

基于偏正态概率分布的粒度分布次总体分离及其沉积环境指示意义

袁瑞¹⁾, 张昌民²⁾, 赵芸²⁾, 张莉²⁾, 陈哲³⁾, 张宝进⁴⁾, 黄若鑫⁵⁾

1) 长江大学地球物理与石油资源学院, 武汉, 430100;

2) 长江大学地球科学学院, 武汉, 430100; 3) 成都北方石油勘探开发技术有限公司, 成都, 610051;

4) 中国石化江汉油田分公司, 湖北潜江, 433124;

5) 中海油田服务股份有限公司油田技术事业部, 北京, 101149

内容摘要: 沉积物颗粒是某种沉积环境和水动力条件下多个沉积过程的最终产物。粒度分布是原始沉积信息的载体, 是来自不同沉积过程的多个次总体的叠加, 频率曲线可能表现为双峰或者多峰特征。传统的沉积学粒度分析方法并未深入研究次总体; 常见的概率分布模型在分离次总体后无法全面计算统计参数。本文以 214 份鄱阳湖现代沉积物的粒度分布数据为例, 利用偏正态概率分布模型共分离提取 977 个次总体, 计算各个次总体的统计参数, 并对比分析了不同沉积环境中次总体参数的异同。结果表明: ① 次总体均值、方差、偏度、峰度、所占百分比和最大频率等参数规律明显; ② 从曲流河河道到河流末端、在河流末端顺流方向上和河道左右两侧远离河道方向上, 粒度分布中主要次总体粒度均值逐渐减小, 河道间洼地和湖区沉积物粒度分布的各个次总体占比接近; ③ 江心洲的河道砂和河漫滩细粒粒度分布分别由 3 种和 5 种不同类型次总体组成。该方法可为沉积环境的定量判断和沉积过程的定量研究提供参考。

关键词: 偏正态概率分布; 粒度分布; 次总体参数; 沉积环境; 鄱阳湖

碎屑沉积物的粒度是地球科学最早研究的对象之一, 也是沉积学和地质学研究使用最广泛的数据 (Udden, 1914; Krumbein, 1934; Bright et al., 2020)。由不同大小颗粒体积或重量百分比组成的粒度分布 (Grain-Size Distribution, GSD) 记录了沉积物原始沉积信息, 粒度分布不仅是研究现代沉积环境的有力证据、推断古气候和古环境的最常用的数据资料 (Ijmker et al., 2012; Vandenberghe, 2013; Rose et al., 2019; Bright et al., 2020; Zhang Xiaodong et al., 2020; 王中波等, 2020), 更是母岩风化序列的“指纹” (Román-Sánchez et al., 2021)。为了挖掘这些隐藏的信息, Krumbein (1934) 创造性将粒度分布的自然刻度转换为以 2 为底的对数 ϕ 刻度。根据粒度频率曲线、累积曲线和概率累积曲线的形态定性、或者结合图解法与矩法公式计算的粒度分布参数 (均值、中值、方差、偏度和峰度) 和

CM 图版半定量分析沉积环境 (Krumbein and Pettijohn, 1938; Folk and Ward, 1957; Visher, 1969; Passega, 1964; Blott and Pye, 2001)。在获得一定数量的粒度分布数据后, 众多非传统沉积学手段也得到了广泛的应用。多重分形 (Multifractal) 方法根据粒度频率曲线的形态, 利用分形理论得到的奇异谱代表不同沉积环境 (Posadas et al., 2001; Paz-Ferreiro et al., 2010; Biswas, 2019; 常宏等, 2019; Li Jinlin et al., 2021; Qiao Jiangbo et al., 2021); 聚类算法 (Clustering Algorithm) 根据粒度分布参数或粒度频率曲线形态的相似性判别沉积环境 (Ordóñez et al., 2016; 章婷曦等, 2018; 刘祥奇等, 2020); 端元模型 (End Member) 分析方法根据预先设定的端元, 从粒度分布频率曲线中寻找对应的沉积过程和沉积环境指标 (Weltje, 1997; Weltje and Prins, 2007; Ijmker et al., 2012; Hateren et al.,

注: 本文为湖北省教育厅科学研究计划项目 (编号: Q20211302)、国家自然科学基金资助项目 (编号: 42130813、41772094) 和国家科技重大专项 (编号: 2016ZX05027-002-007) 的成果。

收稿日期: 2021-09-21; 改回日期: 2021-12-16; 网络首发: 2022-01-20; 责任编辑: 刘志强。Doi: 10.16509/j.georeview.2022.01.016

作者简介: 袁瑞, 男, 1987 年生, 博士, 讲师, 主要从事地球科学数据挖掘方面的科研与教学工作; Email: yuanrui@yangtzeu.edu.cn。通讯作者: 张昌民, 男, 1963 年生, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事沉积学方面的科研与教学工作; Email: zcm@yangtzeu.edu.cn。



2018; Zhang Xiaodong et al. , 2020; 李洋等, 2020; 梁爱民等, 2020)。

砾质河床上砾石在强水流的驱动下沿河床滚动堆积而形成开放结构砾石,当水动力减弱时,早期支撑砾石之间的孔隙才被后期的细粒沉积物充填 (Carling, 1984; Wooster et al. , 2008; Herrero and Berni, 2016; 张昌民等, 2020)。细粒物质在较粗颗粒间通过多次渗滤作用形成了最终的疏松沉积物,每一次渗滤过程对应了沉积水动力的变化 (Gibson et al. , 2011; 张昌民等, 2020)。通过实验和数值模拟,多期沉积过程在砂岩骨架中也得以被证实 (Khullar and Raju, 2017; Bustamante-Penagos and Niño, 2020)。最终沉积物的粒度分布是来自不同

沉积过程的多个次总体 (Subpopulation) 的叠加 (Gan and Scholz, 2017; Wu Li et al. , 2020),并在粒度频率曲线中表现为双峰或者多峰特征 (Kuhnle, 1993)。这些粒度分布次总体是沉积物的最小结构单元,具有沉积“基因”的意义 (Weltje and Prins, 2007; Hateren et al. , 2018)。

传统沉积学中滚动、跳跃和悬浮三段式的粒度分布概率累积曲线形态显然无法分离、提取与沉积过程相关的粒度分布次总体。粒度分布数据本质上即为统计数据体。为了从数学上分离、提取这些与沉积水动力条件、沉积过程和沉积环境有关的粒度分布次总体,许多概率统计分布模型被应用于粒度频率曲线的分解,例如对数正态 (Log Normal) 分布

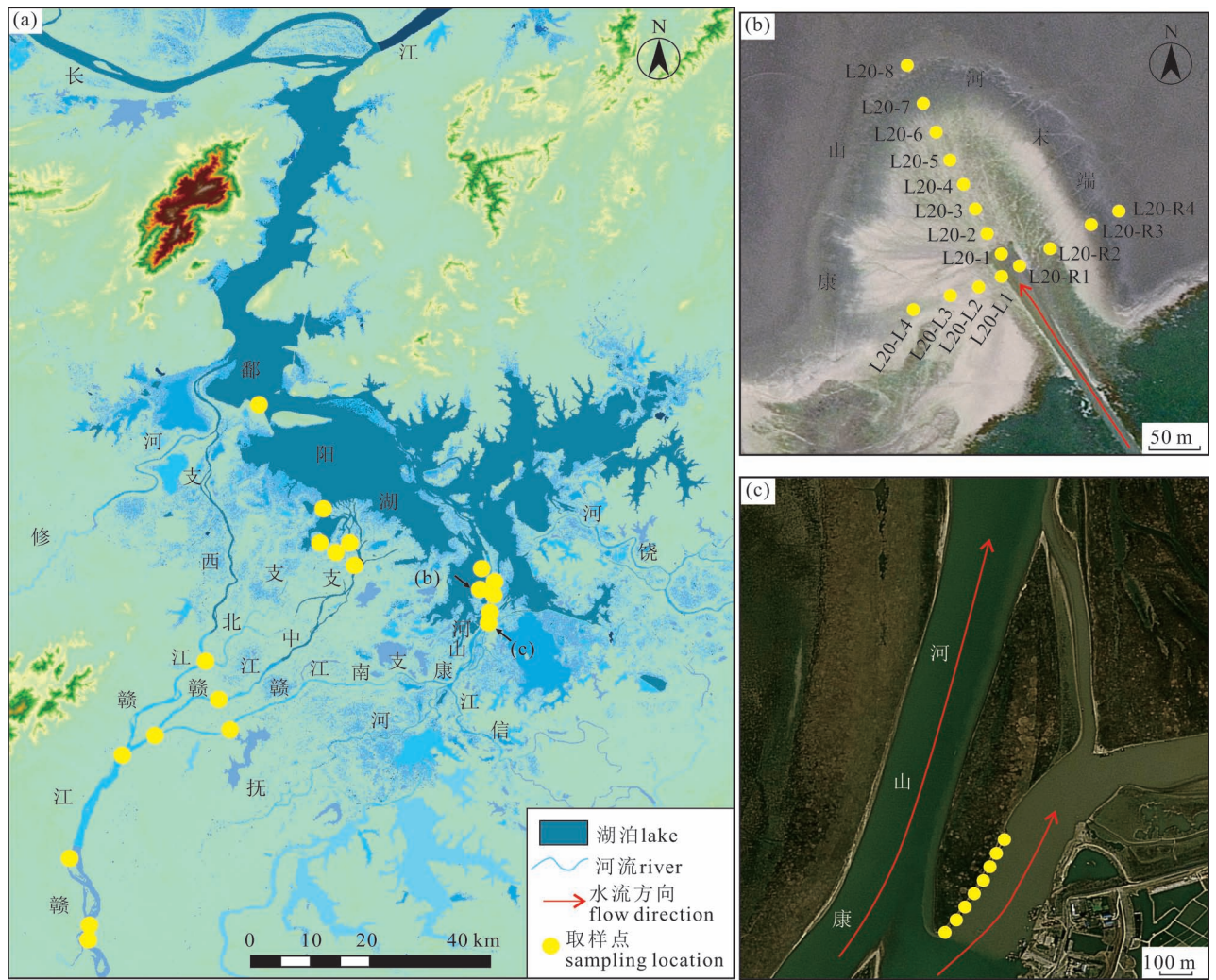


图 1 鄱阳湖流域概况及沉积物取样位置

Fig. 1 General drainage situation of the Poyang Lake and sampling locations of sediments
(a) 鄱阳湖流域及本文 20 个取样位置; (b) 康山河末端取样位置; (c) 康山河江心洲取样位置
(a) Drainage of the Poyang Lake and 20 sampling locations; (b) sampling locations in the terminal of the Kangshan River;
(c) sampling locations in the central bar of the Kangshan River

(Spencer, 1963; Xiao Jule et al. , 2012)、Rosin 分布 (Kittleman, 1964; Ibbeken, 1983)、对数双曲 (Log Hyperbolic) 分布 (Bader, 1970; Purkait, 2002; Bartholdy et al. , 2007)、Weibull 分布 (Carder et al. , 1971; Kondolf and Adhikari, 2000; Wu Li et al. , 2020)、对数偏拉普拉斯 (Log Skew Laplace) 分布 (Fieller et al. , 1992; Purkait, 2002) 和 伽 马 (Gamma) 分布 (Risovic, 1993) 等。但是这些概率分布从原理上无法或较难计算偏度这一重要参数。偏正态 (Skew Normal) 概率分布在正态分布的基础上引入形状参数, 可便捷地计算各个次总体的均值、方差、偏度和峰度 (Azzalini, 1985, 2005; Gupta and Chen, 2001; Ashour and Abdel-hameed, 2010; Yalcinkaya et al. , 2018)。本文以 214 份鄱阳湖现代沉积物粒度分布数据为例, 采用偏正态概率分布分离、提取各个粒度分布中的次总体, 计算次总体的统计参数, 分析这些参数在不同沉积微相中的内在联系与差异, 并探讨次总体对沉积环境的指示意义。

1 数据来源

1.1 取样位置

鄱阳湖 (28°22'~29°45'N, 115°47'~116°45'E) 是我国最大的淡水湖泊, 其水域主要是五大曲流河 (赣江、抚河、信江、饶河、修河) 与下泄长江的水量吞吐动态平衡的结果, 流域内的泥沙沉积物对流域环境有特殊的启示意义 (纪伟涛等, 2017; 甘建军等, 2019; 万智巍等, 2020)。五大河流中, 赣江水系最为发育, 分为四大分支: 赣江西 (主) 支、北支、中支和南支 (图 1a) (纪伟涛等, 2017)。赣江西支向北与修水合并后消亡于入湖水道; 赣江北支与中支汇合后入湖形成赣江三角洲沉积; 赣江南支与抚河和信江汇入康山河, 向北流入鄱阳湖, 形成狭长的康山河三角洲沉积。每年 4~9 月汛期, 五大河流以及独流小河河水入湖, 湖水上涨, 湖面扩大; 冬春枯水季节, 流水减少, 湖面变小, 三角洲前缘显露, 呈现出“枯水一线, 洪水一片”的特殊地质现象 (纪伟涛等, 2017)。本文主要数据来源为枯水期的赣江曲流河、赣江三角洲、康山河三角洲和湖泊沉积, 2019 年 12 月 3 日~9 日在 20 个位置的表层及探槽中共采集 214 个现代沉积物样品, 沉积环境包括曲流河河道、曲流河河漫滩、三角洲平原分流河道、天然堤、河道末端、河道间洼地以及湖泊等 (张金亮, 2019; 马鹏飞等, 2021; 张宪国等, 2021) (图 1a)。

1.2 粒度分析实验

在粒度分析前, 取适量沉积物样品, 分别加入双氧水和稀盐酸进行前处理, 去除有机质和自生碳酸盐物质, 然后用蒸馏水进行离心清洗。少数含砾沉积物样品采用筛析法 (0.25 ϕ 间隔), 形成粒径大于 2000 μm 部分的粒度分布。无砾沉积物样品粒度分析工作在美国贝克曼库尔特公司的 LS13 320 激光粒度分析仪 (理论测量范围 0.017~2000 μm) 上完成, 设置粒度测试区间为 0.375~2000 μm (11.38~-1 ϕ), 粒径间隔 0.135 ϕ 。对每一份样品重复测试至少 3 次颗粒体积比, 相对误差小于 2% 后取 3 次测试结果的平均值作为该样品的粒级数据。最后利用粒度分析仪自带仿真程序将粒径大于 2000 μm 部分和小于 2000 μm 部分的粒级数据合并, 形成完整的粒度分布数据 (图 2a)。利用矩法公式计算各个粒度分布数据的均值、中值、方差、偏度和峰度。

2 研究方法

2.1 偏正态概率分布

1985 年, 意大利数学家 Azzalini 在正态概率分

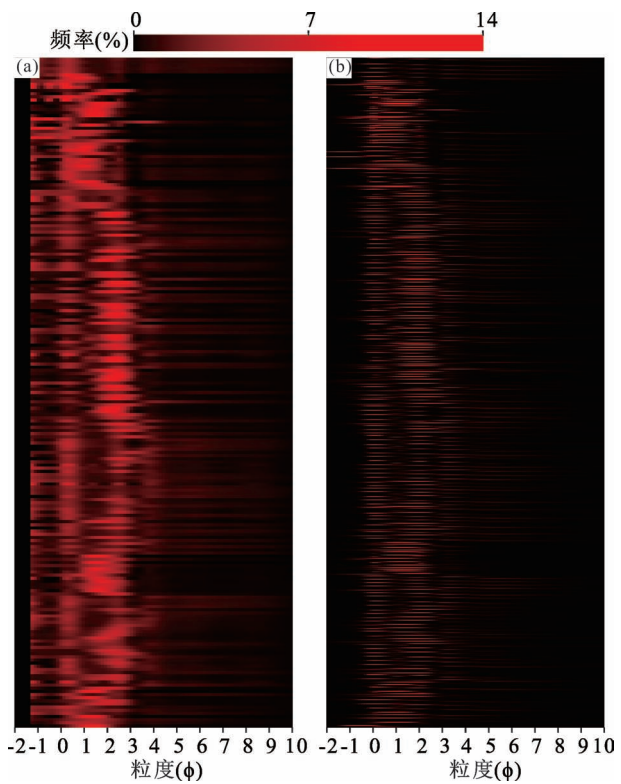


图 2 鄱阳湖沉积物 214 个粒度分布热图(a)及其 977 个次总体频率热图(b)

Fig. 2 Frequency heat maps of 214 grain-size distributions (a) and 977 subpopulations (b)

布中添加了形状参数,首先提出了偏正态概率分布的数学原理。设随机变量 Y 服从偏正态概率分布 $Y \sim SN(\mu, \sigma^2, \alpha)$, 其中 μ 为位置参数, $\sigma \geq 0$ 为尺度参数, 分别与正态分布 $N(\mu, \sigma^2)$ 中的 μ (也称为均值), σ (也称为标准差) 含义一致, α 为形状参数 (Azzalini, 1985, 2005)。与其他概率分布模型相比, 正是因为偏正态概率分布模型中包含了形状参数 α , 才使得偏正态分布概率密度函数可以直接计算偏度与峰度。偏正态分布概率密度函数为 (Azzalini, 1985; Yalçınkaya et al., 2018):

$$f_X(x) = \frac{1}{\pi\sigma} \exp\left[-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right] \cdot \int_{-\infty}^{\frac{x-\mu}{\sigma}} \exp\left(-\frac{t^2}{2}\right) dt \tag{1}$$

随机变量的均值 M 、方差 V 、偏度 S_k 和峰度 K_u 为 (Gan and Scholz, 2017; Yuan Rui et al., 2018):

$$\begin{cases} M = \mu + \sigma\gamma \\ V = \sigma^2(1 - \gamma^2) \\ S_k = \frac{4 - \pi}{2} \cdot \frac{\gamma^3}{\sqrt{(1 - \gamma^2)^3}} \\ K_u = 2(\pi - 3) \frac{\gamma^4}{(1 - \gamma^2)^2} \end{cases} \tag{2}$$

其中

$$\gamma = \alpha \cdot \sqrt{\frac{2}{\pi(1 + \alpha^2)}}$$

特别地, 当 $\alpha = 0$ 时, $M = \mu, V = \sigma^2, S_k = K_u = 0$ 即为正态分布 $N(\mu, \sigma^2)$ 。

2.2 粒度分布的偏正态概率分布模型

受多期沉积过程的影响, 沉积物粒度分布 Y 由多个次总体 Y_i 组成。设粒度分布次总体 Y_i 均服从偏正态概率分布 $Y_i \sim SN(\mu_i, \sigma_i^2, \alpha_i)$, 其中 μ_i, σ_i 和 α_i 分别为第 i 个次总体的位置参数、尺度参数和偏度参数, 则沉积物粒度分布的偏正态概率分布模型为 (Gan and Scholz, 2017; Yuan Rui et al., 2018):

$$f_Y(y) = \sum_{i=1}^n c_i f_{X_i}(x) = \sum_{i=1}^n c_i \left\{ \frac{\exp\left[-\frac{(x-\mu_i)^2}{2\sigma_i^2}\right]}{\pi\sigma_i} \cdot \int_{-\infty}^{\frac{x-\mu_i}{\sigma_i}} \exp\left(-\frac{t^2}{2}\right) dt \right\} \tag{3}$$

其中 c_i 为第 i 个次总体的所占百分比, $\sum c_i = 100\%$;

x 为粒径; 粒度分布中某个粒径的频率 y 的估计值为各次总体频率之和 $\sum y_i$ 。采用自适应网格最优化求解得出每个次总体的偏正态概率分布模型参数 ($c_i, \mu_i, \sigma_i^2, \alpha_i$), 再利用公式 (2) 计算各个次总体的均值、方差、偏度和峰度。本文把粒度分布中占主导、所占百分比明显最大的次总体称为主要次总体。

3 计算结果

3.1 次总体分离

多期沉积过程中形成的沉积物在粒度频率曲线中表现为双峰或者多峰特征, 若每一个峰值对应一个次总体, 则可以利用偏正态概率分布从粒度分布中分离各个次总体。逐个对 214 个沉积物粒度分布数据进行处理, 单个粒度分布的次总体个数为 2~7 个, 共分离出 977 个次总体 (图 2b), 计算每个次总体的所占百分比、均值、方差、偏度、峰度和最大频率 (次总体中的峰值频率)。例如, 1 个现代沉积物样品的粒度分布及其次总体计算结果如图 3 所示。该样品取自康山河枯水主河道中部, 野外鉴定为粉砂质泥, 其粒度频率曲线具有为 5 个峰值。利用偏正态概率分布从中共分离出 6 个次总体, 由粗到细, 这些次总体在粒度分布中所占百分比依次为 38.02%、4.13%、16.31%、15.46%、20.04% 和 3.6%, 次总体的均值分别为 0.75 ϕ 、1.74 ϕ 、2.60 ϕ 、4.52 ϕ 、6.79 ϕ 和 8.70 ϕ , 方差分别为 0.16、0.07、0.16、0.37、1.22 和 0.44, 偏度分别为 -0.44、0.00、0.37、-0.75、-0.84 和 0.00, 峰度分别为 0.30、0.00、0.23、0.60、0.69 和 0.00, 最大频率分别为 5.24%、0.86%、2.21%、1.49%、1.09% 和 0.29%。次总体 S1 所占百分比最大, 为该粒度分布的主要次总体。各个次总体总和即为粒度分布的拟合, 214 个粒度分布拟合的绝对误差均不超过 2%。

3.2 次总体参数特征

对本次所有 977 个次总体的均值、方差、偏度、峰度、所占百分比和最大频率进行统计, 发现这些次总体的统计参数既存在相似性也存在差异性。次总体均值主要集中在 6 个区间上: 0~1 ϕ 、1~2 ϕ 、2~3 ϕ 、4~5 ϕ 、6~7 ϕ 和 7~8 ϕ , 根据 Friedman 和 Sanders (1978) 岩石粒径划分标准, 分别对应了粗砂、中砂、细砂、极粗粉砂、中粉砂和细粉砂组分; 样品中含砾 (<-1 ϕ)、极粗砂 (-1~0 ϕ)、极细砂 (3~4 ϕ) 和粗粉砂 (5~6 ϕ) 组分较少, 泥质组分主要包含在细粉砂次总体中 (图 4a)。

根据 Folk 和 Ward (1957) 分选性等级划分标

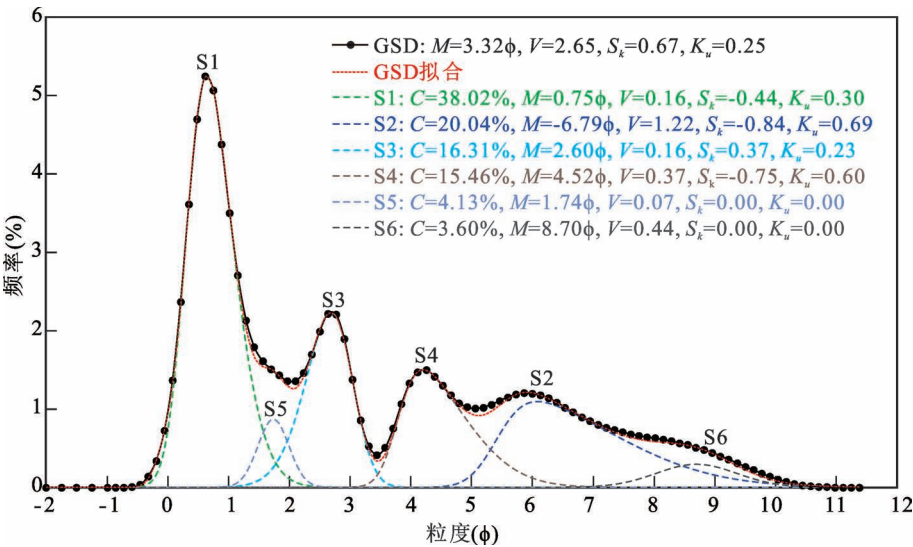


图 3 康山河沉积物中 1 个粒度分布及其 6 个次总体与参数

Fig. 3 One grain-size distribution and its six subpopulations and parameters

准,次总体中粗砂(0~1 ϕ)和中砂(1~2 ϕ)组分的选择性主要为极好;细砂(2~3 ϕ)组分的选择性主要为极好—好;极粗粉砂(4~5 ϕ)组分分选性为极好—较好;中—细粉砂(6~8 ϕ)组分的选择性与均值负线性关系明显(方差=1.1136 ϕ -6.3437, R^2 =0.8829),均值越小,分选性越差(图 4b)。根据 Folk 和 Ward (1957) 偏度等级划分标准,次总体粗砂(0~1 ϕ)组分偏度分布范围较大;中砂(1~2 ϕ)和细砂(2~3 ϕ)组分主要为粗偏—极细偏;由于泥质组分的存在,极粗粉砂(4~5 ϕ)、中粉砂(6~7 ϕ)和细粉砂(7~8 ϕ)组分主要为极粗偏(图 4c)。

各个次总体的偏度均小于 0.8,频率曲线峰态一般较宽(图 4d)。粗砂(0~1 ϕ)、中砂(1~2 ϕ)、细砂(2~3 ϕ)组分所占百分比分布区间较大,其中单个次总体组分所占百分比大于 60%的样品分选性较好(图 4e)。尽管极粗粉砂(4~5 ϕ)和中—细粉砂(6~8 ϕ)组分的次总体粒径频率值小,但是其分选性差,分布区间大,在粒度分布中的百分比仍可达到 20%,但一般不超过 30%(图 4e)。所有次总体的峰值频率均不超过 12%;极粗粉砂(4~5 ϕ)和中—细粉砂(6~8 ϕ)组分最大峰值频率分别小于 3%和 2%(图 4f)。

根据不同均值次总体的最大频率与其在粒度分布中所占百分比的交会图可知,次总体所占百分比与最大频率呈线性正相关关系:①当次总体粒度均值为 0~1 ϕ 时,所占百分比=8.1027 $\times$ 最大频率-2.3106 (R^2 =0.7660);②当次总体粒度均值为 1~

2 ϕ 时,所占百分比=10.103 $\times$ 最大频率-1.8329 (R^2 =0.8801);③当次总体粒度均值为 2~3 ϕ 时,所占百分比=9.6316 $\times$ 最大频率-2.1002 (R^2 =0.9157);④当次总体粒度均值为 4~5 ϕ 时,所占百分比=11.545 $\times$ 最大频率-1.6888 (R^2 =0.9044);⑤当次总体粒度均值为 6~8 ϕ 时,所占百分比=22.931 $\times$ 最大频率-2.8404 (R^2 =0.9444)(图 5)。次总体均值越小,线性关系越明显。因此,根据粒度分布中波峰的频率和位置,选取合适的经验公式,可以快速预测该波峰对应的次总体在粒度分布中所占比重。

4 沉积环境指示

4.1 不同沉积环境中次总体特征

本次现代沉积物取样环境涉及曲流河、三角洲和湖泊 3 种沉积相,其中曲流河相包括河道和河漫滩微相,三角洲相包括上平原和下平原分流河道、天然堤、河道间洼地和河流末端等微相(张金亮, 2019; 马鹏飞等, 2021; 张宪国等, 2021),湖泊沉积物主要来自于靠近康山河地区的湖区裸露地带。

曲流河河道沉积物粒度分布的次总体主要以粗砂(0~1 ϕ)和中砂(1~2 ϕ)组分为主,少量细砾组分,粗砂(0~1 ϕ)和中砂(1~2 ϕ)组分所占百分比一般大于 60%,分选性主要为较好—中等(方差大于 0.4)(图 6a)。曲流河河漫滩沉积物受到风力的改造,粒度分布频率曲线为单峰,次总体组分主要为中砂(1~2 ϕ)和细砂(2~3 ϕ),峰值频率接近 10%,所占百分比可高达 90%以上,分选极好;所含的极少数粗砂和粉砂组分所占百分比一般小于 5%(图 6b)。三角洲上平原分流河道沉积物粒度分布中主要包含 3~4 个次总体,中—细砂(1.5~2.5 ϕ)为主要组分,包含少量细砾和粉砂组分;在粒度分布中主要次总体所占百分比约 80%左右,分选好(图 6c)。与上平原分流河道相比,三角洲下平原分流河道的次总体个数也为 3~4 个,但是主要组分为细砂(2~3 ϕ);同时粒度分布中包含有约 3%的极粗粉砂(4~5 ϕ)组分(图 6d)。

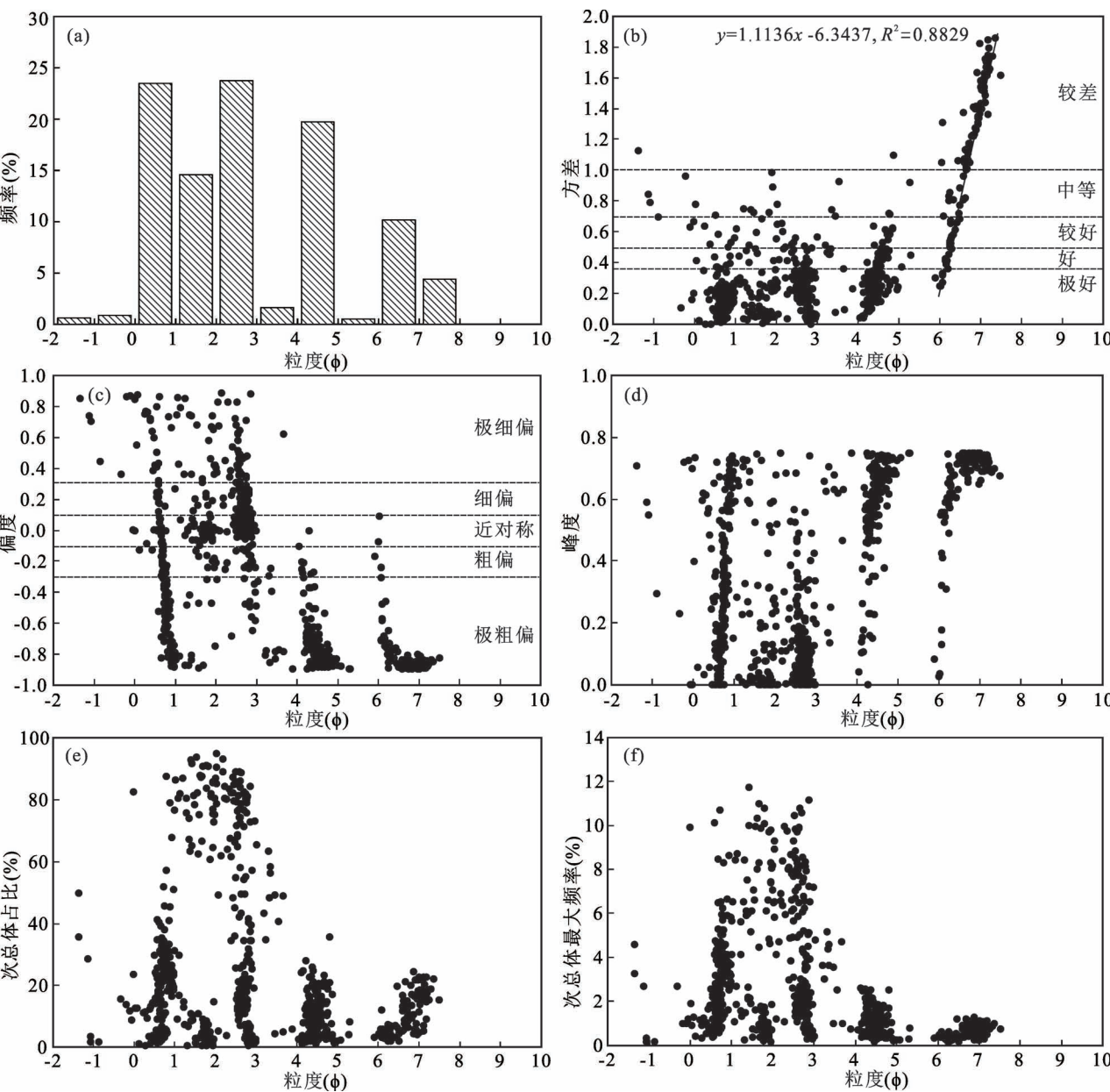


图 4 鄱阳湖沉积物 977 个次总体参数特征

Fig. 4 Parameter characteristics of 977 subpopulations

(a) 次总体均值直方图;(b) 次总体均值与方差交会图;(c) 次总体均值与偏度交会图;(d) 次总体均值与峰度交会图;(e) 次总体均值与所占百分比交会图;(f) 次总体均值与最大频率交会图

(a) Histogram of subpopulation means; (b) crossplot of subpopulation means and sortings; (c) crossplot of subpopulation means and skewness; (d) crossplot of subpopulation means and kurtosis; (e) crossplot of subpopulation means and percentages; (f) crossplot of subpopulation means and maximum frequencies

河流末端河道沉积物粒度分布的方差较大(大于 2),粒度分布主要包含 4~5 个次总体,每个次总体在粒度分布中的所占百分比均小于 50%,最大粒度频率一般小于 7%;主要次总体的粒度为细—极细砂(2.5~3.5 ϕ),呈极粗偏的形态(图 6e)。在河道间洼地和湖区取样的沉积物粒度分布的均值约为 3 ϕ ,方差一般大于 2.5;次总体个数一般为 5~7 个,

每个次总体在粒度分布中的所占百分比接近(均不超过 30%),最大粒度频率小于 5%,无明显占主导地位的次总体;中—细粉砂(6~8 ϕ)的偏度均小于-0.7(图 6f)。

对比不同沉积环境中的粒度分布次总体的特征,发现各个微相的粒度分布次总体的差异明显,相应的次总体参数特征见表 1。整体而言,从曲流河

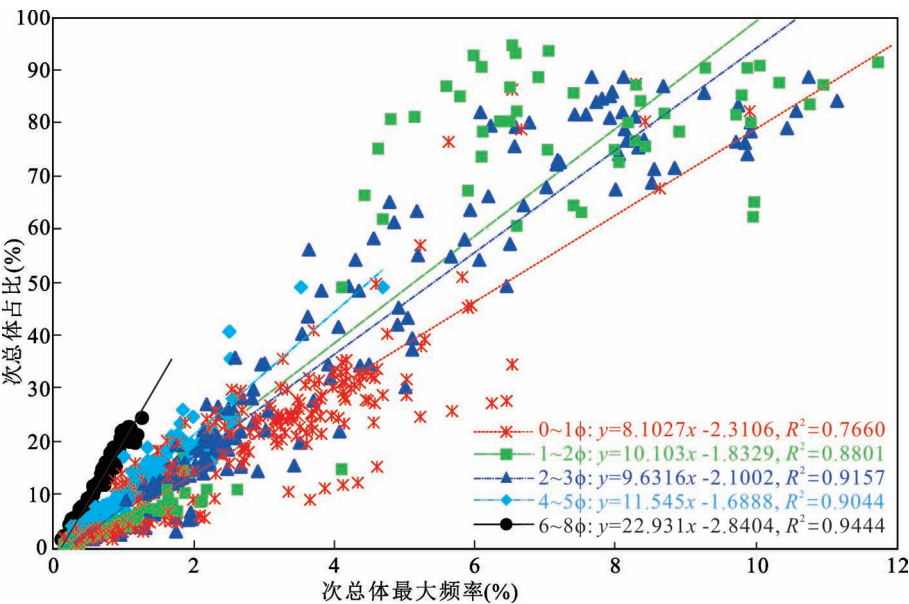


图 5 不同均值次总体最大频率与所占百分比交会图
Fig. 5 Crossplot of maximum frequencies and percentages of subpopulation within different means

到河流末端,粒度分布中主要次总体粒度均值逐渐减小,最大频率大于 2% 的次总体个数逐渐增多。但是河道间洼地和湖区的沉积物表现为河湖共同沉积的特征(王军等, 2017; 甘建军等, 2019; 杨超等, 2021),粒度分布的方差大,各个次总体占比接近,无明显的主要次总体,其中细粒组分极粗偏严重。

4.2 河流末端沉积物次总体差异

河流末端由于水流流量的减小,沿河道水流能量不断损失,河流没有能力再搬运沉积物,最终河流终止。本次在康山河末端顺河道取样 8 个;在河流消亡处左右两侧的河道、天然堤、天然堤外缘和靠湖区分别取样 4 次(图 1b)。在顺河道方向和左右两侧远离河道方向上,利用矩法公式计算得到各个粒度分布的均值并没有明显减小的规律(图 7)。利用偏正态概率分布模型,分离提取次总体后发现,样品

L20-8 至样品 L20-2 中所占百分比大于 40%、最大粒度频率大于 4% 的主要次总体的粒度均值由 0.70φ 逐渐减小至 3.32φ;样品 L20-1 各个次总体所占百分比和最大频率接近,没有占主导的次总体,主要表现为湖区沉积物的粒度分布次总体的特征(图 7a)。

左侧远离河道方向上,沉积物的粒度分布主要次总体的粒度均值由 0.73φ 逐渐减小到 3.20φ;天然堤 L20-L2 和天然堤外缘 L20-L3 样品的粒度分布为单峰形态,主要次总体所占百分比分别为 79.63% 和 79.86%,指示了被风改造的环境特征(图 7b)。在河道右侧,样品 L20-R1 至样品 L20-R3 的粒度分布主要

为双峰,对应的所占百分比均大于 25%;主要次总体粒度均值由 2.58φ 逐渐减小到 2.84φ;最远处样品 L20-R4 无主要次总体,多个次总体所占百分比接近(图 7c)。

因此,尽管粒度分布的参数无法表征河流终端沉积物粒度的变化规律,但是通过分离得到的次总体参数发现,离河道越远,主要次总体的粒度均值逐渐较小,最终转化为各个次总体的百分比接近、无主要次总体的特征。

5 讨论

5.1 江心洲沉积物次总体组合模式

曲流河江心洲的形成演化受控于泥沙与河流流水交互作用,其在洪水期快速加积、平水期缓慢侧积交替,在洪水期末漫溢的洪水在其表面沉积细粒物

表 1 不同沉积环境中沉积物的粒度分布次总体参数特征

Table 1 Parameter characteristics of GSD subpopulations from sediments in different sedimentary environments

参数	沉积微相					
	曲流河河道	曲流河河漫滩 (被风改造)	三角洲上平原 分流河道	三角洲下平原 分流河道	河道末端	河道间洼地和湖区
次总体个数	2~3	2~3	3~4	3~4	4~5	5~7
主要次总体均值(φ)	0~2	1~3	1.5~2.5	2~3	2.5~3.5	无主要次总体
主要次总体占比(%)	70~80	>80	70~80	60~90	30~50	所有次总体占比<30%
主要次总体最大频率(%)	6~10	8~12	6~10	5~11	4~7	所有次总体最大频率<5%

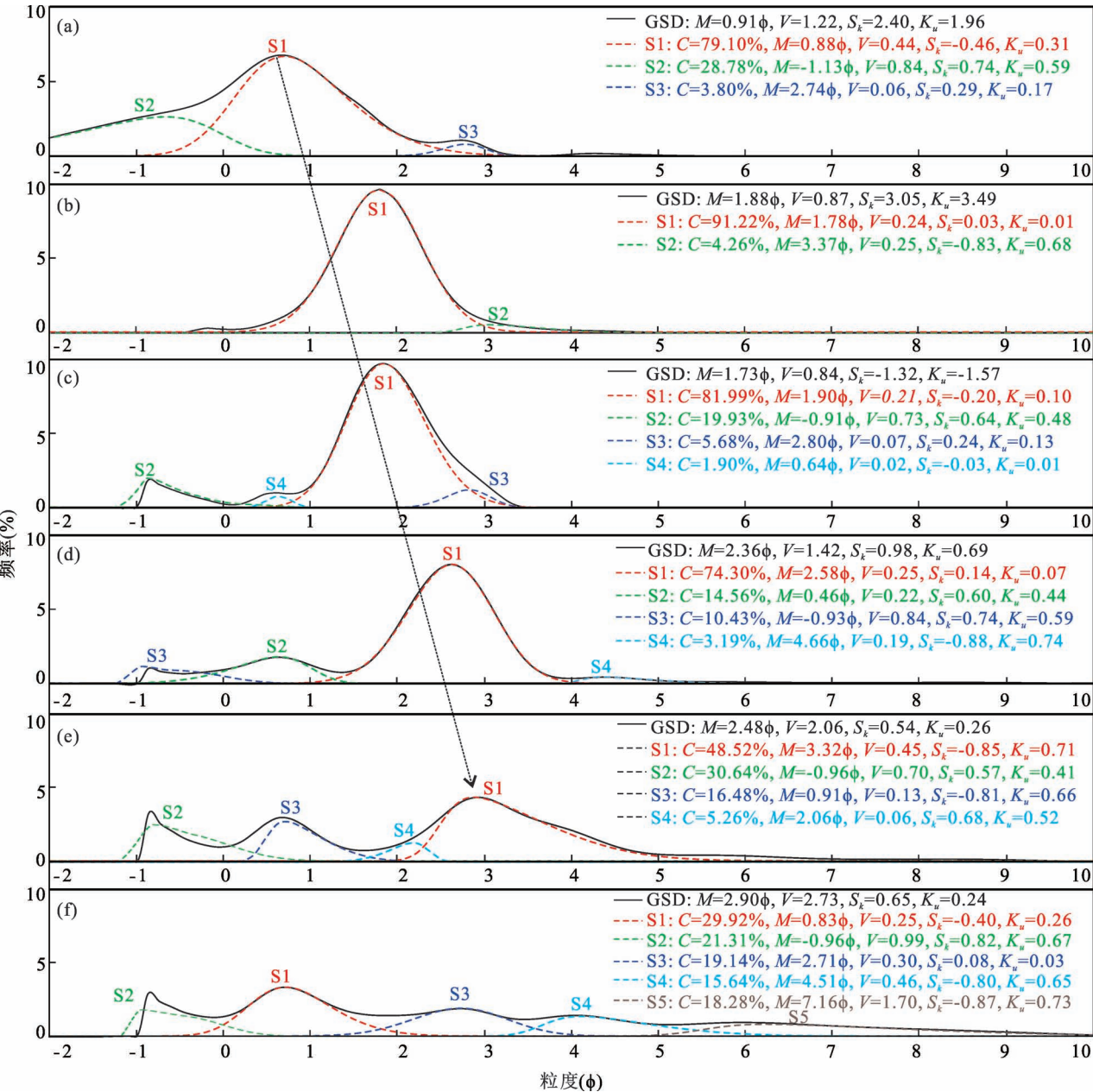


图 6 不同沉积环境中沉积物的粒度分布次总体

Fig. 6 GSD subpopulations of sediments in different sedimentary environments

(a) 赣江曲流河河道样品; (b) 赣江曲流河河漫滩上被改造为风成波痕沙丘样品; (c) 赣江三角洲上平原分流河道样品; (d) 康山河三角洲下平原分流河道样品; (e) 康山河末端河道样品; (f) 湖区样品

(a) Sample in the channel of the meandering Ganjiang River; (b) sample in the floodplain of the meandering Ganjiang River, which is transformed to be wind-rippled dunes; (c) sample in the distributary channel of the Ganjiang delta upper plain; (d) sample in the distributary channel of the Kangshan River delta lower plain; (e) sample in the channel terminal of the Kangshan River; (f) sample in lake center

质,因此江心洲沉积物包括河道砂与河漫滩细粒(马鹏飞等, 2021; 张宪国等, 2021)。本次取样在康山河分叉口江心洲 8 个不同位置的浅层探槽处取样 5~11 次,共取得沉积物 66 份(图 1c)。根据取样剖面的粒度和沉积构造,判断沉积物主要来源于 2 种沉积环境:①以交错层理为主的河道砂;②以块状

层理为主的河漫滩泥质粉砂和粉砂质泥。这两者的沉积物粒度分布数据特点差异明显,河道砂的粒度频率曲线主要以双峰为主,其中 1 个波峰频率值大;河漫滩细粒的粒度频率曲线主要以多峰为主,没有相对较大的峰值频率(图 8)。

利用偏正态分布共分离得到 231 个次总体,根

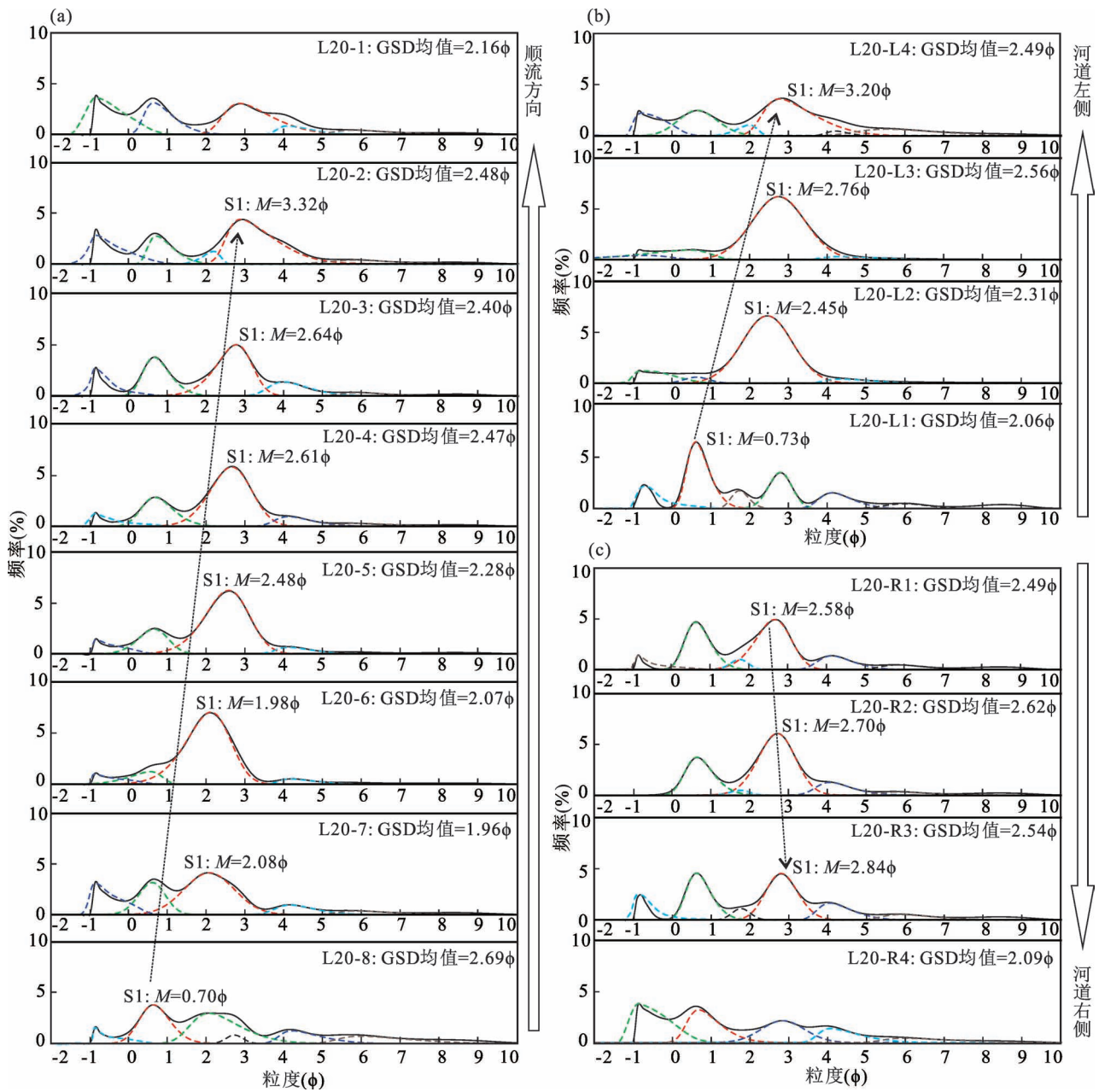


图 7 康山河末端不同位置沉积物的粒度分布次总体

Fig. 7 GSD subpopulations of sediments in different location of the terminal of the Kangshan River

(a) 顺河流方向上沉积物粒度分布次总体; (b) 河道左侧沉积物粒度分布次总体; (c) 河道右侧沉积物粒度分布次总体

(a) GSD subpopulations of sediments downstream in channel; (b) GSD subpopulations of sediments in channel left; (c) GSD subpopulations of sediments in channel right

据次总体的均值、所占百分比和最大频率的特征,将次总体归纳为 8 种类型(图 9、表 2)。河道砂粒度分布由 T1、T5 和 T6 次总体类型组成,T5 次总体在粒度分布中占主导,所占百分比超过 60%,最大粒度频率介于 6%~11%之间;T1 次总体占比其次,最大频率一般小于 2%;T6 次总体占比最小,最大频率一般小于 1%。河漫滩细粒粒度分布主要由 T2、T3、

T4、T7 和 T8 次总体类型组成,各个次总体的所占百分比一般不超过 40%,最大频率不超过 5%;T3 次总体主要隐含于 T2 和 T4 之间,所占百分比及最大频率均较小;T8 次总体多为极粗偏、宽峰度形态。

5.2 不同搬运方式次总体定量化

利用粒度分布分析沉积物的搬运方式时,常用的方法是根据粒度分布概率累积曲线形态划分滚

表 2 康山河江心洲沉积物次总体不同类型

Table 2 Different types of subpopulations from sediments in the central bar of the Kangshan River

参数	次总体类型							
	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8
均值(ϕ)	0~1	0~1	1~2	2~3	2~3	4~5	4~5	6~8
所占百分比(%)	<20	20~40	<15	10~45	70~90	<5	5~30	<30
最大频率(%)	<2	2~5	<2	<5	6~11	<1	1~2.5	<1

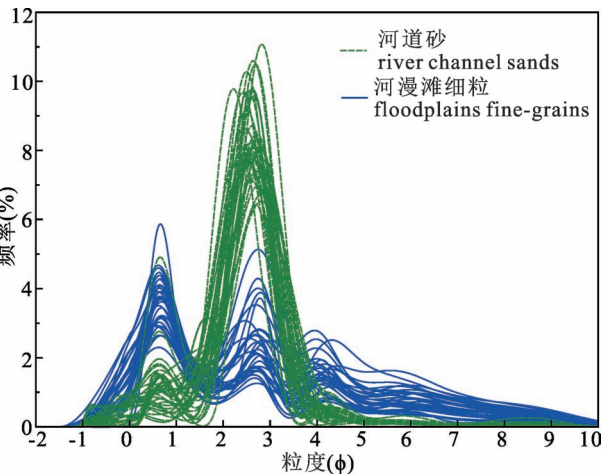


图 8 66 份康山河江心洲沉积物粒度分布数据
Fig. 8 GSD data of 66 sediments from the central bar of the Kangshan River

动、跳跃和悬浮次总体 (Visher, 1969)。但是这种方法无法定量计算各个次总体在粒度分布中的所占百分比。结合偏正态分布分离的次总体及其参数,可以定量研究沉积物的搬运方式和沉积过程。例如,根据一份来自赣江三角洲下平原分流河道沉积物的

粒度分布概率累积曲线可知,该沉积物包含跳跃和悬浮次总体,不包括滚动组分(图 10)。其中跳跃次总体分为 2 个直线段,这一特点可能是由河道冲流和局部回流两种沉积造成的 (Visher, 1969)。第一个跳跃段对应了占比为 18.0%、粒度为 0~1.5 ϕ 、方差为 0.12 的组分,第二个跳跃段对应了占比为 67.6%、粒度为 1.5~3.5 ϕ 、方差为 0.22 的组分。前者粒度较粗,分选性更好,代表了较强水动力的冲流沉积,后者粒度稍细,分选性较差,暗示了河道局部回流沉积。悬浮次总体包含了粒度分别为 4~5 ϕ 、5.5~6.5 ϕ 和 8~9 ϕ 、方差分别为 0.15、0.36 和 0.46 的 3 个组分;粒度越小的组分,分选性越差,代表的水动力越弱(图 10)。尽管在粒度分布概率累积曲线中悬浮段对应的线段较长,但是 3 个悬浮组分占比均小于 4%、最大频率均小于 1%,其总体含量小,搬运沉积物的水动力整体较强。因此,对粒度分布进行分离后,不同搬运方式次总体所对应的沉积过程个数及其在粒度分布中所占百分比均可定量确定。

6 结论

利用偏正态概率分布从 214 份鄱阳湖现代沉积

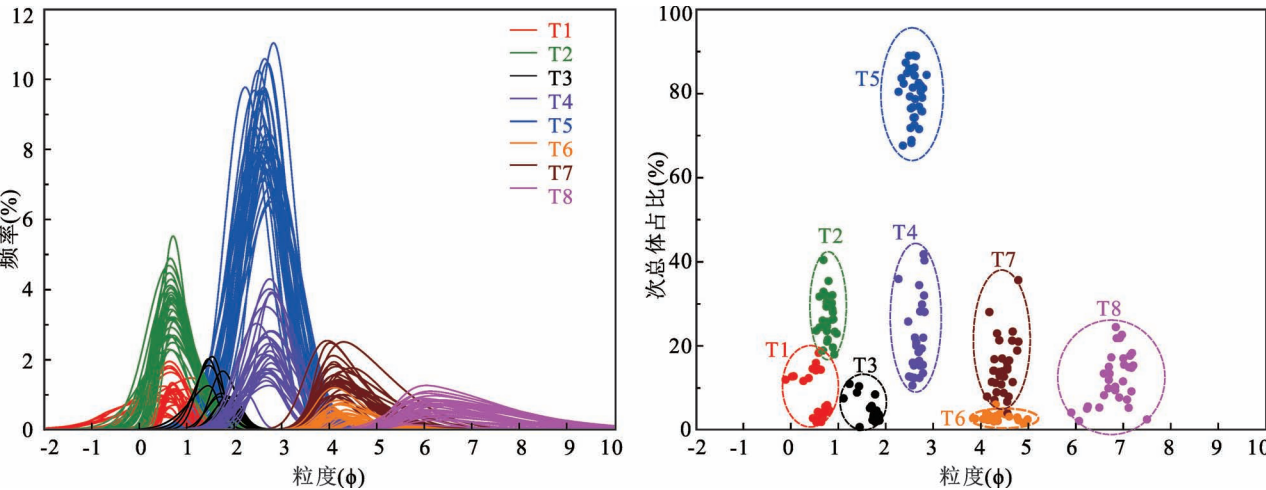


图 9 康山河江心洲沉积物次总体参数特征
Fig. 9 Parameter characteristics of GSD subpopulations from sediments in the central bar of the Kangshan River

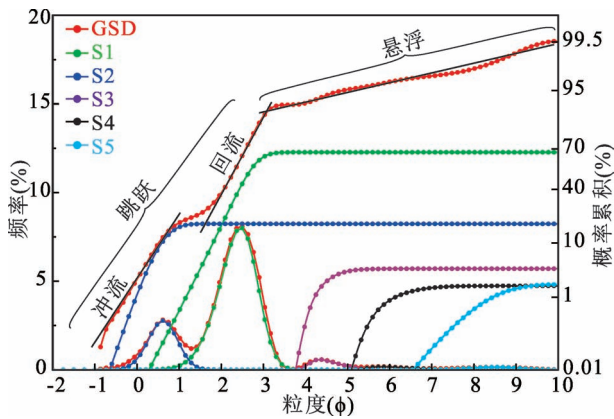


图 10 粒度分布及其次总体的频率及概率累积曲线 (赣江三角洲下平原分流河道沉积物样品)
Fig. 10 Frequency and probability cumulative curves of GSD and subpopulations (sample in the distributary channel of the Ganjiang delta lower plain)

物的粒度分布数据中分离得到了 977 个次总体,研究了次总体参数特征及沉积意义,得到以下结论和认识:

(1)次总体均值主要为 0~1 ϕ 、1~2 ϕ 、2~3 ϕ 、4~5 ϕ 、6~7 ϕ 和 7~8 ϕ 。均值为 0~2 ϕ 的次总体分选性极好,均值为 2~3 ϕ 的次总体分选性极好—好,均值为 4~5 ϕ 的次总体分选性极好—较好,均值为 6~8 ϕ 次总体的分选性随着均值的减小而变差。均值为 4~5 ϕ 和 6~8 ϕ 次总体主要为极粗偏;次总体偏度均小于 0.8。均值为 4~5 ϕ 和 6~8 ϕ 次总体的所占百分比一般不超过 30%。次总体的最大频率均不超过 12%,且均值为 4~5 ϕ 次总体的最大频率小于 3%、均值为 6~8 ϕ 次总体的最大频率小于 2%。次总体的所占百分比与最大频率呈线性正相关关系。

(2)从曲流河河道到河流末端,在粒度分布中占主导的次总体粒度均值逐渐减小,最大频率大于 2%的次总体个数逐渐增多。河道间洼地和湖区的沉积物粒度分布次总体占比接近,无明显的主要次总体,且细粒组分极粗偏严重。受风改造的河漫滩沉积物粒度分布频率曲线为主要为单峰,主要次总体的最大频率约 10%,所占百分比可高达 90%以上。在河流末端顺流方向和河道左右两侧远离河道方向上,粒度分布的主要次总体均值逐渐较小,最终转变为次总体占比接近。

(3)江心洲沉积物的粒度分布主要由 8 种类型的次总体组成,其中河道砂粒度分布主要包括均值

为 0~1 ϕ 且最大频率小于 2%、均值为 2~3 ϕ 且最大频率大于 6%和均值为 4~5 ϕ 且最大频率小 1%的 3 种次总体;河漫滩细粒粒度分布主要包含均值为 0~1 ϕ 且最大频率 2%~5%、均值为 1~2 ϕ 、均值为 2~3 ϕ 且最大频率小于 5%、均值为 4~5 ϕ 且最大频率 1%~2.5%和均值为 6~8 ϕ 的 5 种次总体。

(4)利用偏正态概率分布可以分离粒度分布中叠加的次总体,计算各个次总体的参数为沉积环境的定量化判断提供了一种新思路。结合粒度分布概率累积曲线和分离的次总体,可以定量计算不同搬运方式的所占百分比和确定对应的沉积过程个数,为沉积过程的定量化研究提供参考。

参 考 文 献 / References

(The literature whose publishing year followed by a “&” is in Chinese with English abstract; The literature whose publishing year followed by a “#” is in Chinese without English abstract)

常宏, 左合君, 王海兵, 闫敏. 2019. 黄河乌兰布和沙漠段两岸地表沉积物多重分形特征及其指示意义. 干旱区研究, 36(6): 1559~1567.

甘建军, 万胜, 李荐华, 唐春, 杨涛, 罗藏青排. 2019. 基于沉积环境与工程地质特征的湖相软土分类研究——以鄱阳湖流域四种典型软土为例. 地质论评, 65(4): 983~992.

纪伟涛等. 2017. 鄱阳湖——地形·水文·植被. 北京: 科学出版社.

李洋, 查小春, 黄春长, 庞奖励, 刘俊余. 2020. 基于粒度端元分析的甘肃天水全新世古泥流沉积事件研究. 兰州大学学报: 自然科学版, 56(3): 311~318+325.

梁爱民, 屈建军, 董治宝, 苏志珠, 吴波, 张正偲, 钱广强, 高君亮, 庞营军, 张彩霞. 2020. 库姆塔格沙漠沉积物粒度端元特征及其物源启示. 中国沙漠, 40(2): 33~42.

刘祥奇, 宋磊, 吴奇龙, 李国民, 毛欣. 2020. 基于粒度分布曲线的邻近传播聚类算法在沉积环境识别中的应用——以白洋淀地区为例. 海洋地质与第四纪地质, 40(1): 198~209.

马鹏飞, 论珠群培, 张焱, 次仁尼玛, 逯军峰, 梁爱民, 张正偲. 2021. 雅鲁藏布江中游江心洲、河漫滩面积及其指示的沙源特征. 中国沙漠, 41(3): 25~33.

万智巍, 陈曦, 鞠民, 廖富强, 曹向明, 张智, 贾玉连. 2020. 鄱阳湖南矶湿地沉积物粒级组成特征及搬运趋势分析. 长江流域资源与环境, 29(11): 2462~2469.

王军, 杨勇, 张阳, 杨保良, 蒋龙, 邱隆伟, 赵俊英. 2017. 水位变化对鄱阳湖三角洲分流河道沉积特征的影响. 中国石油大学学报(自然科学版), 41(1): 1~10.

王中波, 陆凯, 温珍河, 张志珣, 李日辉, 梅西, 蓝先洪. 2020. 中国东部海域表层沉积物粒度组成及影响因素. 地球科学, 45(7): 2709~2721.

杨超, 朱红涛, 牛成民, 杜晓峰, 刘强虎, 孙中恒. 2021. 陆相盆地浅水背景河湖交互特征及其模式. 地球科学, 46(5): 1771~1782.

张昌民, 宋新民, 王小军, 王绪龙, 赵康, 双棋, 李少华. 2020. 支撑砾岩的成因类型及其沉积特征. 石油勘探与开发, 47(2): 272~285.

张金亮. 2019. 河流沉积相类型及相模式. 新疆石油地质, 40(2):

- 244~252.
- 章婷曦, 文莹亭, 董丹萍, 王国祥. 2018. 太湖西北部表层沉积物粒度特征与沉积环境. *湖泊科学*, 30(3): 836~846.
- 张宪国, 王涵巍, 张涛, 段冬平, 林承焰, 黄鑫. 2021. 曲流串沟型江心洲形成机制与演化探讨——以现代松花江为例. *沉积学报*, 网络首发: <https://doi.org/10.14027/j.issn.1000-0550>. 2021. 052.
- Ashour S K, Abdel-hameed M A. 2010. Approximate skew normal distribution. *Journal of Advanced Research*, 1(4): 341~350.
- Azzalini A. 1985. A class of distributions which includes the normal ones. *Scandinavian Journal of Statistics*, 12: 171~178.
- Azzalini A. 2005. The skew-normal distribution and related multivariate families. *Scandinavian Journal of Statistics*, 32: 159~188.
- Bader H. 1970. The hyperbolic distribution of particle sizes. *Journal of Geophysical Research*, 75(15): 2822~2830.
- Bartholdy J, Christiansen C, Pedersen J B T. 2007. Comparing spatial grain-size trends inferred from textural parameters using percentile statistical parameters and those based on the log-hyperbolic method. *Sedimentary Geology*, 202: 436~452.
- Biswas A. 2019. Joint multifractal analysis for three variables: Characterizing the effect of topography and soil texture on soil water storage. *Geoderma*, 334: 15~23.
- Blott S J, Pye K. 2001. GRADISTAT: A grain size distribution and statistics package for the analysis of unconsolidated sediments. *Earth Surface Processes and Landforms*, 26: 1237~1248.
- Bright C, Mager S, Horton S. 2020. Response of nephelometric turbidity to hydrodynamic particle size of fine suspended sediment. *International Journal of Sediment Research*, 35(5): 444~454.
- Bustamante-Penagos N, Niño Y. 2020. Suspension and infiltration of copper concentrate in a gravel bed: a flume study to evaluate the fate of a potential spill in a Chilean river. *Environmental Earth Sciences*, 79: 530.
- Carder K L, Beardsley Jr G F, Pak H. 1971. Particle size distributions in the Eastern Equatorial Pacific. *Journal of Geophysical Research*, 76(21): 5070~5077.
- Carling P A. 1984. Deposition of fine and coarse sand in an open-work gravel bed. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 41(2): 263~270.
- Chang Hong, Zuo Hejun, Wang Haibing, Yan Mi. 2019. Multifractal features and their significances of surface sediments along both banks of the Yellow River reach in the Ulanbuh Desert. *Arid Zone Research*, 36(6): 1559~1567.
- Fieller N R J, Gibertson D D, Griffin C M, Briggs D J, Jenkinson R D S. 1992. The statistical modelling of the grain size distributions of cave sediments using log skew Laplace distributions: Creswell Crags, near Sheffield, England. *Journal of Archaeological Science*, 19: 129~150.
- Folk R L, Ward W C. 1957. Brazos River bar: A study in the significance of grain size parameters. *Journal of Sedimentary Petrology*, 27: 3~26.
- Friedman G M, Sanders J E. 1978. *Principles of Sedimentology*. Wiley: New York.
- Gan Jianjun, Wan Sheng, Li Jianhua, Tang Chun, Yang Tao, Luo Zang Qingpai. 2019. Classification of lacustrine soft soil based on sedimentary environment and engineering characteristics—A case study of four typical soft soil in Poyang Lake basin. *Geological Review*, 65(4): 983~992.
- Gan S Q, Scholz C A. 2017. Skew normal distribution deconvolution of grain-size distribution and its application to 530 samples from Lake Bosumtwi, Ghana. *Journal of Sedimentary Research*, 87: 1214~1225.
- Gibson S, Heath R E, Abraham D, Schoellhamer D. 2011. Visualization and analysis of temporal trends of sand infiltration into a gravel bed. *Water Resources Research*, 47(12): 12601.
- Gupta A K, Chen T. 2001. Goodness-of-fit tests for the skew-normal distribution. *Communications in Statistics — Simulation and Computation*, 30(4): 907~930.
- Hateren J A, Prins M A, Balen R T. 2018. On the genetically meaningful decomposition of grain-size distributions: A comparison of different end-member modelling algorithms. *Sedimentary Geology*, 375: 49~71.
- Herrero A, Berni C. 2016. Sand infiltration into a gravel bed: A mathematical model. *Water Resources Research*, 52(11): 8956~8969.
- Ibbeken H. 1983. Jointed source rock and fluvial gravels controlled by Rosin's law: a grain-size study in Calabria, South Italy. *Journal of Sedimentary Petrology*, 53(4): 1213~1231.
- Ijmker J, Stauch G, Dietze E, Hartmann K, Diekmann B, Lockot G, Opitz S, Wünnemann B, Lehmkuhl F. 2012. Characterisation of transport processes and sedimentary deposits by statistical end-member mixing analysis of terrestrial sediments in the Donggi Cona lake catchment, NE Tibetan Plateau. *Sedimentary Geology*, 281(1): 166~179.
- Ji Weitao, et al. 2017. *Poyang Lake——Topography · Hydrology · Vegetation*. Beijing: Science Press.
- Khullar N K, Raju K G R. 2017. Experimental and mathematical investigation for infiltration of fine suspended sediments into surface layer of bed material. *ISH Journal of Hydraulic Engineering*, 23(1): 23~34.
- Kittleman L R. 1964. Application of Rosin's distribution in size-frequency analysis of clastic rocks. *Journal of Sedimentary Research* 34(3): 483~502.
- Kondolf G M, Adhikari A. 2000. Weibull vs. lognormal distributions for fluvial gravels. *Journal of Sedimentary Research*, 70(3): 456~460.
- Krumbein W C, Pettijohn F J. 1938. *Manual of sedimentary petrography*. Appleton-Century-Crofts, New York, USA.
- Krumbein W C. 1934. Size frequency distributions of sediments. *Journal of Sedimentary Research*, 4(2): 65~77.
- Kuhnle R A. 1993. Fluvial transport of sand and gravel mixtures with bimodal size distributions. *Sedimentary Geology*, 85: 1~4.
- Li Jinlin, He Xiubin, Wei Jie, Bao Yuhai, Tang Qiang, Nambajimana J D, Nsabimana G, Khurram D. 2021. Multifractal features of the particle-size distribution of suspended sediment in the Three Gorges Reservoir, China. *International Journal of Sediment Research*, 36(4): 489~500.
- Li Yang, Zha Xiaochun, Huang Chunchang, Pang Jiangli, Liu Junyu. 2020. Study on the Holocene paleomudflow events in Tianshui, Gansu Province, based on grain size end-member analysis. *Journal of Lanzhou University: Natural Sciences*, 56(3): 311~318+325.
- Liang Aimin, Qu Jianjun, Dong Zhibao, Su Zhizhu, Wu Bo, Zhang Zhengcai, Qian Guangqiang, Gao Junliang, Pang Yingjun, Zhang Caixia. 2020. The characteristic of grain size end members in Kumtagh Desert and its implication for sediment source. *Journal of Desert Research*, 40(2): 33~42.
- Liu Xiangqi, Song Lei, Wu Qilong, Li Guomin, Mao Xin. 2020.

- Application of the affinity propagation clustering algorithm based on grain-size distribution curve to discrimination of sedimentary environment—A case study in Baiyangdian area. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 40(1): 198~209.
- Ma Pengfei, Lunzhu Qunpei, Zhang Yan, Nima Ciren, Lu Junfeng, Liang Aimin, Zhang Zhengcai. 2021&. Sand supplement characteristics indicated by the area of river inland, flood plain in the riverbed of the Yarlung Zangbo River. *Journal of Desert Research*, 41(3): 25~33.
- Ordóñez C, Ruiz-Barzola O, Sierra C. 2016. Sediment particle size distributions apportionment by means of functional cluster analysis (FCA). *Catena*, 137: 31~36.
- Passega R. 1964. Grain size representation by CM patterns as a geological tool. *Journal of Sedimentary Research*, 34(4): 830~847.
- Paz-Ferreiro J, Vázquez E V, Miranda J G V. 2010. Assessing soil particle-size distribution on experimental plots with similar texture under different management systems using multifractal parameters. *Geoderma*, 160: 47~56.
- Posadas A N D, Giménez D, Bittelli M, Vaz C M P, Flury M. 2001. Multifractal characterization of soil particle-size distributions. *Soil Science Society of America Journal*, 65: 1361~1367.
- Purkait B. 2002. Patterns of grain-size distribution in some point bars of the Usri River, India. *Journal of Sedimentary Research*, 72(3): 367~375.
- Qiao Jiangbo, Zhu Yuanjun, Jia Xiaoxu, Shao Ming'an. 2021. Multifractal characteristics of particle size distributions (50~200 m) in soils in the vadose zone on the Loess Plateau, China. *Soil & Tillage Research*, 205: 104786.
- Risovic D. 1993. Two-component model of sea particle size distribution. *Deep-Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 40(7): 1459~1473.
- Román-Sánchez A, Temme A, Willgoose G, Berg D, Gura C M, Vanwalleghe T. 2021. The fingerprints of weathering: Grain size distribution changes along weathering sequences in different lithologies. *Geoderma*, 383: 114753.
- Rose M D, Mattioli M, Capuano N, Renzulli A. 2019. Stratigraphy, petrography and grain-size distribution of sedimentary lithologies at Cahuachi (South Peru): ENSO-related deposits or a common regional succession? *Geosciences*, 9: 80.
- Spencer D W. 1963. The interpretation of grain size distribution curves of clastic sediments. *Journal of Sedimentary Petrology*, 33(1): 180~190.
- Udden J A. 1914. Mechanical composition of some elastic sediments. *Geological Society of America Bulletin*, 25: 655~744.
- Vandenbergh J. 2013. Grain size of fine-grained windblown sediment: A powerful proxy for process identification. *Earth-Science Reviews*, 121: 18~30.
- Visher G S. 1969. Grain size distributions and depositional processes. *Journal of Sedimentary Petrology*, 39(3): 1074~1106.
- Wan Zhiwei, Chen Xi, Ju Min, Liao Fuqiang, Cao Xiangming, Zhang Zhi, Jia Yulian. 2020&. Analysis of grain size characteristics and trend of sediments in the Nanji Wetland of Poyang Lake. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 29(11): 2462~2469.
- Wang Jun, Yang Yong, Zhang Yang, Yang Baoliang, Jiang Long, Qiu Longwei, Zhao Junying. 2017&. Impact of water level change on sedimentary characteristics of distributary channel in Poyang Lake delta. *Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)*, 41(1): 1~10.
- Wang Zhongbo, Lu Kai, Wen Zhenhe, Zhang Zhixun, Li Rihui, Mei Xi, Lan Xianhong. 2020&. Grain Size compositions and their influencing factors of the surface sediments in Eastern China Seas. *Earth Science*, 45(7): 2709~2721.
- Weltje G J, Prins M A. 2007. Genetically meaningful decomposition of grain-size distributions. *Sedimentary Geology*, 202: 409~424.
- Weltje G J. 1997. End member modeling of compositional data: Numerical—statistical algorithms for solving the explicit mixing problem. *Mathematical Geology*, 29(4): 503~549.
- Wooster J K, Dusterhoff S R, Cui Y, Sklar L S, Dietrich W E, Malko M. 2008. Sediment supply and relative size distribution effects on fine sediment infiltration into immobile gravels. *Water Resources Research*, 44: W03424.
- Wu Li, Krijgsman W, Liu Jian, Li Chaozhu, Wang Rujian, Xiao Wenshen. 2020. CFLab: A MATLAB GUI program for decomposing sediment grain size distribution using Weibull functions. *Sedimentary Geology* 398: 105590.
- Xiao Jule, Chang Zhigang, Fan Jiawei, Zhou Lang, Zhai Dayou, Wen Ruilin, Qin Xiaoguang. 2012. The link between grain-size components and depositional processes in a modern clastic lake. *Sedimentology*, 59: 1050~1062.
- Yalçinkaya A B, Yolcu U. 2018. Maximum likelihood estimation for the parameters of skew normal distribution using genetic algorithm. *Swarm and Evolutionary Computation*, 38: 127~138.
- Yang Chao, Zhu Hongtao, Niu Chengmin, Du Xiaofeng, Liu Qianghu, Sun Zhongheng. 2021&. Characteristics and models of shallow-water environmental river—lake interaction in continental basins. *Earth Science*, 46(5): 1771~1782.
- Yuan Rui, Zhang Changmin, Wang Xulong, Zhu Rui. 2018. Utilizing skew normal distribution to unmix grain-size distribution of swampy lakeshore: example from Lake Ulungur, China. *Arabian Journal of Geosciences*, 11: 695.
- Zhang Changmin, Song Xinmin, Wang Xiaojun, Wang Xulong, Zhao Kang, Shuang Qi, Li Shaohua. 2020&. Origin and depositional characteristics of supported conglomerates. *Petroleum Exploration and Development*, 47(2): 272~285.
- Zhang Jinliang. 2019. Fluvial facies styles and their sedimentary facies models. *Xinjiang Petroleum Geology*, 40(2): 244~252.
- Zhang Tingxi, Wen Yingting, Dong Danping, Wang Guoxiang. 2018&. Grain size features and sedimentary environment of surficial sediments in the northwest Lake Taihu. *Journal of Lake Sciences*, 30(3): 836~846.
- Zhang Xianguo, Wang Hanwei, Zhang Tao, Duan Dongping, Lin Chengyan, Huang Xin. 2021. Mechanism and evolution of ditch-scouring to form central bar in meandering river: A case study in modern Songhuajiang River. *Acta Sedimentologica Sinica*, online: <https://doi.org/10.14027/j.issn.1000-0550.2021.052>.
- Zhang Xiaodong, Wang Hongmin, Xu Shumei, Yang Zuosheng. 2020. A basic end-member model algorithm for grain-size data of marine sediments. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 236: 106656.

Decomposing subpopulations from grain-size distributions based on skew normal probability distribution and their significances for sedimentary environments

YUAN Rui¹⁾, ZHANG Changmin²⁾, ZHAO Yun²⁾, ZHANG Li²⁾,
CHEN Zhe³⁾, ZHANG Baojin⁴⁾, HUANG Ruoxin⁵⁾

- 1) School of Geophysics and Petroleum Resources, Yangtze University, Wuhan, 430100;
- 2) School of Geosciences, Yangtze University, Wuhan, Hubei, 430100;
- 3) Chengdu North Petroleum Exploration and Development Technology Co., Ltd, Chengdu, 610051;
- 4) Sinopec Jiangnan Oilfield Company, Qianjiang, Hubei, 433124;
- 5) COSL Well Tech of China Oilfield Services Ltd., Beijing, 101149

Objectives: Operated by multiple sedimentary processes in some sedimentary environments and dynamics, the occurrence frequencies of different diameter particles, called grain-size distribution (GSD) in sedimentology and geology, record original sedimentary information. Superposed by multi-subpopulations, the corresponding frequency curve of GSD could be bimodal or multimodal. Traditional methods for sedimentological analysis do not research the subpopulations in GSD deeply. After unmixing subpopulations from GSD, usual probability distribution models are unable to calculate statistical parameters of subpopulations thoroughly.

Methods: Taking 214 GSDs from modern sediments in the Poyang Lake for example, skew normal probability distribution is used to decompose total 977 subpopulations in this paper. Statistical parameters of subpopulations, such as mean, sorting, skewness, kurtosis, percentage in GSD and maximum frequency, are all calculated. Similarities and differences of these parameters from various sedimentary environments are compared.

Results: The statistical parameters of subpopulations are in obvious rules. Means of subpopulations focus in six intervals: 0~1φ, 1~2φ, 2~3φ, 4~5φ, 6~7φ and 7~8φ. Subpopulations with means in 0~2φ, 2~3φ and 4~5φ are excellent, excellent—well and excellent—moderate sorted respectively; sorting of subpopulations with means in 6~8φ are negative linear correlation with means. Subpopulations with means in 4~5φ and 6~8φ are mainly very coarse skewed. Kurtosis of all subpopulations are less than 0.8. Percentages in GSDs of subpopulations with means in 4~5φ and 6~8φ are generally less than 30%. Maximum frequencies of all subpopulations are less than 12%, and that of subpopulations with means in 4~5φ and 6~8φ are less than 3% and 2% respectively. Percentages in GSDs of subpopulations with different means are positive linear correlation with corresponding maximum frequencies.

Conclusions: From the channel to terminal of river, and downstream or left and right away from channels in the river terminal, means of main subpopulations decrease gradually. Percentage of each subpopulations in GSDs of sediments from interchannel hollows and near lake regions are approximated, which means that there is no obvious main subpopulation. Reworked by wind, sediments from floodplain are unimodal distribution, with maximum frequencies about 10% and percentages in GSDs about 90%. In the central bar of the Kangshan River, GSDs of sediments from river channel sands and floodplains fine-grains are constituted by three and five different types of subpopulations respectively. This paper would offer reference information for distinguishing sedimentary environments and researching sedimentary processes quantificationally.

Keywords: skew normal probability distribution; grain-size distribution; parameters of subpopulations; sedimentary environment; Poyang Lake

Acknowledgements: This research is supported by Scientific Research Project of Hubei Provincial Department of Education (No. Q20211302), Natural Science Foundation of China (Nos. 42130813 and

41772094) and National Science and Technology Major Project of China (No. 2016ZX05027-002-007).

First author: YUAN Rui, male, born in 1987, doctor, lecturer, mainly engaged in research and teaching of data mining in geoscience; Email: yuanrui@yangtzeu.edu.cn

Corresponding author: ZHANG Changmin, male, born in 1963, doctor, professor, doctoral supervisor, mainly engaged in research and teaching of sedimentology; Email: zcm@yangtzeu.edu.cn

Manuscript received on: 2021-09-21; Accepted on: 2021-12-16; Network published on: 2022-01-20

Doi: 10. 16509/j. georeview. 2022. 01. 016

Edited by: LIU Zhiqiang

川南沐川地区沉积型铜—铌—钛—镓—多金属综合找矿新模型

文俊

四川省地质矿产勘查开发局二零七地质队,四川乐山, 614000



中国地质学会
成立100周年
1922~2022
www.geojournals.cn/georev

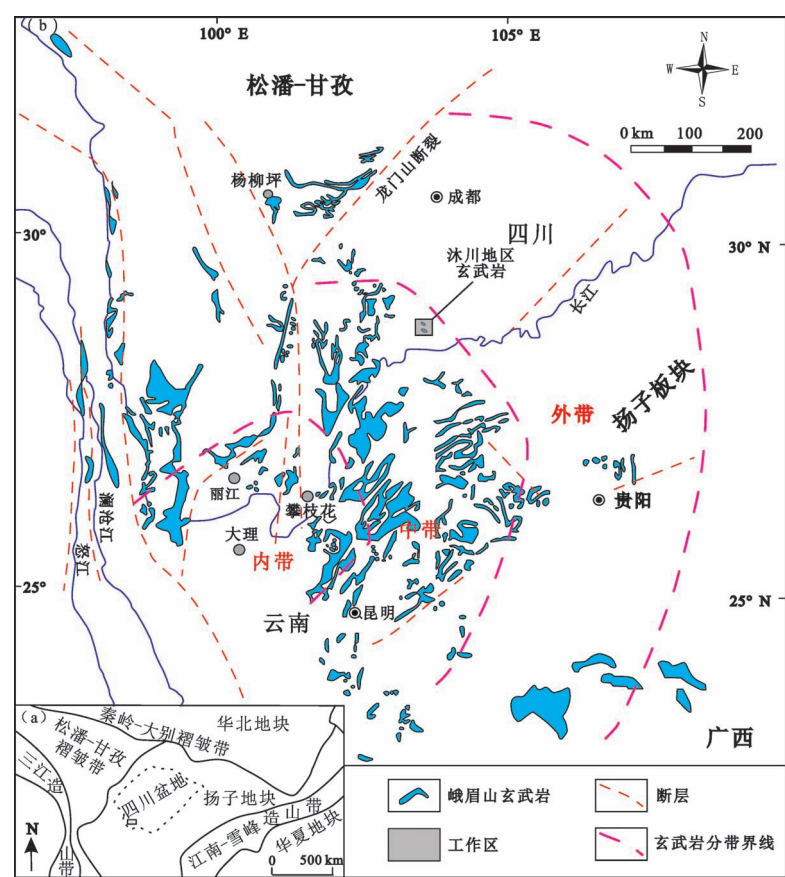


Figure 1 consists of two maps. Map (a) is a tectonic location map showing the Mochuan area in southern Sichuan, China, situated between the Yangtze Craton to the north and the Sichuan Craton to the south. It highlights the distribution of Emeishan玄武岩 (Emeishan basalt) and the work area. Map (b) is a simplified distribution map of Emeishan玄武岩 in the Mochuan area, showing the distribution of the Emeishan玄武岩, the work area, and the boundary of the Emeishan玄武岩 distribution zone. The maps include labels for major cities like Chengdu, Kunming, and Guiyang, and major rivers like the Yangtze River. A scale bar and a north arrow are also present.

近年,在实施四川省政府性投资地质勘查项目中,坚持综合找矿准则,在上二叠统宣威组顶部勘查沉积型铜矿,又在宣威组底部发现了古风化壳—沉积型铌、钛、镓多金属矿(文俊等, 2022)。战略性矿产在未来经济社会的发展过程中具有重要的应用,未来需求将呈快速增长趋势(王登红,2019),通过本次综合找矿,实现了一个矿区找矿多个矿种、多个矿体的目标。通过本次报道,以期达到指导相似成矿地质背景的地区实现找矿新进展,对区域找矿具有重要意义。

1 研究方法

主要采用了1:10000地质填图、钻探工程、探槽工程、1:500地层剖面测量等手段对宣威组顶部的沉积型铜矿体和底部的古风化壳—沉积型铌、钛、镓多金属矿体进行调查和控制,采集样品分析测试Cu、Nb₂O₅、TiO₂、Ga含量,结合矿床地质特征,进行综合分析,总结了沐川地区综合找矿新模型。

2 研究结果

研究区位于扬子陆块西缘(图1a),峨眉山大火成岩省中带(图1b)。研究区位于五指山背斜核部,其核部地层为上二叠统峨眉山玄武岩(P₃e),两翼向两侧依次出露上二叠统宣威组(P₃x)、三叠系(T)、侏罗系(J)等地层(图2a)。铜矿体与铌、钛、镓多金属矿呈异体共生产出于宣威组顶部地层中(图2b),其中铜矿主要赋存

图1 川南沐川地区构造位置图(a)和峨眉山玄武岩分布简图(b)

关键词:铜; 铌; 钛; 镓; 多金属; 找矿模型; 四川

注:本文为四川省自然资源厅省政府性投资地质勘查项目(编号:DZ202002)和四川省自然资源厅科技项目(编号:kj-2022-6)资助的成果。
收稿日期:2022-02-14;改回日期:2022-04-22;网络首发:2022-05-20;责任编辑:章雨旭。Doi: 10. 16509/j. georeview. 2022. 05. 001
作者简介:文俊,男,1990年生,硕士研究生,工程师,主要从事区域地质调查与战略性矿产调查研究;Email: wjun9936@ sina. com。