

文章编号:1000-694X(2010)04-0808-08

萨拉乌苏河流域 MGS2 层段主要氧化物 变化及其指示的气候波动

李后信¹, 李保生^{2,3*}, 温小浩², 欧先交², 李志文², 牛东风², 杜恕环²

(1. 中国科学院广州地球化学研究所, 广东广州 510635; 2. 华南师范大学地理科学学院, 广东广州 510631; 3. 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, 陕西西安 710061)

摘要: 萨拉乌苏河流域与 MIS2 相同时代的 MGS2 地层段记录了 5.5 个由风成砂与河流相或湖沼相构成的沉积旋回, 通过对各沉积旋回的主要氧化物分析表明: 河湖相中 Al_2O_3 、TOFE、 K_2O 、 MgO 、 CaO 、 Na_2O 、 TiO 含量通常明显高于风成砂, 而 SiO_2 含量则呈现相反的变化, 构成了与沉积旋回相对应的 5.5 个主要氧化物变化旋回。结合各主要氧化物的化学迁移特性和剖面所在区域的地貌特征进行分析, 认为该剖面的主要氧化物变化旋回是气候波动的反映, 一个主要氧化物含量变动旋回指示了一个干冷-暖湿旋回, 也即一个冬夏季风先后演替的气候旋回。MGS2 持续的时间仅为 12 ka, 一个冬夏季风环境的变化大致平均仅需要 2 ka, 一个冬季风或者夏季风环境的平均持续时间大约 1 ka。显然, 这是一个千年尺度的环境变化。研究还表明, MGS2 气候波动与晚冰期气候变化以及相关的 Heinrich 事件具有良好的对应关系。可以推断, MGS2 记录的千年尺度环境变化是全球环境变化在本区域的反映。

关键词: 萨拉乌苏河流域; 米浪沟湾剖面; MGS2 层段; 主要氧化物; 气候波动

中图分类号: P532 文献标识码: A

最近 20 a 来, 末次冰期千年尺度的多波动气候变化业已为极地冰芯和深海记录^[1-7]所证实, 这种气候变化的形式在中国黄土中也得到了很好的验证^[8-9], 中国沙漠的环境变化也取得了类似的研究成果^[10-11]。但是, 在末次冰期的 MIS2 中国沙漠环境变化的细节及其与全球变化的对比问题迄今还缺乏专门的分析。位于内蒙古鄂尔多斯高原毛乌素沙地东南缘的萨拉乌苏河流域以其丰富的晚第四纪地质信息特别是其对古气候干湿冷暖变化的敏感性成为我国沙漠环境演变研究的重要区域。中外学者对该地的研究已取得了较多具有科学意义的成果^[12-21], 以近年来对米浪沟湾剖面的研究最多^[22-33]。野外调查表明, 该剖面与 MIS2 时期相对应的 MGS2 层段具有多层风成的古流动沙丘砂与河湖相相互叠覆的沉积序列, 这为回答上述问题提供了很好的材料。为此, 我们对 MGS2 层段及其主要氧化物进行了分析与研究。

1 MGS2 地层段概述

MGS2 地层段所在的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, 地理坐标为 $37^{\circ}45'47.2''N$, $108^{\circ}33'05.4''E$ 。剖面所在的萨拉乌苏河流域在地貌上系毛乌素沙地东南部洼地, 衔跨于黄土高原和鄂尔多斯高原之间, 地势低洼且相对闭塞^[22]。气候分区属中温带干旱-半干旱区与南温带半干旱-半湿润区交错地带之西南段, 具有区域上过渡多变的气候特征。流域内冬季风强且作用时间长, 夏季风弱且持续时间短, 春季多有沙尘暴。

米浪沟湾剖面顶部海拔 1 290 m 左右, 出露厚度约 83 m, 包括全新统大沟湾组和滴哨沟湾组, 上更新统城川组和萨拉乌苏组以及部分中更新统离石组^[27]。本研究涉及的 MGS2 层段属城川组上部, 位于剖面 8.79~13.63 m 深度, 层位为 20D~30D(图 1), 含 11 个层序 3 种成因类型的沉积: 6 层风成的古流动沙丘砂, 以细砂为主, 松散, 分选较均匀, 灰黄色, 风成层理明显, 其中 22D、24D 含有大量巨鸵鸟 (*Struthio* sp.) 蛋片化石; 3 层河流相, 粉砂质细砂—极细砂, 分选较均匀, 灰黄色, 具明显流水层理,

收稿日期: 2009-10-01; 改回日期: 2009-12-11

基金项目: 国家重点基础研究发展计划“973”项目(2010CB833405); 国家自然科学基金项目(40772118, 49971009); 香港政府研究基金项目(HKU7243/04H)资助

作者简介: 李后信(1974—), 男, 博士研究生, 研究方向为地球化学。Email: relyli08@163.com

* 通讯作者: 李保生 (Email: libsh@senu.edu.cn)

底部具钙板；两层湖沼相，粉砂质细砂—极细砂，青灰—灰黄色，其中 25LS 含腹足类化石赤琥珀螺 (*Succinea erythrophana* (Ancey))、小土蜗 (*Galba pervia* (Martens)) 和 西 伯 利 亚 旋 螺 (*Gyraulus sibiricus* (Dunker))。MGS2 古流动砂丘与河湖相相互叠覆，若以前者与后者按一个沉积旋回来计，则此类旋回可达 5.5 个(其中的 20D 属 0.5 个旋回)。

2 MGS2 地层段的年代

MGS2 及其邻近层位共有 5 个年龄测试结果(图 1, 表 1)。其中, 25LS 中部和 31S 中部的¹⁴C 年龄分别为 (15.611 ± 0.219) ka BP 和 (19.57 ± 0.366)ka BP, 由中国科学院寒区旱区环境与工程研究所¹⁴C 年代实验室采用北京核仪器厂生产的低本底液体闪烁计数器测得。采用 Cablib5.01 软件 (Stuiver 等, 1998, 2005) 对其进行校正, 其年代分别

为 (18.945 ± 0.382) cal ka 和 (23.266 ± 0.597) cal ka。其他 3 个层位——18D(顶部)、24D(中部)和 26D(中部)采用热释光即 TL 方法断代: 24D 样品在北京大学热释光实验室使用英国牛津 Littlemore 科学仪器公司 (Littlemore Scientific Co. Oxford UK) 生产的 7185 型热释光断代仪测试; 18D 和 24D 样品分别由中国科学院广州地球化学研究所和地球环境研究所热释光实验室使用英国牛津 Littlemore 科学仪器公司生产的 711 型热释光断代仪测试。18D、24D 和 26D 样品的 TL 年代测试依次为 (9.88 ± 0.9) ka BP、(14.458 ± 867) ka BP 和 (19.236 ± 1.554) ka BP, 测试参数见表 1。

由图 1 可见, MGS2 的上限即为 19FL/20D 之界面, 依据 19FL 上覆的 18D 9.88 ± 0.9 TL ka BP 和与该界面之下的 24D (14.458 ± 867) TL ka BP 的测年结果, 按这两个年代之间的沉积速率 (45.45 cm · ka⁻¹ BP) 并内插进行计算, 可以得知 MGS2 之

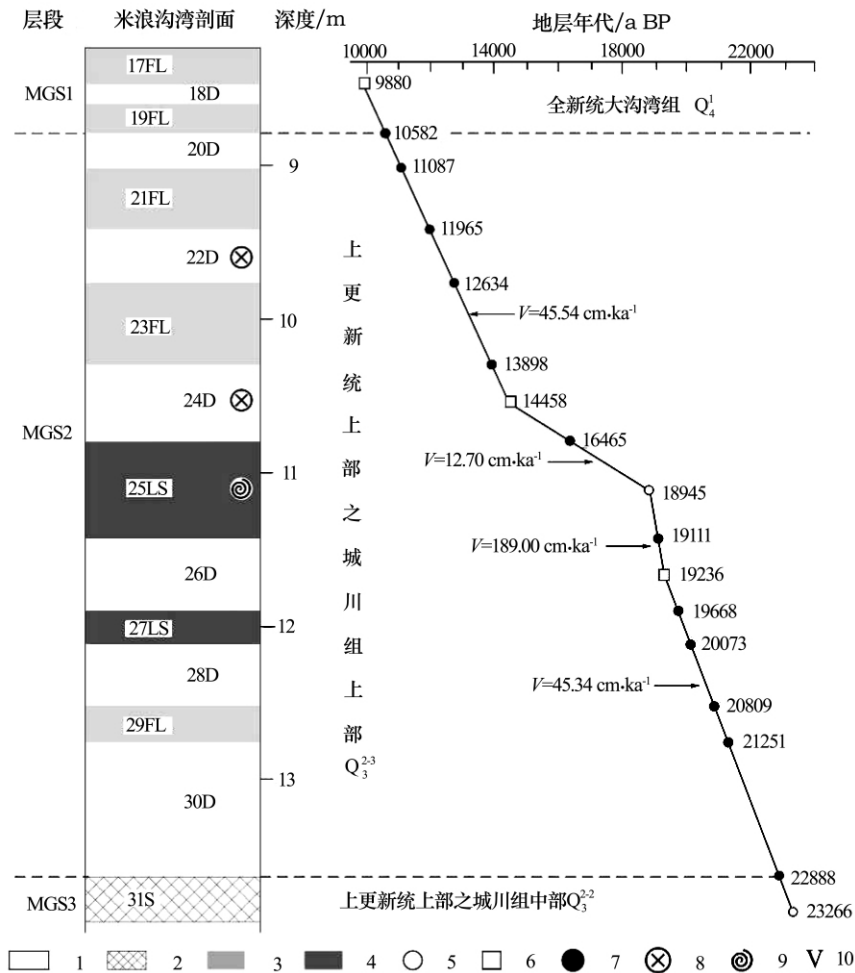


图 1 米浪沟湾剖面 MGS2 层序和年代

(1. 古流动砂丘; 2. 古土壤; 3. 河流相; 4. 湖沼相; 5. Cali 校正年龄; 6. TL 年龄; 7. 按沉积速率推算出的地层年代; 8. 脊椎动物化石; 9. 软体动物化石; 10. 沉积速率)

表1 MGS2及相关层位样品的热释光年代测定值和测试参数

Table 1 TL ages and other test parameters of samples in MGS2 and the correlative strata

| 层位/实验室 样品编号 | 深度 /m | U /($\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$) | Th /($\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$) | K /% | 年剂量 /m. Gy | 总剂量 /Gy | TL /ka BP |
|----------------|----------|---|--|------------|---------------|--------------|--------------|
| 18D/TGD-627 | 8.44 | 0.92±0.05 | 6.07±0.12 | 1.91±0.015 | 2.48±0.08 | 186.20±13.96 | 9.88±0.9 |
| 24D/PKG586 | 10.525 | 1.834 | 8.514 | 1.140 | 2.652 | 33.562±4.774 | 14.458±867 |
| 26D/XAL895 | 11.645 | 5.5 | 4.1 | 1.70 | 3.16 | 60.806±3.21 | 19.236±1.554 |
| | 11.645 | 5.5 | 4.1 | 1.70 | 3.16 | 67.944±6.49 | 21.494±1.437 |

上界面的年代为 10.582 ka BP。同理,依据与 MGS2 下限 30D/31S 之界面最为临近的两个年代数据——26D (19.236±1.437) TL ka BP 和 31S (23.266±0.597) cal ka BP 和这两个年代之间的沉积速率 (54.34 cm·ka⁻¹ BP) 并内插计算,得知此层

段之下界面的年代为 22.888 ka BP。这就是说, MGS2 的年代应该大致在 23~11 ka BP,与 MIS2 的时间^[31]相当。以此为基础,采用线性内插法可以进一步算出该层段之各个层序及其之间的时间界限,其结果见表 2 和图 1。

表2 MGS2各层位起止年龄

Table 2 Age range of each layer in MGS2

| 层位 | 深度 /m | 起止年龄 /a BP | 层位 | 深度 /m | 起止年龄 /a BP |
|-----|-------------|---------------|------|-------------|---------------|
| 20D | 8.76~8.99 | 11 087~10 582 | 21FL | 8.99~9.39 | 11 965~11 087 |
| 22D | 9.39~9.74 | 12 634~11 965 | 23FL | 9.74~10.27 | 13 898~12 634 |
| 24D | 10.27~10.78 | 16 465~13 898 | 25LS | 10.78~11.41 | 19 111~16 465 |
| 26D | 11.41~11.88 | 19 668~19 111 | 27LS | 11.88~12.10 | 20 073~19 668 |
| 28D | 12.10~12.50 | 20 809~20 073 | 29FL | 12.5~12.74 | 21 251~20 809 |
| 30D | 12.74~13.63 | 22 888~21 251 | | | |

3 主要氧化物的分布

MGS2 主要氧化物分析样品基本上按 5 cm 间距(少数为 3 cm、4 cm、6 cm 或 7 cm)取样,共采集 41 个样品。主要氧化物分析仪器使用日本理学 3070E 型 X 荧光光谱仪。分析方法是:将风干样品研磨至过 200 目筛,在高压下压成片,选择适当的条件分析测量,并经计算机处理后得出结果。样品分析由中国科学院寒区旱区环境与工程研究所中心实验室孙忠先生完成。

对样品的分析结果进行统计分析并列于表 3、绘制成图 2。表 3 中的 D、FL、LS 分别表示古流动沙丘砂、河流相、湖沼相。现结合表 3 和图 2,将 MGS2 主元素氧化物的分布概述如下:

3.1 各主要氧化物含量不等,变动范围大

整个层段以 SiO₂ 含量最高, Al₂O₃ 和 TOFE (Fe₂O₃+FeO) 次之,其余组分 CaO、MgO、Na₂O、K₂O 和 TiO₂ 的含量较低。各主要氧化物在 MGS2 都表现出一定的甚至较大的变动,在其含量上呈现

出跌宕起伏的波动曲线。

3.2 各主要氧化物含量于不同沉积相不同,呈明显变化旋回

MGS2 各主要氧化物中, SiO₂ 含量在古流动沙丘较高而在河湖相特别是湖沼相中相对较低;反之, Al₂O₃、TOFE、MgO、CaO、Na₂O、TiO 含量则在河湖相中较高而在古流动沙丘中相对较低。由古流动沙丘至上覆的河湖相, SiO₂ 呈由高向低变化, Al₂O₃、TOFE 等则呈由低向高变化,这些主要氧化物在 MGS2 曲线上表现出峰谷反复交替、构成了与该层段沉积旋回相应的 5.5 个主要氧化物含量变化旋回。

3.3 各主要氧化物含量变动的相关性较强,变动节奏基本一致

对 MGS2 各主要氧化物含量之间的相关性进行统计分析(表 4)发现, SiO₂、Al₂O₃、TOFE、TiO、MgO、CaO 之间相关性较强,相关系数的绝对值都 >0.6,一半以上 >0.8,最高值更可达 0.97。其中

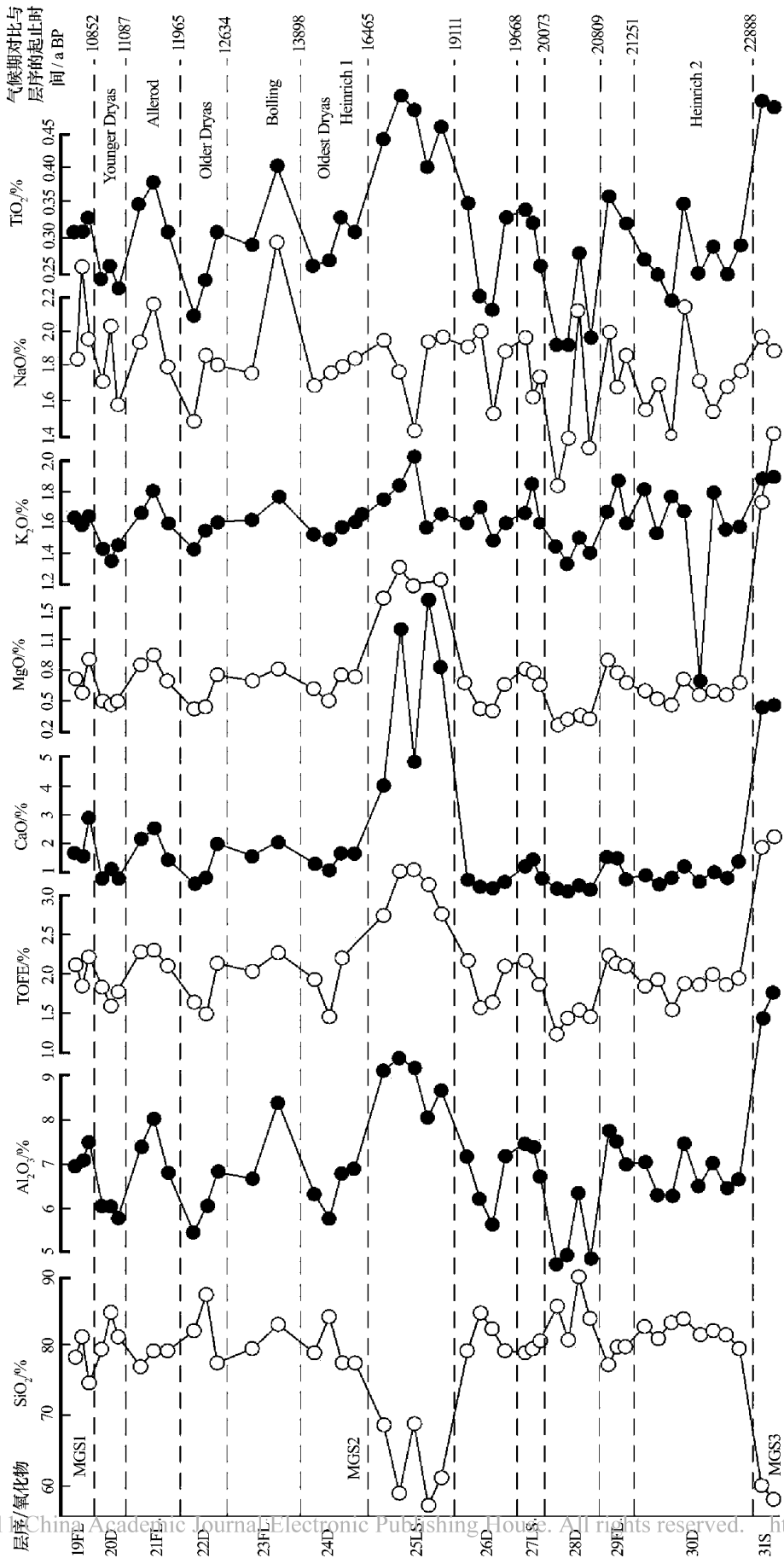


图 2 米浪沟湾剖面 MGS2 层段主要氧化物分布
 Fig. 2 Distribution of primary oxide in MGS2 in Milangouwan section

表3 MGS2层段主要氧化物含量
Table 3 Contents of primary oxide in MGS2

| 沉积相 | 含量 | SiO ₂ /% | Al ₂ O ₃ /% | TOFE /% | CaO /% | MgO /% | K ₂ O /% | Na ₂ O /% | TiO ₂ /% |
|-----|-----|------------------------|--------------------------------------|------------|-----------|-----------|------------------------|-------------------------|------------------------|
| D | 范围 | 77.44~89.91 | 4.73~7.47 | 1.23~2.39 | 0.36~1.94 | 0.26~0.76 | 0.57~1.81 | 0.97~2.01 | 0.15~0.35 |
| | 平均值 | 81.954 | 6.258 | 1.789 | 0.900 | 0.526 | 1.506 | 1.568 | 0.255 |
| FL | 范围 | 76.99~82.81 | 6.68~8.37 | 2.03~2.3 | 0.83~2.5 | 0.68~0.94 | 1.58~1.87 | 1.52~2.38 | 0.29~0.4 |
| | 平均值 | 79.270 | 7.443 | 2.183 | 1.675 | 0.791 | 1.690 | 1.823 | 0.344 |
| LS | 范围 | 56.91~80.8 | 6.7~9.37 | 1.9~3.32 | 0.81~0.23 | 0.65~1.79 | 1.55~2.04 | 1.28~1.83 | 0.26~0.5 |
| | 平均值 | 69.200 | 8.234 | 2.668 | 4.940 | 1.314 | 1.735 | 1.658 | 0.400 |
| 整体 | 范围 | 56.91~89.91 | 4.73~9.37 | 1.23~3.32 | 0.36~0.23 | 0.26~1.79 | 0.57~2.04 | 0.97~2.38 | 0.15~0.5 |
| | 平均值 | 79.005 | 6.860 | 2.031 | 1.817 | 0.727 | 1.585 | 1.633 | 0.300 |

表4 MGS2主要氧化物含量的相关性
Table 4 Correlation between each primary oxide in MGS2

| 氧化物 | SiO ₂ | Al ₂ O ₃ | TOFE | TiO | MgO | CaO | K ₂ O | Na ₂ O |
|--------------------------------|------------------|--------------------------------|--------|--------|--------|--------|------------------|-------------------|
| SiO ₂ | 1.000 | -0.703 | -0.889 | -0.733 | -0.929 | -0.932 | -0.281 | -0.102 |
| Al ₂ O ₃ | | 1.000 | 0.896 | 0.971 | 0.889 | 0.688 | 0.573 | 0.508 |
| TOFE | | | 1.000 | 0.910 | 0.953 | 0.826 | 0.454 | 0.298 |
| TiO | | | | 1.000 | 0.905 | 0.728 | 0.530 | 0.536 |
| MgO | | | | | 1.000 | 0.910 | 0.445 | 0.275 |
| CaO | | | | | | 1.000 | 0.294 | 0.200 |
| K ₂ O | | | | | | | 1.000 | 0.133 |
| Na ₂ O | | | | | | | | 1.000 |

Al₂O₃、TOFE、TiO、MgO、CaO 之间呈较强正相关，而与 SiO₂ 呈较强负相关；与其他元素相关性较弱。在变化节奏上，Al₂O₃、TOFE、TiO、MgO、CaO、K₂O 和 Na₂O 彼此之间大体上呈现同步变化，而 SiO₂ 则与之呈相反变化。

4 氧化物指示的 MGS2 气候波动

根据对毛乌素沙地现代流动沙丘 16 个样品的分析，其 SiO₂、Al₂O₃ 和 TOFE 含量分布范围分别为 75.20%~90.22%，4.62%~9.13% 和 1.42%~2.96%，平均含量 81.55%、7.85% 和 2.23%。将 MGS2 古流动砂丘与之相比不难看出，今古流动砂丘无论在这几种氧化物的含量分布上还是在其平均值上都显示出非常相近的特点。其中，后者 SiO₂、Al₂O₃ 和 TOFE 的含量变化几乎在前者相同氧化物

的分布范围之内。由 SiO₂-Al₂O₃+TOFE 散点图(图 3)可见，古流动沙丘砂的样点都无一例外地分布于现代沙丘沙样点范围之内；而河湖相除少部分样点可能受到季节性风沙活动影响散布在现代流动沙丘的范围之内，而大部分样点分布于这一范围之外。由此表明，古砂丘形成时具有与现代沙丘相似的沉积环境背景，揭示出类似现代毛乌素沙地的干冷多风沙流的主导气候曾经在 MGS2 时期多次发生。

在暖湿气候环境下，地球化学性质相对稳定的 SiO₂、Al₂O₃、TOFE、TiO 等易于富集，化学活动性较强的 MgO、CaO、Na₂O、K₂O 等在正地形相对淋失，而在负地形则相对聚集。研究区位于鄂尔多斯高原东南部洼地，地势总的较为低凹且相对闭塞，为四周水流汇集的良好场所。可以想见，在夏季风

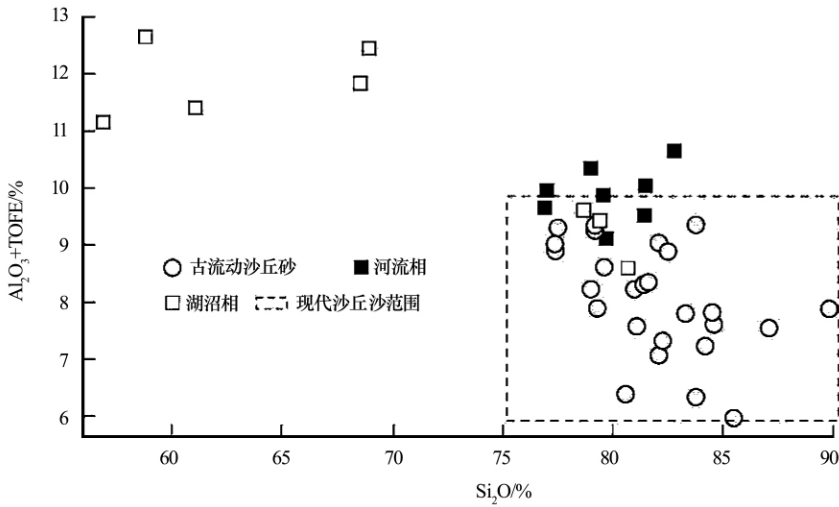


图 3 MGS2 地层层段 SiO₂-Al₂O₃+TOFE 散点图

Fig. 3 The scatter diagram of SiO₂-Al₂O₃+TOFE in MGS2

盛行的时期，河流相和湖沼相发育，气候相对暖湿，受到生物化学风化的影响就会较为明显，相对活动的 CaO、MgO、Na₂O、K₂O 首先淋失、迁移并随水流汇集到河湖沼泽沉积中，同时稳定的 Al₂O₃、TOFE、TiO 则在洼地及其四周高出水面的正地形得以相对聚集。当某一瞬间大气降水增多、地表径流特别是坡面水流作用加强，就会使平时聚集在这种地貌部位上地表的 Al₂O₃、TOFE、TiO 等元素也同样随水流汇集到河湖沼泽中，导致活动性高一中等的 CaO、MgO、Na₂O、K₂O 和相对稳定的 Al₂O₃、TOFE、TiO 在同时期富集。这也许是因为在 MGS2 的河湖沉积中除 SiO₂ 以外的其他化学性质相对稳定的和活动性质较强的主要氧化物含量通常都较古流动砂丘要高的原因。至于 SiO₂ 在古流动砂丘中相对富集的现象，则与之形成时的大量的石英与硅酸盐矿物在干寒多风的环境下随风沙流的迁入有关。这一点已被近年的相关研究结果^[26,31]所证实。

值得注意的是，Na₂O、K₂O 虽然在河湖相中相对富集，但与 Al₂O₃ 等的相关性较弱。这可以理解为在暖湿环境 Na₂O、K₂O 随流水汇聚于研究区域的背景下，由于 Na₂O、K₂O 化学性质最为活泼，易溶解于水，或在暖湿环境下沿地下水下渗，或在干旱季节沿土壤毛细管孔隙上升到地表发生迁移所致。

根据以上讨论认为，MGS2 的一个与沉积旋回大体同步的主要氧化物含量的变动旋回其实指示了一个干冷—相对暖湿旋回，据此也可以视其为一个冬夏季风先后演替的气候旋回。这种看法也可从 MGS2 中的生物化石标志得到某种程度的印证。如

古流动砂丘——22D 和 24D 中的大量巨鸵鸟 (*Struthio sp.*) 蛋片化石；湖沼相——25LS 的赤琥珀螺 (*Succinea erythrophana* (Ancey)) 等腹足类化石，其现生种适合于温暖湿润的环境。

MGS2 所持续的时间仅为 12 ka，平均一个冬夏季风环境的变化大致需要 2 ka，显然，这是一个具有指示千年尺度环境变化的层段。

有意义的是，MGS2 主要氧化物指示的气候波动可与世界其他一些相关研究较详地点的气候波动进行很好的对比。例如，众所周知的北欧晚冰期出现了 3 次寒冷期——最老仙女木期 (Older Dryas)、老仙女木期 (Older Dryas) 和新仙女木期 (Young Dryas)，中间两次温暖期——博林期 (Bolling) 和阿勒罗德期 (Allerod)^[35] 就可与 MGS2 指示的相关气候波动进行对比。由图 2 和表 2 可见，MGS2 在晚冰期即 16 500~10 600 a BP 也形成了 3 次代表干冷环境的风成砂层——24D、22D、20D 和两次代表相对温暖润的河流相——23FL、21FL，3 个风成砂层年代可依次与最老仙女木期 (>13 898 a BP)、老仙女木期 (12 500~12 100 a BP) 和新仙女木期 (10 800~10 300 a BP) 对应；两层河流相分别与博林期 (13 000~12 500 a BP) 和阿勒罗德期 (12 100~10 800 a BP) 对应。上述的晚冰期气候阶段记录在我国西北地区的青海湖^[36] 和罗布泊地区^[37] 也有发现。另外，据 BOND 等对北大西洋气候变化的研究表明，MIS2 期间存在两次 H 事件^[6]，出现于 22~23 ka BP 和 15~16 BP，差不多分别与 MGS2 的 30D 和 24D 在时间上吻合。这表明，MGS2 所指示的干冷-暖湿变化可能是其对北半球千年尺度环境

变化的响应。

参考文献(References):

- [1] Heinrich H. Origin and consequence of cyclic ice-rafting in the Northeast Atlantic Ocean during the past 130000 years[J]. *Quaternary Research*, 1988, 29(1): 142—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 [J]. *Nature*, 1993, 364: 218—220.
- [3] Bond G, Broecker W S, Johnson S, et al. Correlations between climate records from North Atlantic sediments and Greenland ice[J]. *Nature*, 1993, 365: 143—147.
- [4] Grootes P M, Stuiver M, White J W C. Comparison of oxygen isotope records from the GLSP2 and GRIP Greenland ice cores [J]. *Nature*, 1993, 366: 552—554.
- [5] Heusser L. Direct correlation of millennial-scale changes in the western North American vegetation and climate with changes in the California current system over the past 60000 years[J]. *Paleoceanography*, 1998, 13(2): 252—262.
- [6] Bond G C, Showers W, Elliotm, et al. The North Atlantic's 1 ~2 ka climate rhythm: relation to Heinrich events, Dansgaard Oeschger cycles and the Little Ice Age[J]. *Geophysical Monograph Series*, 1999, 112: 35—58.
- [7] Clark P U, Webb R S, Keigwin L D. Mechanisms of global climate change at millennial time scales[J]. *Geophysical Monograph Series*, 1999, 112: 394.
- [8] An Z. The history and variability of the East Asian paleomonsoon climate[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2000, 19(1—5): 171—187.
- [9] 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[J]. *科学通报*, 2004, 49(11): 1091—1098.
- [10] 刘宇飞, 李保生, 杨艺, 等. 末次间冰期我国半干旱盆地 Rb、Sr 的迁移聚集规律与环境演变[J]. *中国沙漠*, 2006, 26(3): 341—344.
- [11] 杨艺, 李保生, 李云卓, 等. 巴丹吉林沙漠查格勒布剖面微量元素反映的 150 ka BP 以来的气候变化[J]. *中国沙漠*, 2007, 27(1): 1—8.
- [12] Teilhard de Chardin P, Licent E. On the geology of the northern, western and southern borders of the Ordos, China[J]. *Bulletin of the Geological Society of China*, 1924, 3(1): 37—44.
- [13] 贾兰坡. 河套人[M]. 上海: 龙门联合书局, 1950.
- [14] 裴文中, 李有恒. 萨拉乌苏河系的初步探讨[J]. *古脊椎动物与古人类*, 1964, 8(2): 99—118.
- [15] Kozlovski, J K. The problem of the So-Called Ordos Culture in the Light of the Palaeolithic Finds from Northern China and Southern Mongolia[J]. *Polia Quaternaria*, 1971, 39: 74.
- [16] 董光荣, 李保生, 高尚玉. 萨拉乌苏河地層看晚更新世以来毛乌素沙地的变迁[J]. *中国沙漠*, 1983, 3(2): 9—14.
- [17] 关有志, 陈振英, 贾惠兰. 萨拉乌苏河地区第四纪地层中的元素分析与古气候[J]. *中国沙漠*, 1986, 6(1): 32—35.
- [18] 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[J]. *地质学报*, 1987, 61(3): 218—230.
- [19] 李明启, 靳鹤龄, 董光荣, 等. 萨拉乌苏河流域微量元素揭示的气候变化[J]. *中国沙漠*, 2006, 26(2): 172—179.
- [20] 靳鹤龄, 李明启, 苏志珠, 等. 220 ka 以来萨拉乌苏河流域地层磁化率与气候变化[J]. *中国沙漠*, 2006, 26(5): 680—686.
- [21] 靳鹤龄, 李明启, 苏志珠, 等. 萨拉乌苏河流域地层沉积时代及其反映的气候变化[J]. *地质学报*, 2007, 82(4): 307—315.
- [22] 李保生, 靳鹤龄, 吕海燕. 150 ka 以来毛乌素沙地的堆积与变迁过程[J]. *中国科学(D 辑)*, 1998, 28(1): 85—90.
- [23] Li Baosheng, David Dian, Zhang, Jin, et al. Paleo-monsoon activities of Mu Us Desert, China since 150ka BP— a study of the stratigraphic sequences of the Milangouwan Section, Salawusu River area [J]. *Paleogeography, Paleoclimatology, Paleoecology*, 2000: 1—16
- [24] 张宇红, 李保生, 靳鹤龄, 等. 萨拉乌苏河流域 150 ka BP 以来的粒度旋回[J]. *地理学报*, 2001, 56(3): 332—344.
- [25] 罗开利, 李保生, 祝一志, 等. 150 ka B. P. 以来萨拉乌苏河流域的 CaCO₃ 旋回[J]. *地理科学*, 2002, 22(6): 683—688.
- [26] 李后信, 李保生, 祝一志, 等. 150 ka BP 以来萨拉乌苏河流域主元素变动旋回[J]. *地球化学*, 2002, 31(5): 424—432.
- [27] 李保生, 靳鹤龄, 祝一志, 等. 萨拉乌苏河流域第四系岩石地层及其时间界限[J]. *沉积学报*, 2004, 22(4): 676—682.
- [28] 吕玉晓, 李保生, 靳鹤龄, 等. 萨拉乌苏河流域末次间冰期全球变化区域响应的主元素记录[J]. *中国沙漠*, 2004, 24(2): 136—143.
- [29] 欧先交, 李保生, 靳鹤龄, 等. 萨拉乌苏河流域萨拉乌苏组沙丘砂沉积特征[J]. *地理学报*, 2006, 61(9): 965—975.
- [30] 温小浩, 李保生, 章典, 等. 萨拉乌苏河流域末次间冰阶气候——以米浪沟湾剖面为例[J]. *地质学报*, 2007, 82(4): 553—562.
- [31] Li Baosheng, Wen Xiaohao, Qiu Shifan, 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 [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2007, 81(4): 801—840.
- [32] 李保生, 陈德牛, David D, 等. 萨拉乌苏河流域 MGS3 地层腹足类动物化石种类及气候环境[J]. *中国科学(D 辑)*, 2007, 37(12): 305—308.
- [33] Niu Dongfeng, Li Baosheng, Du Shuhuan, et al. Cold events of Holocene indicated by primary elements distribution of the high-resolution sanddunes in the Salawusu River Valley [J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2008, 18: 26—36.
- [34] 王绍武, 谢志辉. 千年尺度气候变率的研究[J]. *地学前缘*, 2002, 9(1): 143—153.
- [35] Dansgaard W, Johnson S J, Clausen H B, et al. Climatic record revealed by the Camp Century ice core [M]// Turekian K K. *The Late Cenozoic Glacial Ages*. New Haven: Yale University Press, 1971.
- [36] 沈吉, 刘兴起, Matsumoto R, 等. 晚冰期以来青海湖沉积物多指标高分辨率的古气候演化[J]. *中国科学(D 辑)*, 2004, 34

(6):582-589.

BP 罗布泊地区环境及其对全球变化的响应[J]. 地球化学,

[37] 罗超, 彭子成, 杨东, 等. 多元地球化学指标指示的 32~9 ka

2008, 37(2):139-148.

Primary Oxides Change in MGS2 in Salawusu River Valley and Indicated Climatic Change

LI Hou-xin¹, LI Bao-sheng^{2,3}, WEN Xiao-hao², OU Xian-jiao²,
LI Zhi-wen², NIU Dong-feng², DU Shu-huan²

(1. Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510635, China; 2. School of Geography, South China Normal University, Guangzhou 510631, China; 3. State Key Laboratory of Loess and Quaternary Geology, Institute of Earth Environment, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710061, China)

Abstract: There are 5.5 sedimentary cycles of aeolian sediments and *fluvio-lacustrine sediments* in MGS2 strata in Salawusu river valley. The primary oxides in these sediments are analyzed in this paper. The results show there are 5.5 oxide cycles corresponding with the sedimentary cycles, and the contents of Al_2O_3 , TOFE, K_2O , MgO , CaO , Na_2O and TiO in the *fluvio-lacustrine sediments* are higher than those in the aeolian sediments, while the content of SiO_2 presents the reverse. Analysis of the chemical migration of primary oxides and the geomorphic feature of the research area indicate that these sedimentary cycles or oxide cycles are the reflection of climatic change in this area, and a sedimentary cycle or its corresponding oxide cycle indicates a cold-dry/warm-wet cycle, namely a alternation between winter monsoon and summer monsoon. As MGS2 continues only for 1 200 years, so one alternation between winter monsoon and summer monsoon continues for about 2 000 years and one winter monsoon or summer monsoon continues about only 1 000 years. Obviously, it is a millennium-scale environmental change. The good correlation between the climate change based on the sedimentary cycles and the primary oxide cycles in MGS2 with the climate change in last glacial period in North Europe and the Heinrich events indicates that the millennium-scale environmental change in MGS2 may be the region reflection of global environmental change.

Keywords: Salawusu River Valley; Milanggouwan section; MGS2; primary oxide; climatic cycle