

文章编号: 1000-0550 (2005) 04-0702-07

陇西盆地末次冰期黄土粒度特征及其环境意义

徐树建^{1,2} 潘保田¹ 李 琼¹ 高红山¹ 王均平¹ 胡春生¹

1(兰州大学 资源环境学院 西部环境教育部重点实验室 兰州 730000) 2(临沂师范学院地理与旅游学院 山东临沂 276005)

摘 要 顺着风成堆积物搬运的主导方向,对黄土高原西部的末次冰期以来的 24 个风成堆积物剖面的粒度进行了系统分析,对比各个粒度指标,分析了粒度的空间分布特征,提取了最为敏感的粒度指标,并在南北向大断面上建立了砂的百分含量与沙漠距离的数学模型,该模型与黄土高原中部有所不同。

关键词 风尘 粒度特征 黄土 砂 陇西盆地

第一作者简介 徐树建 男 1967 年出生 副教授 博士 地貌与第四纪环境

中图分类号 P532 **文献标识码** A

1 引言

1.1 黄土研究在环境变化研究中的意义

中国黄土以其分布广泛、沉积连续、蕴含环境信息丰富而与深海沉积物、极地冰芯并称为全球变化研究的三大支柱。国内外研究者运用地层学、地貌学、沉积学、土壤学、环境磁学、岩石学、矿物学、地球化学、古生物学等多学科的研究方法,进行地层划分,建立时间标尺,分析气候指标,提取环境信息,探讨成因机制,揭示了更新世甚至中新世以来气候变化的历史^[1-10]。通过对作为冬季风替代指标的粒度、粉尘通量、碎屑石英粒度等,以及作为夏季风替代指标的磁化率、化学风化指数、碳酸盐含量等的研究表明,黄土—古土壤序列详细记录了亚洲季风形成和演化的历史^[11-15]。黄土—古土壤序列所包含的古气候信息,为探索亚洲内陆干旱化的历史和进程、亚洲季风—沙漠系统的形成和演化、青藏高原的隆升和环境效应以及地球环境各圈层的相互作用等提供了重要的依据。

1.2 黄土粒度被作为环境代用指标进行研究的现状

沉积物的粒度是沉积物的重要特征之一,因其测定简单快速、物理意义比较明确、对气候变化反映敏感等特点而倍受研究者青睐,被广泛应用于黄土沉积、河流沉积、湖泊沉积和海洋沉积研究中^[16]。研究表明,世界范围内的黄土大都分布于大沙漠盆地的下风方向,尤其是亚洲的黄土分布,其中大部分不是来

源于冰川沉积物,而是来源于其邻近的沙漠盆地^[17]。在欧洲的比利时以及南美的阿根廷也在空间上构成沙漠、沙质黄土、黄土的分布格局^[18,19]。我国西北的黄土带处于戈壁、沙漠的外围,构成所谓“孪生沉积关系”。孙继敏^[20]等研究了五十万年来毛乌素沙漠的变迁历史。风成砂是沙漠环境的标型沉积,是干旱多风气候的产物,黄土是第四纪沙漠或沙地外围的风成粉尘沉积,与风成砂同期异相,它一般出现在沙漠下风向的生草环境^[21]。刘东生等对我国黄河中游的 72 个马兰黄土样品的粒度分析表明,自西北向东南方向依次砂黄土带、黄土带、粘化黄土带,粒度逐渐变细^[1]。丁仲礼等对黄土高原中部的南北向大断面晚更新世黄土粒度系统分析后发现,沙漠的进退是控制黄土沉积中粒度变化尤其是砂粒含量变化的一个重要指标,并提出用风成沉积中砂粒百分含量的变化作为沙漠进退的一个代用指标,建立了砂粒含量与沙漠距离的数学模型^[22]。最新的研究表明,黄土高原的物质的主要来源区是蒙古国南部及其与之相邻的戈壁、沙漠地区,且主要由近地面风搬运而来,包括冰川研磨作用、山体剥蚀作用、山前冲洪积作用等在内的“高山作用”,才是产生大量粉砂级物质的原因,戈壁、沙漠、黄土的带状分布,是近地面风对山前冲、洪积物物质的风力分异而已^[23]。地形因素对现代沙尘暴的影响也很明显^[24]。孙东怀等人曾用 Weibull 分布作为黄土和河流沉积物的拟合函数,对多成因的沉积物的粒度分布进行了多组分的分离^[25]; Prins 等人

利用端元粒度模型从阿拉伯海的沉积物中分离出风尘和河流输入的相对贡献,并对黄土高原中部晚第四纪黄土采用端元粒度模型区分和量化了风化和未风化的黄土,也试图根据风化程度和原始的粒度来定量地重建降水和风力两个古气候指标^[26,27]。

粒度被广泛的应用于冬季风的替代性指标,指示东亚冬季风变迁的常用替代指标有中值粒径、平均粒径、 $>30\mu\text{m}$ 粗颗粒含量、 $>40\mu\text{m}$ 粗颗粒含量等^[13,14,28-31],肖举乐等曾提出用提纯石英颗粒的含量作为反映冬季风的代用指标^[11]。在以往的研究中,中值粒径是最常用的粒度指标,它反映了粒度组成的平均状况,但是,由于受到沉积后成壤等作用的影响,尤其是黄土高原中东部地区,影响更为明显,真正的古气候变化的信息可能得不到可靠的反映。鹿化煜等对黄土高原中部黄土粒度的古气候意义做过细致的研究工作,指出 $>30\mu\text{m}$ 粗颗粒百分含量是冬季风敏感的替代性指标^[13,14]。汪海斌等运用主成分和聚类分析方法对黄土高原西部两个剖面的粒度进行了分析,认为 $>40\mu\text{m}$ 粗颗粒含量是该区更为敏感的冬季风替代性指标^[31]。可见,黄土高原不同地区的粒度敏感指标可能不同。

1.3 存在问题

沉积物的粒度曲线和指标被广泛应用于物质运动方式的判定和沉积环境类型的识别,但也会遇到更多的问题。现在和地质历史时期的沉积物往往是多种物源或沉积动力过程的混合,沉积物搬运过程中新加入的物质可能会影响沉积物的粒度分布状况,而且对黄土高原西部黄土粒度的空间研究尚不多见。随着对古环境定量研究的深入,如何从沉积物粒度时空分布的研究和比较中提取敏感的环境替代指标,成为古环境研究的关键问题。

1.4 本研究的意义

六盘山以东典型的黄土—古土壤序列的沉积记录与深海沉积物氧同位素结果能很好对比,意味着中国风尘堆积与大陆冰量及全球气候变化之间存在着密切的内在联系,这一重要成果将中国黄土古气候研究推向了过去全球变化研究的前沿。六盘山以西、青藏高原东北部的广大地区,黄土—古土壤序列也分布广泛,但其物源、沉积条件和气候环境与六盘山以东典型的黄土高原地区有明显差异。而黄土高原西部位于我国东部季风区、西北内陆干旱区和青藏高原高寒区的过渡地带,是气候和环境变化复杂而敏感的地区,因而是研究晚新生代气候与环境变化的规律与机

制、各圈层环境变化耦合关系等地球科学问题的理想区域。

同一剖面的各粒度指标具有较好的相似性,但也存在差异,这主要是由于它们各自的含义不同,所表示的物理意义不同所致。我们沿着现代沙尘暴移动的主要路径之一,从腾格里沙漠南缘的沙坡头到秦岭北麓渭河上游的天水,选取了黄土高原西部的末次冰期沉积的黄土剖面,重点研究了从粉尘源区到沉积区黄土的粒度组成,比较了它们粒度的空间变化特征。南北向系粉尘搬运的主导风向,粉尘在下风向沉积,因而空间的变化实际上也指示了时间的演化。以往的研究者多从2~3个剖面的研究和比较中提取敏感的环境替代指标,这样在很大程度上,区域性的因素可能具有更大的影响,而从更大的空间、采用更多的剖面进行研究应该更有意义。

2 研究区概况与样品实验

2.1 研究区的自然地理概况

本文所研究的西部黄土高原是在第三纪陇中红色盆地的基础上,经第四纪黄土堆积所形成的。其地理坐标大体为 $102^{\circ}\sim 108^{\circ}\text{E}$, $34^{\circ}\sim 38^{\circ}\text{N}$,东以六盘山为界,西以祁连山向东延伸山脉乌鞘岭和达坂山等为界,北至腾格里沙漠南缘,南至西秦岭。该区是位于祁连断褶带与秦岭断褶带之间的过渡地区,宏观地貌表现为一些相互隔离的新生代断陷盆地和山间盆地。该地区在早第三纪已成盆地,但主要拗陷是发生在晚第三纪时期,当时整个盆地普遍堆积了巨厚的第三系甘肃群红层。第三纪末至第四纪初陇西盆地随青藏高原及周围山地一起上升。第四纪黄土在较为平整的甘肃群红层堆积面或阶地面上堆积,形成巨厚的黄土地层。天然剖面出露厚度可达300余米,有的地区甚至更厚。该区在地势上由南向北倾斜,海拔为1200~2000m,地貌以黄土梁塬、岭谷和河流谷地为主,沟壑纵横,坡陡沟密,地形破碎。该研究区属于温带半干旱气候区,在一定范围内表现了热量南北倒置的特征,年均温 $6\sim 10^{\circ}\text{C}$,干燥度 $1.5\sim 2.5$,年降水量自南向北由600mm减少到150mm,年降水变率高达40%左右。这些自然条件在植被分布上也有明显的反映,表现为由南部的典型草原向北部的荒漠过渡。

2.2 研究区的大气环流状况及其沙尘暴移动的路径

本区由于位于青藏高原东北缘,其大气环流与气候特征无不受青藏高原的影响。冬季青藏高原对大气环流的影响主要以动力作用为主,迫使行星西风

产生绕流,形成南北两支西风急流,而高原本身及其上空是个冷源,高原低空大气形成一个浅薄的冷高压,高原盛行西风;夏季高原主要表现为热力作用,高原主体为热低压占据。西风急流中的北支西风急流,在高原北侧向高原东南绕流,在祁连山中东段形成“兰州小高压”,这一小高压,阻挡了西风环流前进,使冬季风速减弱,其携带粉尘的能力降低,形成有利于粉尘物质沉降的环境,因而在兰州一带形成了中国最大的黄土沉积。

对现代沙尘暴路径的研究可以提供大量粉尘搬运和沉积的重要信息^[32,33]。我国北方的沙尘天气是与冷空气活动产生的大风相伴出现的,冷空气影响我国的路径主要有东路、中路(西北路)和西路三条,影响本研究区的路径主要有中路和西路。对于研究大范围的沙尘暴特征来说,卫星遥感是最有效的方法。我国科学家在利用气象卫星遥感沙尘暴源区及其移动路径方面已经开展了一些工作。邱新法等统计了

1971~1996年发生的影响范围较大的96次沙尘暴,发现入侵我国的沙尘暴天气过程的两条主要路径^[24]。另外,对广阔的腾格里沙漠的格状沙丘的分布表明,在腾格里沙漠地区,其主导风向为西北风,东北风次之^[34]。总之,对本研究区来说,沙尘的搬运方向应主要是偏北或西北—东南向。

2.3 研究区黄土样品采集与分析

在研究区共设样点24个(如图1),主要采集了末次冰期沉积的乌兰黄土,黄土样品的采集按照从下往上的顺序,采样间距为5cm或10cm。个别剖面采集了整个黄土—古土壤序列的样品。祖历河流域的会宁剖面、罗家湾剖面位于祖历河的二级阶地上。葫芦河流域的拓家坡剖面、周庄剖面、暖和湾剖面也分别位于河流的二级或三级阶地上。东线大断面的剖面点从腾格里沙漠南缘的沙坡头到西秦岭北麓天水市暖和湾,西线从沙漠南缘到兰州北部的秦王川盆地。

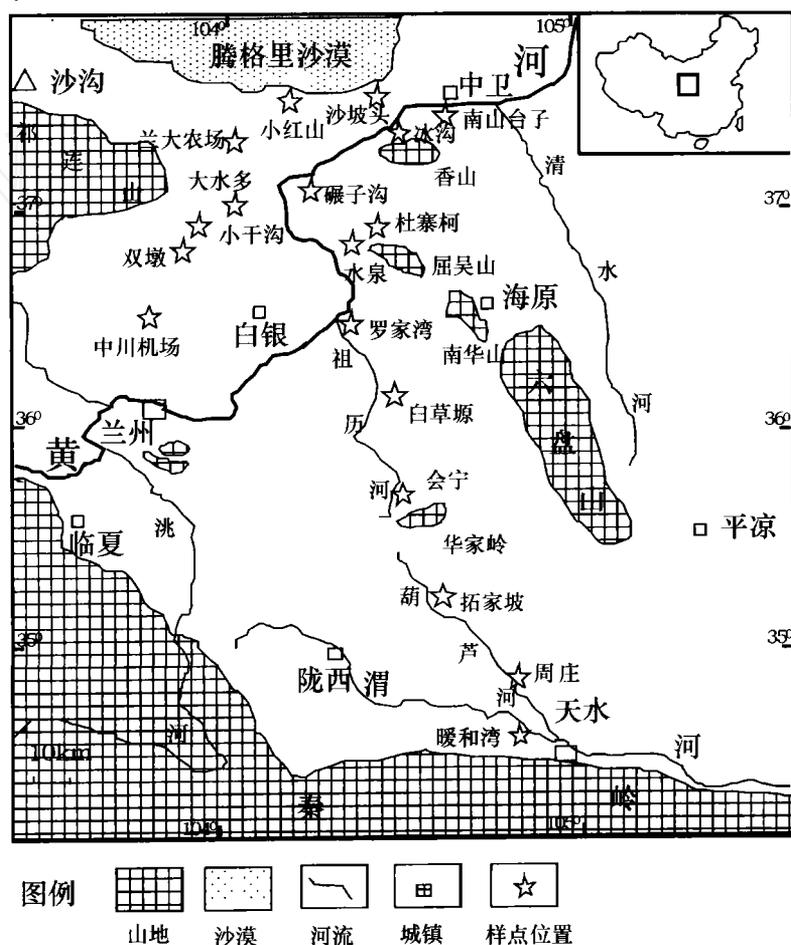


图1 陇西黄土高原采样点分布示意图

Fig 1 Schematic map showing distribution of sample sites at Longxi Plateau in China

粒度样品的测量是在兰州大学西部环境教育部重点实验室进行的。采用了较彻底的前处理方法^[35],经前处理后在 Mastersizer 2000 激光粒度仪上测量。对会宁剖面 1 300 cm 处的同一黄土样品的 15 次重复测试结果表明,其平均粒径 $D[4, 3]$ 的标准偏差为 0.605,相对标准偏差为 2.54%;其中值粒径的标准偏差为 0.469,相对标准偏差为 2.44%。重复测量的相对误差 <3%,说明样品的处理方法可行,粒度数据可靠。

3 分析结果与讨论

3.1 平均粒径、中值粒径、众数等的变化及其原因和指示意义

如何确定各剖面马兰黄土的层次和厚度是该研究的基础和前提,我们主要根据各剖面的粒度曲线、同时结合本区前人的研究剖面^[1,30]和根据沉积速率^[36]推算确定,个别剖面测量了色度和磁化率等辅助指标。

粒度数据的集中趋势主要由平均粒径、中值粒径和众数三个指标来表示。它们可以由激光粒度仪直接输出。平均粒径是所有粒度的平均值,过去主要是通过图解法或矩值法计算得出,也可以由仪器直接输出。中值粒径是 50% 累积含量的粒径。众数是含量最多的颗粒粒径。在激光粒度仪的输出结果中,结果为体积结果。如果沉积物的密度是恒定的,体积平均

也就是质量的平均。

为了比较的统一性,平均粒径采用微米单位。已有的研究表明,采用对数图解法获得的平均粒径与采用矩法得到的值,呈很好的线性相关,可以通用^[37]。但是,对平均粒径来说,按照矩法计算的平均粒径要比图解法公式计算^[16]的准确。因为矩法计算的平均粒径采用了所有粒级的数值,而公式计算只是采用了粗(₁₆)、中(₅₀)、细(₈₄)三个数值的平均。由于计算机技术的发展,用对数或双对数坐标作图已经变得非常简单, 粒径标准又不太符合人们的习惯,建议使用微米单位标准^[37]。

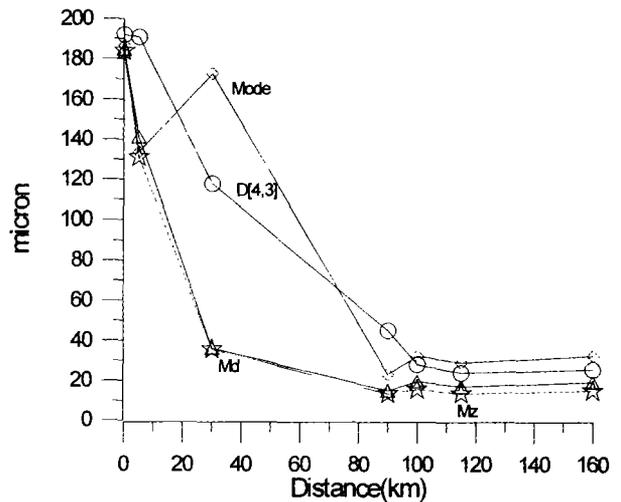


图 3 西线断面粒度的平均值与沙漠南缘距离的关系图
Fig 3 The grain size of L1 in the west transect and distance to the southern border of the Tengger Desert

从粒度的空间分布来看,一个总体的趋势是从北往南,粒度整体变细,这符合随着搬运距离的增大,平均粒径减小的规律。通过对平均粒径、中值粒径和众数的比较可以看出,平均粒径 Mz (图解法)、中值粒径 Md 、 $D[4, 3]$ 和众数 $Mode$ 的值依次增大,说明沉积物是正偏态。平均粒径、 $D[4, 3]$ 和中值粒径的变化极为相似,众数的变化稍大,而其变化趋势基本相似。对次峰非常小 ($2 \sim 6\mu m$) 的双峰分布来说,众数可能比平均粒径和中值更能反映粒度的变化。

但水泉和中川机场两个点比较特殊。这可能主要是由于搬运过程中新物质的加入和地形的影响。水泉平均粒径有所增大,这可能与局地因素有关,水泉(海拔高度 1 701 m)的西北方有水泉尖山(海拔 2 280 m),其东南是黄家洼山(海拔 2 665 m),而且水泉剖面位于一小盆地的南缘,从西北方向来的气流受

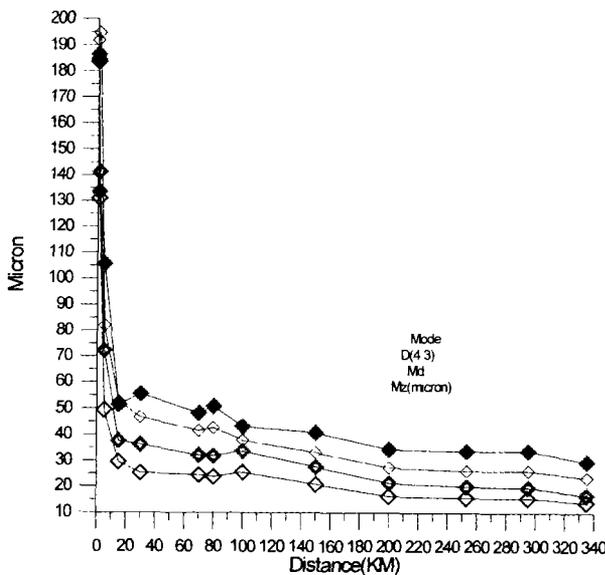


图 2 东线大断面粒度的平均值与沙漠南缘距离的关系图
Fig 2 The grain size of L1 in the east transect and distance of the study sites to the southern border of the Tengger Desert

到盆地南侧丘陵的阻挡,使其沉积了较粗的颗粒;对西线来说,一个明显的现象是,中川机场剖面细颗粒物没有明显增多,而粗颗粒含量明显增加。这主要是由于中川机场剖面位于秦王川盆地的南部,秦王川盆地面积约 350 km^2 ,地表堆积了丰富的第四纪松散堆积物,降水稀少(目前年降水量 285 mm),蒸散量大,可提供丰富的沙源。同时,对兰大农场—双墩 4 个剖面砂的含量与沙漠南缘距离的相关分析,它们呈明显的线性相关。东线的粒度平均值呈现较好的相似性,且 $\text{Mode} > D[4, 3] > M_d > M_z$,显示粒度分布的较好的相似性,从每个样品的粒度频率曲线也可以看所有的粒度分布呈双峰分布,且主峰的较大,而次峰的众数较小。在西线则规律性不强,这是由粒度分布差异所致。兰大农场剖面黄土的粒度频率曲线与其它的粒度分布差异较大,其双峰分布的主峰和次峰非常接近,且都较大。这可能是来自不同方向的多个物源所致。

3.2 粒级百分含量的变化及其原因和指示意义

在东线大断面黄土粒度的空间分布中,大于某一组分的百分含量具有很好的相似性,但其幅度有所不同,随着粒级的增大,其变幅变大。这说明在邻近沙漠区 ($15 \sim 20 \text{ km}$) 范围内,更粗的粒级更为敏感。在较远的地区 (大于 20 km), $> 63 \mu\text{m}$ 的百分含量,更为敏感。因为更粗的粒级如 $> 80 \mu\text{m}$ 、 $> 128 \mu\text{m}$ 的百分含量因在沉积物中的值太低而失去意义。

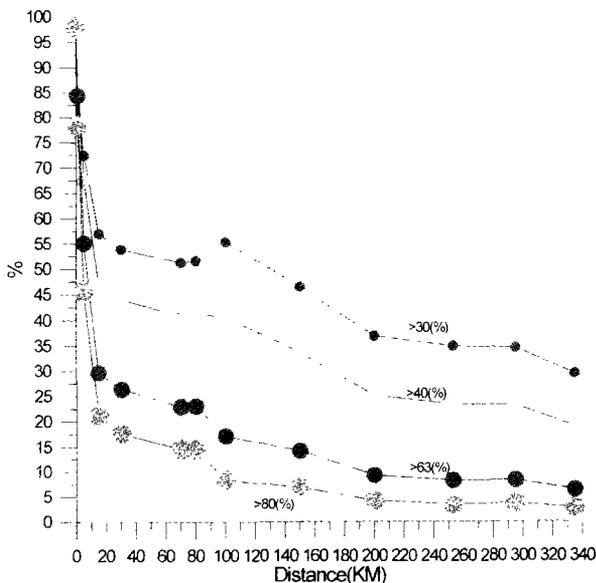


图 4 东线大断面各粒级含量与沙漠南缘距离变化图

Fig 4 The grain size fraction and distance of the study sites to the southern border of the desert

断面中砂 ($> 63 \mu\text{m}$) 的百分含量在该方向上明显递减,而粉砂的含量逐渐增加,粘粒的含量有增加的趋势,然后在四个剖面中粘粒的含量就稳定在 $8 \sim 8\%$ 左右。这说明随着距源区距离的增大,砂的百分含量逐渐减少。但减少的幅度是不同的。通过对上图的分析可以看出,距现代沙漠 15 km 处是一个转折点,该点砂粒的百分含量约为 30% ,与丁仲礼等^[22]所做的榆林—渭南大断面的转折点 20% 不同。上段和下段都呈较好的线性相关,上段从沙漠南部的 98% 迅速下降到 15 km 的 30% ,上段尽管只有四个点,但也呈较好的线性相关。其相关方程为: $Y = -4.2445X + 89.068$ ($Y > 30\%$, $R^2 = 0.9072$)。其中 X 代表样点与沙漠南界的距离, Y 表示样品中砂粒的百分含量。从会宁剖面开始,递减的趋势变得和缓,会宁、拓家坡和周庄三个点的值非常接近。其中冰沟—会宁段 (7 个点) 的相关方程为: $Y = -0.1048X + 30.333$ ($30\% < Y < 40\%$, $R^2 = 0.9697$)。说明随着源区距离的增大,砂的百分含量呈线性递减的趋势。当然,相关方程的有效性还有待于在实际中进一步的检验。

我们分别以冰沟—天水 (10 个点)、冰沟—会宁 (7 个点) 分别作了各个指标与距离的线性相关,分别求出各条趋势线的斜率,斜率越大说明变化越大,指标越敏感。其敏感程度从大到小分别是,冰沟—天水: $> 40 \mu\text{m}$ (%)、 $> 30 \mu\text{m}$ (%)、 $D[4, 3]$ 、 Mode 、 $> 63 \mu\text{m}$ 、 M_d 、 $> 80 \mu\text{m}$ (%)、 M_z (μm); 冰沟—会宁: $D[4, 3]$ 、 $> 40 \mu\text{m}$ (%)、 $> 63 \mu\text{m}$ 、 Mode 、 $> 30 \mu\text{m}$ (%)、 $> 80 \mu\text{m}$ (%)、 M_d 、 M_z (μm); 冰沟—会宁一段,在距离沙漠南缘 200 km 范围内,且主要位于华家岭以北的靖远盆地和会宁盆地内,其物源区和沉积环境更为接近,认为其指标可能更为可信。而且 $D[4, 3]$ 、 $> 40 \mu\text{m}$ (%)、 $> 63 \mu\text{m}$ 、 Mode 等值的趋势比较相似。

4 结论

粒度是被广泛应用的沉积物基本的描述量度,但不同的标准、不同的仪器、不同的方法又会得出不同的数值。粒度是受控于源区距离、搬运动力、风化成壤、沉积后作用、沉积环境等因素的函数。许多沉积物实际上是两种或者多种不同成因的粒度组合,这些混合物也许是反映不同环境沉积物的混合,而更可能是反映了不同的物理作用。

通过以上的分析,我们可以得出以下结论:

(1) 粒度的空间分析表明,表示平均趋势的平均

粒径、中值粒径、众数和粒级百分含量具有较好的相似性,随着距源区距离的增大,颗粒逐渐变细。异常的变化多是由于局地因素所致。

(2) 粒度的空间分析表明,在黄土高原西部,粒度指标的敏感性依次是 $D[4, 3]$ 、 $>40 \mu\text{m}(\%)$ 、 $>63 \mu\text{m}$ 、 Mode 、 $>30 \mu\text{m}(\%)$ 、 $>80 \mu\text{m}(\%)$ 、 Md 。其中 $D[4, 3]$ 、 $>40 \mu\text{m}(\%)$ 、 $>63 \mu\text{m}$ 非常接近。建议使用 $D[4, 3]$ 粒度指标。

(3) 黄土高原西部马兰黄土中砂的含量距现代沙漠南缘 15~200 km 范围内,呈线性递减,往南则基本稳定,但未降到 0,与黄土高原中部不同。

本文在研究分析中所采用的是马兰黄土的平均值,而马兰黄土的上、中、下部的粒度差异是很大的,不同深度的差别也很明显,简单的平均可能掩盖了许多重要的信息。但是,我们认为平均值在大尺度区域范围内具有重要的意义。当然,在提取粒度敏感指标时,需要明确的前提是指标之间的偏差至少应大于实验的误差。

粒度曲线和指标对于识别沉积环境是有意义的,但是同时是有局限的。粒度指标应用于古环境中,会遇到更多问题,沉积物的源区以及搬运过程中新加入的物质可能影响了沉积环境的动力分布状况,特别是缺少有关沉积物的来源及其附近情况的资料,使分析变得更为困难。因此,科学的方法是应与其他指标如沉积构造、地球化学等结合使用,才会取得更好的结果。

参考文献 (References)

- 刘东生. 黄土与环境. 北京: 科学出版社, 1985. 1~412 [Liu Dongsheng. Loess and Environment. Beijing: Science Press, 1985. 1~412]
- An Z S, Kutzbach J E, Prell W, Porter S C. Evolution of Asian monsoons and phased uplift of the Himalaya - Tibetan plateau since Late Miocene times. *Nature*, 2001, 411: 62~66
- 岳乐平, 杨利荣, 李智佩, 等. 西北地区干枯湖床沉积粒度组成与东亚沙尘天气. *沉积学报*, 2004, 22(2): 325~331 [Yue Leping, Yang Lirong, Li Zhipei, et al. Grain-size distribution of the sediments of dry lake bed in the northwest of China and sand dust weather in East Asia. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2004, 22(2): 325~331]
- Pan B T, Burbank D, Wang Y X, et al. A 900 k y record of strath terrace formation during glacial-interglacial transitions in northwest China. *Geology*, 2003, 30(11): 957~960
- 鹿化煜, 安芷生. 黄土高原红粘土与黄土古土壤粒度特征对比—红粘土风成成因的新证据. *沉积学报*, 1999, 17(2): 226~232 [Lu Huayu, An Zhisheng. Comparison of grain-size distribution of red clay and loess-paleosol deposits in Chinese Loess Plateau. *Acta Sedimentologica Sinica*, 1999, 17(2): 226~232]
- Rea D K, Snoeckx H, Joseph L H. Late Cenozoic eolian deposition in the North Pacific: Asian drying, Tibetan uplift, and cooling of the northern hemisphere. *Paleoceanography*, 1998, 13(3): 215~224
- Guo Z T, Ruddiman W F, Hao Q Z, et al. Onset of Asian desertification by 22 Myr ago inferred from loess deposits in China. *Nature*, 2002, 416(14): 159~163
- Chen J, An Z, Head J. Variation of Rb/Sr ratios in the loess-paleosol sequences of Central China during the last 130,000 years and their implications for monsoon paleoclimatology. *Quaternary Research*, 1999, 51: 215~219
- 马锋, 刘立, 王安平, 等. 图门江下游沙丘粒度分布与石英表面结构研究. *沉积学报*, 2004, 22(2): 261~266 [Ma Feng, Liu Li, Wang Anping, et al. The character of grain size analysis and quartz surface texture of sand dunes in the down river of Tumen River. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2004, 22(2): 261~266]
- Zhou L P, Oldfield F, Wintle A G, et al. Partly pedogenic origin of magnetic variations in Chinese loess. *Nature*, 1990, 346: 1~3
- Xiao J L, Porter S C, An Z S, et al. Grain size of quartz as an indicator of winter monsoon strength on the Loess Plateau of central China during the last 130,000 yr. *Quaternary Research*, 1995, 43: 22~29
- Ding Z L, Yu Z W, Rutter N W, Liu T S. Towards an orbital timescale for Chinese loess deposits. *Quaternary Science Reviews*, 1994, 13: 39~57
- 鹿化煜, 安芷生. 洛川黄土粒度组成的古气候意义. *科学通报*, 1997, 42(1): 66~69 [Lu Huayu, An Zhisheng. Paleoclimatic significance of grain size of Luochuan Loess deposit in Chinese Loess Plateau. *Chinese Science Bulletin*, 1997, 42(1): 66~69]
- 鹿化煜, 安芷生. 黄土高原黄土粒度组成的古气候意义. *中国科学 (D辑)*, 1998, 28(3): 278~283 [Lu Huayu, An Zhisheng. Paleoclimatic significance of grain size of loess-paleosol deposit in Chinese Loess Plateau. *Science in China (Series D)*, 1998, 28(3): 278~283]
- 赵景波. 黄土的本质与形成模式. *沉积学报*, 2003, 21(2): 198~204 [Zhao Jingbo. The essence and formation model of the loess. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2003, 21(2): 198~204]
- 成都地质学院陕北队. 沉积岩(物)粒度分析及其应用. 北京: 地质出版社, 1976. 90~100 [The Geology Team of Chengdu College of Geology. Application Analysis of Grain Size. Beijing: Geology Publishing House, 1976. 90~100]
- Flint R F. *Glacial Geology and the Pleistocene Epoch*. 1955. 175~187
- Pye K. *Aeolian Dust and Dust Deposits*. Academic Press, 1987. 68
- Zarate M, B lasi A. Late Pleistocene-Holocene Eolian Deposits of the Southern Buenos Aires Province, Argentina: A preliminary model. *Quaternary International*, 1993, 17: 15~20
- 孙继敏, 刘东生, 丁仲礼, 等. 五十万年来毛乌素沙漠的变迁. 第四纪研究, 1996, (4): 359~365 [Sun Jimin, Liu Tungsheng, Ding Zhongli, et al. The Mu Us desert evolution in the last 0.5 Ma. *Quaternary Sciences*, 1996, (4): 359~365]
- 靳鹤龄, 董光荣, 苏志珠, 等. 全新世沙漠—黄土边界带空间格局的重建. *科学通报*, 2001, 46(7): 538~543 [Jin Heling, Dong Guangrong, Su Zhizhu, et al. Rebuilding of space structure in desert-loess boundary belt on the Holocene. *Chinese Science Bulletin*, 2001, 46(7): 538~543]
- 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*, 1999, 29(1): 82~87 [Ding Zhongli, Sun Jimin, Liu Tungsheng. Sediment index of coupling relation during contacting desert-loess evolution. *Science in China*, 1999, 29(1): 82~87]
- 孙继敏. 中国黄土的物质来源及其粉尘产生的机制与搬运过程. 第四纪研究, 2004, 24(2): 175~183 [Sun Jimin. Provenance,

- forming mechanism and transport of loess in China. *Quaternary Research*, 2004, 24 (2): 175 ~ 183]
- 24 邱新法, 曾燕, 繆启龙. 我国沙尘暴的时空分布规律及其源地和移动路径. *地理学报*, 2001, 56 (3): 316 ~ 322 [Qiu Xinfu, Zeng Yan, Miao Qilong. Temporal-spatial distribution as well as tracks and sources areas of sand - dust storms in China. *Acta Geographica Sinica*, 2001, 56 (3): 316 ~ 322]
- 25 孙东怀, 鹿化煜, David Red, 等. 中国黄土粒度双峰分布及古气候意义. *沉积学报*, 2000, 18 (3): 327 ~ 335 [Sun Donghuai, Lu Huayu, David Red, *et al*. Bimode grain-size distribution of Loess and its paleoclimate implication. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2000, 18 (3): 327 ~ 335]
- 26 Prins M A, Posma G, Weltje G. Controls on the terrigenous sediment supply to the Arabian Sea during the late Quaternary: The Markran continental slope. *Marine Geology*, 2000, 169: 351 ~ 371
- 27 Prins A, Vandenberghe J, Weltje, G J. Palaeoclimate signals in loess size distributions. *Int Workshop HWK DeMenhorst 15-18 April 2004, From Particle Size to Sediment Dynamics* 123 ~ 125
- 28 张小曳. 亚洲粉尘的源区分布、释放、输送、沉降与黄土堆积. *第四纪研究*, 2001, 21 (1): 29 ~ 40 [Zhang Xiaoye. Source distributions, emission, transport, deposition of Asian dust and loess accumulation. *Quaternary Sciences*, 2001, 21 (1): 29 ~ 40]
- 29 Chen F H, Benendal L, Feng Z D, *et al*. East Asian monsoon variations during oxygen isotope stage 5: evidence from the northwestern margin of the Chinese loess plateau. *Quaternary Science Review*, 1999, 18: 1127 ~ 1135
- 30 Ding Z L, Derbyshire E, Yang S L, *et al*. Stacked 2.6 Ma grain size record from the Chinese loess based on five sections and correlation with the deep-sea ^{18}O record. *Paleoceanography*, 2002, 17 (3): 725 ~ 756
- 31 汪海斌, 陈发虎, 张家武. 黄土高原西部地区黄土粒度的环境指示意义. *中国沙漠*, 2002, 22 (1): 21 ~ 26 [Wang Haibin, Chen Fahu, Zhang Jiawu. Environmental significance of grain size of loess-paleosol sequence in western part of Chinese Loess Plateau. *Journal of Desert Research*, 2002, 22 (1): 21 ~ 26]
- 32 张德二, 陆风. 我国北方的冬季沙尘暴. *第四纪研究*, 1999, (5): 441 ~ 447 [Zhang De'er, Lu Feng. Winter sandstorm events in extensive Northern China. *Quaternary Sciences*, 1999, (5): 441 ~ 447]
- 33 王式功, 王金艳. 中国沙尘天气的区域特征. *地理学报*, 2003, 58 (2): 193 ~ 200 [Wang Shigong, Wang Jinyan. Regional characteristics of dust events in China. *Acta Geographica Sinica*, 2003, 58 (2): 193 ~ 200]
- 34 哈斯, 王贵勇, 董光荣. 沙丘背风侧气流及其沉积类型与意义. *沉积学报*, 2001, 19 (1): 96 ~ 100 [Ha Si, Wang Guiyong, Dong Guangrong. Lee-face airflow, depositional types and its significance. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2001, 19 (1): 96 ~ 100]
- 35 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 (23): 2535 ~ 2538 [Lu Huayu, An Zhisheng. Pretreatment methods influences on grain size measurement of loess. *Chinese Science Bulletin*, 1997, 42 (23): 2535 ~ 2538]
- 36 Kohfeld K E, Harrison S P. Glacial-interglacial changes in dust deposition on the Chinese Loess Plateau. *Quaternary Science Reviews*, 2003, 22 (3): 1859 ~ 1878
- 37 Blott S, Pye K. Gradstat: grain size distribution and statistics package for the analysis of unconsolidated sediments. *Earth Surfaces and Landforms*, 2001, 26: 1237 ~ 1248

Environmental Significance and Characteristics of Grain Size of the Loess in Longxi Basin during the Last Glacial Period

XU Shu-jian^{1,2} PAN Bao-tian¹ LI Qiong¹ GAO Hong-shan¹
Wang Jun-ping¹ HU Chun-sheng¹

1 (College of Resource and Environmental Science, Lanzhou University MOE Key Laboratory of Western China's Environmental Systems, Lanzhou 730000) 2 (College of Geography and Tourism, Linyi Teachers University, Linyi Shandong 276005)

Abstract Chinese loess-paleosol sequence has provided the most detailed terrestrial records of climate changes in Quaternary. The aeolian sand and dust has been taken as an important proxy of expansion and contraction of the desert during geological period. The signals of the desert evolution were well preserved in the aeolian deposits on the margin of the desert, which are effective to reconstruct the desert expansion and contraction. According to the dominant wind direction, generally NW-SE, we systematically studies 24 sections of Malan loess in the west of Chinese Loess Plateau during the Last Glacial period. Detailed granular analyses show the properties of temporal and spatial of the Malan loess, and reducing of the percentage of the sand from northwest to southeast. Our study indicates that the proxies such as $D_{[4, 3]}$, the fraction $>40\mu\text{m}$ (%), the fraction $>63\mu\text{m}$ (%), and the Mode are more sensitive than any other proxy. A new linear correlation model of sand percentage and distance are established, which shows different pattern to the east of the Chinese Loess Plateau.

Key words aeolian dust, character of grain size, loess, sand, Longxi Basin