

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2019.291>



基于 Fisher 判别准则的河湖相判别模型的构建： 以江汉盆地汉江上游段为例

张鑫¹, 梁杏^{1*}, 孙立群¹, 宋晨¹, 李琳²

1. 中国地质大学环境学院, 湖北武汉 430074

2. 中国地质大学生物地质与环境地质国家重点实验室, 湖北武汉 430074

摘要: 为了探究 Fisher 模型在盆地第四纪河湖相演变上的实用性, 以江汉盆地汉江上游段某单一钻孔的粒度资料和沉积相划分作为模型的训练样本, 利用 Fisher 基本原理计算得到河湖相判别模型, 最终利用模型实现对研究区沉积环境演化分析. 依据单因素方差以及显著性分析结果可知, Fisher 模型对河流相、河湖过渡相、湖相具有很好的区分效果. 留一交叉验证结果达到 80.6%, 超过了判别模型应用要求的 75% 标准. 同时, 将多孔沉积相判别结果与定性划分结果进行了对比, 其综合吻合率达到 85.06%, 进一步验证了 Fisher 模型在河湖相判别上的实用性. 依据判别分析结果可知, 自早更新世开始, 研究区存在 4 期较大的沉积旋回, 可划分为 8 个沉积阶段, 不同沉积阶段水动力来源复杂且变化迅速, 区域沉积环境演化与新构造运动相吻合. 本研究说明依据粒度资料建立 Fisher 模型用于沉积相以及沉积环境的分析是可行的, 同时丰富了江汉盆地汉江段沉积环境资料, 为盆地水资源调查及保护提供重要参考.

关键词: Fisher 模型; 沉积相识别; 江汉盆地; 第四纪; 沉积环境; 环境地质.

中图分类号: P53

文章编号: 1000-2383(2020)11-4254-13

收稿日期: 2019-12-29

Discriminant Model of River-Lake Facies in the Upper Reach of Hanjiang Section of Jiangnan Basin Based on Fisher Principle

Zhang Xin¹, Liang Xing^{1*}, Sun Liqun¹, Song Chen¹, Li Lin²

1. School of Environmental Studies, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

2. State Key Laboratory of Biogeology and Environmental Geology, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

Abstract: In order to explore the practicality of the Fisher model in the Quaternary river-lake evolution of the basin, in this paper it takes the particle size data and sedimentary facies of a single borehole in the upper reach of the Hanjiang River in the Jiangnan basin as the training samples of the model, which is calculated by Fisher's basic principle. Then the river-lake phase discrimination model is used to analyze the sedimentary environment evolution of the study area by using the model discrimination results. According to the one-way variance and the significance analysis results, the Fisher model has a good distinguishing effect on the river phase, the river-lake transition phase, and the lake phase. The leave-one-out-cross-validation result reaches 80.6%, exceeding the 75% standard required for the discriminant model application. At the same time, the results of the quantitative evaluation of porous sedimentary facies are compared with the qualitative classification results, and the comprehensive coincidence rate reaches 85.06%, which further verifies the practicality of the Fisher model in the identification of rivers and lakes. According

基金项目: 国家自然科学基金项目(No.41772268); 中国地质调查局项目(No.12120114069301).

作者简介: 张鑫(1996-), 男, 硕士, 主要从事水文-环境地质方面研究. ORCID:0000-0001-8177-7599. E-mail:1141040536@qq.com

***通讯作者:** 梁杏, ORCID:0000-0001-9838-5161. E-mail:xliang@cug.edu.cn

引用格式: 张鑫, 梁杏, 孙立群, 等, 2020. 基于 Fisher 判别准则的河湖相判别模型的构建: 以江汉盆地汉江上游段为例. 地球科学, 45(11):4254-4266.

to the results of discriminant analysis, since the Early Pleistocene, there are four large sedimentary cycles in the study area, which can be divided into eight sedimentary stages. The hydrodynamic sources are complex and changing rapidly in different sedimentary stages, and the regional sedimentary environment evolution and Neotectonic movement are consistent. This study demonstrates that it is feasible to establish Fisher model based on particle size data for analyzing sedimentary facies and sedimentary environment, and enrich the sedimentary environment data of Hanjiang Section of Jiangnan basin. It provides an important reference for basin water resources investigation and protection.

Key words: Fisher model; sedimentary phase identification; Jiangnan basin; Quaternary; sedimentary evolution; environmental geology.

沉积环境分析对于含水层结构研究、水文地质参数识别和地下水水流系统划分等有重要意义(张钰东等, 2014; 王妍妍等, 2017). 由于指示沉积环境意义的成因标志类型多、数量大、十分复杂, 利用定性分类方法已不能充分满足对沉积环境的判别和沉积相划分的要求(陆明德等, 1984). 因此, 前人在传统沉积环境分析方法的基础上, 结合统计学方法做了很多尝试. 粒度分析作为一种经典的分析方法被广泛应用(Blott and Pye, 2001; Shi *et al.*, 2002; Jitheshkumar *et al.*, 2013; 陈燕萍等, 2018). Sahu (1964) 在对碎屑沉积物粒度研究过程中结合平均粒径、标准偏差、偏态、峰态 4 种粒度参数建立多组线性判别函数, 对几种相近沉积环境进行区分, 这种方法被广泛引用(冯增昭等, 1993; Alsharhan *et al.*, 2004; 乔彦松等, 2006). 国内部分学者基于国内外粒度分析方法的差异对 SAHU 判别式进行了适当的改进, 大大提高了判别正确率(周莉和陈敦隆, 1980). 然而随着激光粒度仪在沉积物分析中的广泛应用, 粒度资料的获取具有更好的客观性和可重复性, 因此利用判别分析方法获得普适性更强的判别模型成为可能. 部分学者也基于新型的粒度分析方法建立了多种沉积相的判别函数(张平等, 2008; 董文娟, 2011; 杨立辉等, 2014; 张超等, 2017). 然而未曾有人建立区分复杂盆地内第四纪河湖相的判别模型. 虽然现代沉积中河流相与湖相沉积环境差别较大, 粒度特征明显, 但由于构造作用、气候环境等方面的影响, 历史时期河湖沉积条件更为复杂且交替作用频繁(刘昌茂和刘武, 1993; 杨青雄等, 2016), 给河湖相的识别带来了很大麻烦. 因此, 建立盆地河湖相的判别模型不但可以规避人为因素对河湖相划分的影响, 而且随着粒度分析的标准化, 判别模型的普适性大大提高, 可以为之后复杂盆地内第四纪沉积相的识别划分提供参考.

本文以江汉盆地汉江上游段为例, 利用研究区内多个钻孔粒度资料作为数据总体, 以其中一个钻

孔资料作为训练样本建立 Fisher 判别模型, 并利用判别模型对研究区内其他钻孔的沉积相进行沉积相划分. 从而实现对整个研究区沉积演化模式分析, 并同时验证模型的实用性.

1 材料与方法

1.1 研究区背景

江汉盆地是燕山运动晚期以来以继承性沉降为主的均衡补偿性盆地(张德厚, 1994; 柏道远和李长安, 2010). 盆地基底主要是以燕山早期运动作用影响的北西向为主体的断裂构造带构成(王必金等, 2006), 内部沉积了白垩纪以来近万米的沉积层系, 是我国重要的油气聚集盆地. 第四纪以来, 在新构造运动的影响下, 盆地边缘至中心沉积了厚度从几十米至几百米不等的冲积物及湖积物, 蕴含了丰富的环境演化信息, 具有十分重要的研究价值.

研究区位于江汉盆地西北部, 地处于汉江中下游平原区和荆山余脉丘岗地过渡带, 是汉江流域主干流区. 第四纪地层尤其是全新统沉积较薄. 区域总体为冲湖积平原, 仅西部有残坡积沉积物和基岩露头. 汉江沿岸发育一级阶地, 由全新统冲积砂质砾石、淤泥质粉砂、粘土组成. 低平原区微地貌受人为改造强烈, 各级排涝渠系网状密集分布.

1.2 样品采集及处理

依托国家自然科学基金项目(No.41772268)以及中国地质调查局在 2018 年开展的汉江上游 1:5 万水文地质调查(No.12120114069301), 笔者于 2018 年进行了 HJ012、HJ013、HJ014、HJ015 四个钻孔的取样工作(图 1). 钻孔揭露的第四纪地层厚度均在 100 m 以内, 与平原中心地区的 150~283 m 的沉积厚度差距较大. 野外取样大致间隔在 50 cm 左右.

本文采用激光粒度仪对小于 2 000 μm 的沉积物进行分析, 对大于 2 000 μm 的沉积物如砾石层段则采用筛分法和激光粒度仪综合分析. 应用激光粒度仪进行粒度测试之前要根据研究目的和沉积物

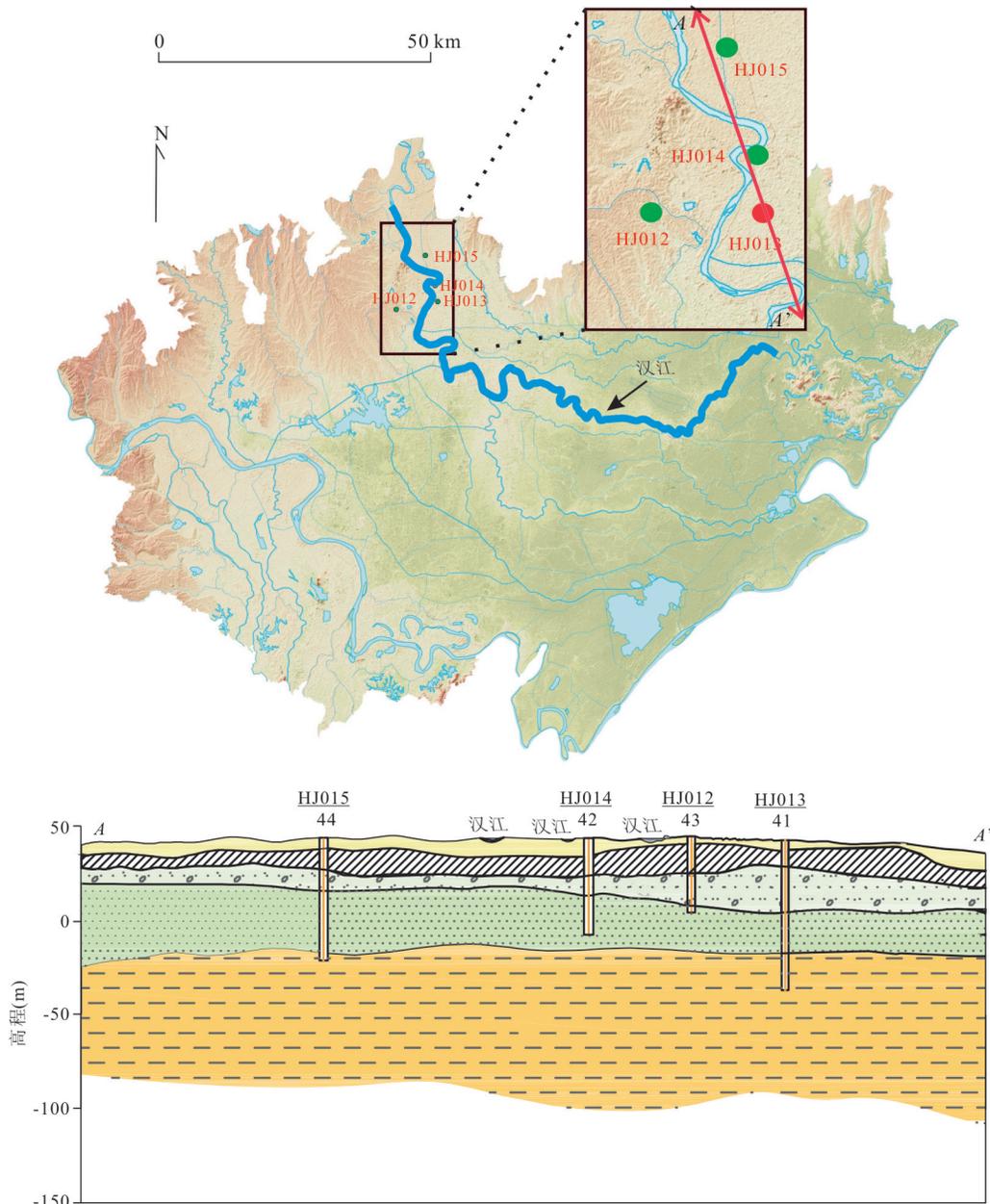


图1 江汉盆地汉江上游段钻孔分布

Fig.1 Distribution of boreholes in the upper reach of Hanjiang River in Jiangnan basin

粒度组成基本特征确定前处理流程. 粒度样品先后加入 10% 过氧化氢和盐酸以排除样品中的有机碳以及无机碳的影响. 测试仪器由中国地质大学(武汉)盆地水文过程与湿地生态恢复学术创新基地提供, 型号为 Mastersizer 3000 型.

1.3 Fisher 模型基本原理

Fisher 判别模型是处理概率分布未知的分类问题的一种重要方法, 其基本思想是将所有数据投影到某一方向上, 使得不同类别样本间差异最大化的同时实现类内差异的最小化(向东进等, 2005). 设样本总体 S 可分为 k 组, 每组由 n_j ($j=1, 2, \dots, k$) 个数

据组成, 总体 S 中每一个样本在 m 维空间以任一向量 a 为法线方向投影后得到的样本向量为 x , 则组中所有样本的投影向量的平均值 δ_j ($j=1, 2, \dots, k$) 即样本组的均值向量为:

$$\delta_j = \frac{1}{n_j} \sum_{t=1}^{n_j} x_{(t)}, \quad j=1, 2, \dots, k, \quad (1)$$

同时, 样本总体的均值向量为:

$$\delta = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^k \sum_{t=1}^{n_j} x_{(t)}^{(j)}, \quad (2)$$

对投影后得到的一元数据进行一元方差分析即可

得到代表组间差异的组间离差阵 A 以及反映组内差异的组内离差阵 B :

$$A = \sum_{i=1}^k n_i (\delta_j - \delta) (\delta_j - \delta)^T, \quad (3)$$

$$B = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{n_i} (\delta_{(i)}^{(j)} - \delta_j) (\delta_{(i)}^{(j)} - \delta_j)^T, \quad (4)$$

因此, Fisher 判别法的数学表达即是在 a 方向上, 组内离差阵 B 与组间离差阵 A 之间的比值达到最大. 利用拉格朗日乘法, 令:

$$L(a) = B - \gamma(A - 1), \quad (5)$$

又令 $\frac{\partial L}{\partial a} = 2(A - \gamma B)a = 0$, 可得:

$$B^{-1}Aa = \gamma a, \quad (6)$$

由上式可知, a 为 $B^{-1}A$ 的特征向量而 γ 为该矩阵的特征根. 则线性判别函数 $u(X) = a^T x$ 可解. 在进行多总体划分时, 往往需要按照特征值及对应特征向量由大到小的顺序建立多个判别函数, 其中前 q ($q \leq r$) 个判别函数的累计判别能力可表示为:

$$P_{(q)} = \frac{\gamma_1 + \gamma_2 + \dots + \gamma_q}{\sum_{i=1}^r \gamma_i}. \quad (7)$$

利用判别函数对未知样品进行判别时, 需要计算未知样品在投影方向上的位置与多个总体质心之间的距离. 未知样品的位置与哪一个分类总体的质心接近即划为该分类总体. 即存在唯一的 i 使得:

$$\frac{|u(X) - \bar{u}(i)|}{\hat{\sigma}_i} = \min_{i=1, 2, 3, \dots, k} \frac{|u(x) - \bar{u}(i)|}{\hat{\sigma}_i}, \quad (8)$$

$u(X)$ 对应判别函数所计算的判别值; $\bar{u}(i)$ 对应总体的均值向量; $\hat{\sigma}_i$ 对应的样本标准差, 则判别样品可划入第 i 个总体. 当 i 不唯一时, 再利用判别效率次大的判别函数进行上述判别, 直到样品类别得到确定为止.

2 判别模型的建立

2.1 训练样本的获取

训练样本包括两部分, 一部分是能够充分反映沉积相属性的粒度参数, 即判别因子. 另一部分是对应沉积相的划分. 判别因子的选择情况直接影响模型的实用性. 平均粒径、标准差、偏态、峰态是 4 种常用的代表性参数, 平均值 (M_z) 反映的是粒度分布的平均大小以及平均水动力和物源碎屑的大小. 标准差 (σ_1) 代表了沉积物的集中趋势, 标准差值越大说明分选越差, 反映了水动力稳定情况. 偏态 (S_k) 是

反映粒度分布对称性的指标, 当偏态值 > 0 时, 表示粒度总体偏细, 偏态值 < 0 时, 表示粒度总体偏粗. 峰态 (K_G) 主要衡量粒度频率曲线峰型的宽窄, 峰型越宽说明水动力越不稳定. 4 种参数较好地反映了粒径分布情况. 因此本文采用这 4 种参数作为判别因子. 参数的计算方法包括矩法 (Friedman *et al.*, 1978) 和图解法 (Folk *et al.*, 1957) 2 种, 本文采用图解法来计算粒度属性参数, 计算公式如下:

$$\text{平均值}(M_z) = \frac{(\phi_{16} + \phi_{50} + \phi_{84})}{3}, \quad (9)$$

$$\text{标准差}(\sigma_1) = \frac{(\phi_{84} - \phi_{16})}{4} + \frac{(\phi_{95} - \phi_5)}{6.6}, \quad (10)$$

$$\text{偏态}(S_k) = \frac{(\phi_{84} + \phi_{16} - 2\phi_{50})}{2(\phi_{84} - \phi_{16})} + \frac{(\phi_{95} + \phi_5 - 2\phi_{50})}{2(\phi_{95} - \phi_5)}, \quad (11)$$

$$\text{峰态}(K_G) = \frac{\phi_{95} - \phi_5}{2.44(\phi_{75} - \phi_{25})}, \quad (12)$$

沉积相则综合粒度频率曲线、粒度累计曲线综合划分. 粒度频率曲线是反映沉积物各粒径含量、众数粒径以及沉积物颗粒粗细相对关系的重要指标. 不同峰型可以反映不同的水动力条件以及物源情况 (顾延生等, 2018). 本文以 HJ013 沉积物粒度频率曲线的分布情况以及相应的粒度参数将沉积相划分为湖相、河湖过渡相、河流相 3 种沉积相.

湖相沉积的粒度频率标准曲线主要表现为单峰形态 (图 2a), 峰态较为平缓, 峰值较小, 且一般在峰值两端有极低的拖尾. 粒度众数在 $10 \mu\text{m}$ 左右, 粒径分布范围较大, 表明一种较弱的水动力条件以及多种沉积作用叠加的沉积环境 (Sun *et al.*, 2002). 钻孔样品曲线相较于标准曲线, 粒度众数更小, 说明平均水动力条件更加微弱. 同时, 粒度频率累计曲线表现为较为平直的上倾式, 截点位置不明显, 以悬移搬运组分为主, 滚动搬运组分基本不存在. 总体上曲线与标准湖相累计曲线吻合较好 (范天来和范育新, 2010). 因此将其划分为湖相沉积可信度较高.

河流相粒度频率标准曲线则表现为一陡一缓的双峰形态 (图 2b), 主峰峰态较为陡窄, 基本不见拖尾, 峰值较高. 次峰峰态十分平缓, 体积百分含量在 2% 左右, 存在一极低的拖尾. 主峰粒度众数在 $500 \mu\text{m}$ 左右, 次峰粒度众数在 $10 \mu\text{m}$ 左右. 指示一种较强的水动力为主的沉积环境. 钻孔样品曲线相较于标准曲线略显宽缓且众数粒径较小. 部分样品

呈单峰形态且在细粒端拖尾十分明显.以上说明钻孔河流相沉积的水动力较弱,但整体上粒度分布以及曲线形态与标准曲线吻合较好.概率累计曲线符合粗二段型曲线(吕童,2018),截点处的粒径小于 3ϕ ,主要介于 1ϕ 和 3ϕ ,以滚动搬运组分以及跳跃搬运组分为主,含有少量的悬浮搬运组分,其中跳跃搬运组分占70%左右,反映的是一种河流成因的高能水动力环境,因此将其划定为河流相无较大异议.

由于水动力条件十分复杂,河湖过渡相在粒度频率曲线上并没有较为统一的标准曲线作为参考.因此本文将不符合湖相、河流相标准曲线的样品均划归为河湖过渡相(图2c).粒度频率曲线多呈不规则形态,双峰态曲线主峰多位于粗粒段,众数粒径在 $500\mu\text{m}$ 以上,峰值较河流沉积环境主峰小.次峰位于细粒段,粒度众数在 $10\mu\text{m}$ 左右,粗粒端无拖尾,细粒端有较大拖尾.可见兼具湖相以及河流相沉积特征,指示沉积时期是由2种水动力交替作用形成的沉积环境.另一种极其宽缓的单峰态曲线则表明沉积过程分选极差,很可能是重力流沉积作用造成的.累计曲线总体上呈平缓的上倾式曲线,较为符合细一段型曲线,反映片流成因条件.部分多段型曲线则说明成因较为复杂.

依据HJ013孔沉积相划分结果建立Fisher判别模型的训练样本(表1).为了模型计算方便,将湖相、河湖过渡相以及河流相分别定义为1、2、3.

2.2 模型计算及结果

将上述的训练样本数据导入SPSS软件,其中平均粒径、标准差、偏态以及峰态数据导入至自变量,沉积相划分导入至分组变量,分组范围定义为1~3.得到Fisher判别函数:

$$y_1 = 1.400M_z + 1.282\sigma_1 - 1.728S_k - 0.912K_G - 3.466, \quad (13)$$

$$y_2 = -1.238M_z + 1.640\sigma_1 + 11.403S_k - 2.507K_G - 1.238, \quad (14)$$

将其他钻孔共87个沉积物的4种粒度参数带入上述判别函数并计算与分组质心间的马氏距离(表2),SPSS软件通过比较沉积物判别得分与各个分组质心间的距离来得到沉积物分组概率,并将概率最高的一组作为预测组结果(表3).以39号沉积物样品为例,其最高概率组与次高概率组的分组概率值差距很大,则说明依据模型的沉积相划分结果十分可靠.而当最高概率组与次高概率组的分组概率值差距较小时,则容易产生判别错误.如46号样品

的最高概率组的分组概率为0.544,预测分组为2,次高概率组的分组概率为0.455,预测分组为3,说明样品分组介于2与3之间且略偏向于2,划分结果则并不是十分可靠.但总体上看,模型的预测情况十分良好,沉积相划分结果可靠性较高.

3 讨论

3.1 判别模型评价

为了验证判别模型的准确性和普适性,依据Fisher模型建立的基本原理利用多种计算方法对模型的可靠性进行定量化、可视化的评价.

3.1.1 单因素方差分析 通过对判别参数进行单因素方差分析,可以得到各个判别参数的显著性水平(表4).显著性水平可以反映不同总体之间相互区别的能力,其值越小,说明区别能力越强.可见除峰态的显著性概率接近0.02之外,其余3个参数均远小于0.01.说明4个参数均具有较好的沉积相划分能力.

3.1.2 箱式检验 箱式检验是检验不同类别间的协方差矩阵之间是否相等来预估判别函数的错判率.由计算结果可得(表5),箱的 M 统计量值为 $72.839 > 0.05$,从而在显著性水平0.05下为各类协方差矩阵相等. F 显著值概率为零,说明判别分析的结果十分显著,错判率低.

3.1.3 判别函数方差及特征值 方差贡献率可以作为Fisher判别分析中判别方程量的解释.第一和第二判别函数的累计方差贡献率已经达到100%,说明2组判别函数既可以完成所有样品的判别.正则相关性分别达到了0.857和0.787,具有较强的相关性,判别效果显著(表6).同时,可以利用2个判别函数的二维散点图来直观地对判别结果进行评价(图3).从图3中不同类别样品的分布情况来看,虽然个别样品的类别划分存在不确定性,但绝大多数样品的沉积相划分比较明确,类别之间的分界线十分清晰.

3.1.4 留一交叉验证 留一交叉验证基本思想是从样本数为 N 的样本总体中取出一个样本作为验证,剩下的样本作为训练样本,重复进行直至取遍所有样本作为验证样本为止,最后将平均的 N 个数据的结果作为泛化误差的估计值(范永东,2013).经计算,训练样本的交叉误判率为19.4%.其中河湖过渡相的误判率较高,为26.6%.湖相误判率最低,仅为9.1%,河流相误判率介于两者之间,为20%(表7).

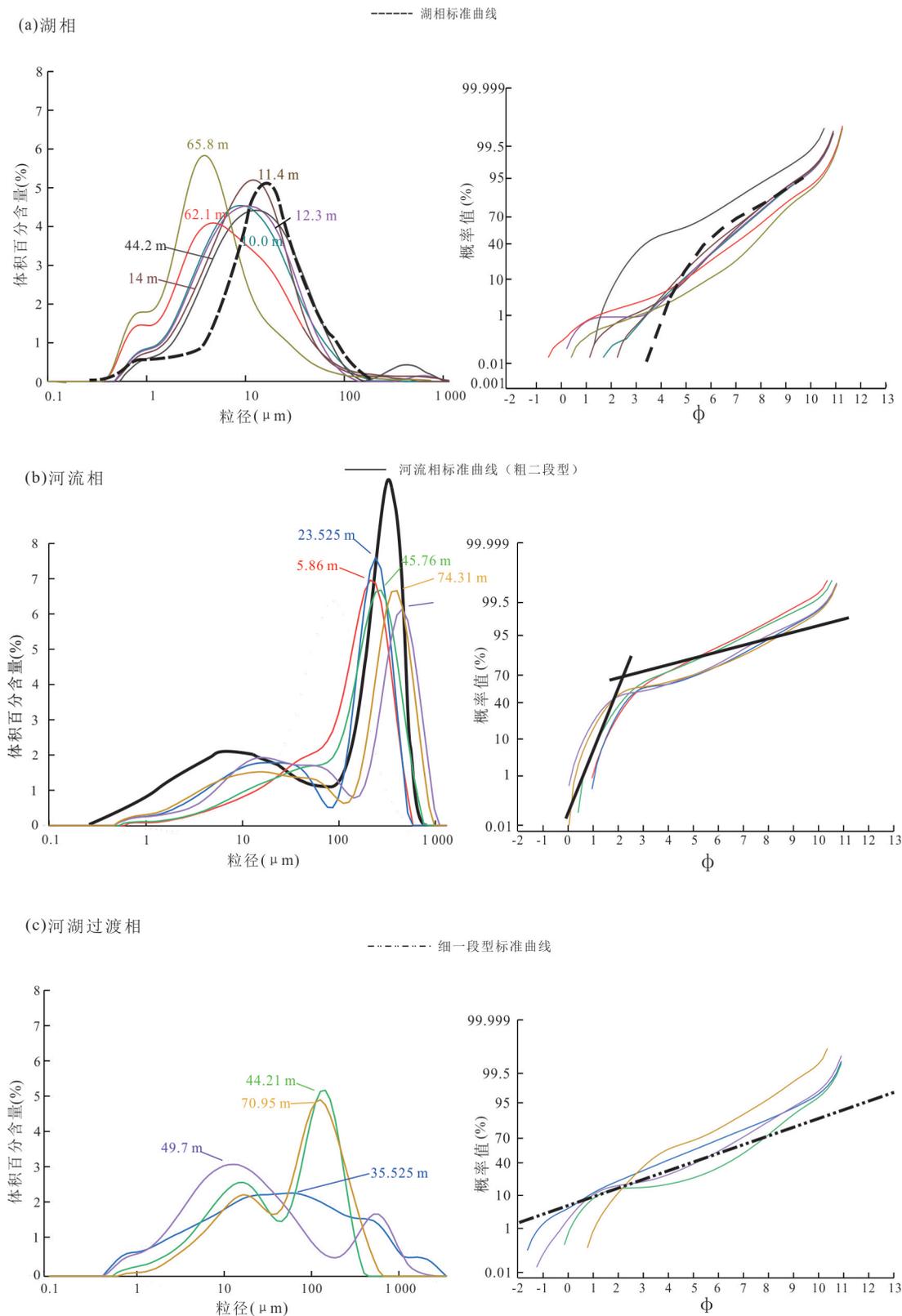


图 2 粒度频率曲线与典型沉积相

Fig.2 Particle size frequency curves and typical sedimentary facies

3.1.5 对比验证 将判别结果与沉积相定性分析结果进行对比(表 8).判别函数的总体识别正确率

为 85.06%,误判率为 14.94%,远高出普遍的 75%标准.另外,以 HJ015 号孔为例将模型判别结果与

表 1 Fisher 判别分析训练样本

Table 1 Training samples for Fisher discriminant analysis

样品 编号	平均粒径	标准差	偏态	峰态	沉积相 划分
01	51.131 101 62	3.554 969	-0.201 610	1.016 3	2
02	70.812 676 07	2.615 387	-0.233 360	1.191 4	2
03	62.780 400 69	3.925 418	-0.313 550	0.942 2	2
04	38.656 427 08	2.594 851	-0.326 720	1.314 7	1
05	112.966 903 1	3.234 160	-0.466 250	1.061 7	3
06	120.018 659 5	2.955 526	-0.436 710	1.109 6	3
07	17.032 798 07	3.786 894	-0.083 670	0.960 5	1
08	8.363 780 912	3.038 145	-0.023 800	1.012 1	1
09	8.844 834 076	2.807 966	-0.092 110	1.061 6	1
10	8.557 623 511	2.957 768	-0.061 010	0.988 4	1
11	10.098 961 50	3.099 973	-0.090 380	0.958 2	1
12	28.301 271 52	3.345 976	-0.232 760	1.062 3	1
13	56.514 773 28	4.097 760	-0.107 850	0.865 6	2
14	37.683 375 41	4.033 479	-0.171 590	0.970 0	2
15	59.472 706 67	6.581 987	-0.066 430	0.907 1	2
16	73.242 320 36	5.336 122	-0.272 020	0.755 0	2
17	80.871 407 31	4.891 506	-0.622 300	0.762 5	3
18	71.413 548 90	5.157 396	-0.458 660	0.743 0	3
19	39.514 562 71	5.187 817	-0.026 920	0.953 9	2
20	42.698 104 32	7.655 457	-0.033 190	0.918 6	2
21	11.290 370 79	3.124 726	-0.010 670	1.025 6	1
22	45.811 045 80	4.170 028	-0.330 520	0.770 7	1
23	12.601 434 68	6.230 988	0.367 407	1.299 4	2
24	122.301 223 2	3.715 868	-0.502 020	1.010 1	3
25	55.542 567 62	7.035 185	0.006 348	0.672 0	2
26	28.075 645 62	7.222 934	0.243 520	1.064 6	2
27	27.349 379 91	3.875 744	-0.140 160	0.950 7	2
28	62.439 108 34	6.212 808	-0.208 610	0.691 3	3
29	109.532 956 8	5.783 568	-0.467 120	0.708 5	3
30	38.261 742 89	3.544 544	-0.394 670	0.903 3	3
31	6.145 801 807	3.576 619	0.053 488	1.032 3	1
32	3.945 493 723	2.883 212	0.076 891	1.227 6	1
33	36.102 239 38	4.280 104	-0.008 410	0.776 0	2
34	67.319 464 44	3.844 993	-0.355 020	0.809 1	2
35	96.186 135 17	6.209 262	-0.507 750	0.678 2	3
36	103.590 710 3	6.170 378	-0.618 870	0.742 6	3
37	117.055 969 8	5.251 232	-0.619 390	0.814 5	3

表 2 不同沉积相质心函数

Table 2 The function of the centroid of each sedimentary facies

沉积相划分	判别函数 1	判别函数 2
湖相	2.424	-0.292
河湖过渡相	-0.772	1.356
河流相	-1.371	-1.558

钻孔岩性以及 TOC 数据进行对比(图 4)发现,模型判别的湖相沉积主要岩性为粘土及粉质粘土,湖相沉积物 TOC 平均含量分别为 4.279 g/kg、0.457 g/kg. 河流相沉积物主要对应于砂砾石层以及粗砂层, TOC 平均含量为 0.860 g/kg、0.253 g/kg. 模型判别结果与钻孔岩性吻合较好且符合 TOC 在钻孔岩性中的分布规律.

3.2 沉积环境推演

3.2.1 沉积阶段及沉积旋回 依据 HJ013 号孔的岩性柱状图、颗粒百分含量以及粒度参数变化曲线将上新世以来的地层划分为 5 个沉积旋回、10 个沉积阶段(图 5). 上新世沉积旋回(62.10~78.00 m): 包括 I、II 两个沉积阶段, 粒度频率曲线表现为由 I 沉积阶段的典型河流相曲线过渡到 II 沉积阶段的湖相宽缓曲线. 水动力条件为逐渐由强减弱, 平均粒径及中值粒径均逐渐减小, 众数粒径由近 400 μm 逐步减小至 4 μm 左右. 砂粒百分含量降低, 粘粒百分含量增加明显, 岩性由青灰色中粗砂过渡为青灰色中细砂以及半风化, 表现为明显的正粒序旋回, 表现为水域面积扩大、河流流速减缓直至被湖泊取代的沉积环境演化过程.

第一沉积旋回(49.70~62.10 m): 包括 III、IV 两个沉积阶段. 与第一沉积旋回相比, 第二沉积旋回的沉积厚度较薄, 沉积环境演化过程较为迅速, 岩性以青灰色中粗砂层过渡为青灰色细粉砂层. 第 II 阶段与第 III 阶段之间缺乏过渡沉积, 沉积物中砂粒沉积陡然增加而粘粒含量急剧减少. 从各个粒度参数值可以看出, 相较于第 II 阶段的湖相沉积环境, 第 IV 阶段的湖相沉积时期较短, 较不稳定, 说明湖盆规模较小. 但总体上第二沉积旋回仍为水动力逐渐减弱的环境演化过程.

第二沉积旋回(30.80~49.70 m): 包括 V、VI 两个沉积阶段. 其中第 V 阶段表现为河湖交替沉积环境, 平均粒径与中值粒径相比于河流相沉积物较小, 但众数粒径大小与之相近, 主要沉积灰色或青灰色中粗砂互层, 说明存在多期水动力条件综合作用, 反映为河湖频繁交替的湖相三角洲或湖积扇沉积. 从第 V 沉积阶段到第 VI 沉积阶段, 粉砂含量逐渐增高而砂粒含量逐渐减少, 青灰色或灰黑色砂层为主并含有少量砾石, 分选极差, 说明水动力急剧减弱或者重力流造成的混杂沉积情况, 可能为间歇性洪水或泥石流沉积后经由湖泊沉积改造形成.

第三沉积旋回(8.71~30.80 m): 包括 VII、VIII

表 3 部分钻孔沉积物的沉积相判别结果

Table 3 Discriminant results of sedimentary facies in some borehole sediments

样品编号	最高概率组			次高概率组			沉积相划分结果
	马氏距离	分组概率	预测分组	马氏距离	分组概率	预测分组	
38	3.463	0.658	1	4.782	0.340	2	1
39	1.055	1.000	1	20.888	0.000	2	1
40	0.727	1.000	1	18.896	0.000	2	1
41	1.372	0.848	2	5.906	0.088	3	2
42	0.441	1.000	1	18.135	0.000	2	1
43	0.225	0.996	1	11.298	0.004	2	1
44	0.552	0.992	1	11.309	0.005	3	1
45	1.344	0.999	1	15.260	0.001	3	1
46	2.092	0.544	2	2.449	0.455	3	2
47	3.368	0.825	1	6.472	0.175	2	1

表 4 组均值的均等性检验

Table 4 Equivalence test of mean within groups

	Wilks 的 Lambda	F	df1	df2	Sig.
平均粒径	0.327	34.989	2	34	0.000
标准差	0.657	8.891	2	34	0.001
偏态	0.429	22.646	2	34	0.000
峰态	0.790	4.520	2	34	0.018

表 5 箱式检验结果

Table 5 The results of the test box

箱的 M		72.839
F	近似	2.989
	df1	20
	df2	3 507.550
	Sig.	0.000

表 6 判别函数方差附加特征值

Table 6 Additional eigenvalues of the variance of the discriminant function

判别函数	特征值	方差贡献率 (%)	累计方差贡献率 (%)	正则相关性
1	2.772	63.1	63.1	0.857
2	1.624	36.9	100.0	0.787

两个沉积阶段.其中 VII 段为一套杂色砾石层夹杂少量的粉砂及砂粒沉积,砾石直径为 1~80 mm,分选极差,为典型的河床相沉积环境.第 VIII 沉积阶段主要以灰色或棕黄色粉砂以及粉质粘土为主,含铁锰结核,为稳定且处于还原环境的沼泽湖泊环境.中值粒径、平均粒径及众数粒径均在 10 μm 左右,沉积阶段中仍存在粒径由粗至细又由细至粗的旋回

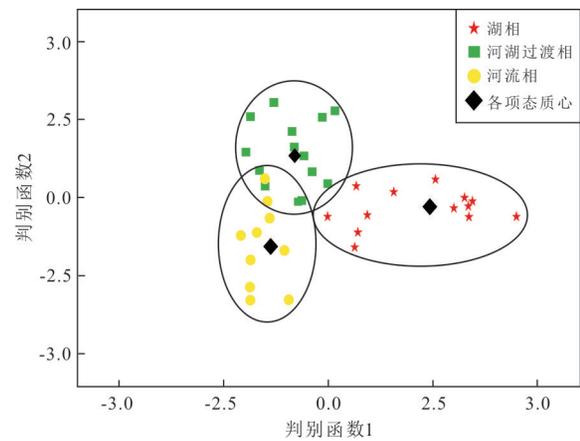


图 3 沉积相判别二维分组图

Fig.3 Two-dimensional grouping of discriminant phases of sedimentary facies

表 7 留一交叉验证结果

Table 7 The results of LOOCV

	湖相	河湖过渡相	河流相	总计
湖相	90.9%	9.1%	0%	100%
河湖交替相	13.3%	73.3%	13.3%	100%
河流相	10.0%	10.0%	80.0%	100%

表 8 判别结果与定性分析结果对比

Table 8 Comparison of the results of discriminant analysis with the results of qualitative analysis

钻孔编号	样品数	识别正确个数及正确率 (%)	识别错误个数及误判率 (%)
HJ012	19	15(78.95%)	4(21.05%)
HJ014	23	21(91.30%)	2(8.70%)
HJ015	45	38(84.44%)	7(15.56%)
总计	87	74(85.06%)	13(14.94%)

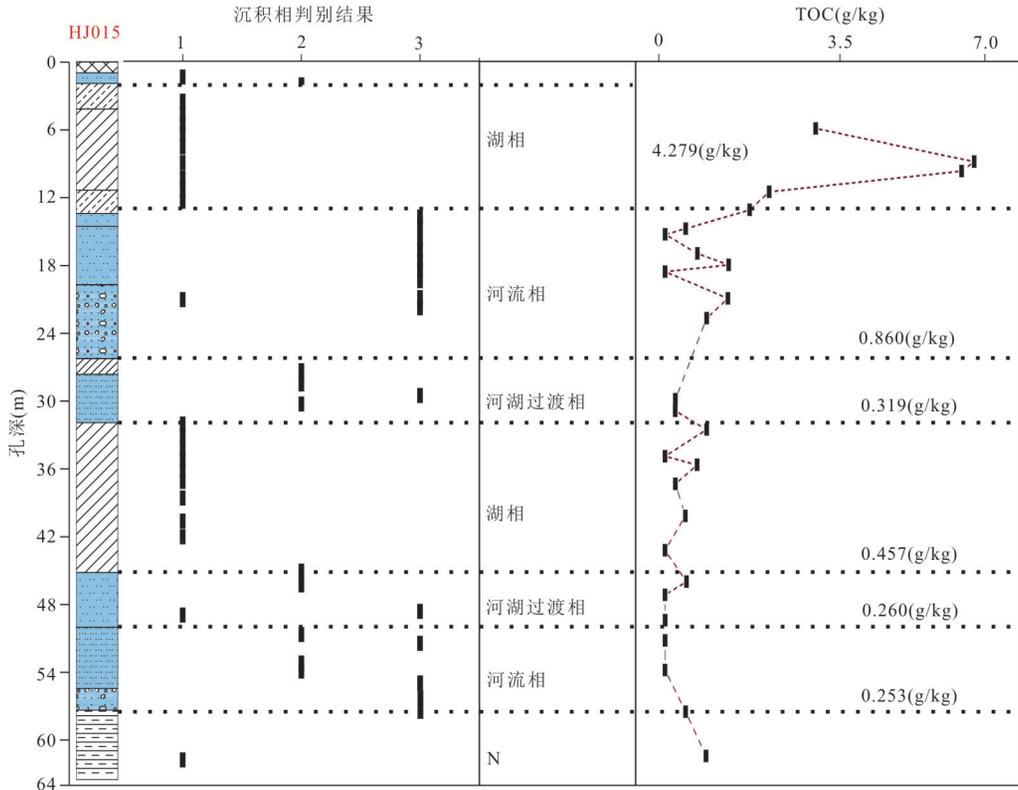


图 4 HJ015孔沉积相判别结果及其对比验证

Fig. 4 Discriminant results of HJ015 pore sedimentary facies and its comparative verification

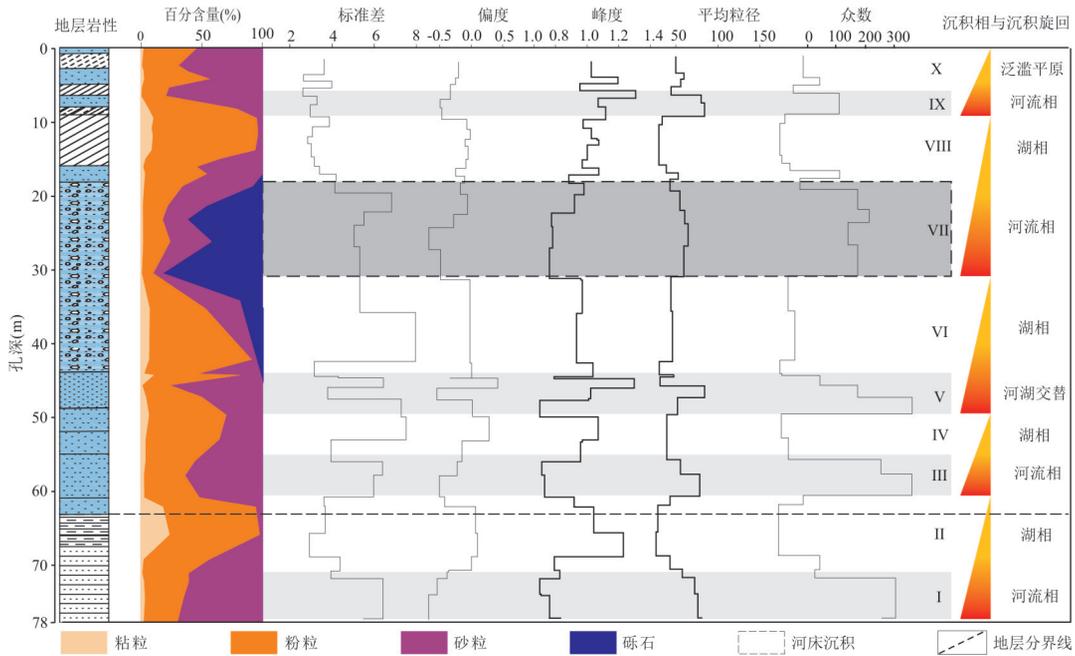


图 5 HJ013孔粒度参数分布及沉积旋回划分

Fig.5 Distribution of particle size parameters of boreholes and division of sedimentary cycles

演化特征,反映了“河流—湖进—稳定湖泊沼泽—湖退—河流”的演化序列.

第四沉积旋回(0~8.71 m): 包括 IX、X 两个沉

积阶段.其中 IX 阶段为一层粗砂段沉积,水动力较强.从 IX 阶段到 X 阶段水动力逐渐减弱.但从 X 沉积阶段的粒度参数可以看出,X 阶段水动力相较于

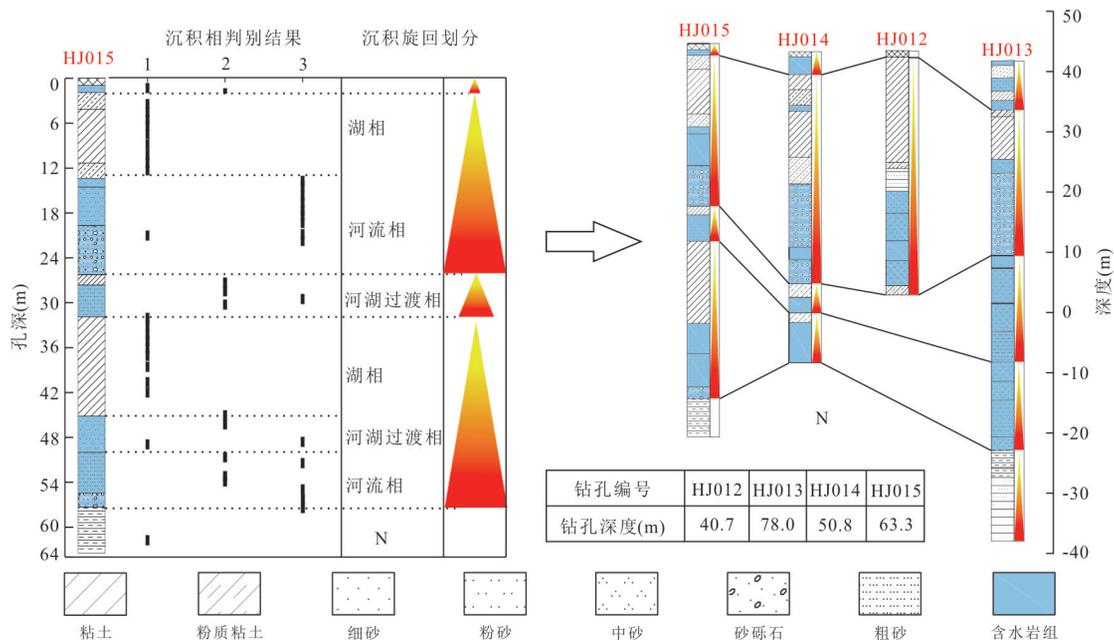


图 6 多孔沉积相及沉积旋回划分图

Fig.6 Sedimentary facies in the study area and division of sedimentary cycles

更新世湖相沉积较强,以棕黄色砂及粉砂为主,分选较差,含植物根系,为泛滥平原沉积环境。

3.2.2 区域沉积演化 依据岩性特征以及模型计算结果可得到 HJ012、HJ014、HJ015 三个钻孔的沉积旋回划分并与 HJ013 定性分析结果进行对比。可见自晚更新世以来四孔的沉积相及沉积旋回耦合十分良好(图 6),结合区域的构造运动以及气候条件可以得到区域上沉积环境演化情况(康悦林, 1987; 张玉芬等, 2016)。

通过对比江汉盆地周缘新生代新构造运动演化过程以及古气候分析结果可将江汉盆地第四纪以来的沉积演化过程划分为 4 个沉积旋回(表 9):

(1) 第一沉积旋回:判别结果主要表现为“河流相—河湖过渡相—湖相”演化序列,岩性由砂砾石、粗砂逐渐过渡到粉细砂、粘土层。研究区早期以强水动力条件的河流沉积相为主。由于盆地中心的强烈抬升作用,受到掀斜运动影响,盆地周缘稳定沉降,河流水动力逐渐减弱直至演化为稳定水体。

(2) 第二沉积旋回:模型判别结果主要为“河流相—河湖过渡相”岩性由中粗砂逐渐过渡到粉砂以及粉质黏土。由于地层剧烈抬升作用,致使上一旋回的湖泊逐渐演化为大范围的河流或冲洪积扇分布,随着地层逐渐稳定下沉,区域内河流水动力逐渐减弱,形成河湖过渡相沉积环境。

(3) 第三沉积旋回:模型判别结果主要为“河流

表 9 江汉盆地晚新生代新构造运动演化表

Table 9 Evolvement of Neotectonics in Late Cenozoic in Jianghan basin

地质年代	方淑琪, 1959	徐瑞璐等, 1988	张德厚, 1994	杨青雄等, 2016	盆地周缘构造活动
全新世(Qh)	强烈沉降	先升后降		强烈沉降	强烈抬升
晚更新世(Qp3)	稳定下沉	稳定下沉		稳定下沉	稳定抬升
中更新世(Qp2)	强烈抬升	强烈抬升		抬升	稳定沉降
早更新世(Qp1)	稳定下沉	稳定下沉	拗折沉降	稳定下沉	稳定抬升

相—湖相”,岩性由大段的砂砾石沉积逐渐过渡到粉质粘土以及粘土。研究区旋回早期为大面积的河床相沉积,随着区域内构造活动,流域面积逐渐扩大,水动力逐渐减弱,逐渐演化为大面积稳定湖泊。

(4) 第四沉积旋回:模型判别结果以河湖过渡相为主,粒度众数在 100 μm 左右研究区在掀斜运动作用下强烈抬升,湖泊整体再次逐渐向沉积中心运移,但部分凹陷区仍存在小型湖泊。同时,受人类活动以及干冷气候综合影响,区域内逐渐由大型稳定湖泊转变为以稳定河流为主的沉积环境。

4 结论

为了验证 Fisher 判别模型在探究复杂盆地第四

纪沉积环境演化的实用性以及客观、准确地得到复杂盆地第四纪河湖沉积相的划分结果,本文选取江汉盆地汉江上游段第四纪沉积地层作为研究对象,以研究区内某一单独钻孔的粒度数据作为训练样本建立判别模型;并通过综合利用单因素方差分析、留一交叉验证等多种验证手段证明了判别函数的综合判别正确率均在 80% 以上,与定性分析结果的吻合率达到了 85%,远远高出普遍 75% 的一般标准,具有较高的实用性.依据判别分析结果可知,江汉盆地汉江上游段第四纪沉积过程共经历了 4 次较大的河湖演变旋回,区域沉积环境具有统一性且与盆地掀斜运动过程吻合良好.本研究证明了 Fisher 判别模型在复杂盆地第四纪河湖相划分上的可用性,并合理化推演了江汉平原汉江上游段的沉积演化过程,为复杂盆地第四纪沉积河湖演化分析以及其他后续研究提供参考.

References

- Alsharhan, A. S., El-Sammak, A., 2004. Grain-Size Analysis and Characterization of Sedimentary Environments of the United Arab Emirates Coastal Area. *Journal of Coastal Research*, 20(2): 464–477.
- 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(11): 1237–1248. <https://doi.org/10.1002/esp.261>
- Bai, D.Y., Li, C.A., 2010. Status of Quaternary Geology Research of Jiangnan Basin. *Geological Science and Technology Information*, 29(6): 1–6 (in Chinese with English abstract).
- Chen, Y.P., Li, Y., 2018. Sediment Grain-Size Characteristics and Sedimentary Significance of DZ-1 Borehole near Zhoushan Islands, East China Sea. *Journal of Marine Science*, 36(4): 53–59 (in Chinese with English abstract).
- Dong, W.J., Zhu, Y.X., Wang, M.G., et al., 2011. Sedimentary Environment Discriminant and Classified Bayes Discriminant Analysis. *Journal of Chengdu University (Natural Science)*, 30(2): 139–141, 154 (in Chinese with English abstract).
- Fan, T.L., Fan, Y.X., 2010. A Comparison of Grain Size Expression Methods: A Case Study. *Gansu Geology*, 19(2): 32–37 (in Chinese with English abstract).
- Fan, Y.D., 2013. A Summary of Cross-Validation in Model Selection (Dissertation). Shanxi University, Taiyuan, 15–20 (in Chinese with English abstract).
- Fang, H.Q., 1959. Neotectonic Movements in the Middle and Lower Reaches of the Yangtze River. *Acta Geologica Sinica*, 39(3): 328–343 (in Chinese with Russian abstract).
- Feng, Z.Z., 1993. Sedimentary Petrology. Petroleum Industry Press, Beijing, 62 (in Chinese with English abstract).
- Folk, R. L., Ward, W. C., 1957. Brazos River Bar: A Study in the Significance of Grain Size Parameters. *Journal of Sedimentary Research*, 27(1): 3–26. <https://doi.org/10.1306/74d70646-2b21-11d7-8648000102c1865d>
- Friedman, G.M., Sanders, J. E., 1978. Principles of Sedimentology. John Wiley & Sons, New York, 792.
- Gu, Y.S., Guan, S., Ma, T., et al., 2018. Quaternary Sedimentary Environment Documented by Borehole Stratigraphical Records in Eastern Jiangnan Basin. *Earth Science*, 43(11): 3989–4000 (in Chinese with English abstract).
- Jitheshkumar, N., Rajganapathi, V. C., Sundararajan, M., et al., 2013. Grain-Size Analysis and Characterization of Sedimentary Environment along Ovari Coast, Tamilnadu, India. *International Journal of Sediment Research*, 6: 4717–4728.
- Kang, Y. L., 1987. The Stratigraphic Division and Palaeoclimate-Divided Stage of Quaternary Period in Jiangnan Plain. *Hubei Geology*, 1(1): 1–10 (in Chinese with English abstract).
- Liu, C.M., Liu, W., 1993. The Evolution of Lakes on Jiangnan Plain in Quaternary. *Journal of Central China Normal University (Natural Science)*, 27(4): 122–125 (in Chinese with English abstract).
- Lu, M.D., Tao, Y.C., Li, H.S., 1984. Application of the Discriminant Analysis Method to the Classification of Ancient Depositional Environments. *Earth Science*, 25(2): 85–104 (in Chinese with English abstract).
- Lü, T., 2018. Analysis of the Particle Size and Sedimentary Environment of the Quaternary Sediments in Luoyang (Dissertation). China University of Geosciences, Beijing, 1–60 (in Chinese with English abstract).
- Qiao, Y.S., Guo, Z.T., Hao, Q.Z., et al., 2006. Grain Size Characteristics of the Miocene Loess-Paleosol Sequence and Its Implications for Genesis. *Science in China (Series D: Earth Sciences)*, 36(7): 646–653 (in Chinese).
- Rajganapathi, V. C., Jitheshkumar, N., Sundararajan, M., et al., 2013. Grain Size Analysis and Characterization of Sedimentary Environment along Thiruchendur Coast, Tamilnadu, India. *Arabian Journal of Geosciences*, 6(12): 4717–4728. <https://doi.org/10.1007/>

- s12517-012-0709-0
- Sahu, B. K., 1964. Depositional Mechanisms from the Size Analysis of Clastic Sediments. *SEPM Journal of Sedimentary Research*, 34: 337—343. <https://doi.org/10.1306/74d70fce-2b21-11d7-8648000102c1865d>
- Shi, X. F., Chen, C. F., Liu, Y. G., et al., 2002. Trend Analysis of Sediment Grain Size and Sedimentary Process in the Central South Yellow Sea. *Chinese Science Bulletin*, 47(14): 1202—1207. <https://doi.org/10.1007/BF02907610>
- Sun, D. H., Bloemendal, J., Rea, D. K., et al., 2002. Grain - Size Distribution Function of Polymodal Sediments in Hydraulic and Aeolian Environments, and Numerical Partitioning of the Sedimentary Components. *Sedimentary Geology*, 152(3/4): 263—277. [https://doi.org/10.1016/s0037-0738\(02\)00082-9](https://doi.org/10.1016/s0037-0738(02)00082-9)
- Wang, B. J., Lin, C. S., Chen, Y., et al., 2006. Episodic Tectonic Movement and Evolutional Character in Jianghan Basin. *Oil Geophysical Prospecting*, 41(2): 226—230 (in Chinese with English abstract).
- Wang, Y. Y., Huang, S. B., Zhao, L., et al., 2017. Evolution of Quaternary Sedimentary Environment in Shallow Aquifers, at Shahu Area, Jiangnan Plain. *Earth Science*, 42(5):751—760 (in Chinese with English abstract).
- Xiang, D. J., Li, H. W., Liu, X. Y., et al., 2005. Practical Multivariate Statistical Analysis. China University of Geosciences Press, Wuhan, 78—80 (in Chinese).
- Xu, R. H., Qi, G. F., Yang, L. M., 1988. A Study of Quaternary Period Geology and Neotectonic Movement in Wuhan. *Journal of Hubei University (Natural Science)*, 10(2): 93—101 (in Chinese with English abstract).
- Yang, L. H., Ye, W., Zheng, X. M., et al., 2014. The Discriminant Function with Grain Size of Floodplain and Aeolian Sediments and Its Application in the Quaternary Red Clay. *Geographical Research*, 33(10): 1848—1856 (in Chinese with English abstract).
- Yang, Q. X., Tian, W. X., Li, Q. W., et al., 2016. The Neotectonic Restricts to Quaternary Deposition Environment Evolution of Jiangnan Basin. *Journal of Geomechanics*, 22(3): 631—641 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, C., Zhang, L. Q., Chen, J. L., et al., 2017. Lithofacies Types and Discrimination of Paleogene Fine - Grained Sedimentary Rocks in the Dongying Sag, Bohai Bay Basin, China. *Natural Gas Geoscience*, 28(5): 713—723 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, D. H., 1994. Neotectonics and Quaternary Environmental Changes in Jiangnan Basin. *Crustal Deformation and Earthquake*, 14(1): 74—80 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, P., Song, C. H., Yang, Y. B., et al., 2008. The Significance and Establishment of Discriminant Function with Grain Size of Stable Lacustrine Sediment and Eolian Loess. *Acta Sedimentologica Sinica*, 26(3): 501—507 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, Y. D., Shi, J. S., Zhou, A. G., 2014. Application of Laser Particle Size Analysis in Environment Analysis of Quaternary Sediments in Shenzhou. *Journal of University of Chinese Academy of Sciences*, 31(4): 517—523 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, Y. F., Li, C. A., Sun, X. L., et al., 2016. Sediment Magnetism Characteristics and Its Climatic Environment Significance of Northeast Margin of Jiangnan Plain. *Earth Science*, 41(7):1225—1230 (in Chinese with English abstract).
- Zhou, L., Chen, D. L., 1980. Analysis of Sediment Phases Discriminant for Grain Size Parameters. *Transactions of Oceanology and Limnology*, (2): 68—74 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 柏道远,李长安,2010.江汉盆地第四纪地质研究现状.地质科技情报,29(6): 1—6.
- 陈燕萍,李琰,2018.舟山DZ-1钻孔沉积物粒度特征与沉积环境判别.海洋学研究,36(4): 53—59.
- 董文娟,朱远鑫,万明刚,等,2011.沉积环境判别与分类的Bayes判别分析法.成都大学学报(自然科学版),30(2): 139—141, 154.
- 范天来,范育新,2010.频率分布曲线和概率累积曲线在沉积物粒度数据分析中应用的对比.甘肃地质,19(2): 32—37.
- 范永东,2013.模型选择中的交叉验证方法综述(硕士学位论文).太原:山西大学,15—20.
- 方鸿琪,1959.长江中下游地区的新构造运动.地质学报,39(3):328—343.
- 冯增昭,1993.沉积岩石学.北京:石油工业出版社,62.
- 顾延生,管硕,马腾,等,2018.江汉盆地东部第四纪钻孔地层与沉积环境.地球科学,43(11): 3989—4000.
- 康悦林,1987.江汉平原第四纪地层划分与古气候分期.湖北地质,1(1): 1—10.
- 刘昌茂,刘武,1993.第四纪江汉平原湖群的演变.华中师范大学学报(自然科学版),27(4): 122—125.
- 陆明德,陶一川,李蕙生,1984.判别分析与沉积环境划分.地球科学,25(2): 85—104.
- 吕童,2018.洛阳第四纪沉积物粒度与沉积环境分析(硕士学位论文).北京:中国地质大学,60.
- 乔彦松,郭正堂,郝青振,等,2006.中新世黄土—古土壤序列

- 的粒度特征及其对成因的指示意义. 中国科学(D辑:地球科学), 36(7): 646—653.
- 王必金, 林畅松, 陈莹, 等, 2006. 江汉盆地幕式构造运动及其演化特征. 石油地球物理勘探, 41(2): 226—230.
- 王妍妍, 黄爽兵, 赵龙, 等, 2017. 江汉平原沙湖地区浅层含水层第四纪沉积环境演化. 地球科学, 42(5): 751—760.
- 向东进, 李宏伟, 刘小雅, 等, 2005. 实用多元统计分析. 武汉: 中国地质大学出版社, 78—80.
- 徐瑞瑚, 齐国凡, 杨礼茂, 1988. 武汉地区第四纪地质与新构造运动的研究. 湖北大学学报(自然科学版), 10(2): 93—101.
- 杨立辉, 叶玮, 郑祥民, 等, 2014. 河漫滩相沉积与风成沉积粒度判别函数的建立及在红土中应用. 地理研究, 33(10): 1848—1856.
- 杨青雄, 田望学, 李启文, 等, 2016. 江汉盆地新构造运动对第四纪沉积环境演化的制约. 地质力学学报, 22(3): 631—641.
- 张超, 张立强, 陈家乐, 等, 2017. 渤海湾盆地东营凹陷古近系细粒沉积岩岩相类型及判别. 天然气地球科学, 28(5): 713—723.
- 张德厚, 1994. 江汉盆地新构造与第四纪环境变迁. 地壳形变与地震, 14(1): 74—80.
- 张平, 宋春晖, 杨用彪, 等, 2008. 稳定湖相沉积物和风成黄土粒度判别函数的建立及其意义. 沉积学报, 26(3): 501—507.
- 张钰东, 石建省, 周爱国, 2014. 激光粒度分析法在深州市第四纪沉积环境分析中的应用. 中国科学院大学学报, 31(4): 517—523.
- 张玉芬, 李长安, 孙习林, 等, 2016. 江汉平原东北缘麻城剖面磁化率特征及气候环境意义. 地球科学, 41(7): 1225—1230.
- 周莉, 陈敦隆, 1980. 几种不同沉积相粒度参数的判别分析. 海洋湖沼通报, (2): 68—74.