

文章编号: 1000-0550(2009) 02-0343-09

中国北方部分地区黄土、沙漠沙、湖泊、河流细粒沉积物粒度多组分分布特征研究¹

殷志强^{1,2} 秦小光¹ 吴金水³ 宁波¹

(中国科学院地质与地球物理研究所 北京 100029; 2 中国地质环境监测院 北京 100084; 3 海南省海洋地质调查局 海口 570206)

摘要 通过对我国北方部分地区的黄土、沙漠沙、湖泊、河流细粒沉积物的粒度多组分分布特征系统研究后总结了其粒度分布特征及组分间差异,并提出了风成、水成沉积物成因类型的判别依据。认为: 1) 细粒沉积物粒度一般由多个组分叠加构成,表现为多组分粒度分布特征。2) 黄土粉尘粒径以 $< 70 \mu\text{m}$ 的悬浮颗粒为主,粒度由粗、中、细三个组分构成。粗粒组分含量最高,其中值粒径与源区距离呈负相关,中粒组分百分含量与源区距离呈正相关。3) 沙漠沙粒度由一个极其明显的粗粒跳跃组分构成,中值粒径一般位于 $100 \sim 300 \mu\text{m}$,分选性极好。4) 湖泊沉积物粒度分布最多可有 6 个组分(中值粒径: $< 1 \mu\text{m}$, $2 \sim 10 \mu\text{m}$, $10 \sim 70 \mu\text{m}$, $70 \sim 150 \mu\text{m}$, $150 \sim 700 \mu\text{m}$, $> 700 \mu\text{m}$),前 4 个组分属悬浮组分, $\frac{1}{2}$ 为跳跃组分, $\frac{3}{4}$ 为滚动组分,分选性差。5) 河流沉积物粒度分布曲线较复杂,其分布特征蕴含了水动力强弱信息。6) 沙漠沙、黄土与河流沙、湖泊沉积物其优势组分的粒径均逐渐变细,但水成相对应组分比风成组分粒径要粗。

关键词 黄土 沙漠沙 湖泊 河流 粒度特征 多组分分布

第一作者简介 殷志强 男 1980 年出生 硕士 第四纪地质学 E-mail yinzq@mail.cigem.gov.cn

中图分类号 P512.2 **文献标识码** A

粒度是沉积物古环境指标之一,因其测定简单、快速、物理意义明确、对气候变化敏感等特点近年来被广泛应用于各种沉积环境研究中^[1-9]。沉积物粒度研究发现,当搬运介质和搬运方式一定,并且介质动力大小稳定时,它所搬运的沉积物粒度总体是一个单因子控制的单组分分布^[10]。但自然界大多沉积物均受一种或几种不同的搬运方式、动力类型控制,因而产生了多组分、多模态粒度分布特征,在频率曲线上表现为多峰光滑曲线^[11]。

黄土粒度被广泛应用于冬季风的替代性指标,指示东亚冬季风变迁^[12-14];沙漠沙粒度用来反映研究区气候的干湿变化、风力状况、沉积环境等信息^[15-16];湖泊沉积物粒度组成及特点可以反映沉积时的降水、水动力搬运强度以及湖面水位高低变化等信息^[17-24];河流沉积物的粒度曲线特征复杂,波动范围大,粒度特征反映了河流的水动力环境等信息^[25-26]。近年来,随着测试技术的进步,研究人员对沉积物粒度的多组分(多模态)特征进行了更细致的研究。如用 Weibull 分布函数作为黄土沉积物的拟合函数,对其粒度进行了多组分分离^[27];风成成因的黄土主要由大气中的悬浮颗粒构成,其存在粗、中、细

三个组分等^[11,28]。上述研究主要从沉积物粒度级别分类、百分含量组成、参数统计等角度来反映物源、沉积环境及沉积介质能量等信息,实验手段多采用半自动、自动化粒度分析仪。近年来研究人员虽采用高精度的激光粒度仪来获取数据,但大多只是利用了其中的部分粒度信息(如中值粒径或粒级比值等),显然充分利用各个粒级测量数据的信息对于准确区分不同的沉积环境类型具有更大意义。前人的工作为细粒沉积物粒度研究奠定了坚实的基础,但不同细粒沉积物粒度分布特征以及其悬浮、跳跃、滚动组分的粒级范围划分等问题仍悬而未决,而这对古环境研究具有重要意义。笔者利用高分辨率激光粒度仪 MS200Q 采用图示与对数正态分布函数拟合相结合的分析方法,对大量的细粒沉积物进行了粒度测试分析,研究了不同类型细粒沉积物的多组分粒度分布特征及其组分间差异,并以此建立不同沉积环境类型的粒度识别标志,为区分未知沉积环境提供参考依据。

1 样品和方法

1.1 样品

样品采自我国北方晚全新世的剖面 and 表土,且能

¹ 国家自然科学基金项目(批准号: 40802089 和 40024202)资助。
收稿日期: 2008-01-15 收修改稿日期: 2008-07-14

准确确定其沉积环境。其中黄土样品主要采自黄土高原地区的黄土剖面顶部(间隔 5 cm 取样)和表土样,并以我国陕西渭南、北京灵山以及中原邙山全新世黄土为主要研究对象,此外还有西峰、张家口等地,共取样品 237 个;沙漠沙样品主要采自毛乌素沙地南缘以及东北的科尔沁沙地、松嫩沙地、呼伦贝尔沙地、东北平原等沙地的典型沙漠沙现代层样品,共取样

品 71 个;湖泊样品以张家口安固里淖为主要研究对象,样品由湖滨向湖心依次等间隔取水下表层湖泥样,此外还有巴彦查干湖、达里湖等地样品,共取样品 131 个;河流样品取自部分现代河流(长江、黄河、三台河等)河漫滩及水下泥沙样品,共取样品 47 个。各类样品数累计 486 个。采样点分布图见图 1,样品点详细描述见表 1。

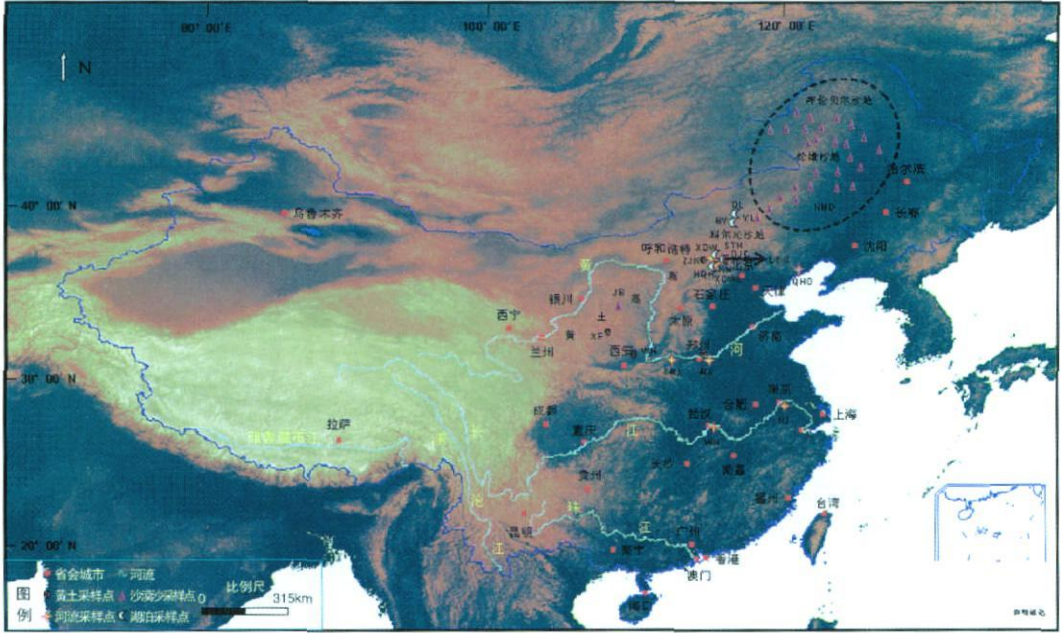


图 1 细粒沉积物粒度采样点分布图

Fig 1 Location of fine-grain sediments sampling sites

表 1 采样点描述

Table 1 Description of sampling sites

样品号	采样地点	经度	纬度	描述	采样数 / 个
WN	渭南	109°29'	34°20'	全新世剖面	39
MS	邙山	113°22'	34°56'	全新世表土样	13
LS-II	灵山	115°30'	40°03'	全新世剖面	37
XF	西峰	107°40'	35°45'	全新世剖面	19
ZK	张家口	114°48'	40°52'	全新世剖面(多个剖面)	129
JB	靖边	109°19'	38°01'	毛乌素沙地流动沙丘表层样	5
NMD	内蒙东部	118°04' ~ 122°41'	45°08' ~ 49°19'	科尔沁、松嫩、呼伦贝尔等地流动沙丘表层沙漠沙样	54
YL	通辽	121°52'	43°21'	科尔沁固定沙丘表层沙漠沙样	12
XDW	安固里淖刑地湾	114°20'	41°21'	湖滨向湖心依次取样	7
DJC	安固里淖度假村	114°21'	41°19'	湖滨向湖心依次取样	14
HQH	黄旗海	113°12'	40°51'	湖滨样	6
KN	安固里淖张楷年村	114°21'	41°19'	湖边表土样品	3
DL	达里湖	116°56'	43°30'	湖泊钻孔样	8
BY	巴彦查干湖	115°21'	41°65'	湖泊钻孔样	90
XDWL	安固里淖刑地湾西	114°21'	41°21'	湖滨样	3
STH	安固里淖三台河	114°24'	41°18'	河道、河口及附近湖滨样	13
WH	武汉	116°14'	32°28'	长江河沙样	7
SMX	三门峡	111°20'	34°50'	河流及河漫滩样	5
MS	邙山	113°21'	34°58'	黄河河漫滩样	5
NJ	南京	118°46'	32°07'	长江河沙样	3
QHD	秦皇岛	119°57'	39°54'	大石河等河流样品	14

1.2 粒度测试与组分分离方法

粒度分析在中国科学院地质与地球物理研究所粒度分析实验室完成。前处理采用了较彻底的前处理方法^[29,30], 然后用 Mastersiz2000 型激光粒度仪测试。该仪器测量范围是 0.02~2000 μm, 优点为测试精度高(误差 < 1%), 所需样品量少, 数据连续、可靠、间隔划分细, 能够全面分析粒度的细微特征, 对测试数据进行整理和分析后可绘制出每一粒度组分的百分含量图、频率曲线图、粒度众数分布曲线图等。

沉积物粒度组分分布特征曲线中每一组分均属于对数正态分布类型^[28,31]。因此笔者采用了正态分布函数对样品各组分进行了数学分离。用设定的分布函数对实测数据以各粒级的粒径为自变量, 以该粒级的百分含量为分布函数值, 以拟合权重残差最小为目标对样品进行了粒度频率曲线拟合, 拟合误差均控制在 3% 以内(文章以湖相样品为例, 见图 2。其他样品拟合方法与湖相样品相同, 图从略)。并计算了样品中每个组分粒径的平均值、标准差、百分含量等粒度参数, 从而将混合样品的各组分完全分离出来。对于多个组分组成的对数正态分布函数, 其分布函数应为:

$$F(\lg x) = \sum_{i=1}^n C_i \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_i} e^{-\frac{(\lg x - \lg \alpha_i)^2}{2\sigma_i^2}} \quad (1)$$

公式(1)中 α_i 和 σ_i 分别为样品第 i 组分粒径的平均值和标准差, C_i 为第 i 组分百分含量占全样品的百分比。

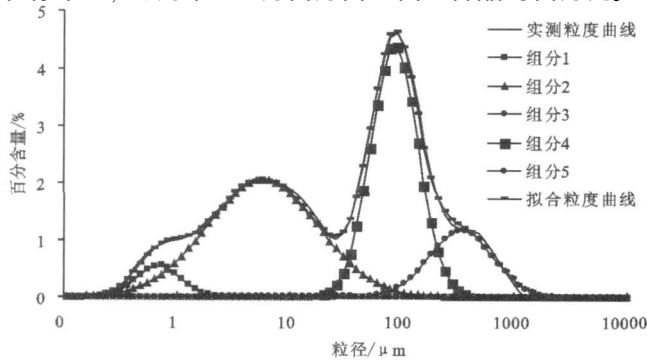


图 2 粒度对数正态分布拟合图

Fig. 2 Logarithm normal distribution fitting of grain size

2 细粒沉积物粒度多组分特征

文章主要就黄土、沙漠沙、湖泊和河流等细粒沉积物的粒度多组分分布特征进行分析、研究。黄土粉尘按源区距离分为远源、近源及源区距离过渡三种类型, 沙漠沙按固定程度分为固定沙丘、半固定沙丘和流动沙丘三种类型, 湖泊沉积物按粒度分布特征分为湖滨相、湖心相以及过渡相三种类型; 河流沉积物因

受水动力条件控制显著, 曲线类型复杂, 这里总结其中的四种类型。

通过对上述多种典型细粒沉积物样品粒度数据统计分析, 笔者发现沉积物粒度分布曲线最多可有 6 个组分(Mode) (图 3), 从左至右依次定义为 1°、¼、½、¾, 命名为第 1 组分、第 ¼ 组分...、第 ¾ 组分, 表示为 1M、¼M...¾M, 其中值粒径范围分别为 < 1 μm, 2~10 μm, 10~70 μm, 70~150 μm, 150~700 μm 和 > 700 μm。

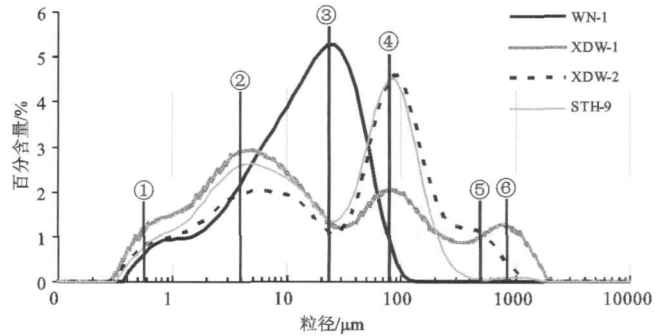


图 3 细粒沉积物粒度组分划分

Fig. 3 The multimodal partition of fine-grain sediments

2.1 黄土

黄土采样点位置分布见图 1, 样品均采自晚全新世黄土剖面的顶部。渭南(WN)位于黄土高原的南部, 粉尘主要来源于毛乌素沙地、腾格里沙漠、巴丹吉林沙地等西北戈壁沙地^[32], 属于远源黄土类型; 邙山(MS)位于河南省郑州市西北黄河南岸, 地处黄土高原与华北平原过渡带上, 该地黄土紧邻黄河岸边, 是黄河河滩冲积物经风力低空搬运近距离沉积^[33], 属于近源黄土类型。灵山(LS-II)黄土物源主要是阴山以北的内蒙古苏尼特右旗—二连浩特荒漠戈壁等地^[11], 源区距离介于 WN 和 MS 之间。三地黄土粒度分布特征见图 4

总体分析, 黄土粉尘粒度属于悬浮组分范围, 不同地区粒度频率分布曲线特征有明显差异。其中第 ¼ 组分是含量最多的组分。

WN 粒度分布特征(图 4-a): 粗粒组分中值粒径为 20~30 μm, 明显偏细; 中粒组分百分含量很高, 形态很显著。

LS-II 粒度分布特征(图 4-b): 粗粒组分中值粒径为 40~50 μm, 较 WN 明显偏粗但较 MS 又偏细, 中粒组分百分含量明显较黄土-1 偏低。

MS 粒度分布特征(图 4-c): 粗粒组分中值粒径为 50~70 μm, 粉尘粒径均很粗, 中粒组分百分含量

较 WN、LS-II 为三者中最低。

因西峰、张家口等地全新世黄土粒度分布特征为上述三者之一或组分粒径介于三者之间(属于过渡类型),讨论从略。从 MS 到 WN,随着黄土粉尘源区距离逐渐增加,粗粒组分中值粒径减小(从 70 μm 减小到 20 μm)含量减少,而中粒组分百分含量明显增加。因黄土粉尘受搬运距离与颗粒重力沉降的影响,可通过粗粒组分和中粒组分的中值粒径和百分含量的高低变化推知其源区距离的相对远近关系,离源区越远,黄土粉尘粒度越细,反之越粗。因此,由图 4a 能够判别出黄土粒度组分间的差异,粒径变化范围以及相对源区距离等信息。

2.2 沙漠沙

沙漠沙样品粒度分布特征见图 4 其以一个极其明显的粗粒单峰组分为特点,峰窄,分选性极好,属于跳跃组分范围。优势组分(第 1/2 组分)中值粒径一般位于 100~300 μm(各地沙漠沙粒度受风力强弱影响而差异较大),多以众数粒径为轴对称呈对数正态分布。沙漠沙被固定后,随着后来地表植被对大气粉尘颗粒吸附作用的增强,吸附越多,悬浮组分含量越多。因此细粒悬浮组分百分含量由少到多,暗示沙漠沙固定程度不断加强。根据沙漠沙悬浮组分的百分含量高低变化以及跳跃组分中值粒径的范围等可将其粒度频率分布曲线分为 3 种类型:

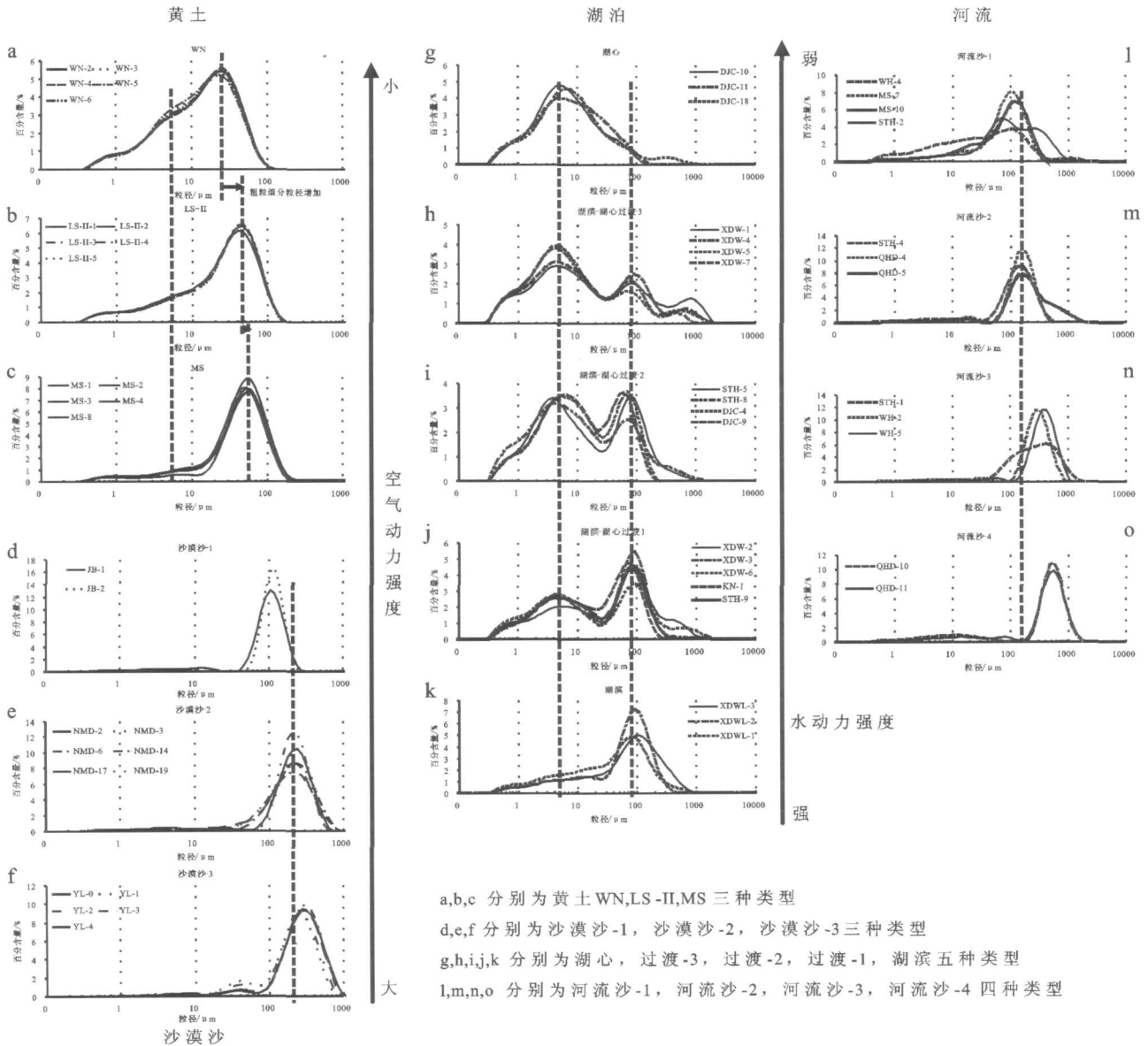


图 4 黄土、沙漠沙、湖泊、河流样品粒度分布图

Fig 4 Grain size distributions of loess, desert sand, lake and river samples

a,b,c 分别为黄土 WN,LS-II,MS 三种类型
d,e,f 分别为沙漠沙-1, 沙漠沙-2, 沙漠沙-3 三种类型
g,h,i,j,k 分别为湖心, 过渡-3, 过渡-2, 过渡-1, 湖滨五种类型
l,m,n,o 分别为河流沙-1, 河流沙-2, 河流沙-3, 河流沙-4 四种类型

沙漠沙-iv 代表性样品采自毛乌素沙漠南缘, 这里位于沙漠沙源区与黄土过渡带, 为流动沙丘。粒度主要由跃移组分与极少量悬浮组分构成。优势组分中值粒径相对其它类型偏细, 为 $100 \sim 150 \mu\text{m}$, 百分含量占 93% 以上, 粒度区间窄, 轴对称分布, 分选极好(图 4-d)。细粒端有一个百分含量很低 ($< 7\%$) 的成分, 其中值粒径约为 $2 \sim 6 \mu\text{m}$ 。而毛乌素沙漠内部沙漠沙粒度中值粒径范围为 $100 \sim 200 \mu\text{m}$ ^[23], 比该地样品粒度要粗。与黄土相比, 该地沙漠沙粒度又明显粗于黄土, 显然与因沙漠边缘过渡带的风力介于沙漠腹地与黄土区之间有关。因黄土主要来源沙漠的尘暴, 而尘暴在搬运过程中沉积分异, 粗颗粒先沉降, 细颗粒最后沉降, 这再次反映出了源区距离对粒度粗粒变化的明显影响, 因此峰值出现于 $100 \mu\text{m}$ 左右且分选性较好是黄土与沙漠沙过渡带的类型。

沙漠沙-⑤ 粒度频率分布曲线形态(图 4-e)与沙漠沙-iv 相似, 但优势组分中值粒径粗于前者, 为 $200 \sim 300 \mu\text{m}$, 百分含量也较高, 占 98% 以上, 粒度区间窄, 分选性很好。该类型也属于流动沙丘, 没有或者几乎没有被固定, 代表样品采自东北地区三大沙地(科尔沁沙地、松嫩沙地、呼伦贝尔沙地)等地。这里位于沙漠腹部, 空气动力强度更强, 风力更大, 因此跳跃组分的粒径较沙漠沙-iv 更粗。

沙漠沙-⑥ 粒度频率分布曲线形态(图 4-f)与沙漠沙-⑤相似, 优势组分中值粒径也为 $200 \sim 300 \mu\text{m}$, 但细粒成分含量明显较多, 显示混合吸附了较多的黄土粉尘悬浮颗粒。将细粒部分的单独作图(图 5)后可见其粒度分布与黄土粉尘形态基本类似, 呈现 3 组分分布特征, 而且粒径范围也类似。指示该地区沙漠沙吸附了较多粉尘物质, 显然已有被固定的特点, 这是因为沙丘被逐渐固定后, 将大量吸附空气中的悬浮粉尘物质, 悬浮组分百分含量将逐渐增加, 因此该悬浮组分含量随着沙丘被固定的程度而呈正相关(即悬浮组分含量越高, 沙漠沙被地表植被等固定的就越坚实, 反之亦然), 故该悬浮组分百分含量的高低可间接作为沙漠沙被固定程度的判别依据。典型样品采自科尔沁沙地固定沙丘上, 以及其它一些活化沙丘、半固定沙丘等。

2.3 湖泊

湖相沉积物的粒度分布特征对比曲线见图 4。其粒度分布曲线最多可有 6 个组分 ($< 1 \mu\text{m}$, $2 \sim 10 \mu\text{m}$, $10 \sim 70 \mu\text{m}$, $70 \sim 150 \mu\text{m}$, $150 \sim 700 \mu\text{m}$, $> 700 \mu\text{m}$), 分选性差^[31]。

总体分析, 湖相沉积物粒度悬浮组分范围, 不同地区、不同湖泊沉积物的粒度频率分布曲线特征差异较大, 但自湖滨向湖心的过渡趋势是一致的。其中第 ④组分或第 ¼ 组分可以成为含量最高的组分; 第 ④组分与第 ¼ (有时为第 ④) 组分百分含量呈现此消彼长关系, 这种变化随湖水深度变化而变化, 即从湖滨到湖心第 ④组分逐渐增加, 完全成为湖心相后就只有第 ①、④组分。

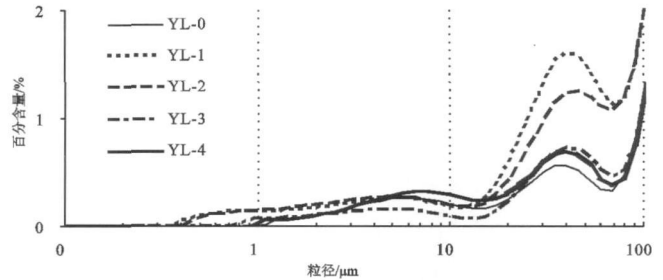


图 5 沙漠沙样品悬浮组分粒度分布图

Fig 5 Suspended particles grain size distribution of desert samples

湖滨 沉积物粒度频率分布特征(图 4-k): 1) 总体分选性差。2) 第 ¼ 组分占主导优势, 其中值粒径范围为 $70 \sim 150 \mu\text{m}$, 峰值一般为 $70 \sim 100 \mu\text{m}$ 。该组分百分含量越高, 指示沉积物越靠近湖岸。3) 第 ④组分中值粒径范围为 $2 \sim 10 \mu\text{m}$, 其峰值一般为 $3 \sim 8 \mu\text{m}$, 与第 ¼ 组分呈明显的此消彼长关系, 即第 ④组分含量越高, 第 ¼ 组分含量就越低, 反之亦然。4) 第 ①组分中值粒径范围为 $< 1 \mu\text{m}$, 峰值粒径一般为 $\pm 0.7 \mu\text{m}$, 在水成沉积物中均可见。5) 第 ①组分向第 ④组分呈平稳的逐步增加过渡, 但第 ¼ 组分与第 ④组分之间有明显的凹谷。

湖滨—湖心过渡 沉积物所受水动力条件较湖滨弱而较湖心强粒度频率分布特征: 频率分布曲线总体分选性极差, 第 ¼ 组分与第 ④组分百分含量变化明显。图 4-j 中第 ¼ 组分含量很高, 为优势组分; 随着离湖岸边距离越来越远, 第 ④组分百分含量开始增加, 第 ¼ 组分逐渐降低; 图 4-i 中第 ④组分与第 ¼ 组分高度相当, 随着离岸距离的进一步增加, 第 ④组分含量逐渐升高为优势组分, 如图 4-h。其他组分粒径范围、特点与湖滨相类似。

湖心沉积物主要受椭圆形上下振荡波浪的作用, 水动力强度较弱, 因此沉积物的粒度很细(图 4-g)。其粒度频率分布特征: 1) 第 ④组分占主导优势, 含量在 72% 以上, 该组分百分含量越高, 指示沉积物越靠

近湖心。2) 第④组分样品在中值粒径为 $10\sim 70\ \mu\text{m}$, 属于黄土与沙尘暴粉尘的粗粒悬浮组分范围, 其成因与④组分类似, 只是由于水较大的密度和粘滞系数, 造成水成的粗粒悬浮组分④比风成的粗粒组分④偏粗, 它们大致以 $65\sim 70\ \mu\text{m}$ 为划分界线。该组分在黄河与渭河河道、三门峡水库库底等改造样品的粒度分布中表现清晰, 见图 6。在其他一些中国北方湖泊(如达里湖、巴彦查干湖等)沉积物样品中也多有发现。该组分是流水改造风成沉积物, 使风成黄土的粗粒组分向细粒方向变化而形成, 因此其粒度通常略比黄土的粗粒组分偏细, 我们将其纳入湖心相的优势组分, 故湖心相计算等均将该组分与第④组分合并利用。该组分是流域内风成作用强弱的判别标志, 若该组分含量很高, 则可能受湖泊改造程度较低, 反之受湖泊改造程度较高。3) 个别湖心相样品出现第⑤、甚至第⑥组分, 而第④组分含量并无明显增加, 这种跳跃或滚动组分的突然出现指示了有强动力水流入湖, 可能指示了大雨引发的洪水作用过程, 这种样品可用于指示强降水事件的发生。其他组分粒径范围、特点与湖滨相类似。

通过上述分析可知湖滨、过渡和湖心相的粒度频率分布特征曲线有明显差异。1) 从湖滨到湖心, 随着离湖岸距离的逐渐增加, 第④组分百分含量明显减小, 第④组分百分含量明显增加, 待到完全进入湖心相后, 由于湖滨拍岸浪对湖底作用明显减弱, 只剩下①和④组分; 2) 湖泊三相粒度频率曲线均十分典型, 同时又呈现此消彼长的良好过渡关系。

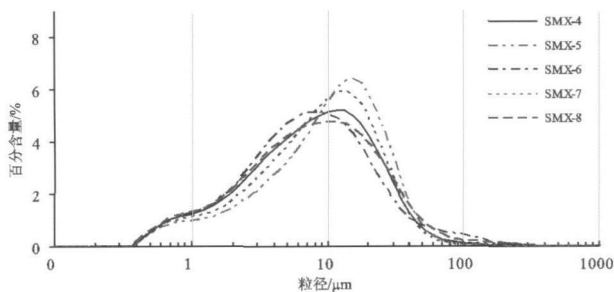


图 6 黄河(三门峡段)水库库底样品粒度分布图

Fig 6 Grain size distribution of Huanghe River (Sanmenxia) samples

2.4 河流

河流受水动力条件影响极为复杂, 其粒度频率分布曲线也较复杂(图 4)。在蛇曲等水流速度较缓的凸岸以及水动力条件较缓的河漫滩, 沉积物粒度一般较细; 而在凹岸或者水动力较强的河道、河口等地, 沉

积物粒度一般较粗。其粒度分布基本特征: 1) 粒度分布总体分选性很差, 第⑤组分波动范围较大, $150\sim 700\ \mu\text{m}$ 均有。2) 不同水动力条件下优势组分粒径波动范围较大, 水动力条件越强, 粒度越粗, 反之亦然。若水动力条件较弱以则第④组分为主, 若水动力条件较强, 则以第⑤或第⑥组分为主。按照河流沉积物粒度分布特征, 现选择 4 种类型进行粒度分析:

类型 iv (图 4-l): 样品采自南京长江凸岸段水下样, 该地水流很缓, 类似湖泊、水库等静水相环境。沉积物粒度分选性较好, 单峰明显, 优势组分中值粒径范围为 $10\sim 20\ \mu\text{m}$ 。优势组分粒径细反映了该地区河流水流很缓。

类型 ⑤ (图 4-m): 样品采自武汉白沙洲南长江边河漫滩、邕山黄河河漫滩以及三台河等地。河漫滩型沉积物粒度分选性一般, 优势组分中值粒径范围为 $90\sim 100\ \mu\text{m}$ 。小于 $90\ \mu\text{m}$ 有两个含量很低的组分, 中值粒径分别为: $0.7\ \mu\text{m} \pm 1\sim 10\ \mu\text{m}$ 。优势组分粒径较细反映了该地区河流水流较缓, 细粒物质发生了充分的分选分异, 因此峰值出现于 $100\ \mu\text{m}$ 左右且分选性较差是水动力条件很弱的河漫滩或湖滨类型。

类型 ⑥ (图 4-n): 典型样品取自秦皇岛新开河口三角洲、三台河等地。样品单峰明显, 优势组分粒度中值粒径在 $100\sim 200\ \mu\text{m}$ 。由于河口三角洲等地水流速度缓慢, 故沉积物粒度偏细。

类型 ⑦ (图 4-o): 样品采自三台河、长江、秦皇岛等地。粒度频率分布主要有 2 个组分, 分选性差。其优势组分中值粒径为 $300\sim 500\ \mu\text{m}$, 其百分含量在 $75\%\sim 90\%$ 之间。细粒端组分含量较低。沉积环境如水流很急的河口、河道或地势落差较大的河道, 有时也预示着特大雨或洪水暴发等, 当然可能物源也有一定的关系。

3 细粒沉积物粒度多组分特征对比分析

水成沉积物与风成沉积物粒度区别主要在于其动力机制、搬运介质性质、搬运方式等的不同, 并由此导致了粒度组分、粒径分布范围、组分百分含量等差异。由于风成沉积物受大气动力强度影响, 从沙漠沙到黄土粉尘其优势组分的粒径逐渐变细; 水成沉积物受水动力强度变化控制, 从河流沙到湖泊沉积物其优势组分的粒径也逐渐变细。但由于空气的粘滞系数以及能搬运的动力强度小于水, 故风成沉积物的组分

比相应的水成组分要细。风成和水成沉积物粒度特征有明显区别, 可以作为各种沉积物单、混合成因的识别标志。

3.1 粒度组分差异

风成沉积物一般只有悬浮组分(最大中值粒径 $< 70 \mu\text{m}$)和跳跃组分(中值粒径一般为 $90 \sim 300 \mu\text{m}$)。其中黄土粉尘以第④组分为优势组分; 而沙漠沙则以第 $\frac{1}{2}$ 组分为优势组分, 悬浮组分含量很低或者几乎没有。因此通过优势组分范围很容易区别黄土、黄土—沙漠过渡带以及沙漠沙样品。

水成沉积物一般有悬浮组分(最大粒径可达 $150 \mu\text{m}$)、跳跃组分(中值粒径一般为 $150 \sim 700 \mu\text{m}$)和滚动组分。其中湖相沉积物或以第④组分为优势组分(湖心相)和以第 $\frac{1}{4}$ 组分为优势组分(湖滨相)。河流沉积物因水动力条件影响显著, 粒度分布特征很复杂, 静水相水库湖泊沉积物可以第④组分为优势组分, 河漫滩则可以第 $\frac{1}{4}$ 或 $\frac{1}{2}$ 组分为优势组分, 水动力条件很强的河道则以第 $\frac{1}{2}$ 或 $\frac{3}{4}$ 组分为优势组分。

3.2 河漫滩与湖滨

河漫滩、湖滨、水动力条件较弱的河流相沉积物因其所受水动力强度类似(均为弱水动力), 故其粒度分布特征也极其相似, 优势组分粒径范围为 $70 \sim 150 \mu\text{m}$ (图 7)。可以说水动力条件相似, 粒度组分特征也相似。

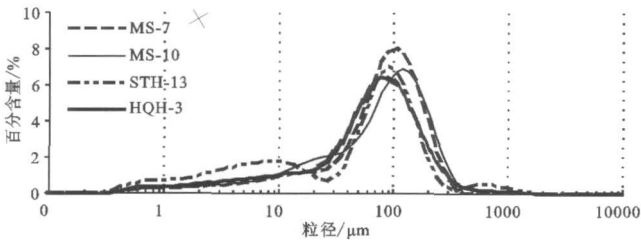


图 7 湖滨与河漫滩粒度对比分布图

Fig 7 Compared by grain size distribution of lake shore and river floodplain

此外, 自然界中很多沉积物既受风力改造也受流水改造, 属于混合成因, 这类沉积物单利用粒度分布特征很难准确地区分其成因类型, 因为在沉积物沉积类型或沉积相的判别上, 粒度仅是一个方面的判别标志, 而不是唯一的判别标志。因此, 对混合成因沉积物应综合其他标志(如沉积结构和构造等)来判别, 有时需要借助扫描电镜作进一步分析。

4 结论

文章通过对不同类型细粒沉积物粒度特征的对比如、分析, 总结了各种风成、水成沉积物的粒度分布特点, 并区别了各种沉积物的相似之处。主要取得了以下认识:

(1) 细粒沉积物粒度一般由多个组分叠加构成, 表现为多组分粒度分布特征, 其受控于搬运介质的性质(风、水)、动力强度(强、弱)和搬运方式(悬移、跃移、滚动)等因素。

(2) 黄土粉尘粒径以 $< 70 \mu\text{m}$ 的悬浮组分为主, 粒度由粗、中、细三个组分构成。粗粒组分含量最高, 其中值粒径与源区距离呈负相关; 中粒组分百分含量与源区距离呈正相关。粒度受源区距离影响显著。

(3) 沙漠沙粒度由一个极其明显的粗粒跳跃组分构成, 中值粒径一般位于 $100 \sim 300 \mu\text{m}$, 分选性极好。

(4) 湖泊沉积物粒度分布最多可有 6 个组分(中值粒径: $< 1 \mu\text{m}$, $2 \sim 10 \mu\text{m}$, $10 \sim 70 \mu\text{m}$, $70 \sim 150 \mu\text{m}$, $150 \sim 700 \mu\text{m}$, $> 700 \mu\text{m}$), 分选性差。湖泊三相间粒度分布特征有明显差异, 同时又存在此消彼长的良好过渡关系。

(5) 河流沉积物粒度分布曲线很复杂, 分选型差, 其分布特征蕴含了水动力强弱信息。

(6) 沙漠沙 \rightarrow 黄土与河流沙 \rightarrow 湖泊沉积其优势组分的粒径均逐渐变细, 但水成相应组分比风成组分粒径要粗。

参考文献 (References)

- 1 成都地质学院陕北队. 沉积岩(物)粒度分析及其应用[M]. 北京: 地质出版社, 1976 11-45 [The Geology Team of Chengdu College of Geology. Application Analysis of Grain Size[M]. Beijing Geological Publishing House 1976 11-45]
- 2 Alfaro S C, A Gaudichet, L Ganes *et al*. Mineral aerosol production by wind erosion: A aerosol particle sizes and binding energies[J]. Geophysical Research Letters 1998, 25(7): 991-994
- 3 Ashley G M. Interpretation of poly-modal sediments[J]. Journal of Geology, 1978, 86 411
- 4 Bagnold R A. The Physics of Blown Sand and Desert Dunes[M]. London: Methuen Press, 1941 265
- 5 Bagnold R A. The pattern of nature size distributions[J]. Sedimentology, 1980 27: 199
- 6 Richard A D. Depositional systems—a genetic approach to sedimentary geology[J]. Prentice-Hall 1983 243-259
- 7 John R L. Physical processes of sedimentation: an Introduction[J].

- American Elsevier Publishing Company 1970: 5-70
- 8 Reading H G. Sedimentary Environments and Facies[M]. London: Blackwell Scientific Publications, 1978: 518-544
 - 9 刘东生. 黄土与环境[M]. 北京: 科学出版社, 1985: 38-79 [Liu Tungsheng. Loess and the Environment[M]. Beijing: Science Press, 1985: 191-207]
 - 10 孙东怀, 鹿化煜, David Rea 等. 中国黄土粒度的双峰分布及其古气候意义[J]. 沉积学报, 2001, 18(3): 327-329 [Sun Donghuai, Lu Huayu, David Rea *et al.* Bimodal grain-size distribution of Chinese loess and its paleoclimate implication[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2001, 18(3): 327-329]
 - 11 秦小光, 吴金水, 蔡炳贵, 等. 全新世时期北京—张家口地区与黄土高原地区风成系统的差异[J]. 第四纪研究, 2004, 24(4): 430-436 [Qin Xiaoguang, Wu Jinshui, Cai Bingui *et al.* The difference between dust-transporting wind systems of Beijing-Zhangjiakou area and the loess plateau since the LGM [J]. Quaternary Sciences, 2004, 24(4): 430-436]
 - 12 鹿化煜, 安芷生. 黄土高原黄土粒度组成的古气候意义[J]. 中国科学: D辑, 1998, 28(3): 278-283 [Lu Huayu, An Zhisheng. Paleoclimatic significance of grain size of loess-palaeosol deposit in Chinese Loess Plateau [J]. Science in China Series D, 1998, 28(3): 278-283]
 - 13 Ding Z L, Derbyshire E, Yang S L, *et al.* Stacked 2.6 M a grain size record from the Chinese Loess based on five sections and correlation with the deep-sea $\delta^{18}O$ record [J]. Paleoclimatology, 2002, 17(3): 725-756
 - 14 汪海滨, 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[J]. 中国沙漠, 2002, 22(1): 21-26 [Wang Haibin, Chen Fahu, Zhang Jiawu. Environmental significance of grain size of loess-palaeosol sequence in the western part of Chinese Loess Plateau [J]. Journal of Desert Research, 2002, 22(1): 21-26]
 - 15 孙继敏. 中国黄土的物质来源及其粉尘的产生机制与搬运过程[J]. 第四纪研究, 2004, 24(2): 175-183 [Sun Jimin. Provenance forming mechanism and transport of loess in China [J]. Quaternary Sciences, 2004, 24(2): 175-183]
 - 16 裘善文, 张柏, 王志春. 中国东北平原西部荒漠化现状、成因及其治理途径研究[J]. 第四纪研究, 2005, 25(1): 63-72 [Qiu Shanwen, Zhang Bai, Wang Zhichun. Analyses on current situation, causes of formation and way of management of desertification in western northeast plain of China [J]. Quaternary Sciences, 2005, 25(1): 63-72]
 - 17 Dearing J A. Sedimentary indicators of lake-level changes in the humid temperate zone: a critical review [J]. Journal of Paleolimnology, 1997, 18(1): 1-14
 - 18 Folk R L. A review of grain-size parameters [J]. Sedimentology, 1966, 6: 73-93
 - 19 王苏民, 余源盛, 吴瑞金, 等. 岱海湖泊环境与气候变化[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 1990: 12-18 [Wang Sumin, Yu Yuansheng, Wu Ruijin, *et al.* Dahuai lake environment and the climate change [M]. Hefei: University of Science and Technology of China Press, 1990: 12-18]
 - 20 陈敬安, 万国江, 张峰, 等. 不同时间尺度下湖泊沉积物环境记录——以粒度为例 [J]. 中国科学: D辑, 2001, 33(6): 563-568 [Chen Jingan, Wan Guojiang, Zhang Feng *et al.* The record of lake sediments in different scales: taking grain size for example [J]. Science in China Series D, 2001, 33(6): 563-568]
 - 21 孙千里, 周杰, 肖举乐. 岱海沉积物粒度特征及其古环境意义[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2001, 21(1): 93-95 [Sun Qianli, Zhou Jie, Xiao Jule. Grain size characteristics of lake Dahuai sediments and its paleoenvironmental significance [J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2001, 21(1): 93-95]
 - 22 何华春, 丁海燕, 张振克, 等. 淮河中下游洪泽湖湖泊沉积物粒度特征及其沉积环境意义[J]. 地理科学, 2005, 25(5): 590-596 [He Huachun, Ding Haiyan, Zhang Zhenke *et al.* Grain size characteristics and their environmental significance of Hongze lake sediments [J]. Scientia Geographica Sinica, 2005, 25(5): 590-596]
 - 23 Peng Y J, Xiao J L, Nakamura T, *et al.* Holocene East Asian monsoonal precipitation pattern revealed by grain-size distribution of core sediments of Dahuai Lake in Inner Mongolia of north-central China [J]. Earth and Planetary Science Letters, 2005, 233: 467-469
 - 24 姜加明, 吴敬禄, 沈吉. 安固里淖沉积物记录的气候环境变迁[J]. 地理科学, 2004, 24(3): 346-348 [Jiang Jiaming, Wu Jinglu, Shen Ji. Lake sediment records of climatic and environmental change in Angulinuo lake [J]. Scientia Geographica Sinica, 2004, 24(3): 346-348]
 - 25 刘红, 何青, 王元叶, 等. 长江口表层沉积物粒度时空分布特征[J]. 沉积学报, 2007, 25(3): 445-448 [Liu Hong, He Qing, Wang Yuanye, *et al.* Temporal and spatial characteristics of surface sediment grain-size distribution in Changjiang estuary [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2007, 25(3): 445-448]
 - 26 彭晓彤, 周怀阳, 叶瑛, 等. 珠江河口沉积物粒度特征及其对底层水动力环境的指示[J]. 沉积学报, 2004, 22(3): 487-493 [Peng Xiaoyang, Zhou Huaiyang, Ye Ying *et al.* Characteristics of sediment grain size and their implications for bottom hydrodynamic environment in the Pearl River estuary [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2004, 22(3): 487-493]
 - 27 孙东怀, 安芷生, 苏瑞侠, 等. 古环境中沉积物粒度组分分离的数学方法及其应用[J]. 自然科学进展, 2001, 11(3): 269-276 [Sun Donghuai, An Zhisheng, Su Ruixia *et al.* Mathematics method and its application of grain-size distribution of paleoenvironment sediments [J]. Progress in Natural Sciences, 2001, 11(3): 269-276]
 - 28 Qin Xiaoguang, Cai Binggui, Liu Tungsheng. Loess record of the aerodynamic environment in the East Asia monsoon area since 60 000 years before present [J]. Journal of Geophysical Research, 2005, 110(4): 1029
 - 29 鹿化煜, 苗晓东, 孙有斌. 前处理步骤与方法对风成红粘土粒度测量的影响[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2002, 22(3): 129-132 [Lu Huayu, Miao Xiaodong, Sun Youbin. Pretreatment methods and their influences on grain-size measurement of aeolian "Red clay" in north China [J]. Marine Geology and Quaternary Geology, 2002, 22(3): 129-132]
 - 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 [J]. 科学通报, 1997, 42(23): 2535-2538 [Lu Huayu, An Zhisheng. The influences of pretreatment methods on grain size measurement of bess-pakosol [J]. Chinese Science Bulletin, 1997, 42(23): 2535-2538]
- 31 殷志强, 秦小光, 吴金水, 等. 湖泊沉积物粒度多组分特征及其成因机制研究 [J]. 第四纪研究, 2008, 28(2): 334-342 [Yin Zhiqiang, Qin Xiaoguang, Wu Jingshui *et al*. The multimodal grain-size distribution characteristics and its formation mechanism of lake sediments [J]. Quaternary Sciences, 2008, 28(2): 334-342]
- 32 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 [J]. 中国科学: D 辑, 1999, 42(2): 146-152 [Ding Zhongli, Sun Jimin, Liu Dongsheng. A sedimentological proxy indicator linking changes in bess and deserts in the Quaternary [J]. Science in China Series D, 1999, 42(2): 146-152]
- 33 蒋复初, 王书兵, 傅建利. 河南邙山晚更新世黄土的环境记录 [J]. 第四纪研究, 2003, 23(6): 702 [Jiang Fuchun, Wang Shubing, Fu Jianli. Environmental record of Henan Mangshan mountain bess in late Pleistocene [J]. Quaternary Sciences, 2003, 23(6): 702]

The Multimodal Grain-Size Distribution Characteristics of Loess, Desert, Lake and River Sediments in Some Areas of Northern China

YIN Zhi-qiang^{1, 2} QIN Xiao-guang¹ WU Jin-shui³ NING Bo¹

(1 Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029;

2 China Institute of Geo-Environment Monitoring, Beijing 100081; 3 Marine Geological Survey of Hainan Province, Haikou 570206)

Abstract By using high-resolution laser grain size instrument Mastersizer 2000, the multimodal characteristics of grain size distribution of loess, desert, lake and river sediments are measured and carefully studied. The standard patterns and their grain size characteristics of various sediments are systematically summarized, the discrepancies of multimodal distribution among these sediments are concluded and the comparisons of grain size multimodal distribution of them are also discussed in this paper. The major conclusions are followed: 1) The multimodal characteristic of grain size distribution is a common feature in all sediments and results from properties of transportation medium, dynamic intensity, transportation manner and other factors; 2) There are three modes in loess grain size distribution (fine, median and coarse (the median size is < 1 μm, 1~10 μm, 10~70 μm, respectively) and suspended particles which diameters are less than 70 μm are dominant); 3) There is a predominant coarse saltation mode in grain size distribution of sandy dunes, which median size is about 100~300 μm and the content is larger than that of other modes; 4) There are 6 modes (median size are < 1 μm, 2~10 μm, 10~70 μm, 70~150 μm, 150~700 μm, > 700 μm respectively) in grain size distribution of lake sediments. The former 4 modes are suspension and others are saltated and rolling. Lake sediments can be divided into three types: lake shore facies, transitional facies and central lake facies; 5) The grain size distribution of river sediments is the most complex and it consists of suspension, saltation and rolling modes; 6) The windblown depositions and aqueous sediments of predominant mode gradually decreases from sandy dunes to bess and river to lake sediments. But the grain size of modes of windblown depositions is usually finer than that of corresponding modes of aqueous sediments.

Key words Loess, desert, lake, river sediments, grain size, multimodal distribution characteristics