyraulus convexiusculus</i> (Hutton)	+	+	+
似线旋螺 <i>Gyraulus filaris</i> (Gredler)	+	—	—
赤琥珀螺 <i>Succinea erythrophana</i> (Ancy)	—	—	+
青海萝卜螺 <i>Radix cucunorica</i> (Mollendorff)	—	—	+
半球多脉扁螺 <i>Polypylis hemisphaerula</i> (Benson)	—	—	+
小土蜗 <i>Galba perversa</i> (Martens)	+	—	+
旋展琥珀螺 <i>Succinea evoluta</i> (Martens)	—	—	+
伸展瓦娄蜗牛 <i>Vallonia patens</i> (Reinhardt)	+	—	—
瓦娄蜗牛 <i>Vallonia sp.</i>	+	—	—
土螺 <i>Succinea sp.</i>	—	+	—
豌豆蛭 <i>Pisidium sp.</i>	—	—	+

根据上述讨论,本文倾向于把CaCO₃含量在MGS5b, MGS5d所呈现的谷态作为东亚冬季风控制下的产物,其时风沙活动强烈,为毛乌素沙漠的堆积时期;而把CaCO₃含量在MGS5a, MGS5c和MGS5e所呈现的峰态作为东亚夏季风盛行的体现,这个期间发育了河湖相和古土壤,为间沙漠堆积时期。其变化周期和气候性质与格陵兰冰芯氧同位素5a—5e亚段在时间—气候上的记录比较一致。这表明末次间冰期毛乌素沙漠从其发生、发展与演化的本质上,主要是受北半球冰量增减导致的东亚冬、夏季风强弱变化所控制。

致谢 中国科学院地球环境研究所张景昭,广州地球化学研究所热释光实验室卢良才进行了TL年代的测试,刘宇飞、曾兰华、欧阳椿陶参加了野外的样品采集工作,在此一并致谢。

参 考 文 献

- 1 Dansgaard W, Johnsen SJ, Clausen HB, et al. Evidence for general instability of past climate from a 250-kyr ice core record. *Nature*, 1993, 364: 218—220
- 2 Grootes PM, Stulver M, White WC, et al. Comparison of oxygen isotope records from the GISP2 and GRIP Greenland ice cores. *Nature*, 1993, 366: 552—554
- 3 姚檀栋, Thompson LG, 施雅风, 等. 古里雅冰芯中末次间冰

1) 陈雅婷等, 甘肃省地质局, 未发表资料, 1979

- 期以来气候变化记录研究. 中国科学, D 辑, 1997, 27(5): 447—452
- 4 王 建, 杨怀仁. 转换函数与南黄海 13 万年来海水深度的变化. 地理科学, 1995, 15(4): 32—326
- 5 涂 霞, 郑 范, 王吉良, 等. 南海北部末次间冰期早期的突然降温事件. 中国科学, D 辑, 2001, 31(10): 823—827
- 6 孙湘君, 罗运利. 南海北部 280 ka 以来深海花粉记录. 中国科学, D 辑, 2001, 31(10): 846—853
- 7 安芷生, 吴锡浩, 汪品先, 等. 最近 130 ka 中国的古季风-1. 古季风变迁. 中国科学, B 辑, 1991, 21(10): 1076—1081
- 8 方小敏, 戴雪荣, 李吉均, 等. 亚洲季风演化的突发性与不稳定性—以末次间冰期土壤发生为例. 中国科学, D 辑, 1996, 26(2): 154—160
- 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
- 10 孙东怀, 安芷生, 吴锡浩, 等. 最近 150 ka 黄土高原夏季风气候格局的演化. 中国科学, D 辑, 1996, 26(5): 417—422
- 11 An ZS, Porter SC. Millennial-scale climatic oscillations during the last interglaciation in central China. *Geology*, 1997, 25: 603—606
- 12 方小敏, 李吉均, Banerjee S, 等. 末次间冰期 5e 亚阶段夏季风快速变化的环境岩石磁学研究. 科学通报, 1998, 43(21): 2330—2332
- 13 Chen FH, Feng ZD, Zhang JW. 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
- 14 Chen FH, Qiang MR, Feng ZD, et al. Stable East Asian monsoon climate during the Last Interglacial (Eemian) indicated by paleosol S1 in the western part of the Chinese Loess Plateau. *Glob Planet Change*, 2003, 36: 171—179
- 15 Yuan DX, Cheng H, Edwards RL, et al. Timing, duration, and transitions of the Last Interglacial Asian Monsoon. *Science*, 2004, 304: 575—578
- 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, 7(1): 86—93
- 17 袁宝印. 萨拉乌苏组的沉积环境及地层划分问题. 地质科学, 1978, (3): 220—224
- 18 董光荣, 李保生, 高尚玉. 由萨拉乌苏河地层看晚更新世以来毛乌素沙漠的变迁. 中国沙漠, 1983, 3(2): 9—14
- 19 李保生, 董光荣, 高尚玉, 等. 鄂尔多斯萨拉乌苏河地区马兰黄土与萨拉乌苏组的关系及其地质时代问题. 地质学报, 1987, 61(3): 218—230
- 20 郑洪汉. 中国北方晚更新世河湖相地层与风积黄土. 地球化学, 1989, (4): 343—351
- 21 谢骏义, 高尚玉, 董光荣, 等. 萨拉乌苏动物群. 中国沙漠, 1995, 15(1): 313—322
- 22 董光荣, 苏志珠, 靳鹤龄. 晚更新世萨拉乌苏组时代的新认识. 科学通报, 1998, 43(17): 1869—1872
- 23 Li BS, Zhang DD, Jin HL, et al. Palaeo-Monsoon activities of Mu Us Desert, China since 150ka-A study of the stratigraphic sequences of the Milangouwan section, Salawusu River area. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*. 2000, 162: 1—16
- 24 黄慰文, 董光荣, 侯亚梅. 鄂尔多斯化石智人的地层、年代和生态环境. 人类学学报, 2004, 23(增刊): 258—271
- 25 Li BS, Zhang DD, Wen XH, et al. A multi-cycle climatic fluctuation record of the last interglacial period; Typical stratigraphic section in the Salawusu River valley on the Ordos Plateau, China. *Acta Geologica Sinica*, 2005, 79(3): 398—404
- 26 靳鹤龄, 李明启, 苏志珠, 等. 220 ka BP 来萨拉乌苏河流域地质剖面地球化学特征及其对全球变化的响应. 冰川冻土, 2005, 27(6): 861—868
- 27 Li BS, Wen XH, Qiu SF, et al. Phases of environmental evolution indicated by primary chemical elements and paleontological records in the upper Pleistocene-Holocene Series for the Salawusu River valley, China. *Acta Geologica Sinica*, 2007, 81(4): 555—565
- 28 李保生, 陈德牛, Zhang DD, 等. 萨拉乌苏河流域 MGS3 层段腹足类动物化石种类及气候环境. 中国科学, D 辑, 2008, 37(12): 1625—1633
- 29 Wen XH, Li BS, Zheng YM, et al. Climate variability in the Salawusu River valley of the Ordos Plateau (Inner Mongolia, China) during marine isotope stage 3. *Journal of Quaternary Science*, 2009, 24(1): 61—74
- 30 鹿化煜, 安芷生. 前处理方法对黄土沉积物粒度测量影响的实验研究. 科学通报, 1997, 42(3): 2535—2538
- 31 Folk PL, Ward WD. Brazos Reviver bar: A study in the significance of grain size parameters. *J Sedi Petr*, 1957, 27: 3—26
- 32 Martinson DG, Pisias NG, Hays JD, et al. Age dating and the orbital theory of the ice ages: Development of a high-resolution 0 to 300, 000-year chronostratigraphy. *Quaternary Research*, 1987, 27: 1—29
- 33 Bascomb CL. A calcimeter for routine use on soil samples. *Chem Ind*, 1961: 1826—1827
- 34 鹿化煜, 安芷生, 刘洪滨, 等. 洛川黄土记录的最近 2500ka 东亚冬夏季风变化周期. 地质论评, 1998, 44(5): 553—558
- 35 孙继敏, 丁仲礼, 刘东生, 等. 末次间冰期以来沙漠—黄土边界带的环境演变. 第四纪研究, 1995, 15(2): 117—122
- 36 刘东生, 丁仲礼. 二百五十万年来季风环流与大陆冰量变化的阶段性耦合过程. 第四纪研究, 1992, 12(1): 12—23
- 37 李 森, 强明瑞, 李保生, 等. 末次冰消期东亚季风区西北缘气候快速变化事件. 地质论评, 2004, 50(1): 106—112
- 38 刘东生, 等. 黄土与环境. 北京: 科学出版社, 1985
- 39 文启忠, 刁桂仪, 贾蓉芬, 等. 黄土剖面中古气候变化的地球化学记录. 第四纪研究, 1995, 15(3): 223—231