

文章编号: 0375-5444 (2001) 03-0332-13

萨拉乌苏河流域 150 ka BP 以来的粒度旋回

张宇红^{1,2} 李保生^{1,2} 靳鹤龄³ David Dian ZHANG⁴ 阎满存⁵

祝一志² 李后信¹ 姚春霞¹ 罗开利¹

(1. 华南师范大学地理系, 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. 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所, 兰州 730000; 4. 香港大学地理及地质学系; 5. 清华大学水利水电工程系, 北京 100084)

摘要: 萨拉乌苏河流域米浪沟湾地层剖面 150 ka BP 以来古流动砂丘砂与河湖相和古土壤在粒度上具有多次显著的粗细韵律交替变化, 粒度参数 M_z 、 σ 、 Sk 、 K_g 和 SC/D 亦随之响应为多波动峰谷交替的态势。同时, 粒度特征值 ϕ_5 、 ϕ_{16} 、 ϕ_{25} 、 ϕ_{50} 、 ϕ_{75} 、 ϕ_{84} 、 ϕ_{95} 相应地表现为非常有节奏地跳动。据此, 将米浪沟湾剖面划分为 27 个粒度粗细沉积旋回, 并认为其是 150 ka BP 以来在东亚冬夏古代季风交替影响下沙漠演变的一个颇为完整的气候-地质过程记录。

关键词: 萨拉乌苏河流域 米浪沟湾剖面 150 ka 粒度 古气候旋回

中图分类号: P531; P532; P931.3 文献标识码: A

地处中国沙区最南部的毛乌素沙漠东南的萨拉乌苏河流域, 蕴藏着丰富的晚第四纪以来东亚季风变迁的环境演变信息, 是该时段沉积学与古气候学等研究的良好地点。早在 1924 年, 法国古生物学家 P. 德日进等就在萨拉乌苏河流域建立了上更新统萨拉乌苏组, 并勾画出“河套东南角之理想剖面”^[1]。此后的 70 余年来中外学者对该地晚第四纪地层^[2-8]、古生物^[9-14]、古人类^[15-20]与沙漠变迁^[21-27]和城川组建立^[28]等进行了大量工作, 不断加深对该区环境演变过程的理解。特别是近年对该地米浪沟湾地层剖面 150 ka BP 以来(上更新统-全新统)多沉积旋回划分所揭示出的沙漠期与间沙漠期频繁变更的历史过程^[29], 更表明这一剖面是迄今为止研究晚第四纪中国沙漠及其环境变迁的最理想的地质记录。

然而, 上述的多旋回沉积是否也可将其同等地视为气候旋回的结果? 尽管新近的研究^[30]以及其它有关讨论^[31]认为两者之间是有联系的, 但对于专门从米浪沟湾剖面粒度分析结果出发, 进而系统地两者之间关系的探讨尚少。而从沉积地层学和古气候学角度来看, 粒度分析恰恰是判明岩性、岩相和古代沉积环境的最重要的量化代用指标之一。为此, 作者对米浪沟湾剖面粒度结果进行了分析, 并据此着重讨论 150 ka BP 以来的气候旋回问题。

收稿日期: 2001-03-09; 修订日期: 2001-04-16

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (49971009) 和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资助项目 (SKLLQG0008)。国家重点基础研究发展规划项目 (G2000048701) [Foundation Item: National Natural Science Foundation of China, No. 49971009; State Key Laboratory of Loess and Quaternary Geology, Institute of Earth Environment, CAS, No. SKLLQG0008; the National Key Project for Basic Research, No. G2000048701]

作者简介: 张宇红 (1974-), 女, 硕士, 研究方向为环境演变。从事地理教育多年, 近年参加毛乌素沙漠与华南环境及其演变的科学考察与研究。E-mail: claudych@163.net

1 米浪沟湾地层剖面概况

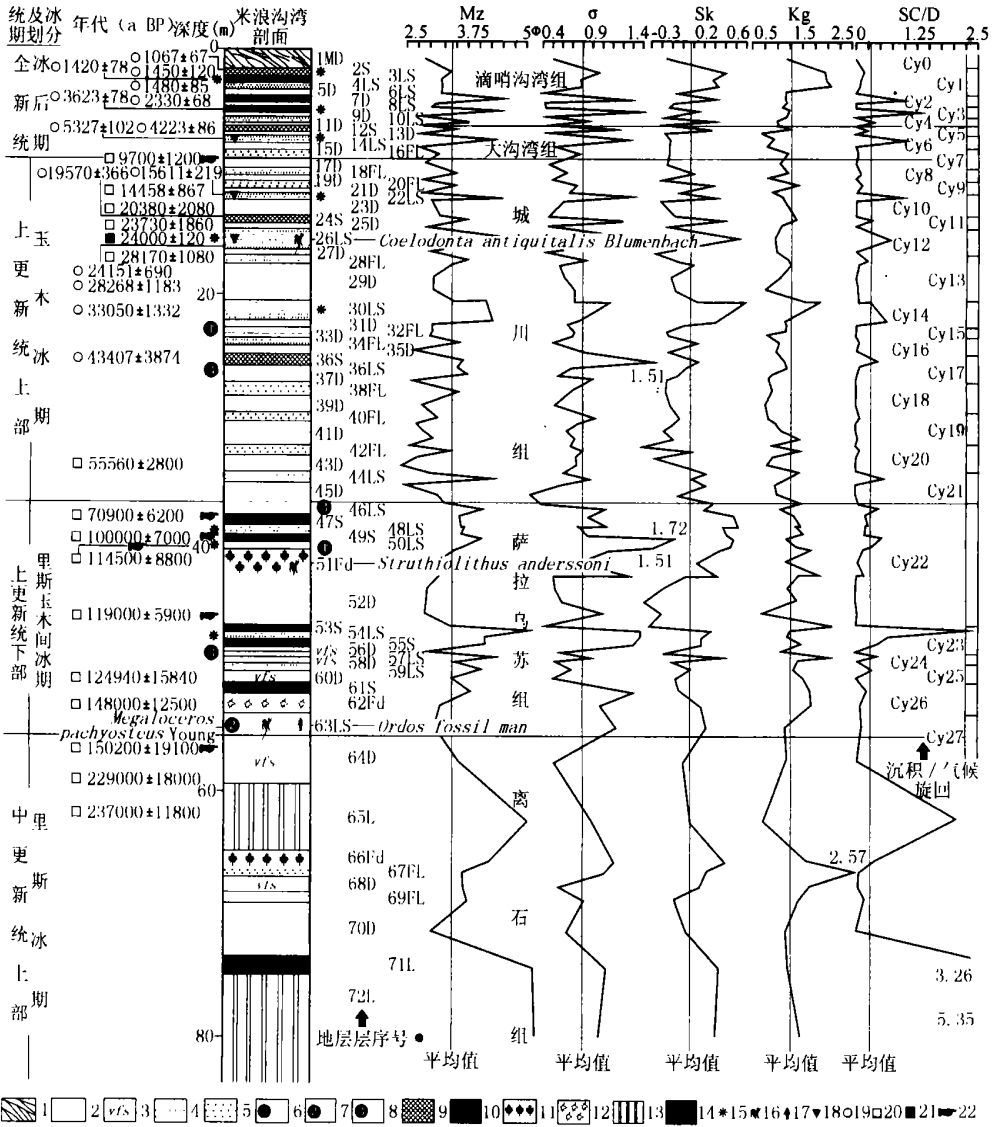
米浪沟湾地层剖面位于萨拉乌苏河中游流域米浪沟湾村 NE 约 500 m 的河流左岸, 剖面地层堆积连续、层序完整, 是目前本区晚第四纪地层最为典型的剖面之一 (图 1)。

从鄂尔多斯高原现代流动砂丘顶起迄萨拉乌苏河面, 剖面厚度约为 83 m, 按沉积相划分为 72 层序, 含 29 层风成的古流动砂丘, 3 层古固定~半固定砂丘, 1 层现代流动砂丘, 28 层河湖相, 5 层棕褐色土, 4 层黑垆土, 2 层黄土和 3 层在湖沼相堆积以后发育的冻融褶皱层。其时代为中更新世-全新世, 包括部分离石组、萨拉乌苏组、城川组、大沟湾组和滴哨沟湾组。按气候地层学划分, 它们分属于里斯冰期, 里斯/玉木间冰期, 玉木间冰期和冰后期。该地离石组/萨拉乌苏组、萨拉乌苏组/城川组、城川组/大沟湾组的地质时限分别约为 150 ka、70 ka 和 10 ka BP, 与所述的冰期间冰期的时限一一对应。风成砂丘尤其是古流动砂丘层沉积相特征在米浪沟湾剖面最为显著 (图 1), 其次为河湖相和古土壤。古流动砂丘层主要是由以细砂粒级为主的砂质沉积物组成, 松散且分选都比较均匀。古固定-半固定砂丘所含层数较少, 以细砂~极细砂为主, 还伴有一定含量的粉砂和粘土, 致密且分选中等, 垂直节理发育, 无层理并可见植物根系。河湖相和古土壤主要由极细砂~粉砂粒级组成, 并具一定含量粘土成分, 松软-致密, 分选较差, 常可见到植物根系, 偶见植物根叶残体化石。通常, 在河湖相和古土壤底部发育有成层的钙质结核或钙板, 其下覆地层往往是风成的砂丘层。剖面中的古土壤具有明显的土壤发生层次, 即上部为粘化层, 中部为富含碳酸盐新生体的钙积层, 下部常为分选比较均匀的风成砂, 有时为河湖沉积构成的母质层。相对而言, 棕褐色土粘化层质地较黑垆土粘重。镜下分析与实验结果显示, 无论棕褐色土还是黑垆土, 其胶斑状微结构都很明显。其中的土壤基质, 前者以粘粒、碳酸盐及铁质氧化物较多, 后者则是由粘粒与部分碳酸盐复合而成并具灰白色钙质假菌丝、钙膜等。为了便于阐述, 本文将现代流动砂丘砂、古流动砂丘砂、古固定-半固定砂丘砂、河流相、湖相-沼泽相、古土壤和黄土分别以 MD、D、Fd、FL、LS、S 和 L 表示之, 置在该剖面层序号阿拉伯数码后并显示于图 1 之上。剖面中含化石地层较多, 有 10 个层位 (2S、3LS、8LS、14LS、22LS、26LS、30LS、48LS、50LS、54LS) 含软体动物化石, 3 个层位 (26LS、51FD、63LS) 含脊椎动物化石 (图 1)。米浪沟湾剖面在其垂直方向上, 风成的砂丘砂与河湖相或/和古土壤构成的粗细旋回非常明显, 两者相互超覆, 其中 150 ka BP 以来可达 27 个这种沉积旋回。

2 150 ka BP 以来粒度分布的基本特征

2.1 米浪沟湾剖面 150 ka BP 来粒度的一般分布特征

米浪沟湾剖面粒度分析样品基本上按上述成因地层单位层序自上而下逐层采集, 但对于其中厚度较大的层位采集密度也适度加大。共取得 95 个样品进行了筛析和移液管法分析, 实验由中科院寒区旱区环境与工程研究所中心实验室张焕新等完成。该剖面的粒级划分是: 1~0.1 mm 采用十进制, <0.1 mm 用中国黄土的一般分类原则。颗粒粒径以其对数 Φ 表示, 其转换公式为 W. C. Krumbien 制定的 $\Phi = -\log_{10}(d)$ (d 为直径/mm)。



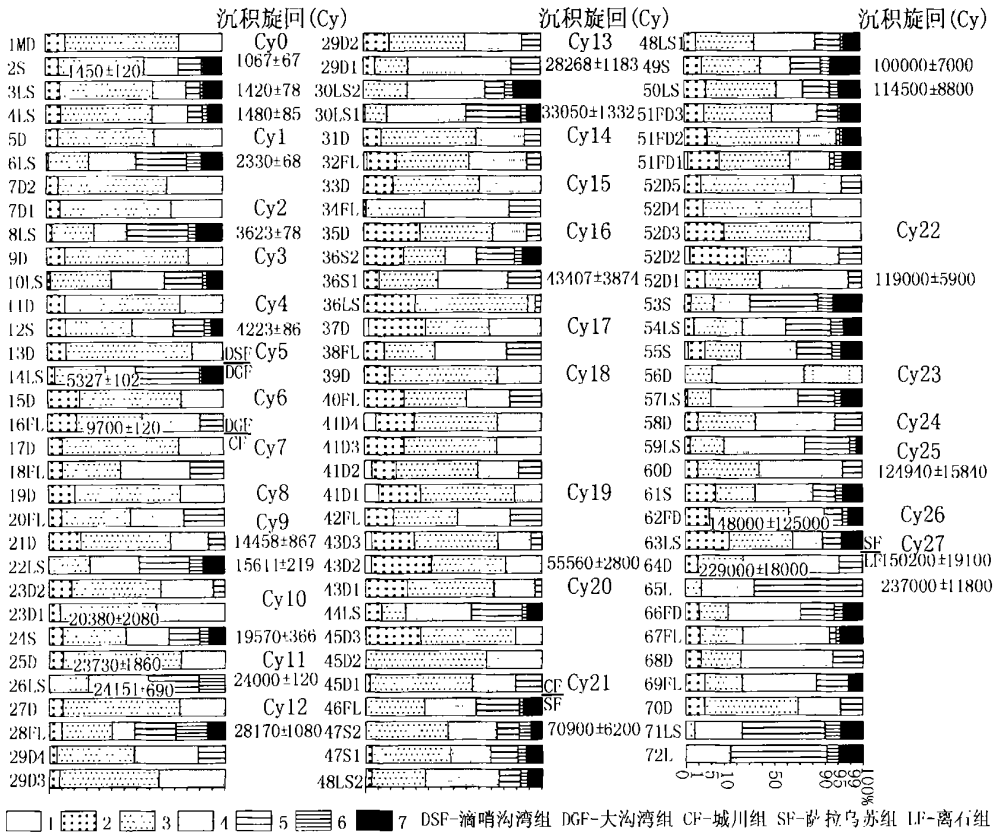
1-现代流动沙丘; 2-古流动砂丘(细砂); 3-古流动砂丘(极细砂); 4-粉砂质极细砂; 5-粘土质细砂(河流相); 6-粉砂质细砂; 7-粘土质~粉砂质细砂; 8-粘土质极细砂; 9-黑垆土; 10-棕褐色土; 11-古固定~半固定砂丘(粉砂质细砂); 12-古固定~半固定砂丘(粉砂质极细砂); 13-离石黄土; 14-粉砂~粘土质粉砂; 15-软体动物化石; 16-脊椎动物化石; 17-河套人化石; 18-冻融褶皱; 19-14C年代; 20-热释光年代; 21-轴系年代; 22-通过与萨拉乌苏河地区有关地层对比获得的年代(文献 29)

图 1 米浪沟湾地层剖面及其粒度参数的变化

Fig. 1 Milangouwan stratigraphical section and the change of its grain-size parameters

根据米浪沟湾剖面的粒度分析结果绘制成累积百分含量(图 2), 可以看出该剖面 150 ka BP 以来不同沉积相粒度的一般分布具有如下特征:

古流动砂丘砂粒度与该区及其周围现代流动砂丘^[33]一样, 几乎全部是由砂物质成分组



- 1- 粗砂 (0~1φ); 2- 中砂 (1~2φ); 3- 细砂 (2~3.32φ); 4- 极细砂 (3.32~4.32φ);
- 5- 粗粉砂 (4.32~6.64φ); 6- 细粉砂 (6.64~7.64φ); 7- 粘土 (>7.64φ)

图 2 米浪沟湾剖面粒度累积百分含量

Fig. 2 The grain-size accumulative centigrade content of Milangouwan section

成。其中, 细砂平均含量为 64.95%, 分布范围为 34.16% ~ 89.57%, 极细砂平均含量 25.17%, 分布范围 5.57% ~ 59.06%, 中砂平均含量 6.83%, 分布范围 0.06% ~ 32.16%; 为数不多的层位含少量粗粉砂, 平均含量 1.21%, 分布范围 0~6%; 古流动砂丘中粗砂含量极少, 平均含量仅为 0.1%, 范围在 0~1.33%, 而细粉砂和粘土缺失。

古固定-半固定砂丘砂粒与该区及其以南的黄土高原北部边缘现代固定-半固定砂丘砂^[33]很相似, 以砂物质为主, 且两者粉砂和粘土都占有一定比例。细砂、极细砂、中砂的平均含量分别为 56.03%、27.96%、5.15%, 分布范围依次是 46.2% ~ 65.74%、21.72% ~ 36.76%、3.34% ~ 8.13%; 粗粉砂、粘土和细粉砂平均含量分别为 6.82%、2.69% 和 1.26%, 分布范围依次 1.7% ~ 9.43%、2% ~ 3.56% 和 0.67% ~ 2.47%。

河流相中同样以砂质成分为主, 但极细砂含量为首, 其次才是细砂。前者平均含量为 46.02%, 分布范围为 32.49% ~ 65.07%, 后者平均含量 41.09%, 分布范围 27.97% ~ 54.97%; 具有少量粗粉砂和中砂, 前者平均含量 8.2%, 分布范围 1.16% ~ 17%, 后者平均含量 4.42%, 分布范围 0.23% ~ 11.4%; 细粉砂与粘土含量甚微, 平均含量分别为 0.1% 和 0.17%, 分布范围依次是 0~1% 和 0~1.56%。

湖相-沼泽相与河流相一样,含量为首的也是极细砂,其次是细砂。前者平均含量为 43.09%,分布范围 22.26%~76.66%,后者平均含量 26.49%,分布范围为 4.44%~63.33%;所不同的是,粗粉砂,细粉砂和粘土含量明显增高,其平均含量分别为 24.09%, 2.2%和 2.76%,分布范围依次是 5.13%~47.3%, 0.43%~5.7%和 0~5.3%;中砂平均含量很低,但却有一定的分布范围,分别为 1.57%和 0.12%~14.2%。

古土壤更接近于湖相~沼泽相,差别主要是细粉砂和粘土等细粒成分含量略有增加。极细砂、细砂和粗粉砂平均含量分别为 36.12%, 35.92%和 20.63%,分布范围依次是 24.23%~54.93%, 5.93%~57.7%和 7.83%~56.34%;细粉砂和粘土平均含量分别为 2.69%和 2.94%,分布范围分别是 0~6.53%和 0~6.46%;中砂平均含量也略有增加,分布范围相对变窄,分别为 2.8%和 0.07%~10.16%。

显而易见风成砂与河湖相及古土壤在粒度分布特征上的异同之处,最为显著的则是风成的古流动砂丘、古固定~半固定砂丘与河湖相、古土壤粒度在剖面纵向上随风、水营力以及生物化学风化作用彼此交替而表现出来的粗细韵律波动。

2.2 粒度参数- M_z 、 σ 、 Sk 、 Kg 和 SC/D 的变化

为了系统地查明米浪沟湾剖面粒度分布规律及其与沉积的古代气候环境之间的关系,对剖面分析数据按 M_z (平均粒径)、 σ (标准离差)、 Sk (偏度)、 Kg (峰态) 公式进行了计算并在 EXCEL 中处理统计。计算的参数值均采用 Folk and Ward (1957) 制定的公式:

$$M_z = (\sigma_{16} + \sigma_{50} + \sigma_{84})/3, \quad \sigma = (\Phi_{84} - \Phi_{16})/4 + (\Phi_{95} - \Phi_5)/6.6 \quad (2-1)$$

$$Sk = (\Phi_{84} + \Phi_{16} - 2\Phi_{50})/2(\Phi_{84} - \Phi_{16}) + (\Phi_{95} + \Phi_5 - 2\Phi_{50})/2(\Phi_{95} - \Phi_5) \quad (2-2)$$

$$Kg = (\Phi_{95} - \Phi_5)/2.44(\Phi_{75} - \Phi_{25}) \quad (2-3)$$

为了进一步说明剖面中砂物质与粉砂和粘土之间的关系,本文还计算了粉砂和粘粒之和与砂的比值,以 SC/D 表示(图 1)。可以看到该剖面 150ka 以来 M_z 、 σ 、 Sk 、 Kg 和 SC/D 诸粒度参数值的分布具有如下一些变化特点:

150 ka 来沉积物粒度参数变化较大。 M_z 、 σ 、 Sk 、 Kg 的分布范围分别是 2.33~5.06 Φ , 0.28~1.72, -0.38~0.59, 0.68~2.11; SC/D 的分布范围是 0~2.26。

150 ka 来各组粒度参数颇不相同。萨拉乌苏组 M_z 、 σ 、 Sk 、 Kg 和 SC/D 的分布范围依次是 2.83~5.06 Φ , 0.43~1.72, -0.36~0.53, 0.73~2.11 和 0~2.26; 平均值依次是 3.56 Φ , 0.95, 0.15, 1.42 和 0.28; 城川组各粒度参数和 SC/D 分布范围依次是 2.33~4.75 Φ , 0.28~1.51, -0.38~0.59, 0.76~1.92 和 0~0.93; 平均值依次是 3.23 Φ , 0.73, 0.02, 1.13 和 0.12; 大沟湾组和滴哨沟湾组各粒度参数和 SC/D 的分布范围依次是 2.73~4.49 Φ , 0.41~1.39, -0.18~0.4, 0.68~2.06 和 0~1.28; 平均值依次是 3.32 Φ , 0.76, 0.04, 1.24 和 0.25。

150 ka 来风成的砂丘相与河湖相和古土壤粒度参数差异明显。古流动砂丘砂 M_z 、 σ 、 Sk 、 Kg 和 SC/D 的分布范围依次是 2.33~3.48 Φ , 0.28~1.00, -0.38~0.29, 0.68~2.11 和 0~0.06; 平均值依次是 2.92 Φ , 0.58, -0.1, 1.12 和 0.01。古固定~半固定砂丘砂所述粒度参数范围依次是 3.08~3.45 Φ , 0.76~1.27, 0.14~0.35, 1.19~1.85 和 0.05~0.17; 平均值依次 3.22 Φ , 1.02, 0.25, 1.61 和 0.12。河流相 M_z 、 σ 、 Sk 、 Kg 和 SC/D 的分布范围依次是 3~3.56 Φ , 0.51~0.92, -0.26~0.28, 0.83~1.46 和 0.01~0.24; 平均值依次 3.38 Φ , 0.74, 0.01, 1.16 和 0.1。湖沼相 M_z 、 σ 、 Sk 、 Kg 和 SC/D 的分布范围依

次是 $3.04 \sim 4.75\Phi$, $0.56 \sim 1.51$, $-0.12 \sim 0.59$, $0.91 \sim 2.06$ 和 $0.02 \sim 1.28$; 平均值依次 3.98Φ , 1.03 , 0.27 , 1.37 和 0.49 。古土壤 M_z 、 σ 、 Sk 、 K_g 和 SC/D 的分布范围依次是 $3.38 \sim 5.06\Phi$, $0.69 \sim 1.72$, $-0.03 \sim 0.53$, $1.15 \sim 1.94$ 和 $0.08 \sim 2.26$; 平均值依次 3.82Φ , 1.19 , 0.29 , 1.4 和 0.47 。

显然, 无论从米浪沟湾剖面不同沉积相粒度的一般分布特征上还是从粒度的各个参数的变化上都明显表现出, 河湖相或古土壤颗粒通常要较风成砂颗粒细化, 所显示的分选相对较差; 偏度上, 前者较之后者明显增高, 呈正偏, 而后者常常表现近对称分布, 少数呈负偏。从峰态上看, 河湖相与古土壤亦较风成砂特别是古流动砂丘砂要大。

从垂直方向看, 米浪沟湾剖面粒度粗细韵律分布随沉积相的变化非常明显。这不仅在剖面上粒度的累计含量可以清楚地反映出来, 且各个粒度参数也同样具有显著响应。150 ka 来河湖相或/和古土壤与风成砂的 M_z 、 σ 、 Sk 、 K_g 构成一峰谷交替、犬牙交错的锯齿状多波动过程线: 常常是由风成砂至上覆河湖相或/和古土壤, M_z 的 Φ 值、 σ 、 Sk 值相应增大, K_g 相应增高。SC/D 对于米浪沟湾剖面来说, 其数值实际上是放大的 $> 4.32\Phi < 4.32\Phi$ 颗粒物质的比例关系, 以此说明地质时期以来风砂活动强度具有特殊意义。米浪沟湾剖面 150 ka 来的 41 个古流动砂丘的样品中, SC/D 值趋近于 0 以至为 0; 古固定~半固定砂丘 SC/D 值较流动砂丘的稍大; 河湖相与古土壤的 SC/D 值明显大于风成砂层。在剖面垂直方向上, SC/D 值与上述 4 个参数的变化步骤基本一致。

值得注意的是, 以往一些学者往往将风成的砂丘沉积特别是古流动砂丘作为河流相来处理^{7,8,13]}。为此, 我们将米浪沟湾剖面各种沉积相的 M_z 、 σ 分布与现代流动砂丘砂进行了比较 (图 3)。根据 56 个样品分析结果毛乌素沙漠现代流动砂丘砂 M_z 、 σ 的变化范围, 分别是 $1.94 \sim 3.39\Phi$ 和 $0.35 \sim 1.03$ ^[33] (图 3)。米浪沟湾剖面中的古流动砂丘砂的上述分布与之非常接近, 前者 M_z 和 σ 数值几乎全部分布于后者范围之内, 其密集分布范围 M_z 和 σ 分别是 $2.72 \sim 3.02\Phi$ 和 $0.42 \sim 0.73$; 而古固定~半固定砂丘、河流相、湖沼相及古土壤的分布范围与之有较大差距, 绝大多数 M_z 和 σ 数值分布在现代流动砂丘砂范围之外, 它们密集分布的范围 M_z 和 σ 分别是 $3.48 \sim 4.55\Phi$ 和 $1.41 \sim 0.68$ 。如此看来将该剖面中古流动砂丘砂的成因归属于风成是合宜的。

2.3 粒度特征值 - Φ_5 、 Φ_{16} 、 Φ_{25} 、 Φ_{50} 、 Φ_{75} 、 Φ_{84} 、 Φ_{95} 的跳动

上述 M_z 、 σ 、 Sk 、 K_g 的大小取决于特征值 - Φ_5 、 Φ_{16} 、 Φ_{25} 、 Φ_{50} 、 Φ_{75} 、 Φ_{84} 、 Φ_{95} 大小。很显然, 米浪沟湾剖面不同沉积相粒度参数的分布及其变化主要受到这些基本特征值的制约。那么, 粒度参数与特征值之间究竟存在一种什么样的关系呢? 为了回答这一问题, 我们将米浪沟湾剖面 150 ka 来的 86 个样品的粒度特征值绘制成图 4。同时, 为便于讨论, 将同一个成因地层单位具有多个样品的粒度特征值按其平均值处理 (图 4)。54 组样品特征值共计 378 个数据, 各个特征值之间的连接构成 7 个特征值 150 ka 来的变化曲线, 呈现在 27 个沉积旋回之中 (图 4)。

米浪沟湾剖面特征值最为显著的变化即是 150 ka 以来随着风成砂与河湖相和古土壤的相互更替而表现出来的多次“跳动”(图 4)。而跳动的节奏几乎是与 M_z 、 σ 、 Sk 和 K_g 节奏合拍。若与 M_d (中位数) 也即 Φ_{50} 为界, 其上下的特征值的跳动幅度又有很大不同: 其上的特征值 Φ_{75} 、 Φ_{84} 、 Φ_{95} 跳动幅度较大, 其下的特征值 Φ_5 、 Φ_{16} 、 Φ_{25} 跳动幅度较小。

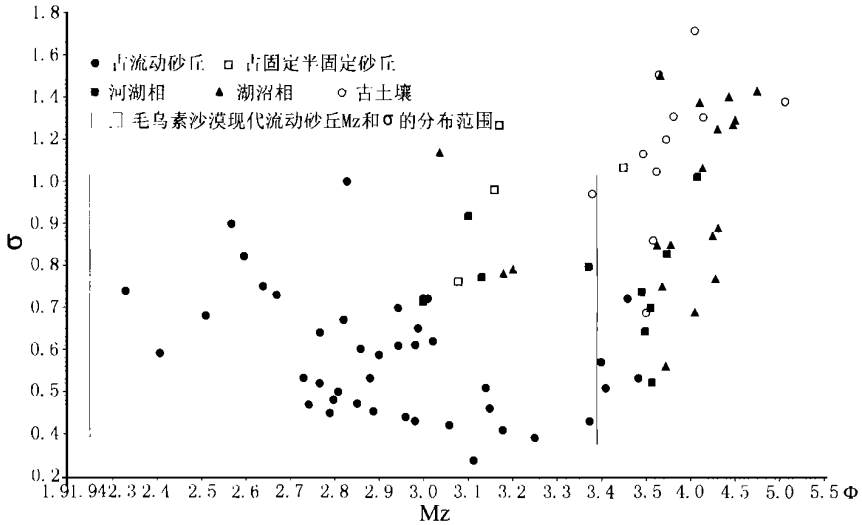


图3 米浪沟湾剖面各沉积相 Mz-σ 散点图

Fig.3 Mz-σ scattergram of different sedimentary facies in Milangouwan section

Φ84 平均值 4.1Φ, 分布范围 3.06Φ~ 6.68Φ, 变化幅度 3.62Φ, Φ95 平均值 4.99Φ, 分布范围 3.38Φ~ 7.9Φ, 变化幅度 3.52Φ,

Md 以下的特征值中, Φ5 平均值为 2.18Φ, 分布范围为 1.24Φ~ 3.46Φ, 变化幅度为 2.22Φ, Φ16 平均值 2.61Φ, 分布范围 1.54Φ~ 3.9Φ, 变化幅度 2.36Φ, Φ25 平均值 2.85Φ, 分布范围为 1.79Φ~ 4.19Φ, 变化幅度 2.4Φ.

根据上述数据认为, Φ75、Φ84、Φ95 是 150 ka 来沉积相发生变更的急烈跳动特征值。因其对于沉积相响应的敏感度较高, 又可称之为“活性特征值”。相对而言, Φ5、Φ16、Φ25 对于沉积相变更响应的敏感度较低, 故可称之为“惰性特征值”。基于对粒度参数与诸特征值属性关系的认识, 我们发现, 米浪沟湾剖面粒度惰性特征值的跳动被限定在一定的幅度范围、也即前述的 2.22Φ~2.4Φ 这样一种跳动幅度之后, 活性特征值的跳动幅度 (2.9Φ~ 3.62Φ) 便成为 Mz、σ Sk 和 Kg 波动的非常重要的因子。因此, 如果说粒度参数是沉积环境特别是气候变迁响应的主体之一, 那么粒度特征值 Φ75、Φ84、Φ95 就是这一主体中所包含的诸因子中响应气候变迁的最为活跃的个体。

3 萨拉乌苏流域的古气候旋回

米浪沟湾剖面 150 ka 来古流动砂丘砂与毛乌素沙漠现代流动砂丘砂在粒度一般分布和 Mz、σ 的相似, 表明其时前者与后者的沉积环境也是相似的。该剖面古固定一半固定砂丘砂与现代固定一半固定砂丘砂粒度组成也非常相似。其中, 就 Mz 和 σ 的变化而言, 前者 Mz 和 σ 分别分布于后者 Mz (2.76~3.81Φ) 和 σ(0.53~2.17) 的范围之内^[33]。这可能表明沙漠沉积过程中伴有一定的季节性降水, 从而使草灌植被得以生长, 其屏障作用有利于撮取甚至滋生一些风沙堆积期间携带的粉尘和粘粒。因而, 这类砂丘致密且含植物根系甚至有适宜干旱半干旱环境的 *Struthiothus anderssoni* (图 1) 的生物遗存不是偶然的, 反映

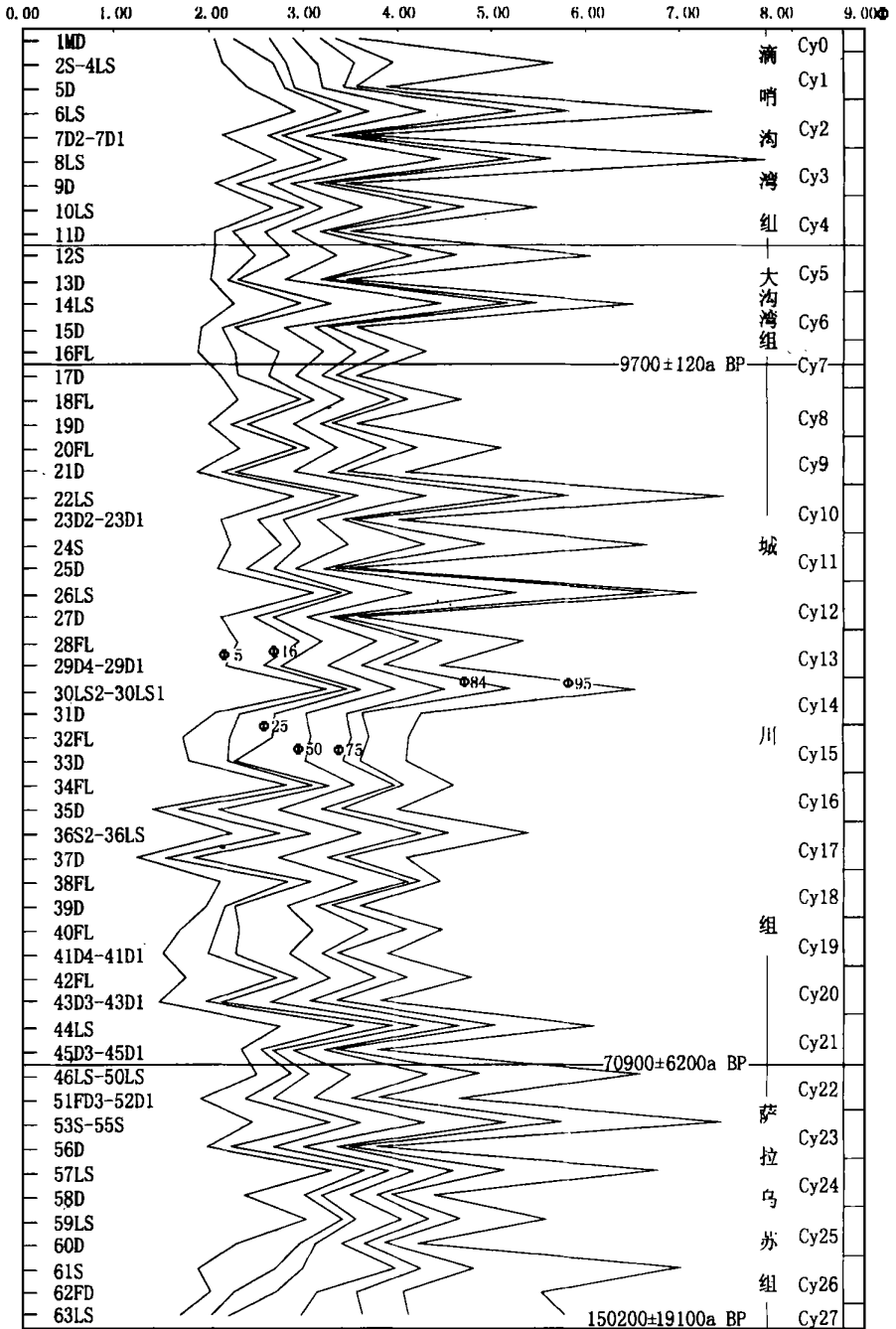


图 4 米浪沟湾剖面粒度特征值的变化

Fig. 4 The change of grain-size eigenvalue of Milangouwan section

出其时既有风沙环境, 又有草地灌丛而与完全流沙的沉积环境有所不同。无论古流动砂丘砂还是古固定—半固定砂丘砂, 其与现代流动砂丘砂和固定—半固定砂丘砂在粒度上的分别相似特征, 都说明现代这 2 种砂丘环境曾经在过去一定地质时期的存在, 是过去气候恶

化的显著标志, 尽管砂丘类型有所不同, 然而却是砂丘曾经活化的明显体现。也就是说, 过去 150 ka 该地曾多次出现过由气候干寒作用产生流动砂丘的地质过程, 也曾几度出现过草灌植被生长且具一定降水的固定—半固定砂丘地貌景观。按粒度分析结果可以将米浪沟湾剖面 150 ka 来的砂丘演化划分为 27 个沙漠堆积时期, 简称“沙漠期”。

米浪沟湾剖面砂丘沉积之间的河湖相和古土壤, 其上下层位界面时限之间的阶段, 主要贯穿了流水、成壤或者两者交替作用的地质过程, 后者见于 2S ~ 4LS 和 46LS ~ 50LS 层序。当然, 河湖相和古土壤时期也会存在季节性的风沙活动, 但由于这种营力的从属地位, 其形成不久往往被流水和成壤作用加工和改造了。这也许是前述粒度散点图中为什么某些河湖相和古土壤样品的 M_z 、 σ 参数值也会分布在现代流动砂丘范围内的原因之一(图 3)。另一原因则可能是河湖沼泽沉积和成壤作用之前的物源即是风砂及其所充当的“母岩”作用。而从河湖相和古土壤粒度的一般分布特征上来看, 其颗粒都程度不同地相对下伏的流动砂丘细粒物质增加的现象, 至少可以说明该时期堆积砂丘的干旱风力作用已经大为减弱。河湖相和古土壤过程往往是古流动砂丘的沉积间断。然而, 由粒度分析结果不难看出, 每一层河湖相和古土壤中都具有一定的砂物质成分。这些砂物质尽管目前还难以分辨出哪些属于河湖堆积和成壤过程中的季节性风砂灌入成分, 但是若以 M_z 和 SC/D 值来衡量干旱风力大小变化并不失对于这一问题的讨论意义。也即是说, M_z 的 Φ 值尤其是 SC/D 值越大, 指示河湖沉积和古土壤发育时的风砂特别是流砂因素的影响越小。

基于上述对沙漠期的理解, 我们也可以将米浪沟湾剖面中砂丘上覆的河湖相与古土壤发育视为沙漠沉积作用的极度减弱时期, 也即“间沙漠期”; 于是该剖面记录了 150 ka 来 27 个旋回的沙漠期与间沙漠期的交替演变过程, 显然, 这也就是前述的沉积旋回。问题是, 这些旋回其粒度组成究竟与过去气候存在着怎样一种关系呢? 回答这一问题, 有赖于对现在毛乌素沙漠沉积过程的认识。众所周知, 毛乌素沙漠现代风沙风尘活动主要与冬春季气温降低引起的西伯利亚—蒙古高压增强并进而触发亚洲冬季风自北向南和自西北向东南侵入有关。在这种季节中, 持续数天的风沙活动便可使流沙的前移与堆积具有明显的增长。而风尘物质往往随干旱风力作用继续向东南漂移, 沉浮在黄土高原及其以远。一个季节内仅持续数天的风沙活动尚且如此, 若是旷日持久的一个以低温为主导的地质时代, 冬季风多次叠加作用之强, 干寒气候影响之巨, 延续的时间之长, 从而形成米浪沟湾剖面的砂丘砂堆积这样一种因果关系是可以想象的。以上从粒度分布和 M_z 、 σ 散点图 2 个方面论证砂丘沉积成因, 不难解释米浪沟湾剖面 150 ka 来任一时段的风成砂丘堆积亦是类似现代冬季风动态过程多次在毛乌素沙漠作用的结果。基于这样一种认识, 不难将米浪沟湾剖面 150 ka 来 27 层砂丘堆积进而反演成毛乌素地区所经历的 27 次沙漠堆积时期。与上述情形相反, 毛乌素沙漠现代风沙风尘活动减弱乃至停止, 常常与夏秋季节增温引起的东亚夏季风自南向北和自东南向西北的渗入有关。这一季风活动不仅为该区带来更多的水泽, 致河湖发育, 同时亦使流动砂丘之上生草固定。由此可以设想, 若 150 ka 来气温增高且持续时间较长, 本区所受夏季风的影响就会更大、频次更多。这说明, 一个河湖相或古土壤代表了多次夏季风叠加影响的后果; 米浪沟湾剖面 27 序次的河湖相和古土壤则是 27 个时期东亚夏季风在毛乌素沙漠形成主导季风的体现。这样, 可以归结米浪沟湾剖面 150 ka 来所发生的 27 个沉积旋回为东亚冬夏古代季风相互对峙、交替演化的结果。150 ka 来, 当毛乌素沙漠主要受到冬季风影响时, 风沙活动就猖獗。地表以细砂粒级为主的物质构成风沙流, 并在此作用

之下大量地吹蚀以至风蚀殆尽 $> 4.32\phi$ 的粉尘和粘粒, 从而使得粒度特征值 ϕ_5 、 ϕ_{16} 、 ϕ_{25} 、 ϕ_{75} 、 ϕ_{84} 、 ϕ_{95} 的跳动向 M_d 聚集, 其结果, M_z 的颗粒粗化、 σ 显示分选变好、 Sk 呈现近对称分布甚至负偏, 而 K_g 明显降低, SC/D 趋于 0 或者为 0。反之, 150 ka 来当毛乌素沙漠盛行夏季风时, 风沙活动萎缩, 河湖沼泽发育, 成土成壤作用加强, 在生物化学风化作用下, 有利于捕获和滋生更多的粉尘和粘粒, 结果使得活性特征值跳跃幅度增大, M_z 的颗粒细化、 σ 显示分选变差、 Sk 呈现正偏, 而 K_g 明显增高, SC/D 增大。正是由于 150 ka 来毛乌素沙漠冬夏季风的多次更迭, 才导致米浪沟湾剖面的多旋回沉积交替演化。也正是由于这种原因, 才使得剖面 150 ka 来 ϕ_5 、 ϕ_{16} 、 ϕ_{25} 、 ϕ_{50} 、 ϕ_{75} 、 ϕ_{84} 、 ϕ_{95} 有节奏地跳动, M_z 、 σ 、 Sk 、 K_g 和 SC/D 有规律地波动。

参考文献 (References):

- [1] Teilhard de Chardin P, Licent E. On the discovery of a paleolithic industry in northern China [J]. *Bulletin of the Geological Society of China*, 1924, 3 (1): 45- 50.
- [2] Teilhard de Chardin, P. and Young C. C.. preliminary observation on the pre-loessic and Post-Pleistocene Formations in West Shanxi and Northern Shensi [J]. *Geological Memoirs of China*, 1930, 1 (8): 15- 17. [德日进 P, 杨钟健. 山西西部陕西北部莲蒂纪后黄土期之地层观察 [J]. 地质专报, 甲种, 第 8 号, 1930, 1 (8): 15- 17.]
- [3] Liu Tungsheng. The composition and texture of loess [J]. Beijing: Science Press, 1966. 9- 18. (In Chinese) [刘东生著. 黄土的物质成分和结构 [M]. 北京: 科学出版社, 1966. 9- 18.]
- [4] Pei Wenzhong, Li Youheng. Some tentative opinions on the problem of "Sjara-Osso-Gol Series, Inner Mongolia [J]. *Vertebrata Palasiatica*, 1964, 8 (2): 99- 118. (In Chinese) [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.]
- [5] Kozlovski J K. The problem of the so-called Ordos Culture in the light of the palaeolithic finds from Northern China and South Mongolia [J]. *Polia Quaternaria*, 1971, 39: 73- 75.
- [6] Yuan Baoying. Sedimentary environment and stratigraphical subdivision of Sjara-Osso-Gol Formation [J]. *Scientia Geologica*, 1978 (3): 320- 334. (In Chinese) [袁宝印. 萨拉乌苏组的沉积环境及地层划分问题 [J]. 地质科学, 1978 (3): 320- 334.]
- [7] Zhou Kunshu, Li Xingguo, Shao Yajun. The permafrost period subdivision in the Salawusu River Reaches, Inner Mongolia, and its significance [A]. Contribution to the Academic Symposium on the Pre-Historic Earthquake and Geology of China [C]. Xi'an: Shaanxi Science and Technology Press, 1982. 149- 153. (In Chinese) [周昆叔, 黎兴国, 邵亚军. 内蒙萨拉乌苏河流域冰缘期划分及其意义 [A]. 见: 中国第四纪研究委员会全新世分会, 陕西省地震局编. 史前地震与第四纪地质论文集 [C]. 西安: 陕西科学技术出版社, 1982. 149- 153.]
- [8] Zheng Honghan. Late Pleistocene fluvio-lacustrine deposits and eolian loess in North China [J]. *Geochemica*, 1989 (4): 343- 351. (In Chinese) [郑洪汉. 中国北方晚更新世河湖相地层与风积黄土 [J]. 地球化学, 1989 (4): 343- 351.]
- [9] 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.
- [10] Teilhard de Chardin, P. Early Man in China [M]. Beijing: the French Bookstore, Institut de Geo-Biologie, Peking, No. 7, 1941. 67- 77. [德日进 P. 东亚地质及人类原始 [M]. 北京: 北京地质学生物研究所出版品 7 号, 1941. 67- 77.]
- [11] Qi Guoqing. Quaternary mammalian fossils from Salawusu River District, Nei Mongol (Inner Mongolia) [J]. *Vertebrata Palasiatica*, 1975, 13 (4): 239- 249. (In Chinese) [祁国琴. 内蒙古萨拉乌苏河流域第四纪哺乳动物化石 [J]. 古脊椎动物与古人类, 1975, 13 (4): 239- 249.]
- [12] Li Baosheng, Dong Guangrong, Gao Shangyu. Relationship between the Malan Loess and the Salawusu Formation in the Salawusu River area, Ordos, and their geological age [J]. *Acta Geologica Sinica*, 1987, 1 (1): 29- 45. [李保生, 董光荣, 高尚玉. 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.]
- [13] Sun Jianzhong. Quaternary Geology in the Loess Plateau [M]. Beijing: Science Press, 1991. 161-168. (In-Chinese) [孙建中著. 黄

土高原第四纪 [M]. 北京: 科学出版社, 1991. 161-168.]

- [14] Xie Junyi, Gao Shangyu, Dong Guangrong. Zoocenosis in Salawusu [J]. *Journal of Desert Research*, 1995, **15** (4): 313-322. (In Chinese) [谢骏义, 高尚玉, 董光荣. 萨拉乌苏动物群 [J]. 中国沙漠, 1995, **15** (4): 313-322.]
- [15] Licent E, Teilhard de Chardin P, B. Davidson. On a presumably Pleistocene human tooth from the Sjara Osso Gol (South eastern Ordos) deposits [J]. *Bulletin of the Geological Society of China*, 1927, **5**: 285-298.
- [16] Jia Lanpo. The Ordos Fossil Man [M]. Shanghai: Longmen United Publishing House, 1950. 1-89. (In Chinese) [贾兰坡. 河套人 [M]. 上海: 龙门联合书局, 1950. 1-89.]
- [17] Woo Rukang. Fossil human parietal bone and femur from Ordos [J]. *Vertebrata Palasiatica*, 1958, **2** (1): 208-210. (In Chinese) [吴汝康. 河套人顶骨和股骨化石 [J]. 古脊椎动物学报, 1958, **2** (1): 208-210.]
- [18] Wang Yuping. The paleolithic culture of Sjara-Osso-Gol River area. Wushen Banner [A]. Selected Writings of the Historical Relics Data, Inner Mongolia [C]. Hohhot: Inner Mongolia Press, 1964. 9-16. (In Chinese) [汪宇平. 乌审旗萨拉乌苏河的石器文化 [A]. 见: 内蒙古文物工作队编. 内蒙古文物资料选辑 [C]. 呼和浩特: 内蒙古出版社, 1964. 9-16.]
- [19] Dong Guangrong, Gao Shangyu, Li Baosheng. New discovery of the Fossil Ordos Man [J]. *Kexue Tongbao* (Chinese Science Bulletin), 1982, **27** (7): 754-758. [董光荣, 高尚玉, 李保生. 河套人化石的新发现 [J]. 科学通报, 1982, **26** (19): 192-194.]
- [20] Yuan Sixun, Chen Tiemei, Gao Shijun. Uranium series dating of "Ordos Man" and "Sjara-Osso-Gol Culture" [J]. *Acta Anthropologica Sinica*, 1983, **2** (1): 90-94. (In Chinese) [袁思训, 陈铁梅, 高世君. 用铀子系法测定河套人和萨拉乌苏文化的时代 [J]. 人类学学报, 1983, **2** (1): 90-94.]
- [21] Dong Guangrong, Li Baosheng, Gao Shangyu. The case study of the vicissitude of Mu Us Sandy Land since the Late Pleistocene according to the Salawusu River area strata [J]. *Journal of Desert Research*, 1983, **3** (2): 9-14. (In Chinese) [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 [J]. 中国沙漠, 1983, **3** (2): 9-14.]
- [22] Lu Xiaoxia. Clay mineral composition and its relation to paleoclimate in the area of Sjara-Osso-Gol River, Inner Mongolia [J]. *Journal of Desert Research*, 1985, **5** (2): 27-35. (In Chinese) [卢小霞. 萨拉乌苏河地区粘土矿物组合分析与气候的关系 [J]. 中国沙漠, 1985, **5** (2): 27-35.]
- [23] Gao Shangyu, Dong Guangrong, Li Baosheng. Migration and accumulation of chemical elements in the Quaternary strata of the Salawusu River area in relation to climatic evolution [J]. *Geochimica*, 1985, (3): 269-275. (In Chinese) [高尚玉, 董光荣, 李保生. 萨拉乌苏河第四纪地层中化学元素迁移和聚集与古气候的关系 [J]. 地球化学, 1985, (3): 269-275.]
- [24] Guan Youzhi, Chen Zhenying, Jia Huilan. Ancient climate and element distribution in the Quaternary strata in Sjara Osso Gol District [J]. *Journal of Desert Research*, 1986, **6** (1): 32-35. (In Chinese) [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, **6** (1): 32-35.]
- [25] Shao Yajun. Pollen component and paleoclimate and paleovegetation in Sjara-Osso-Gol River since Late Pleistocene Epoch [J]. *Journal of Desert Research*, 1987, **7** (2): 22-27. (In Chinese) [邵亚军. 萨拉乌苏河地区晚更新世以来的孢粉组合及其反映的古植被和古气候 [J]. 中国沙漠, 1987, **7** (2): 22-27.]
- [26] Li Baosheng, Dong Guangrong, Gao Shangyu. Sedimentary palaeogeographic environment of Upper Pleistocene strata and its evolution in the Salawusu River area [J]. *Geographical Research*, 1988, **8** (2): 64-71. (In Chinese) [李保生, 董光荣, 高尚玉. 萨拉乌苏河地区晚更新世环境演化 [J]. 地理研究, 1989, **8** (2): 64-73.]
- [27] Li Baosheng, Dong Guangrong, Gao Shangyu. The changes in climatic environment of the Salawusu River area since the terminal stage of Mid-Pleistocene as indicated by detrital minerals in Quaternary sediments [J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 1991, **10** (1): 84-90. (In Chinese) [李保生, 董光荣, 高尚玉. 萨拉乌苏河地区第四纪地层中的碎屑矿物及其反映的中更新世末期以来的环境变化 [J]. 岩石矿物学杂志, 1991, **10** (1): 84-90.]
- [28] Li Baosheng, Dong Guangrong, Wu Zheng. The establishment of the Upper Pleistocene Chengchuan Formation in Northern China [J]. *Geological Review*, 1993, **39** (2): 91-100. (In Chinese) [李保生, 董光荣, 吴正. 我国北方上更新统城川组的建立 [J]. 地质评论, 1993, **39** (2): 91-100.]
- [29] Li Baosheng, Jin Heling, Lu Haiyan. Processes of the deposition and vicissitude of Mu Us Desert, China since 150 ka BP. [J]. *Science in China* (Series D), 1998, **41** (3): 248-254. [李保生, 靳鹤龄, 吕海燕. 150ka 以来毛乌素沙漠的堆积与变迁过程 [J]. 中国科学 (D), 1998, **28** (1): 85-90.]

- [30] Li Baosheng, David Dian Zhang, Jin Heling et al. Palaeo- Monsoon activities of Mu Us Desert, China since 150 ka—A study of the stratigraphic sequences of the Milangouwan section, Salawusu River area [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2000, 162: 1–16.
- [31] Li Baosheng, Wu Zheng, David Dian ZHANG. The environment and change in the monsoon sandy region of China during late Pleistocene and Holocene [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2001, 75 (1): 127–137. [李保生, 吴正, David Dian ZHANG. 中国季风沙区晚更新世以来环境及其变化 [J]. *地质学报*, 2001, 75 (1): 127–137.]
- [32] Grains size analysis of sedimentary rock (sediment) and application. The Shanbei group of Chengdu Geologic Institute [M]. Beijing: Geology Press, 1978. 1. [成都地质学院陕北队编. 沉积岩(物)粒度分析及其应用 [M]. 北京: 地质出版社, 1978, 1]
- [33] Li Baosheng, Dong Guangrong, Gao Shangyu. A analysis and discussion on the grain size of the Quaternary stratum profile in Yulin area of the Northern Shaanxi [J]. *Acta Geographica Sinica*, 1988, 43 (2): 125–133. (In Chinese) [李保生, 董光荣, 高尚玉. 陕西北部榆林第四纪地层剖面的粒度分析与讨论 [J]. *地理学报*, 1988, 43 (2): 125–133.]

Grain-Size Cycles in Salawusu River Valley since 150 ka BP

ZHANG Yu-hong^{1,2}, LI Bao-sheng^{1,2}, JIN He-ling³, David Dian Zhang⁴,

YAN Man-cun⁵, ZHU Yi-zhi², LI Hou-xin¹, YAO Chun-xia¹, LUO Kai-ti¹

(1. Department of Geography, South China Normal University, Guangzhou 510631, China; 2. State Key Laboratory of Loess and Quaternary Geology, Institute of Earth Environment, CAS, Xi'an 710061, China; 3. Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, CAS, Lanzhou 730000, China; 4. Department of Geography and Geology, Hongkong University; 5. Department of Hydraulic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China;)

Abstract: The Milangouwan stratigraphical section in the Salawusu River Valley takes down 27 alternately evolutionary sediment sequences of the aeolian dune layers with the fluvio-lacustrine facies and palaeosols since 150 ka BP. Based on grain-size analyses of the 86 samples from the section, some views have been put forward: (1) Grain-size accumulative centigrade contents of the aeolian sands in the past 150 ka in Milangouwan section are mainly characterized by the aeolian palaeo-mobile dune sands, and those of the fluvial facies dominated by very fine sands also contain some quantities of silt and clay. (2) The grain-size general distributional characteristics — Mz (particle diameter) and σ (standard deviation) clearly show that the fluvio-lacustrine facies and palaeosols usually become finer in particles and worse in sorting than the aeolian sands. As regards Sk (bias angle) and Kg (kurtosis) values, the former two increase obviously compared with the latter, displaying positive bias and the latter often proximately symmetrical distributed, only few in negative bias. (3) At vertical direction of the section, the grain-size distributional coarse and fine rhythms vary very pronouncedly with the alternation of sedimentary facies. Mz, σ , Sk, Kg and SC/D (ratio of the sum of silt and clay to sand) of fluvio-lacustrine,

palaeosols and aeolian sands separately constitute a commulative between peak and valley values. (4) The values of grain-size parameters lie on their eigenvalues. Taking the eigenvalue Φ_{50} as a boundary, the Φ_{75} , Φ_{84} and Φ_{95} above the eigenvalue have wide flounce range and high sensitivity responding to the sedimentary facies, which may be called "active eigenvalues". In contrast with them, those below the above-cited eigenvalue, i. e. , Φ_5 , Φ_{16} and Φ_{25} , which have relatively narrow flounce range and low sensitivity, are called "inert eigenvalues".

Key words: Salawusu River valley; Milanggouwan section; 150 ka; grain-size; palaeo-elimite cycles

* * * * *

《地理学报》加入“万方数据—数字化期刊群”的声明：《地理学报》已加入“万方数据—数字化期刊群”，本刊稿件将一律纳入“万方数据—数字化期刊群”，提供网络信息服务，凡有不同意见者，请另投它刊。

《地理学报》编辑部
万方数据股份有限公司