

# 松辽盆地北部昌德地区白垩系泉头组四段 浅水三角洲砂体结构及控制因素

钱子桐<sup>1</sup>, 邓庆杰<sup>1</sup>, 杨 烁<sup>2</sup>, 胡明毅<sup>1</sup>, 胡忠贵<sup>1</sup>, 蔡全升<sup>1</sup>, 林婉媚<sup>1</sup>

(1. 长江大学 地球科学学院, 湖北 武汉 430100; 2. 中国石油华北油田公司 二连分公司, 内蒙古 锡林浩特 026000)

**摘 要:**松辽盆地北部昌德地区白垩系泉四段砂体分布广泛, 砂体类型多样且存在差异, 影响后期致密砂岩油气藏的勘探开发。利用岩心、测井、古生物和地球化学资料, 探讨昌德地区泉四段砂体结构特征及控制因素。结果表明: 昌德地区泉四段发育浅水三角洲—浅湖沉积体系。浅水三角洲平原亚相主要发育分流河道和决口扇沉积, 分流河道见大量小型槽状交错层理、楔状交错层理和平行层理等强水动力构造; 浅水三角洲前缘亚相主要发育水下分流河道和席状砂沉积, 见波状层理和砂纹层理等弱水动力构造。浅水三角洲平原亚相相对前缘砂体更富集且砂比更高。昌德地区泉四段砂体垂向结构表现为块状切叠型、块状叠置型、层状叠置型和单一孤立型四类结构样式, 横向结构表现为侧向切割、侧向对接、泥岩间隔三种接触关系, 不同砂体结构的物性存在差异。古气候变化影响沉积物供给量, 基准面变化影响可容纳空间, 河流和湖浪作用随河流向湖盆推进砂体持续改造, 古气候、基准面升降、水动力因素共同影响砂体结构。该结果为浅水三角洲油气藏开发提供指导。

**关 键 词:**松辽盆地北部; 昌德地区; 泉头组四段; 浅水三角洲; 砂体结构; 控制因素

**中图分类号:**P588.21 **文献标识码:**A **文章编号:**2095-4107(2025)03-0083-14

## 0 引言

通常, 浅水三角洲是河流进入水体较浅、构造相对稳定、地形平缓和整体沉降缓慢拗陷湖盆时, 堆积形成的扇形沉积体, 不发育河口坝<sup>[1]</sup>。浅水三角洲是由 FISK H N 等<sup>[2]</sup>在 1954 年研究密西西比河三角洲时提出的, 与传统三角洲相比缺少明显的顶积层<sup>[1]</sup>。中国鄂尔多斯、准噶尔、松辽、塔里木等盆地的中、新生界浅水三角洲砂体获得重大油气发现, 具有巨大的油气勘探开发前景<sup>[3-7]</sup>。浅水三角洲广泛发育砂体, 砂体是油气藏形成的重要物质基础<sup>[8-9]</sup>。人们研究浅水三角洲砂体, 总结砂体结构样式, 分析砂体结构与分布的主控因素, 建立砂体发育模式。砂体结构方面, MAILL A D<sup>[10-11]</sup>在 1985 年提出储层构型理论后, 中国学者建立河控浅水三角洲沉积构型<sup>[12]</sup>, 采用层序地层格架、现代三角洲沉积过程观察、单砂体和叠合砂体组合分析及数值模拟等方法识别砂体特征<sup>[13-15]</sup>。研究砂体结构与成因控制因素时, 杨征等<sup>[16]</sup>认为地形坡度的差异造成河道弯曲度变化, 进而造成河道砂体差异; 谢才铸等<sup>[17]</sup>认为构造沉降控制层序的发育, 从而控制砂体发育; 蔡全升等<sup>[18]</sup>认为缓坡环境下, 水深变化导致湖平面波动和快速迁移是造成浅水三角洲前缘砂体分布广泛的原因; 朱筱敏等<sup>[19]</sup>认为在长周期尺度下, 气候是控制沉积的主要因素。有学者总结浅水三角洲砂体发育模式<sup>[15,20]</sup>, 为浅水三角洲相油藏开发提供重要依据。

松辽盆地北部三肇凹陷昌德地区泉四段发育典型的浅水三角洲, 是重要的沉积物汇聚区, 发育多期砂体, 蕴含丰富的油气资源<sup>[21-25]</sup>。在长期的勘探开发中, 建立较为完善的地层格架<sup>[23-24]</sup>。有学者划分和总结松辽盆地白垩系泉头组浅水三角洲砂体样式<sup>[22]</sup>, 研究区构造相对稳定, 地形坡度平缓, 认为基准面变化、湖平面升降和供源差异是导致砂体结构差异的主要因素<sup>[18,22,24]</sup>。昌德地区泉四段沉积时期气候多变<sup>[20]</sup>, 水动力条件复杂<sup>[18,22-24,26]</sup>, 砂体的复杂结构和强非均质性离不开古气候和水动力条件变化<sup>[19,22-23]</sup>, 研究砂体结构控制因素时关于古气候和水动力因素的分析较少。分析砂体结构样式及其控制因素, 解释

收稿日期: 2024-10-30; 编辑: 关开澄

基金项目: 国家自然科学基金项目(42202161); 国家科技重大专项(2017ZX05013-006)

作者简介: 钱子桐(2000—), 男, 硕士研究生, 主要从事沉积与储层方面的研究。

通信作者: 邓庆杰, E-mail: dengqingjie1988@126.com

砂体结构和强非均质性,有利于后期勘探开发<sup>[27]</sup>。

笔者以松辽盆地北部三肇凹陷昌德地区泉头组四段为研究对象,基于岩心、测井、古生物和地球化学数据分析,总结砂体结构特征,从古气候、基准面升降、水动力因素探讨砂体结构差异性及其演化的控制因素,为昌德地区剩余油的高效开发提供参考。

## 1 区域地质概况

三肇凹陷位于松辽盆地北部中央坳陷带(见图1(a)),为二级负向构造单元<sup>[28]</sup>,是松辽盆地重要的生油和富油凹陷之一<sup>[29]</sup>,东连徐家围子断陷西翼斜坡,西临大庆长垣,北部接壤明水阶地(见图1(a)),可分为9个三级构造单元,即宋芳屯鼻状构造带、升平鼻状构造带、尚家鼻状构造带、尚南鼻状构造带、肇州鼻状构造带、太北斜坡带,以及升西向斜、徐家围子向斜、永乐向斜<sup>[29]</sup>。松辽盆地白垩纪以来的构造运动过程及构造演化可划分为断陷阶段( $J_3-K_1$ )、坳陷阶段( $K_1-K_2$ )和萎缩隆褶阶段( $K_2-Q$ )<sup>[18]</sup>。

昌德地区位于三肇凹陷中部,总面积约为488.41 km<sup>2</sup>(见图1(b))。泉四段沉积时期(见图2),松辽盆地稳定沉降,研究区具备大型坳陷湖盆特征<sup>[20]</sup>,构造稳定,地势平坦,沉积中心水体较浅,受气候影响,湖平面波动频繁。松辽盆地北部及其附近地区接受讷河—依安、拜泉—青岗和怀德—长春三大水系物源供给<sup>[20-21,30]</sup>,凹陷内白垩系地层齐全,自下而上依次为登娄库组、泉头组、青山口组、姚家组、嫩江组、四方台组、明水组<sup>[29]</sup>(见图2(a))。泉四段沉积时期,埋藏深度为1700~1900 m,泉四段地层沉积厚度为80~110 m,沉积一套浅水三角洲—湖泊相地层,主体为一套紫红色、灰绿色泥岩与浅灰色粉砂岩沉积,局部夹少量灰黑色泥岩,垂向上泥岩颜色由紫红色转变为灰绿色,砂岩粒度变细,具有正旋回沉积特征(见图2(b))。根据沉积特征,将泉四段自上而下划分为MSC1、MSC2、MSC3三个四级层序和SSC1、SSC2、SSC3、SSC4、SSC5、SSC6、SSC7七个五级层序<sup>[23-24]</sup>(见图2)。

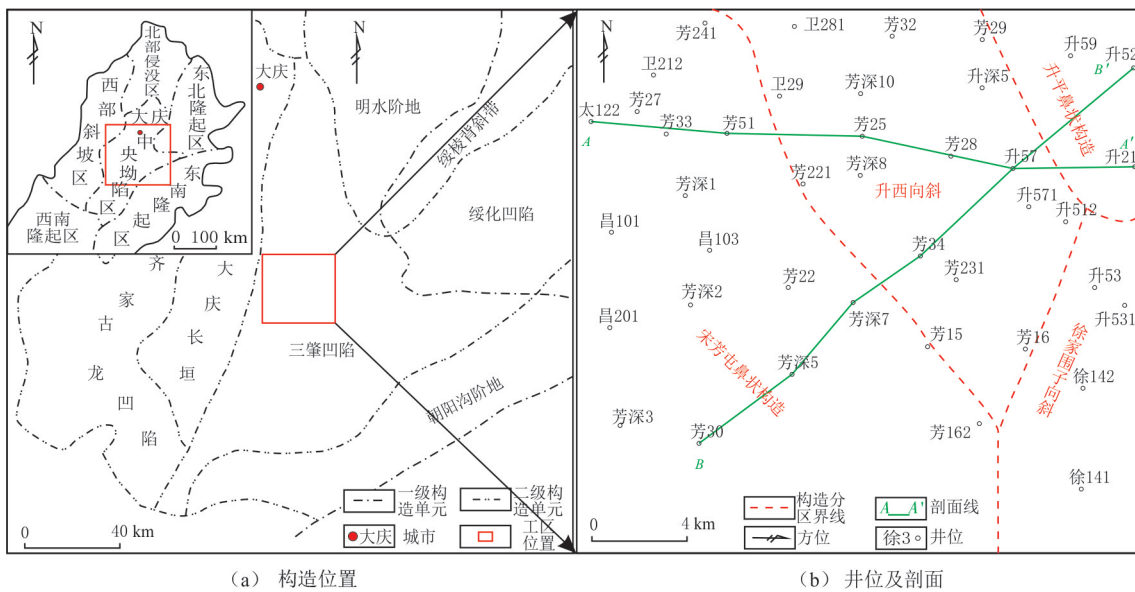


图1 研究区构造位置、井位及剖面  
Fig.1 Structural location, well location and profile of the study area

## 2 沉积特征

### 2.1 岩性及沉积构造

昌德地区泉四段泥岩表现为紫红色、灰绿色(见图3(a))及灰色等特征,可见植物化石(见图3(b))。紫红色和灰绿色泥岩中发育较小的钙质结核(见图3(c-d)),表明湖平面相对较浅,总体处于弱蒸发环境<sup>[31]</sup>。泉四段河道底部可见泥砾(见图3(e))、冲刷面构造(见图3(f)),以及小型槽状交错层理、楔状交错层理(见图3(g))、平行层理(见图3(h))。红色泥岩中可见生物虫孔(见图3(i)),反映水动力较强的浅水

三角洲平原沉积环境。此外,可见波状层理(见图 3(j))和砂纹层理(见图 3(k)),反映水体能量处于强弱交替的浅水三角洲前缘沉积环境。

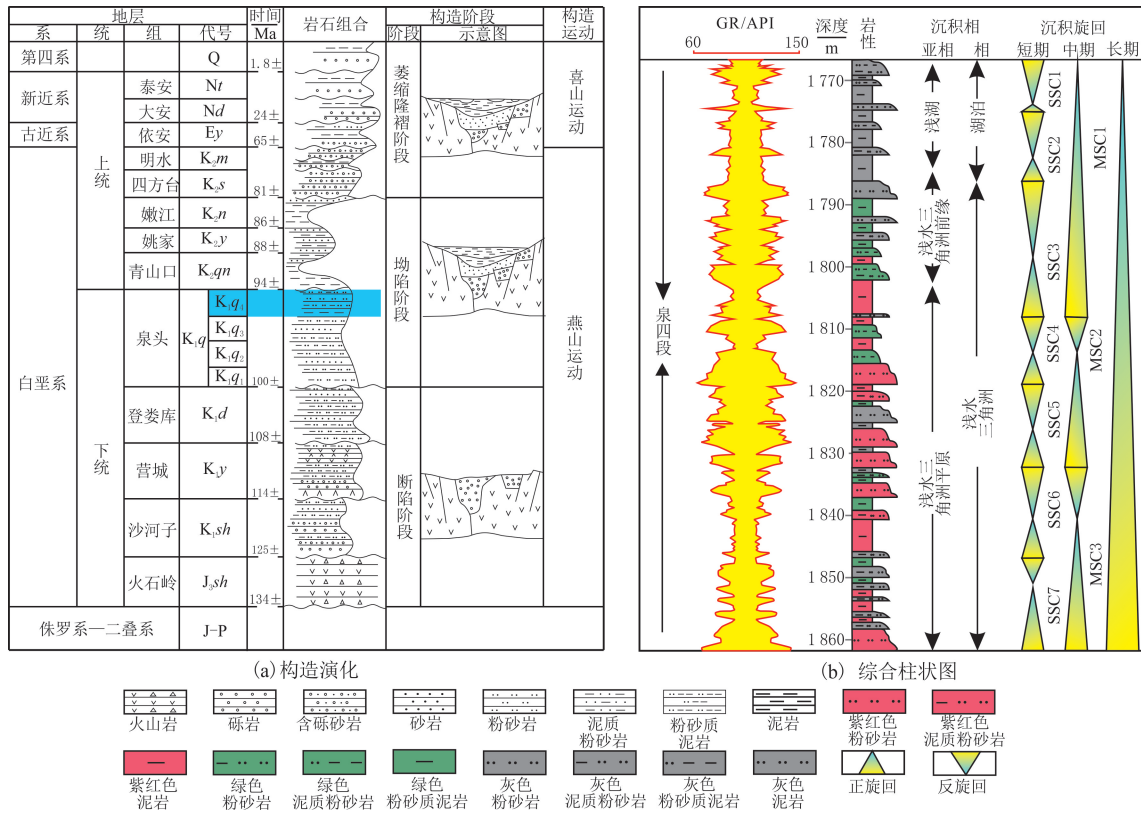


图2 昌德地区泉头组四段构造演化与综合柱状图

Fig. 2 Structural evolution and comprehensive bar chart of the fourth section of Quantou Formation in Changde Area

### 2.2 水动力及粒度特征

浅水三角洲形成过程中,沉积物随河道搬运,最终汇聚于蓄水体<sup>[19]</sup>。泉四段砂岩类型较为单一,以细砂、粉砂岩为主,主要分布于河道沉积。浅水三角洲平原广泛发育分流河道(见图 4(a)),浅水三角洲前缘发育水下分流河道,河道规模比前者小(见图 4(b))。根据河道粒度概率累积曲线,泉四段沉积物以跳跃搬运和悬浮搬运为主<sup>[28]</sup>,具有两段式的曲线特征。平原分流河道粒径为(3~4)Φ(Φ=-log<sub>2</sub>D,D为颗粒直径),以跳跃组分为主,占60%(见图 4(c)),发育大量冲刷面构造、平行层理和小型槽状交错层理,为牵引流沉积,且河道稳定沉积;前缘水下分流河道砂体进一步筛选,粒径为(4~4.5)Φ,结构成熟度更高,悬浮组分明显增多(见图 4(d)),可达70%,水下分流河道沉积冲刷面及交错层理减少,可见波状层理和砂纹层理,反映牵引流作用减弱,河道砂体受到河流和湖浪作用影响。

### 2.3 砂体演化特征

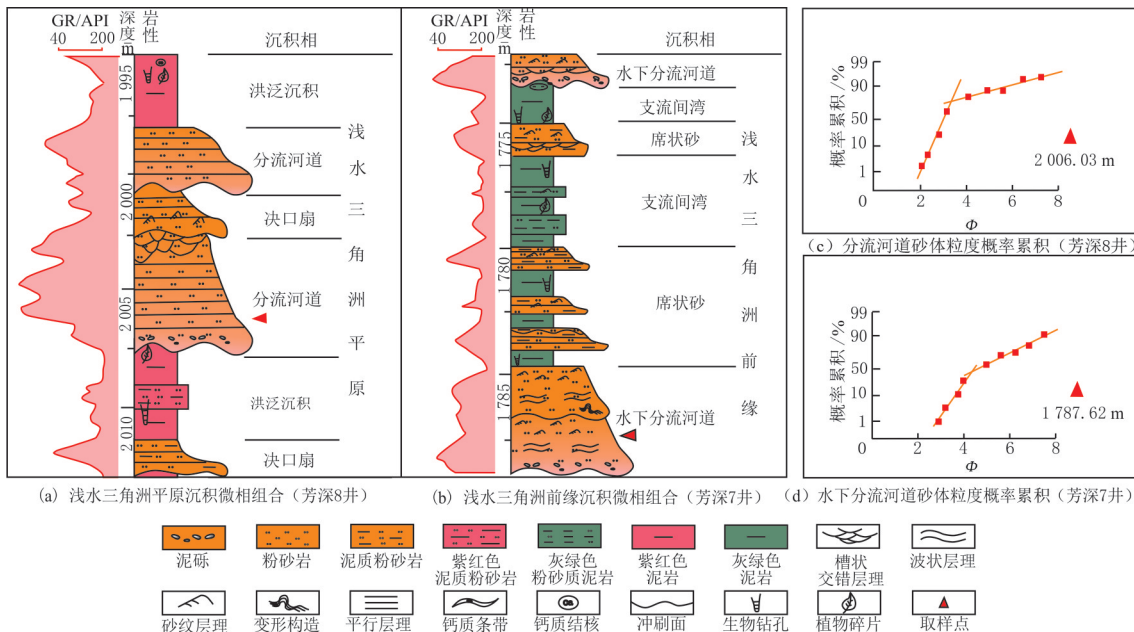
昌德地区泉四段沉积演化由平原沉积向前缘沉积过渡,局部发育浅湖沉积,研究区南部先过渡为前缘沉积,北部平原沉积更厚(见图 5),总体具有“厚平原、薄前缘”的特征<sup>[19-20]</sup>(见图 5),早期全区接受南部物源供给,晚期南部物源减弱,北部物源供给增强<sup>[21,30]</sup>。泉四段沉积时期为浅水环境,期间水体持续上升<sup>[1,21,23]</sup>,泥岩颜色由氧化色向还原色转变(见图 6(a))。砂地比(见图 6(b))及沉积微相平面分布(见图 6(c))表明:(1)SSC7—SSC6时期为浅水三角洲平原沉积环境,发育5个主体分流河道。SSC5—SSC4时期河道数量不断减少,砂体厚度整体减薄,砂地比为30%~45%。SSC3—SSC1时期为浅水三角洲前缘沉积环境,砂地比为20%(见图 5-6)。(2)浅水三角洲平原沉积,砂体富集带宽,砂地比大,以分流河道为主;前缘沉积,砂体富集带窄,砂地比小,以水下分流河道为主(见图 6(b))。(水下)分流河道频繁改道,交汇位置砂体厚度大,砂地比略微增大(见图 6(b))。(3)研究区泉四段为多物源汇聚区<sup>[20-21,30]</sup>,平面上砂地比存



(a) 红色泥岩、灰绿色泥岩, 芳32井, 1 892.22~1 892.34 m; (b) 灰绿色泥岩, 植物化石, 卫18井, 1 692.95~1 693.00 m; (c) 绿色泥岩, 钙质结核, 芳34井, 1 989.68~1 989.77 m; (d) 红色泥岩, 钙质结核, 芳32井, 1 868.00~1 868.50 m; (e) 灰色粉砂岩, 泥砾, 芳33井, 1 805.91 m; (f) 灰色粉砂岩, 冲刷面构造、泥砾, 芳31井, 1 875.78~1 876.48 m; (g) 紫红色粉砂岩, 小型槽状交错层理、小型楔状交错层理, 芳381井, 1 920.65~1 921.13 m; (h) 灰色粉砂岩, 平行层理, 芳31井, 1 884.65 m; (i) 紫红色泥岩、生物钻孔, 芳381井, 1 913.86 m; (j) 灰色粉砂岩、波状层理, 芳32井, 1 872.72~1 873.95 m; (k) 灰色粉砂岩, 砂纹层理, 芳461井, 1 834.48~1 834.57 m

图3 泉头组四段岩性及沉积构造照片

Fig. 3 Photos of lithology and sedimentary structure of the fourth section of Quantou Formation



(a) 浅水三角洲平原沉积微相组合 (芳深8井) (b) 浅水三角洲前缘沉积微相组合 (芳深7井) (c) 分流河道砂体粒度概率累积 (芳深8井) (d) 水下分流河道砂体粒度概率累积 (芳深7井)

图4 研究区分流河道和水下分流河道沉积特征及粒度概率累积曲线

Fig. 4 Sedimentary characteristics and cumulative probability curves of grain size for distributary channels and underwater distributary channels of the study area

在一定差异。砂地比变化表现为西南部呈下降趋势,东北部经历增大—减小变化。西南部 SSC7—SSC1 时期,砂体富集带持续变窄,砂地比不断减小。东北部 SSC7 时期,砂体富集带窄,砂地比介于 30%~40%。SSC5、SSC3 时期,砂体富集带变宽;SSC1 时期,地层砂地比最小(见图 6(b))。

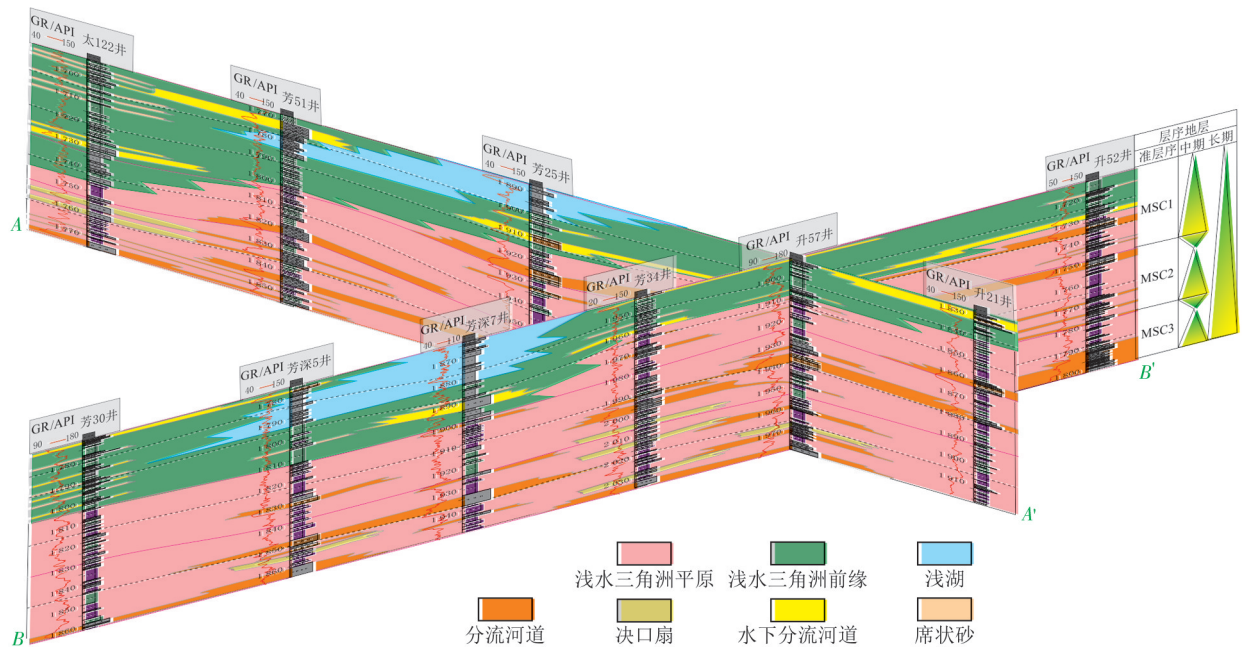


图5 昌德地区泉头组四段沉积相特征(剖面位置见图1)

Fig. 5 Characteristics of sedimentary facies in the fourth section of Quantou Formation in Changde Area(profile position is shown in fig. 1)

### 3 砂体结构

河流携带沉积物入湖时,在河口区卸载,在水下形成三角形的朵扇锥体,沉积物出露水面,水下分流河道转变为分流河道,扇体不断堆积推进,进而演变成大型浅水三角洲<sup>[19]</sup>。砂体的垂向结构及侧向接触关系对储层的连通性和储层非均质性具有重要影响<sup>[26-27]</sup>。研究区浅水三角洲以河道砂体为主,包括分流河道砂体和水下分流河道砂体,次要砂体为决口扇砂体和席状砂砂体。分析不同砂体间垂向结构和侧向接触关系,有助于实现昌德地区剩余油的高效开发。

#### 3.1 垂向结构

在沉积微相划分的基础上,根据测井相特征、泥质隔夹层、底冲刷和砂体韵律特征分析砂体系统,将不同成因类型砂体在垂向上组合特征分类梳理,分为块状切叠型、块状叠置型、层状叠置型和单一孤立型4种垂向结构。

(1)块状切叠型。浅水三角洲平原沉积环境下发育的砂体结构<sup>[15-16]</sup>,岩性垂向组合为紫红色泥岩—块状粉砂岩—紫红色泥岩,测井曲线特征为多期箱型/钟型叠置。单砂体厚度为0.5~2.0 m,累计厚度可达9.0 m;横向延伸距离远,可达1 km。砂体结构为分流河道间相互切割形成,处于较强水动力环境,可见槽状交错层理和多期冲刷面。冲刷面是河道对下部沉积冲刷形成的,且随泥砾增多,容易造成垂向封堵,渗透率在界面处存在差异变化(见图7(a)),根据冲刷面出现次数判断砂体具多期旋回,多达8~9期。砂体结构物性较好,不发育泥质夹层,平均渗透率为 $0.8 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。

(2)块状叠置型。浅水三角洲平原沉积环境形成<sup>[15]</sup>,以粉砂岩和泥质粉砂岩为主,水动力条件略微减弱时,河道砂体与河道/决口扇砂体垂向和斜向叠置(见图7(b))。可见冲刷面和平行层理,单一砂体厚度为0.5~1.5 m,砂体累计厚度为6.0~8.0 m,一般为3~5期单砂体叠置,整体表现正韵律。测井曲线组合形态为GR低幅—GR高幅(钟型/箱型)—GR低幅—GR高幅(钟型/箱型)。晚期河道冲刷早一期洪水

遗留淤泥层时保留冲刷面和泥质夹层,砂体垂向上分割,致使砂体连通性减弱,物性较差,存在泥质夹层,垂向上分布不均匀,平均渗透率为  $0.5 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。

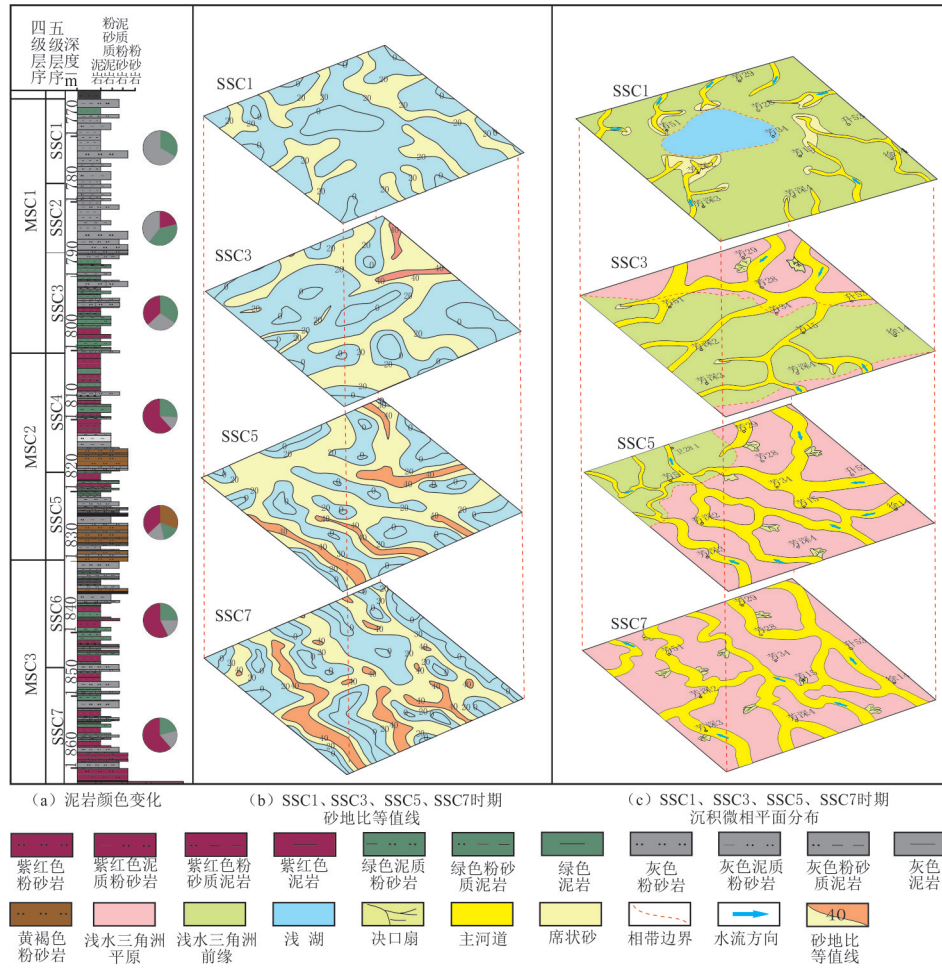


图6 昌德地区泉头组四段 SSC1、SSC3、SSC5、SSC7 时期砂地比等值线与沉积微相平面分布

Fig.6 Contour line of sand to land ratio and sedimentary microfacies distribution during SSC1,SSC3,SSC5 and SSC7 periods of fourth section in the Quantou Formation of Changde Area

(3)层状叠置型。形态与块状叠置型的相似(见图 7(c))。浅水三角洲前缘沉积环境下,发育粉砂岩、泥质粉砂岩和粉砂质泥岩,水下分流河道之间叠置,砂体底部具少量泥砾,冲刷面规模和次数更少,相对前面两类砂体,砂体厚度明显较小,砂体粒度更小,泥质夹层发育,物性进一步变差,砂体中部物性相对较好,顶底物性相对较差,平均渗透率为  $0.4 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。单砂体厚度为  $0.5 \sim 0.8 \text{ m}$ ,累计厚度为  $5.0 \text{ m}$ ,由 1~2 期单砂体组成。测井曲线为钟形,曲线之间被泥岩基线隔开<sup>[23]</sup>。

(4)单一孤立型。浅水三角洲前缘沉积环境下,发育泥质粉砂岩和粉砂质泥岩的席状砂,受波浪改造,被厚层泥岩隔开(见图 7(d)),测井曲线指状凸出。砂体基本上不连通,物性差,渗透率小于  $0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ,基本不含油。

### 3.2 侧向接触关系

由于昌德地区泉四段三维地震资料品质较差,分辨率低,难以准确分辨薄层砂体侧向接触关系,利用密井区测录井资料,分析相邻井间砂体厚度和测井曲线差异,结合平面相特征,可较好地刻画河道边界及横向接触关系<sup>[28]</sup>。研究区砂体表现为侧向切割、侧向对接、泥岩间隔三种侧向接触关系。

(1)侧向切割型。分流河道砂体侧向接触关系为晚期河道对早期河道的冲刷、切割而成(见图 8(a))。测井相表现为箱型或钟型。芳深 7—芳深 23 井河道被芳深 5—芳深 7 井河道切割叠置,形成垂向块状叠

置型,砂体侧向连通性较好(见图 8(a))。

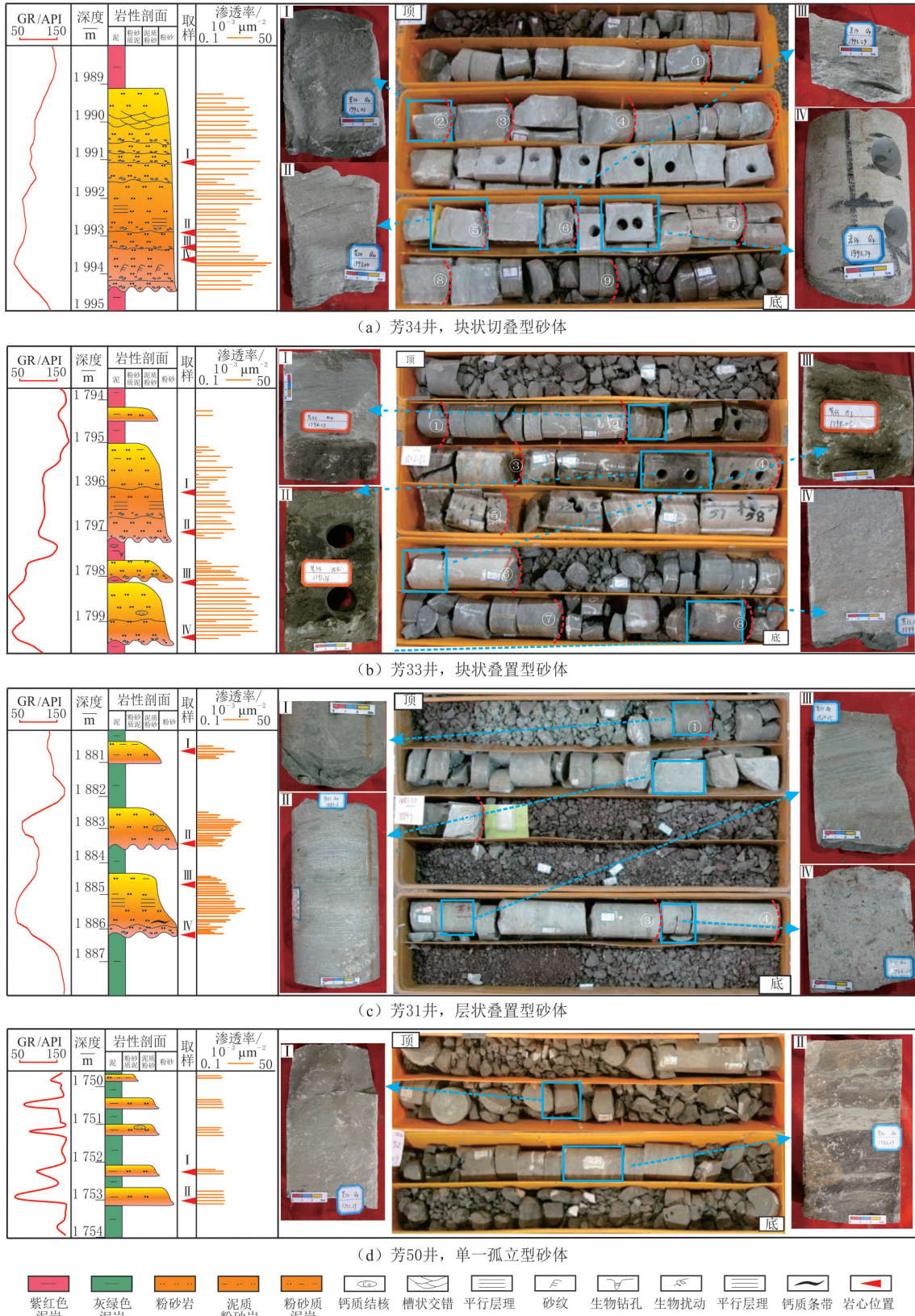


图 7 昌德地区泉头组四段砂体垂向叠置样式

Fig. 7 Vertical stacking style of sand bodies in the fourth section of Quantou Formation in Changde Area

(2)侧向对接型。分流河道砂体侧向对接,为河道—决口扇—河道的连接样式,为新一期河道形成于早期河道决口扇之上(见图8(b))。如太122、芳25井河道主体测井曲线为箱型和漏斗型,中间区域芳51井测井曲线形态为中低幅度扁钟型(见图8(b)),相邻河道以决口扇相连,砂体侧向连通性减弱。

(3)泥岩间隔型。前缘水下分流河道砂体侧向接触关系,通常指两个水下分流河道间不接触,河道间为灰绿色支流间湾泥岩(见图8(c))。芳深5、芳25井河道主体测井曲线表现为箱型,芳深7井支流间湾为直线型或曲化线型(见图8(c)),二者为不相邻河道,砂体侧向不连通。

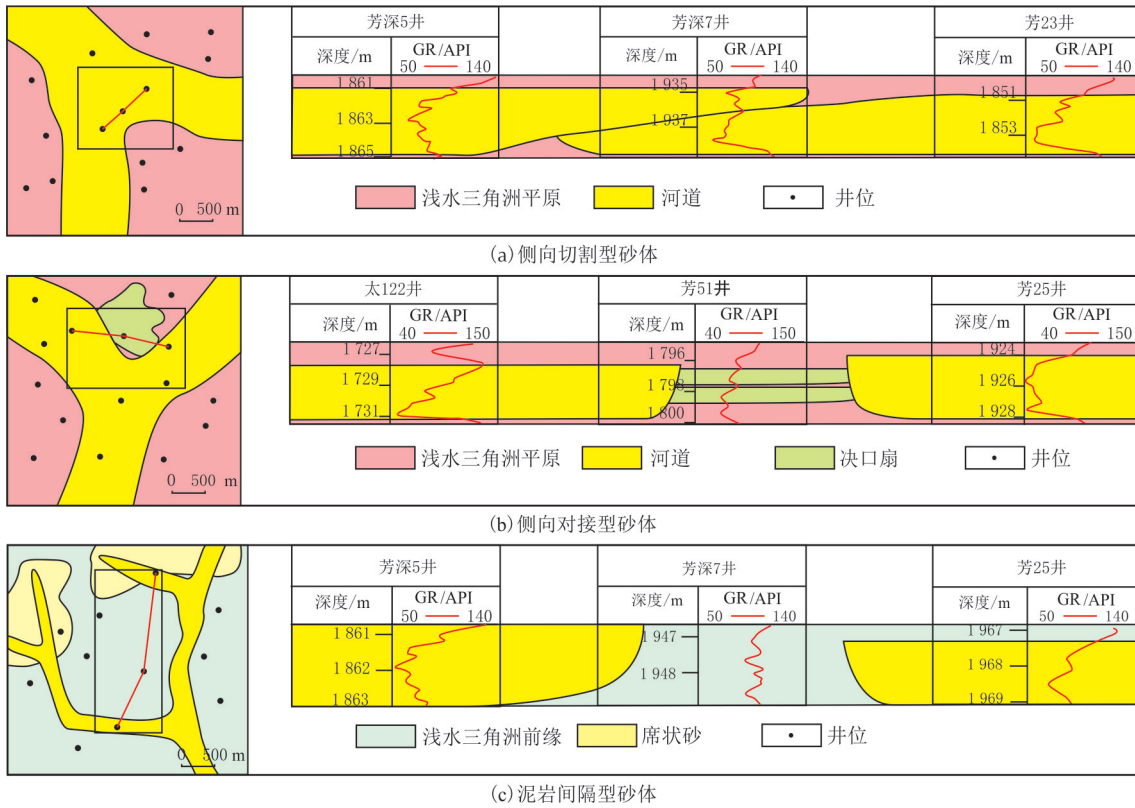


图8 昌德地区泉头组四段砂体侧向接触关系

Fig. 8 Lateral contact relationship of sand bodies in the fourth section of Quantou Formation in Changde Area

#### 4 控制因素及发育模式

浅水三角洲砂体垂向和纵向的结构差异受控于多种因素<sup>[15,19,23]</sup>。研究区构造稳定,具有盆广地缓的古地形<sup>[20]</sup>,从古气候、基准面升降、水动力因素探讨砂体结构成因及发育模式。

##### 4.1 古气候控制作用

昌德地区泉四段底部发育大量的植物和孢粉化石,其中蕨类植物化石占优势,总体质量分数在50%以上,包括喜干热的桫欏孢属(*Cyathidites*)和希指蕨(*Schizaeopiorites*);裸子植物次之,质量分数约为30%,如喜温的松粉属(*Pinuspollenites*)和喜干内环粉属(*Classopollis*);被子植物种类及含量最少,如沟粉属(*Tricolpites*)(见图9)。通常,蕨类植物生活于潮湿的热带和亚热带气候。顶部孢粉化石裸子植物花粉及被子植物花粉占比增多,昌德地区泉四段具有“厚平原、窄前缘”的沉积相特征(见图5),泉四段底部平原沉积粉砂岩多被紫红色氧化色泥岩分割,顶部前缘沉积粉砂岩夹灰绿色还原色泥岩(见图6(a))。古生物沉积相和岩性特征表明,昌德地区泉四段早期气候干旱炎热,晚期气候湿润。

干热的气候环境加剧母源区的风化,季节性的干旱/洪涝有利于沉积物的快速搬运沉积<sup>[32]</sup>,二者共同作用控制S(沉积物供给量)的变化。昌德地区MSC3时期,气候炎热,降水少,湖泊水体蒸发量大,湖盆收缩,河道宽深比小,以进积为主,易形成枝状三角洲<sup>[19]</sup>,沉积物供给速率大,沉积物供给量大,A/S远小于1(A为可容纳空间变化速率),分流河道发育,河道携砂量大,下切能力强,以加积为主,多见冲刷面,表现

为“砂冲砂”的间断正韵律<sup>[19]</sup>,垂向上形成块状切叠型砂体结构。MSC2时期,气候开始转变,沉积物供给量减少,湖盆扩张,湖平面上升造成分流河道改道、分汊,河道宽深比增大,形成网状三角洲<sup>[19]</sup>, $A/S$ 小于1,水下分流河道发育,以侧向加积为主,表现为“砂冲砂”和“砂冲泥”的序列<sup>[19]</sup>,形成切割型和叠加型结合的砂体结构。MSC1时期,气候湿润,母岩源区风化作用减弱,沉积物供给速率减小,沉积物供给量小,易形成席状三角洲<sup>[19]</sup>, $A/S$ 大于1,河道规模和携砂量减少,河道下切能力弱,退积为主,细粒沉积物受水体托举更易溢岸,形成单一孤立型砂体结构。

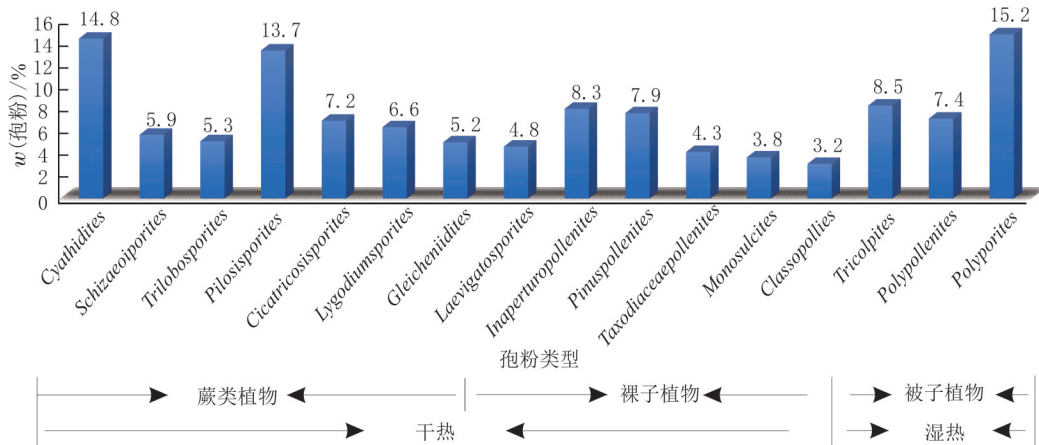


图9 昌德地区泉头组四段孢粉质量分数变化

Fig. 9 Pollen content of the fourth member of Quantou Formation in Changde Area

#### 4.2 基准面升降控制作用

研究区泉四段整体为一个长期基准面上升的半旋回(见图2),基准面变化控制可容空间变化,进而决定砂体充填样式<sup>[15,22-24]</sup>。昌德地区泉四段沉积时期且经历缓慢上升(MSC3时期)—加速上升(MSC2早期)—缓慢上升(MSC1时期),可容纳空间不断增大。MSC3时期,中期基准面最低且为上升半旋回,河道切割和区域紫红色泥岩表明可容纳空间最小且缓慢增长, $A/S$ 远小于1,发育浅水三角洲平原分流河道沉积,与紫色泥岩构成无泥或少泥的间断正韵律(见图10(a)),砂体以块状切叠型为主(见图7(a))。MSC2时期,中期基准面呈上升为主和下降为辅不完全对称型,可容纳空间快速增长, $A/S$ 不大于1,为浅水三角洲平原向前缘过渡沉积,发育连续性较好的水下分流河道沉积,与红色泥或绿色支流间湾泥交互构成间断正韵律(见图10(b)),砂体多为块状叠置型(见图7(b))和层状叠置型(见图7(c))。MSC1时期,全区主要为前缘—湖泊沉积,基准面逐渐由对称型(见图10(c))向上升为辅和下降为主的不完全对称型转变,可容纳空间达最大, $A/S$ 大于1,发育连续性较差的席状砂砂体(见图7(d)),形态为单一孤立型(见图10(d))。基准面升降影响砂体垂向结构,研究区基准面不断升高(见图10(e)),整个过程中,水体携带能量、搬运沉积物的速率、总量和粒度由高到低,可容纳空间由低到高,经历进积—加积—退积的地层沉积相应序列<sup>[23]</sup>,砂体结构对应变化为块状切叠型—块状叠置型—层状叠置型—单一孤立型。

#### 4.3 水动力控制作用

$Th/U$ (质量分数比)和 $Th/K$ (质量分数比)反映水体深度变化, $U$ 可大致表明沉积物粒度变化,水下环境 $K$ 元素居多,暴露环境 $Th$ 元素居多<sup>[33]</sup>。泉四段下部 $Th$ 和 $K$ 高, $U$ 明显低, $Th/K < 7$ 。泉四段中上部 $Th/U$ 和 $Th/K$ 较高,平均大于7<sup>[33]</sup>,泉四段 $Th/K$ 自下而上具有增加趋势,昌德地区整体为浅水环境,但沉积过程中水体不断加深(见图11(a))。由昌德地区沉积相(见图5)可知,昌德地区自下而上发育浅水三角洲平原—浅水三角洲前缘,局部地区发育浅湖。昌德地区泉四段不同探井砂体累计厚度表明,MSC3时期,钻遇砂体的探井数为28,砂体累计厚度为172.86 m;MSC2时期,钻遇砂体的探井数为21,砂体累计厚度为146.94 m;MSC1时期,钻遇砂体的探井数为21,砂体累计厚度为123.41 m(见表1)。结合退积型浅水三角洲的背景,浅水三角洲平原位于洪水面向陆一侧,以河流作用为主,浅水三角洲前缘位于正常浪基面与洪水面之间,受河流和湖浪的双重影响<sup>[8]</sup>。由岸到湖,河流作用和湖浪作用此消彼长<sup>[34]</sup>,且随河

流不断向湖盆推进,湖浪作用愈发主导(见图 11(a))。平原水体浅,河流能量大,建设性强,河道分汊改道频繁,进积速度快,河道十分发育<sup>[19]</sup>,砂体规模大,多为切叠型和叠置型砂体结构,砂体钻遇率高。前缘三角洲主体被湖盆水体淹没,受湖盆水体阻力影响,河流能量减弱,湖浪作用增强,河道发育受限<sup>[34]</sup>,河道砂体规模变小,发育单一型砂体,砂体钻遇率低。

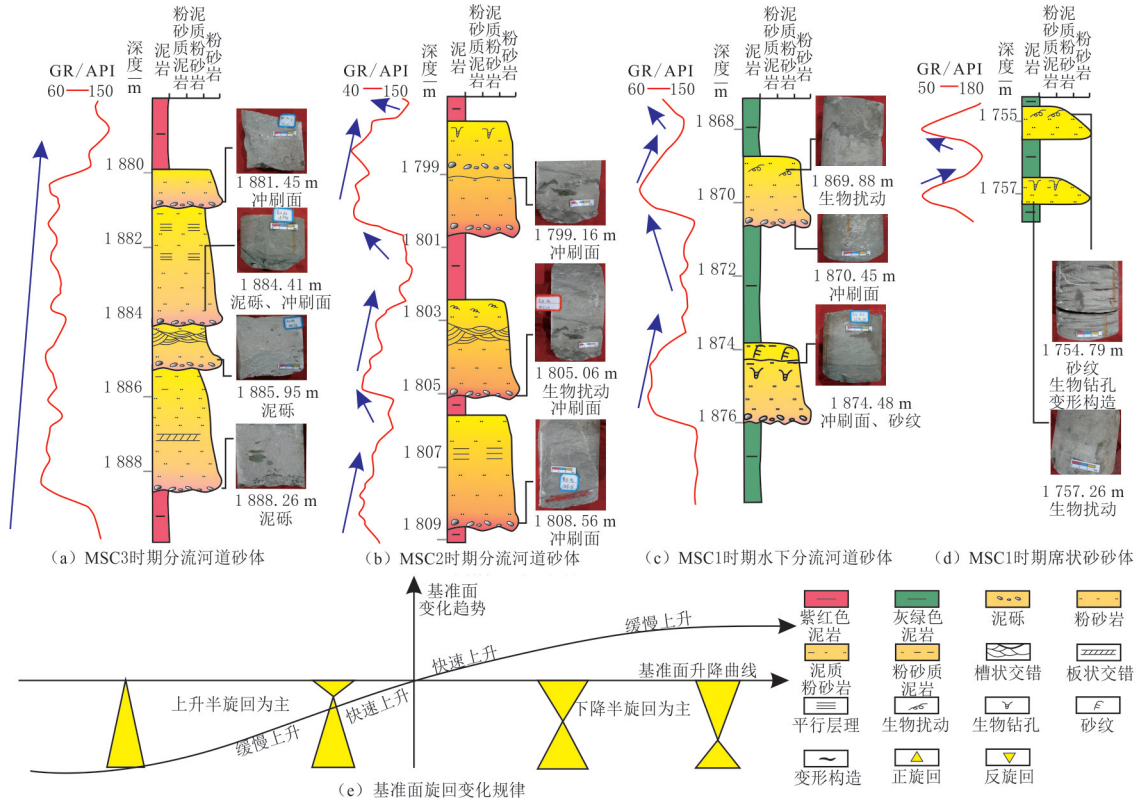


图 10 昌德地区泉头组四段基准面旋回控制下砂体发育类型及特征

Fig. 10 Development types and characteristics of sand bodies under the control of the base level cycle of fourth section of Quantou Formation in Changde Area

表 1 昌德地区泉头组四段浅水三角洲连续沉积河道砂体统计

Table 1 Statistics of continuous sedimentary channel sand bodies in the shallow water delta of fourth section of Quantou Formation in Changde Area

层序地层单元	钻遇砂体井数	最大连续沉积厚度/m	最小连续沉积厚度/m	累计总厚度/m
MSC1	21	9.29	1.13	123.41
MSC2	21	10.21	1.34	146.94
MSC3	28	12.87	1.40	172.86

#### 4.4 发育模式

综合研究区泉四段砂体沉积结构样式,建立昌德地区泉头组四段砂体发育控制因素及模式(见图 11(b))。昌德地区泉头组四段发育浅水三角洲—浅湖沉积体系,受南部怀德沉积体系和北部讷河—依安沉积体系物源供给<sup>[20-21,30]</sup>,沉积中心早期在研究区西部以外,晚期迁移至中西部地区。研究区发育河控型浅水三角洲,盆地内部沉积相分异度低<sup>[19]</sup>,岩性以粉砂岩、泥质粉砂岩、粉砂质泥岩和泥岩为主。MSC3 时期,发育平原沉积,气候干旱,具大面积红色泥岩的洪泛沉积(见图 5),发育枝状三角洲,研究区远离物源区,河道分汊明显,具有“网格状”特征,河道宽且河道砂体厚,河道砂地比由南向北发散减弱(见图 6);砂体连通性好,形成很好的储层,且研究区南部储层更加发育,是油气勘探的有利区。MSC2 时期,延续干旱的气候特征,研究区中西部地区开始发育浅水三角洲前缘沉积,河道间泥岩主要为紫红色,中西部区域泥岩为灰绿色(见图 5),沉积水体上升,水下分流河道发育程度减弱,表现为中西部地区河道变窄,分支化进

一步减弱,河道砂体砂地比减小(见图6),总体储集性减弱。MSC1时期,气候湿润,昌德地区以浅水三角洲前缘沉积为主,中西部区域变为浅湖沉积(见图5),水下分流河道为主体,河道多分汊,靠近浅湖萎缩消失,整体砂地比低(见图6),难以横向对比;以湖浪作用为主,水下分流河道受湖浪改造,发生席状砂化,河道砂体表现为“厚度小、粒度细、延伸广”<sup>[19]</sup>,在前缘形成透镜状岩性油气藏。

研究区早期气候干旱,晚期气候湿润,长周期表现为干旱环境下退积型浅水三角洲,短周期表现为由干旱环境转为湿润气候的退积型浅水三角洲,整体为“厚平原、窄前缘”的特征。沉积砂体结构类似鄱阳湖现代沉积特征<sup>[1,18,32]</sup>,枯水期,分流河道下切,叠置在早期沉积砂体之上;洪水期,河道砂体退积,泥质质量分数增多,湖水对河道砂体改造,逐渐席状化,河道砂体形成孤立型。

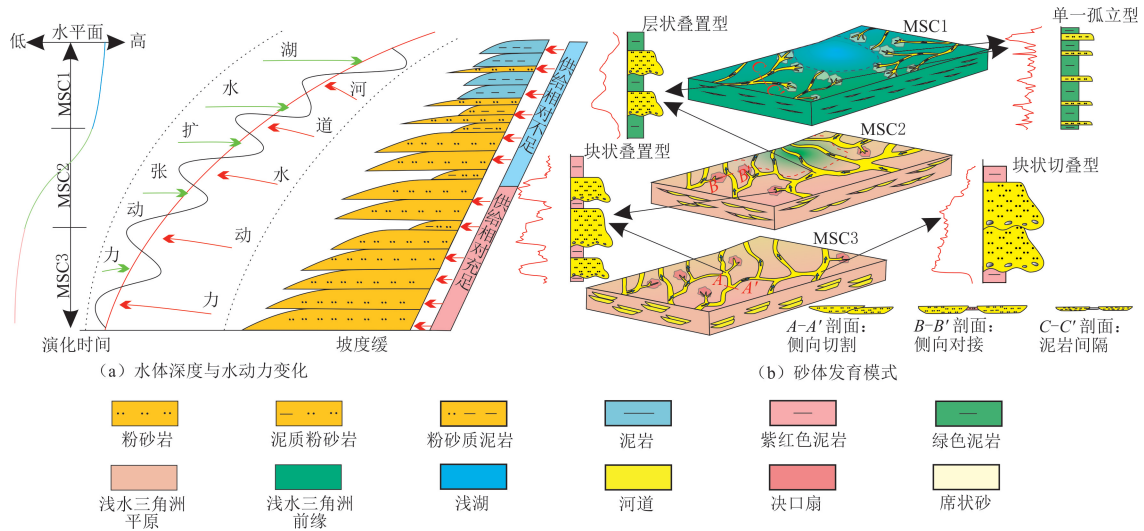


图11 昌德地区泉头组四段水体、水动力变化及砂体发育模式

Fig. 11 Control factors and pattern of sand body development in the fourth section of Quantou Formation in Changde Area

### 5 结论

(1)松辽盆地北部昌德地区泉四段为浅水三角洲环境,发育大量紫红色泥岩、钙质结核、植物化石和水动力特征的沉积构造。平原分流河道沉积物粒度大,以跃移为主,前缘水下分流河道粒度小,以悬浮搬运为主。研究区具有“厚平原、薄前缘”的沉积格局,为退积型浅水三角洲。整体具有早期砂体富集带宽且砂地比大,晚期砂体富集带窄且砂地比小的特征。

(2)昌德地区泉四段砂体垂向结构样式有4种,分别为块状切叠型、块状叠置型、层状叠置型和单一孤立型砂体。砂体侧向接触关系有三种,分别是侧向切割、侧向对接和泥岩间隔。浅水三角洲平原发育块状切叠型和块状叠置型砂体;浅水三角前缘发育层状叠置型和单一孤立型砂体,砂体物性依次减弱。

(3)昌德地区泉四段发育浅水三角洲—浅湖沉积体系。砂体结构受古气候、基准面升降、水动力因素共同控制。MSC3时期,气候干旱,基准面缓慢上升,河流作用为主,沉积物供给充足,可容纳空间小,砂体为块状切叠型,形成很好的储层,研究区南部是油气勘探的有利区;MSC2时期,气候开始改变,基准面加速上升,受河流和湖浪双重作用,沉积物供应减少,可容纳空间增大,发育块状/层状叠置型砂体,总体储集性减弱;MSC1时期,气候湿润,基准面缓慢上升,湖浪作用为主,沉积物供给不足,可容纳空间最大,发育单一孤立型砂体,浅水三角洲前缘形成透镜状岩性油气藏。

### 参考文献(References):

[1] 冯文杰,吴胜和,张可,等.曲流河浅水三角洲沉积过程与沉积模式探讨;沉积过程数值模拟与现代沉积分析的启示[J].地质学报,2017,91(9):2047-2064.

- FENG Wenjie, WU Shenghe, ZHANG Ke, et al. Depositional process and sedimentary model of meandering-river shallow delta: insights from numerical simulation and modern deposition[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2017,91(9):2047-2064.
- [2] FISK H N, KOLB C R, MCFARLAN E. Sedimentary framework of the modern Mississippi Delta[J]. *Journal of Sedimentary Research*, 1954,24(2):76-99.
- [3] 蒙启安,白雪峰,张文婧,等. 松辽盆地北部西部斜坡石油成藏特征与勘探实践[J]. *石油勘探与开发*, 2020,47(2):236-246.  
MENG Qian, BAI Xuefeng, ZHANG Wenjing, et al. Accumulation and exploration of petroleum reservoirs in west slope of Northern Songliao Basin, China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2020,47(2):236-246.
- [4] 王永乐,马俊生,陈剑峰,等. 鄂尔多斯盆地东南部山西组曲流河三角洲构型特征及沉积模式[J]. *东北石油大学学报*, 2022,46(5):26-39.  
WANG Yongle, MA Junsheng, CHEN Jianfeng, et al. Architectural characteristics and sedimentary model of meandering river delta of Shanxi Formation in the southeast of Ordos Basin[J]. *Journal of Northeast Petroleum University*, 2022,46(5):26-39.
- [5] 邱恩波,仇鹏,石磊,等. 准噶尔盆地前哨地区有利砂体展布规律及演化模式:以下侏罗统三工河组二段一砂组为例[J]. *东北石油大学学报*, 2024,48(1):61-73.  
QIU Enbo, QIU Peng, SHI Lei, et al. Distribution and evolution of favorable sand in Qianshao Area of Junggar Basin: a case study from the first sand group of the second member of the Sangonghe Formation of the Lower Jurassic[J]. *Journal of Northeast Petroleum University*, 2024,48(1):61-73.
- [6] 赵一波,李胜利,周练武,等. 近源河流相辫状河一曲流河微相转换沉积特征及控制因素:以刘官庄油田馆陶组三段为例[J]. *东北石油大学学报*, 2022,46(1):14-25.  
ZHAO Yibo, LI Shengli, ZHOU Lianwu, et al. Sedimentary characteristics and controlling factors of microfacies transformation from braided river to meandering river of near source fluvial facies: taking the third member of Guantao Formation in Liuguanzhuang Oilfield as an example[J]. *Journal of Northeast Petroleum University*, 2022,46(1):14-25.
- [7] 贺萍,王青春,于靖波,等. 大涝坝地区下白垩统巴什奇克组浅水三角洲沉积特征[J]. *东北石油大学学报*, 2021,45(2):67-78.  
HE Ping, WANG Qingchun, YU Jingbo, et al. Sedimentary characteristics of shallow-water delta of the Lower Cretaceous Bashijiqi Formation in Dalaoba Area, Tarim Basin, China[J]. *Journal of Northeast Petroleum University*, 2021,45(2):67-78.
- [8] TAYLOR T R, GILES M R, HATHON L A, et al. Sandstone diagenesis and reservoir quality prediction: models, myths, and reality[J]. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 2010,94(8):1093-1132.
- [9] STEFANO P, GARY J H, CHRISTOPHER A L J, et al. Cliniform geometry, geomorphology, facies character and stratigraphic architecture of a sand-rich subaqueous delta: Jurassic Sognefjord Formation, offshore Norway[J]. *Sedimentology*, 2015,62:350-388.
- [10] MIAL L A D. Architectural elements and bounding surfaces in fluvial deposits: anatomy of Kayenta Formation(Lower Jurassic), Southwest Colorado[J]. *Sedimentary Geology*, 1988,55(3/4):233-262.
- [11] MIAL L A D. Architectural-element analysis: a new method of facies analysis applied to fluvial deposits[J]. *Earth Science Reviews*, 1985,22(4):261-308.
- [12] 吴胜和,纪友亮,岳大力,等. 碎屑沉积地质体构型分级方案探讨[J]. *高校地质学报*, 2013,19(1):12-22.  
WU Shenghe, JI Youliang, YUE Dali, et al. Discussion on hierarchical scheme of architectural units in clastic deposits[J]. *Geological Journal of China Universities*, 2013,19(1):12-22.
- [13] PRANTER M J, COLE R D, PANJAITAN H, et al. Sandstone-body dimensions in a lower coastal-plain depositional setting: Lower Williams Fork Formation[J]. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 2009,93(10):1379-1401.
- [14] FORD G, LPYLES D R. A hierarchical approach for evaluating fluvial systems: architectural analysis and sequential evolution of the high net-sand content, Middle Wasatch Formation Uinta Basin Utah[J]. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 2014,98(7):1273-1304.
- [15] 邓文龙,叶泰然,纪友亮,等. 川西新场构造带须二段浅水三角洲砂体结构特征及控制因素[J]. *古地理学报*, 2024,26(3):545-566.  
DENG Wenlong, YE Tairan, JI Youliang, et al. Sand body architecture and controlling factors of shallow water delta in the member 2 of Xujiahe Formation in Xinchang Structural Belt, Western Sichuan Basin[J]. *Journal of Palaeogeography(Chinese Edition)*, 2024,26(3):545-566.
- [16] 杨征,吴胜和,段冬平,等. 西湖凹陷花港组浅水三角洲平原分流河道沉积构型[J]. *古地理学报*, 2024,26(3):525-544.  
YANG Zheng, WU Shenghe, DUAN Dongping, et al. Architecture characteristics of distributary channels in shallow water delta plain of the Huagang Formation in Xihu Sag, East China Sea[J]. *Journal of Palaeogeography(Chinese Edition)*, 2024,26(3):525-544.
- [17] 谢才铸,傅恒,朱梦琦,等. 塔河桑塔木地区石炭系卡拉沙依组层序地层及砂体发育特征[J]. *东北石油大学学报*, 2022,46(4):1-11.  
XIE Caizhu, FU Heng, ZHU Mengqi, et al. Sequence formations and sandbody development characteristics of Kalashayi Formation of Carboniferous in the Sangtamu Area of Tahe[J]. *Journal of Northeast Petroleum University*, 2022,46(4):1-11.

- [18] 蔡全升,胡明毅,胡忠贵,等. 退积型浅水三角洲沉积演化特征及砂体展布规律:以松辽盆地北部临江地区下白垩统泉头组四段为例[J]. 石油与天然气地质, 2016,37(6):903-914.  
CAI Quansheng, HU Mingyi, HU Zhonggui, et al. Sedimentary evolution and distribution of sand bodies of retrogradational shallow-water delta: a case study from 4th member of the Cretaceous Quantou Formation in the Lingjiang Area, Songliao Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2016,37(6):903-914.
- [19] 朱筱敏,叶蕾,谢爽慧,等. 低可容空间陆相湖盆富砂浅水三角洲沉积模式及实例分析[J]. 古地理学报, 2023,25(5):959-975.  
ZHU Xiaomin, YE Lei, XIE Shuanghui, et al. Sedimentary models and case study of sand-rich shallow-water delta in continental lacustrine basins with low accommodation[J]. Journal of Palaeogeography(Chinese Edition), 2023,25(5):959-975.
- [20] 朱筱敏,刘媛,方庆,等. 大型坳陷湖盆浅水三角洲形成条件和沉积模式:以松辽盆地三肇凹陷扶余油层为例[J]. 地学前缘, 2012,19(1):89-99.  
ZHU Xiaomin, LIU Yuan, FANG Qing, et al. Formation and sedimentary model of shallow delta in large-scale lake: example from Cretaceous Quantou Formation in Sanzhao Sag, Songliao Basin[J]. Earth Science Frontiers, 2012,19(1):89-99.
- [21] 卜春明. 松辽盆地北部三肇凹陷扶余致密油层浅水三角洲沉积特征及演化[J]. 特种油气藏, 2021,28(4):62-71.  
BU Chunming. Sedimentary characteristics and evolution of shallow water delta in Fuyu tight oil reservoir in Sanzhao Sag, Northern Songliao Basin[J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2021,28(4):62-71.
- [22] 李敏,陈博,阮金凤,等. 松辽盆地新民油田下白垩统泉四段浅水三角洲骨架单砂体空间发育特征[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2019,39(4):46-55.  
LI Min, CHEN Bo, RUAN Jinfeng, et al. Spatial distribution patterns of single framework sand bodies of a shallow-water delta in the Cretaceous Quantou Formation of Xinmin Oilfield, Songliao Basin[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2019,39(4):46-55.
- [23] 孙春燕,胡明毅,胡忠贵,等. 高分辨率层序格架内储层砂体发育特征:以松辽北部州311地区泉三、泉四段为例[J]. 石油与天然气地质, 2017,38(6):1019-1031.  
SUN Chunyan, HU Mingyi, HU Zhonggui, et al. Characteristics of reservoir sand bodies within high-resolution sequence framework: a case from the 3rd and 4th members of Quantou Formation in Zhou 311 Area, Northern Songliao Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2017,38(6):1019-1031.
- [24] 宿赛,胡明毅,邓庆杰,等. 基于浅水三角洲沉积的供源差异与砂体分布空间配置关系——以松辽盆地长垣西部葡萄花油层为例[J]. 东北石油大学学报, 2021,45(1):32-44.  
SU Sai, HU Mingyi, DENG Qingjie, et al. Relationship between source difference and spatial distribution of sand bodies of shallow-water delta: an instance of Putaohua oil layer in the Western Changyuan, Songliao Basin[J]. Journal of Northeast Petroleum University, 2021,45(1):32-44.
- [25] 史超群,鲍志东,方松,等. 松辽盆地大安油田扶余油层储层特征及控制因素[J]. 西北大学学报(自然科学版), 2014,44(6):959-969.  
SHI Chaoqun, BAO Zhidong, FANG Song, et al. Reservoir characteristics and influential factors of Fuyu reservoirs in Daan Oil Field, Songliao Basin, China[J]. Journal of Northwest University(Natural Science Edition), 2014,44(6):959-969.
- [26] 邱祥亮,陈小东,丁黎,等. 姬塬地区长81油层组砂体结构特征及对油藏的控制作用[J]. 地质科技通报, 2020,39(5):87-96.  
QIU Xiangliang, CHEN Xiaodong, DING Li, et al. Controlling effects of sand body structural characteristics on oil reservoirs of Chang 81 oil layer in Jiyuan Area[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2020,39(5):87-96.
- [27] 田磊,宋璐,张世奇,等. 深层致密砂岩储层非均质性特征及控制因素:以准噶尔盆地永进地区侏罗系齐古组为例[J]. 东北石油大学学报, 2024,48(4):29-40.  
TIAN Lei, SONG Fan, ZHANG Shiqi, et al. Heterogeneity characteristics of deep tight sandstone reservoir and its controlling factors: a case study of Jurassic Qigu Formation in Yongjin Area, Junggar Basin[J]. Journal of Northeast Petroleum University, 2024,48(4):29-40.
- [28] 邓庆杰,康德江,胡明毅,等. 松辽盆地三肇凹陷南部泉头组四段浅水三角洲河道储层构型特征[J]. 石油与天然气地质, 2020,41(3):513-524.  
DENG Qingjie, KANG Dejiang, HU Mingyi, et al. Architecture of channel reservoirs of shallow-water delta in the 4th member of Cretaceous Quantou Formation in Southern Sanzhao Sag, Songliao Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2020,41(3):513-524.
- [29] 孙雨,于利民,闫百泉,等. 松辽盆地三肇凹陷向斜区白垩系姚家组葡萄花油层油水分布特征及其主控因素[J]. 石油与天然气地质, 2018,39(6):1120-1130.  
SUN Yu, YU Limin, YAN Baiquan, et al. Oil-water distribution and its major controlling factors of Putaohua Reservoir of the Cretaceous Yaojia Formation in syncline area of Sanzhao Sag, Songliao Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2018,39(6):1120-1130.
- [30] 蒙启安,赵波,陈树民,等. 致密油层沉积富集模式与勘探开发成效分析:以松辽盆地北部扶余油层为例[J]. 沉积学报, 2021,39(1):112-125.

- MENG Qi'an, ZHAO Bo, CHEN Shumin, et al. Sedimentary enrichment mode and effect analysis of exploration and development; a case study of Fuyu reservoir tight oil in Northern Songliao Basin[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2021,39(1):112-125.
- [31] 付文俊,张昌民,冀东升,等. 准噶尔盆地南安集海河剖面中侏罗统头屯河组浅水三角洲沉积特征[J]. *岩性油气藏*, 2023,35(4):145-160.
- FU Wenjun, ZHANG Changmin, JI Dongsheng, et al. Sedimentary characteristics of shallow water delta of Middle Jurassic Toutunhe Formation in Southern Anjihai river outcrops, Junggar Basin[J]. *Lithologic Reservoirs*, 2023,35(4):145-160.
- [32] 赵汉卿,李超,郭诚,等. 河控型浅水三角洲前缘河道砂体结构特征:以渤海湾盆地黄河口凹陷 BZ34 油区明下段 II 油组为例[J]. *海洋地质前沿*, 2024,40(2):20-27.
- ZHAO Hanqing, LI Chao, GUO Cheng, et al. Geomorphology of channel sandbodies in fluvially dominated shallow water delta front: taking the lower member of the Minghuazhen Formation in BZ34 Oilfield of the Huanghekou Sag, Bohai Bay Basin as an example[J]. *Marine Geology Frontiers*, 2024,40(2):20-27.
- [33] 吴欣松,郭娟娟,黄永建,等. 松辽盆地晚白垩世古气候变化的测井替代指标[J]. *古地理学报*, 2011,13(1):103-110.
- WU Xinsong, GUO Juanjuan, HUANG Yongjian, et al. Well logging proxy of the Late Cretaceous palaeoclimate change in Songliao Basin[J]. *Journal of Palaeogeography*, 2011,13(1):103-110.
- [34] 张美,任新成,商丰凯,等. 准噶尔盆地齐古组浅水河控三角洲沉积特征及模式探讨[J/OL]. *特种油气藏*, 2024: 1-11. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/21.1357.TE.20240722.1845.002.html>.
- ZHANG Mei, REN Xincheng, SHANG Fengkai, et al. Sedimentary characteristics and model of shallow river controlled delta of Qigu Formation in the Junggar Basin[J/OL]. *Special Oil & Gas Reservoirs*, 2024: 1-11. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/21.1357.TE.20240722.1845.002.html>.

.....

(上接第 82 页)

- [29] 刘翰林,邹才能,邱振,等. 陆相黑色页岩沉积环境及有机质富集机制:以鄂尔多斯盆地长 7 段为例[J]. *沉积学报*, 2023,41(6):1810-1829.
- LIU Hanlin, ZOU Caineng, QIU Zhen, et al. Sedimentary depositional environment and organic matter enrichment mechanism of lacustrine black shales; a case study of the Chang 7 Member in the Ordos Basin[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2023,41(6):1810-1829.
- [30] BEARD D C, WEYL P K. Influence of texture on porosity and permeability of unconsolidated sand[J]. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 1973,57(2):349-369.
- [31] BREIMAN L. Random forests[J]. *Machine Learning*, 2001,45(1):5-32.
- [32] ROKACH L. Ensemble-based classifiers[J]. *Artificial Intelligence Review*, 2010,33:1-39.