

大民屯凹陷古近系沙河街组三段扇三角洲前缘沉积生物扰动特征



Pre-pub. on line: www.
geojournals.cn/georev

江凯禧¹⁾, 李晓光²⁾, 李铁军²⁾, 黄舒雅¹⁾, 张妮³⁾, 赵雪培¹⁾,
夏长发¹⁾, 张新培²⁾, 樊佐春²⁾, 林春明¹⁾

1) 南京大学地球科学与工程学院, 南京, 210023;

2) 中石油辽河油田分公司勘探开发研究院, 辽宁盘锦, 124010;

3) 金陵科技学院材料工程学院, 南京, 211169

内容提要:为探究陆相扇三角洲前缘沉积生物扰动特征,以辽河拗陷大民屯凹陷沈检5井古近系沙河街组三段扇三角洲前缘沉积岩芯为研究对象,对生物遗迹化石进行了鉴定,统计了垂向剖面上生物扰动层厚度和扰动指数的分布特征。依据主微量元素参数反映的沉积条件,探讨了生物扰动层厚度和扰动指数与沉积环境的响应关系。研究表明,沈检5井 S_3^4 II 和 S_3^4 I 油层组发育生物扰动构造,生物遗迹化石以古藻迹 (*Palaeophycus*) 和漫游迹 (*Planolites*) 占优势为特征。生物扰动构造主要发育于水下分流间湾微相沉积物中,扰动层厚度在 5~51 cm,扰动指数以 3~5 级为主。主微量元素参数分析表明 S_3^4 II 和 S_3^4 I 油层组沉积期的古气候、古生产力、古盐度和古水深条件相近,即为相对温湿的古气候、低古生产力、淡水—微咸水盐度条件和浅水沉积环境。沉积环境变化幅度小是造成 S_3^4 II 油层组与 S_3^4 I 油层组发育的生物扰动层厚度和扰动指数差异不明显的主要原因。但当前研究还难以明确单个油层组内生物扰动层厚度和扰动指数变化的主控因素。该项研究加深了对陆相浅水扇三角洲前缘沉积环境遗迹化石组成和生物扰动指数变化特征的认识。

关键词:辽河拗陷; 大民屯凹陷; 古近系沙河街组; 浅水扇三角洲; 遗迹化石; 生物扰动

遗迹化石是指地质历史时期的生物遗留在沉积物表面或沉积物内部的各种生命活动的形迹构造所形成的化石,也称痕迹化石,是各种生物成因的沉积构造,如各种生物扰动、足迹、移迹、潜穴、粪化石等。沉积地层中的遗迹化石属种、组构类型及生物扰动强度能为古环境重建提供关键信息,如沉积速率、古水深、古盐度、沉积能量、底水和孔隙水的氧化还原条件等(李应暹等, 1997; 杨式溥等, 2004; Seilacher, 2007; 龚一鸣等, 2009; 林春明, 2019),是沉积环境分析的重要相标志。全球性生物大灭绝和复苏也会在遗迹化石上留下关键信息(赵小明和童金南, 2010; 周志澄等, 2014; 张立军等, 2015)。遗迹化石有别于实体化石,是一定沉积环境背景下的古代生物行为和习性的岩石记录(龚一鸣等, 2009)。生物扰动是生物对沉积物的改造,其强度

的变化与沉积条件密切关联。

自 Seilacher (1967) 建立起遗迹相与水体深度的关联性以来,遗迹化石在沉积环境解释上的价值逐渐受到重视。相较于海相盆地,陆相盆地遗迹化石的研究程度相对较低 (Seilacher, 2007)。Frey 和 Pemberton (1987) 明确了 *Scoyenia* 遗迹相代表陆相低能浅水或潮湿底质的河湖过渡环境; Smith 等 (1993) 建立了代表陆上古土壤环境的 *Termitichnus* 遗迹相; Buatois 和 Mangao (1995) 提出了代表湖泊水下沉积环境的 *Mermia* 遗迹相。我国学者在陆相遗迹化石研究上也取得了重要成果,特别是对滨浅湖和半深湖—深湖相的遗迹化石组构特征及古环境意义方面开展了详细研究(李应暹等, 1997; 卢宗盛等, 2003; 刘彦博等, 2009; 林春明, 2019)。在遗迹化石研究方法上,以野外露头 and 岩芯样品的观

注:本文为“辽河油田千万吨稳产关键技术研究与应用”的重点专项课题“高凝油油藏水驱后期储层精细描述与评价”(编号:2017E-1063)的成果。

收稿日期:2020-08-05; 改回日期:2021-01-30; 网络首发: 2021-02-20; 责任编辑:刘志强。Doi: 10.16509/j.georeview.2021.02.***

作者简介:江凯禧,男,1987年生,博士研究生,地质学专业;Email:haokaisi5535553@163.com。通讯作者:林春明,男,1964年生,教授,主要从事沉积学与石油地质学的教学和研究;Email:cmclin@nju.edu.cn。

察描述为基础(杨式溥等, 2004; 王约等, 2004), 并越来越多地应用了碳氧同位素、微量元素、CT 扫描、扫描电子显微镜和三维重建等方法和技术(牛永斌等, 2008; 丁奕等, 2016; 陈浩等, 2018; 陈翔等, 2018; 宋慧波等, 2019)。

以往研究注重对我国陆相沉积盆地遗迹化石属

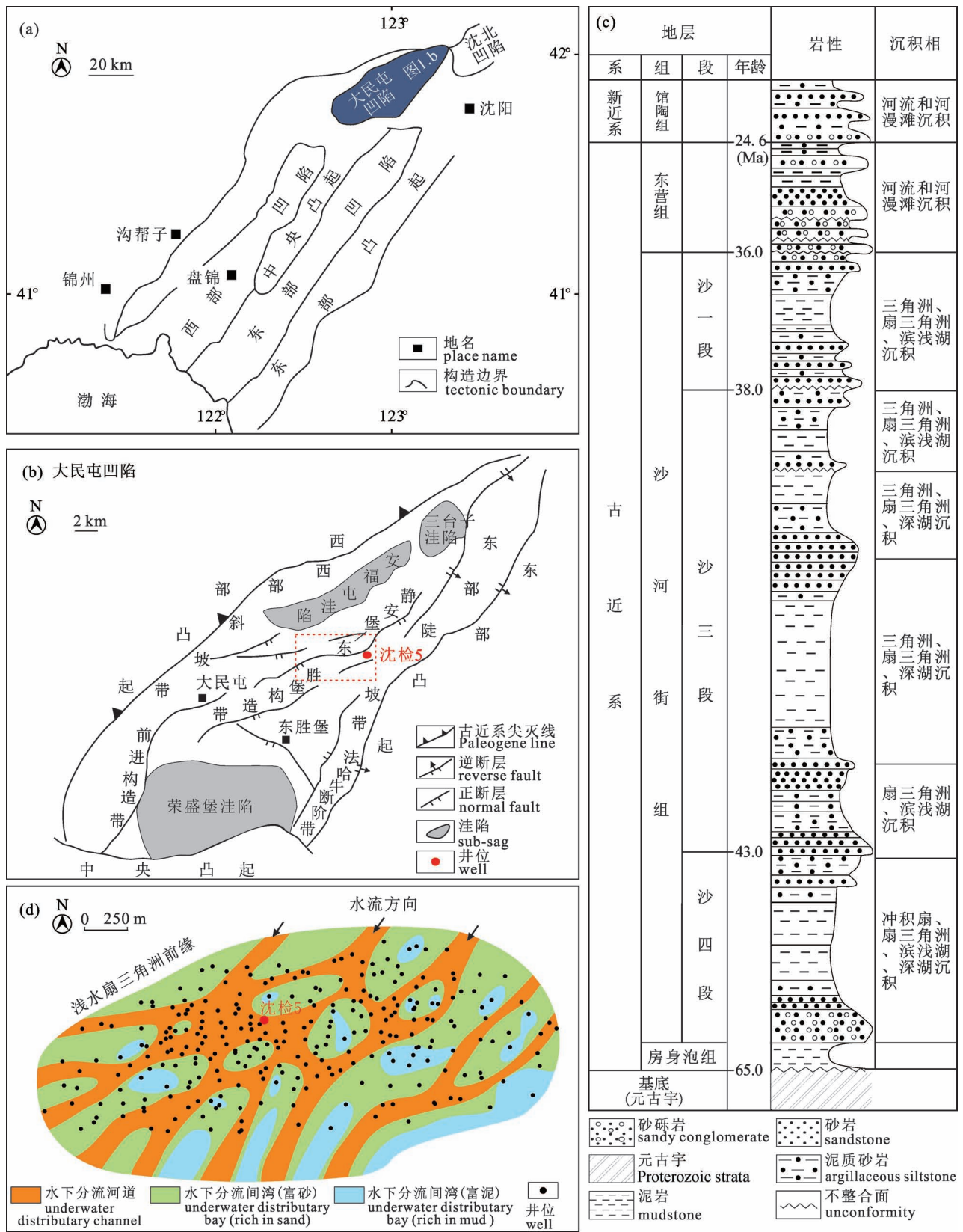


图 1 辽河拗陷大民屯凹陷地质背景及沈检 5 井位置图

Fig. 1 Geologic settings of the Damintun Sag, Liaoh Depression, and the location of the Well Shenjian-5

- (a) 大民屯凹陷地理位置图(据孟卫工, 2006, 略修改); (b) 大民屯凹陷构造简图(据孟卫工, 2006, 略修改); (c) 研究区地层柱状图(据孟卫工, 2006, 略修改); (d) 研究区 S_3^4 II 油层组沉积相平面图及研究井位图
- (a) Location of the Damintun Sag(modified from Meng Weigong, 2006&); (b) simplified tectonic map of the Damintun Sag(modified from Meng Weigong, 2006&); (c) general columnar section of the study area in the Damintun Sag(modified from Meng Weigong, 2006&); (d) a depositional facies map of the S_3^4 II oil layer group in the study area, and the location of the Well Shenjian-5

种、组构类型及其沉积环境指示意义的分析(李应暹等, 1997; 卢宗盛等, 2003; 杨式溥等, 2004; 龚一鸣等, 2009), 但较少聚焦于岩芯生物扰动层厚度和扰动指数与沉积条件变化的协同响应关系研究。前人在本研究区辽河拗陷岩芯遗迹化石鉴定、遗迹组构划分与命名及其沉积环境解释上开展了细致的研究(李应暹等, 1997; 卢宗盛等, 2003), 为本研究工作中的遗迹化石识别和组构划分提供了重要指导。本次研究聚焦于沈检 5 井, 该井位于辽河拗陷大民屯凹陷, 对古近系沙河街组湖相浅水扇三角洲前缘沉积地层沙三四亚段第二和第一油层组(S_3^4 II 和 S_3^4 I)进行了连续取芯, 获取岩芯长近 132 m, 岩芯中遗迹化石和生物扰动构造发育。浅水三角洲沉积在我国陆相含油气盆地广泛发育, 其中浅水三角洲前缘砂体是重要的油气储集层(徐振华等, 2019), 也是大民屯凹陷重要的勘探和开发目标(李晓光等, 2017), 因此取芯层段较连续, 为本研究提供了基本素材。岩芯遗迹化石和生物扰动的研究能为浅水三角洲前缘沉积的判识和演化分析提供关键证据, 有利于大民屯凹陷的油气勘探与开发。

本文侧重于生物扰动层厚度和扰动指数的垂向剖面分布特征及其与沉积条件变化响应关系的探讨。研究成果能为研究区和类似沉积盆地的浅水扇三角洲前缘沉积环境判识提供生物遗迹化石的证据, 加深对生物扰动强度与沉积条件协同响应关系的认识, 具有一定理论和实际应用价值。

1 地质背景

辽河拗陷位于渤海湾盆地东北部, 被划分为 6 个主要次级构造单元, 分别是大民屯凹陷、西部凸起、西部凹陷、中央凸起、东部凹陷和东部凸起(图 1a), 总体上呈北东向展布(李晓光等, 2017, 2019)。大民屯凹陷位于辽河拗陷东北部, 面积约 800 km², 平面上似椭圆形, 是中、新生代小型陆相凹陷(武毅等, 2017)。研究区位于大民屯凹陷静安堡—东胜堡构造带的中部(图 1b)。大民屯凹陷主

要发育太古宇、元古宇、中生界及新生界的古近系、新近系和第四系地层。其中古近系地层主要发育陆相湖泊—扇三角洲沉积体系。

大民屯凹陷古近系地层自下而上划分为房身泡组、沙河街组及东营组(图 1c), 其中沙河街组由下至上分别发育沙四段、沙三段和沙一段, 缺少沙二段; 新近系自下而上发育馆陶组和明化镇组(孟卫工, 2006; 赵明等, 2011; 武毅等, 2017)。沙河街组沙三段为稳定沉陷构造背景下沉积的一套地层, 为大民屯凹陷主要含油气层系之一。沙三段由下至上又划分为沙三四(S_3^4)、沙三三(S_3^3)、沙三二(S_3^2)及沙三一(S_3^1)四个沉积旋回亚段(张妮等, 2020)。其中 S_3^4 段自下而上又被分为 S_3^4 IV、 S_3^4 III、 S_3^4 II 和 S_3^4 I 四个次一级沉积旋回的油层组。本文目的层为 S_3^4 II 和 S_3^4 I 油层组, 为浅水扇三角洲前缘亚相沉积(图 1d; 李晓光等, 2017)。

2 样品与实验分析

沈检 5 井为 2015 年完钻的取芯井, S_3^4 II 和 S_3^4 I 油层组为连续取芯, 样品保存好, 有利于遗迹化石和生物扰动构造的观察描述和样品采集。

S_3^4 II 和 S_3^4 I 油层组的 53 个岩芯样品开展了主微量元素含量分析, 均在南京大学内生金属矿床成矿机制研究国家重点实验室完成。用于测定全岩主量和微量元素的样品均通过清洗, 去除表面灰尘, 通过无污染研磨获得 200 目的粉末样品。主量元素测试前需将粉末样品放置在型号为 BPG-9040A 的恒温干燥箱中以 105℃ 烘干约 4 h, 之后称取 1 g 烘干的粉末样品和 11 g 助熔剂(四硼酸锂), 混合摇匀后倒入铂金坩埚, 放入 THEOXD 型全自动电熔炉中, 在一般氧化物程序下高温加热熔融制备成碱熔玻璃片, Thermo ARL 9900 型 X 射线荧光光谱仪测试所用电流和电压分别为 50 mA 和 50 kV。此外, 还需称取 0.5 g 粉末样品在 1050℃ 下高温加热 1 h 获得烧失量(LOI)。根据国际岩石标准参考物质(BHVO-2、BCR-2 和 RGM-2)的测定值, 所有元素的

相对误差均小于3%。

全岩微量元素分析主要流程为:称取大约50 mg烘干的粉末样品于干净的Teflon溶样罐中,加入1.0 mL HF溶解后放置于130℃的电热板上;待样品蒸至湿盐状后再次加入1.5 mL HF和1.0 mL HNO₃,并将溶样罐置于密封高压釜中在190℃烘箱中加热72 h以上使样品进一步溶解,后将样品从高压釜中取出并蒸至湿盐状,再重复两次加1 mL HNO₃蒸至湿盐状;下一步,加入1.5 mL HNO₃和2 mL H₂O后再次将溶样罐置于密闭高压釜中在120℃烘箱中加热12 h;最后将溶样罐中的溶液转移至容量瓶中,加入1 mL 500 μg/L Rh内标溶液并稀释到50 mL用于测试,测试仪器为Finnigan Element II HR-ICP-MS。样品测定值的相对误差小于10%,且大多数在5%以内。

3 结果与讨论

3.1 浅水扇三角洲前缘沉积特征

三角洲既可以发育于陆相湖泊环境,也可以在海洋环境,其本质是来自物源区的风化物质被河流搬运到水体能量相对稳定的可容空间所形成的似三角形沉积体。由于造成三角洲差异化的地质因素众多,从而出现各种分类方案。扇三角洲主要依据供源体性质划分而来,即以冲积扇为供源,以底负载搬运方式为主所形成的三角洲(林春明,2019)。湖相浅水扇三角洲形成的必要条件是湖泊水体浅且湖盆边缘地形坡度小。由于大民屯凹陷为小型断陷湖盆,发育的浅水扇三角洲具有物源供给充足,搬运距离短、水下分流河道砂岩粒度粗的特点。其中发育的古生物化石多为生活于浅水和低盐度环境的生物,如沼泽拟星介、盘星藻属和阶状似瘤田螺等(孟卫工,2006)。

沈检5井S₃⁴Ⅱ和S₃⁴Ⅰ油层组发育水下分流河道微相、水下分流间湾微相(富砂)和水下分流间湾微相(富泥)沉积(图1d),未见河口坝发育,符合常见浅水扇三角洲前缘沉积特点(王立武,2012;朱筱敏等,2013)。S₃⁴Ⅱ和S₃⁴Ⅰ油层组的岩性和沉积构造组成特征非常相似。在此以S₃⁴Ⅰ油层组为例,该油层组未见暴露标志的氧化色泥岩;岩性上砂岩发育,泥岩少,主要为浅灰色和灰色,少见深灰色(图2)。水下分流河道沉积主要发育砂砾岩、含砾砂岩、粗砂岩和细砂岩,砾石主要以细砾为主,少见中砾,棱角一次圆状为主。水下分流河道砂体底部发育冲刷面,常见泥砾(图2)。水下分流间湾(富

砂)沉积以粉砂岩和泥质粉砂岩为主,水下分流间湾(富泥)沉积以泥岩和粉砂质泥岩为主。在沉积构造上,水下分流河道砂岩以块状层理和递变层理为主。未发现辫状河三角洲前缘沉积常见的侧积交错层理、板状和槽状交错层理,特别是厚0.5 m以上的交错层(李维锋等,2000)。水下分流间湾沉积以发育小型波状层理、透镜状层理和水平层理为主,生物扰动构造发育且扰动强度较高,反映水体较浅和溶解氧含量较高的特征。

湖相浅水扇三角洲前缘水下分流河道微相测井曲线常以中幅箱形—钟形为主,反映重力流与牵引流双重搬运的特点(朱筱敏等,2013)。S₃⁴Ⅰ油层组水下分流河道微相测井曲线特征为中至中幅微齿或齿化箱形;水下分流间湾(富砂)微相以中等齿化形态为主,偶夹指状形态;水下分流间湾(富泥)以低幅平直形或微齿化形态为主(图2)。以上S₃⁴Ⅰ油层组岩性、沉积构造和测井曲线等各项特征均反映其为浅水扇三角洲前缘沉积。

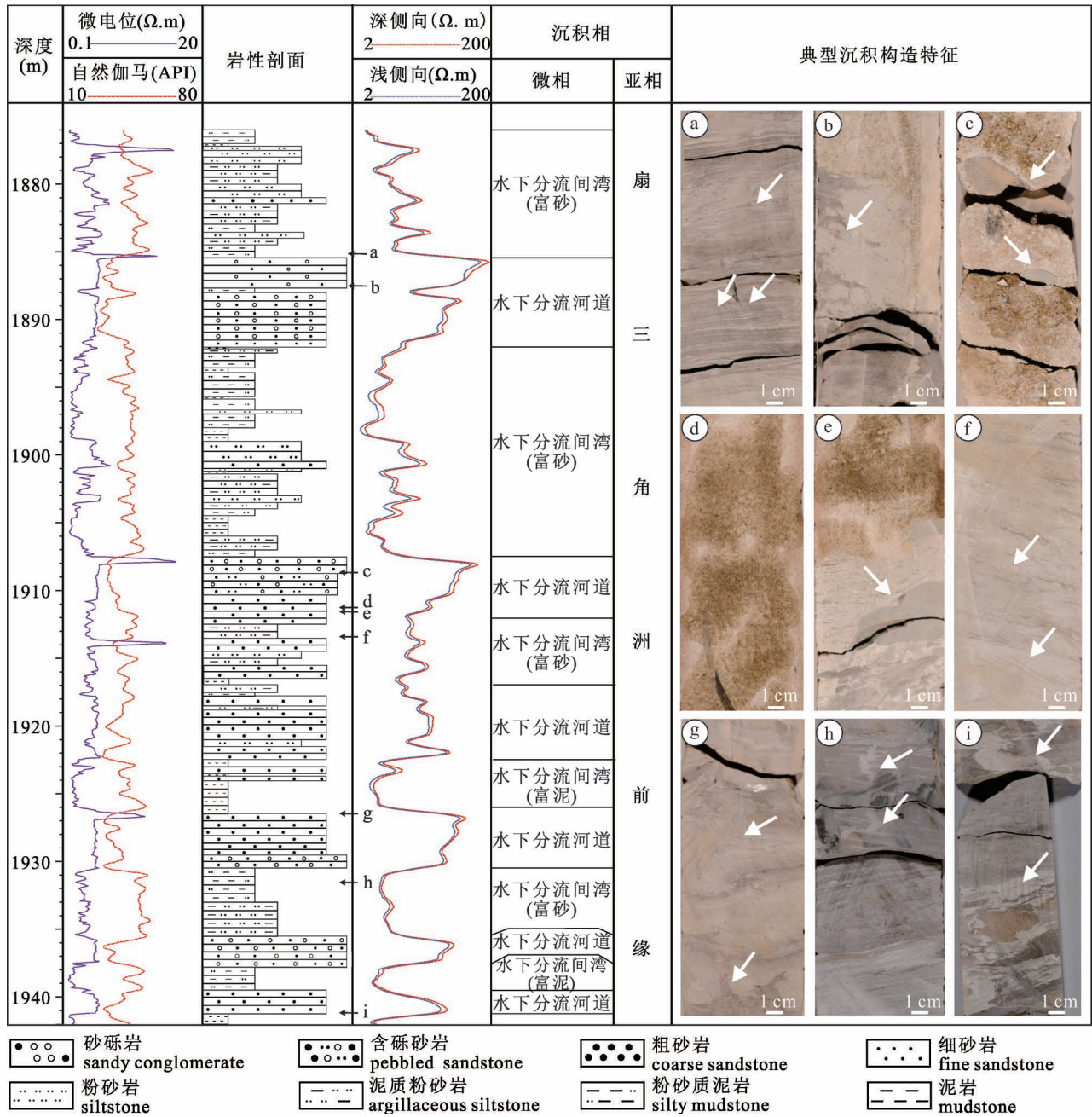
3.2 生物遗迹组构类型

根据生物遗迹化石特征可判识造迹生物类型。生物的活动和生活习性必然要适应环境,即“适者生存”,故特定的生物活动和生活习性亦反映其所处环境的特点,因此遗迹化石及其组构类型能为沉积环境解释提供重要信息。

参考李应暹等(1997)和卢宗盛等(2003)对辽河拗陷陆相遗迹化石与沉积环境关系的研究成果。根据沈检5井S₃⁴Ⅱ和S₃⁴Ⅰ油层组的生物遗迹化石特征(图3),发现主要以古藻迹(*Palaeophycus*)和漫游迹(*Planolites*)遗迹化石为主,也见墙形迹(*Teichichnus*)遗迹化石,为*Palaeophycus*—*Planolites*遗迹组构(卢宗盛等,2003;胡斌等,2017)。

*Palaeophycus*遗迹具有生物在沉积层内快速进食的特点(Ayranci et al., 2014; Paz et al., 2020),常被认为是由食沉积物生物形成的潜穴(杨式溥等,2004),其围岩常为杂基含量较高的细粒砂岩(图3 a、b、c)。*Palaeophycus*的潜穴较小,通常指示水体较浅和沉积速率较快的环境(胡斌等,2017)。

*Planolites*遗迹化石为小个体类型的漫游迹,喜泥质基底(McIlroy, 2004; Ayranci et al., 2014),常被认为是食沉积物生物所形成的觅食构造(李应暹等,1997;杨式溥等,2004)。*Planolites*的潜穴延伸长度较短,一般介于0.8~1.5 cm,常呈微弯曲状,不分枝,与层面平行或斜交(图3 d、e)。*Planolites*的潜穴充填物无结构,其颜色和围岩不同,为浅灰色泥



● ○ ●

粗砂岩

● ○ ●

● ○ ●

细砂岩

● ○ ●

● ○ ●

粉砂岩

● ○ ●

● ○ ●

泥质粉砂岩

● ○ ●

● ○ ●

粉砂质泥岩

● ○ ●

● ○ ●

泥岩

● ○ ●

图 2 辽河拗陷大民屯凹陷沈检 5 井 S_3^4 I 油层组岩性和沉积构造特征

Fig. 2 The lithology and sedimentary structure characteristics of the S_3^4 I oil layer group from the Well Shenjian-5 in the Damintun Sag, Liaohe Depression

(a) 小型波状层理及透镜状层理; (b) 冲刷面, 撕裂状泥砾; (c) 冲刷面, 见泥砾; (d) 块状层理; (e) 冲刷面, 泥砾发育; (f) 小型水流波纹层理; (g) 滑塌构造; (h) 液化脉状砂; (i) 变形构造

(a) Small-scale ripple and lenticular beddings; (b) scour surface, lacerate muddy gravels; (c) scour surface, muddy gravels; (d) massive bedding; (e) scour surface, muddy gravels; (f) small-scale current ripple lamination; (g) slump structure; (h) liquefied-sand veins; (i) deformation structure

质粉砂岩, 而围岩主要为水下分流间湾微相的灰色泥质粉砂岩或粉砂质泥岩(图 3 d, e)。

Teichichnus 遗迹化石指示浅水沉积环境(Corner and Fjalstad, 1993; Buatois and Mángano, 2011), 主要发育于水下分流间湾微相粉砂岩中(图 3f)。在纵断面上, *Teichichnus* 潜穴呈水平或斜交于层面, 潜穴不分枝, 呈孤立状分布, 潜穴长 1.0~1.5 cm(图 3f)。

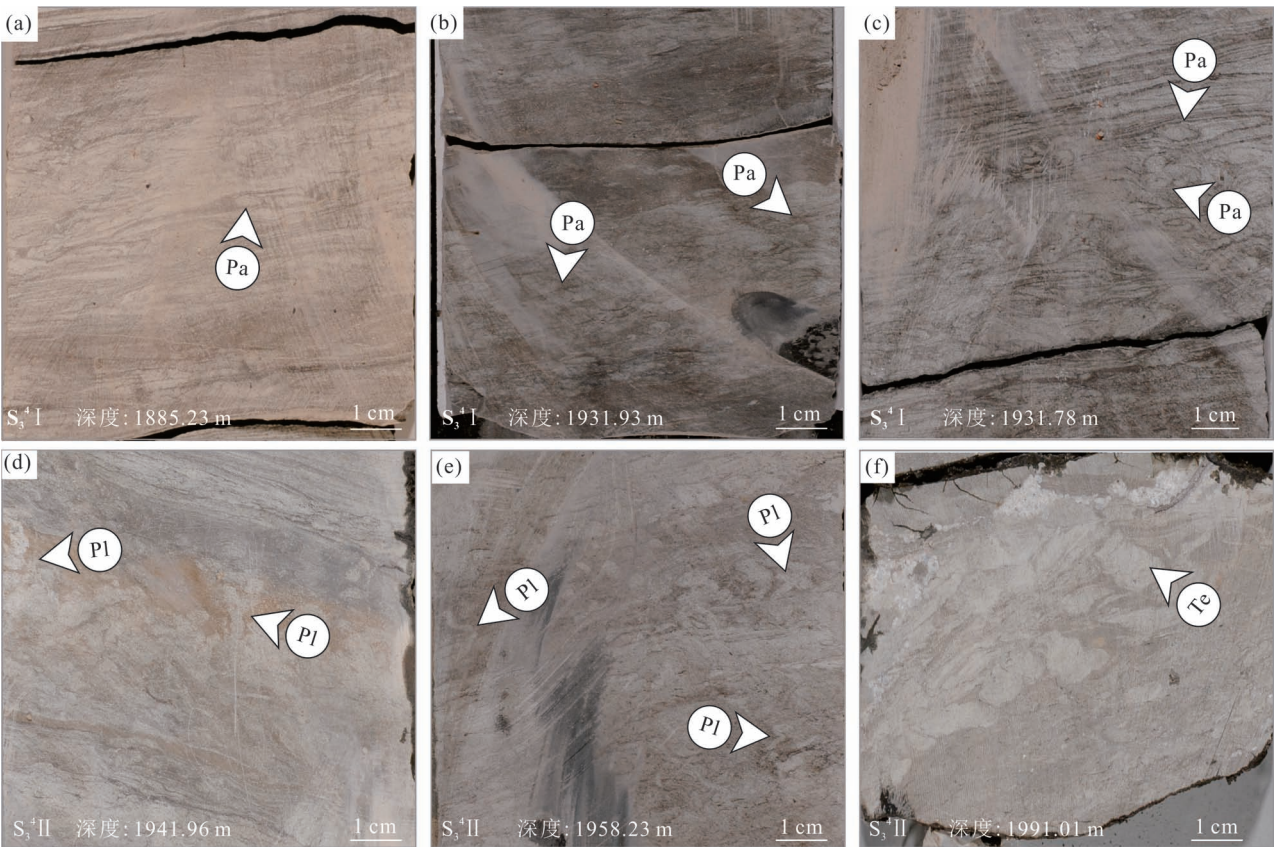


图 3 辽河拗陷大民屯凹陷沈检 5 井 S_3^4 II 和 S_3^4 I 油层组的生物遗迹化石特征

Fig. 3 Trace fossils in the S_3^4 II and S_3^4 I oil layer groups in the Well Shenjian-5 in the Damintun Sag, Liaohe Depression

(a) — (c) *Palaeophycus* 遗迹; (d) 、(e) *Planolites* 遗迹; (f) *Teichichnus* 遗迹。Pa: *Palaeophycus*; Pl: *Planolites*; Te: *Teichichnus*
(a) — (c) *Palaeophycus*; (d) 、(e) *Planolites*; (f) *Teichichnus*. Pa: *Palaeophycus*; Pl: *Planolites*; Te: *Teichichnus*

Palaeophycus—*Planolites* 遗迹组构通常指示浅水沉积环境特征 (Olariu et al. , 2010; 胡斌等, 2017), 与 S_3^4 II 和 S_3^4 I 油层组为浅水扇三角洲前缘沉积的地质背景相一致。因此, S_3^4 II 和 S_3^4 I 油层组的生物遗迹化石组成可以作为判识大民屯凹陷古近系沙河街组沙三段为浅水扇三角洲前缘沉积的一项重要辅助证据。

3.3 生物扰动强度判识和垂向分布特征

3.3.1 生物扰动强度判识

生物扰动是指生物对沉积物的改造, 其强度与生物改造程度和次数密切相关, 并影响沉积物的颗粒混合状况和沉积结构 (Baniak et al. , 2014)。

通常用扰动指数来评价生物扰动强度。不同扰动指数代表单位面积内生物扰动百分数, 即扰动量的不同。本文根据 Taylor 和 Goldring (1993) 和 Baniak 等 (2014) 对生物扰动强度的划分方案, 并结合沈检 5 井岩芯生物扰动实际特征, 建立了本研究区的岩芯生物扰动强度判识图版 (图 4)。当扰动指

数为 1 时, 沉积层理清晰, 遗迹化石较少, 单位面积内扰动部分占 1%~5%; 当扰动指数为 2 时, 沉积层理较清晰, 遗迹化石增多, 但密度还较低, 单位面积内扰动部分占 6%~30%; 当扰动指数为 3 时, 沉积层理连续性变差, 部分层理的连续性被扰动破坏, 但总体还可分辨, 单位面积内扰动部分占 31%~60%; 当扰动指数为 4 时, 沉积层理边界模糊, 遗迹化石密度高, 单位面积内扰动部分占 61%~90%; 当扰动指数为 5 时, 沉积层理边界难以识别, 遗迹化石密度很高, 单位面积内扰动部分占 91%~99%。通过详细观察, 发现 S_3^4 II 和 S_3^4 I 油层组 132 m 岩芯的生物扰动指数以 3~5 级为主 (图 5), 也存在 1 和 2 级。

3.3.2 生物扰动强度垂向分布特征

垂向上, 生物扰动构造主要发育于水下分流间湾微相的泥岩、粉砂质泥岩、泥质粉砂岩和粉砂岩中, 以 *Palaeophycus* 和 *Planolites* 遗迹化石占优势为特征 (图 5)。这是因为水下分流间湾沉积物的粒度较细, 泥质含量相对高并有相对丰富的食物, 利

扰动指数	扰动量 (%)	特征描述	判识图版	沈检5井实例照片
0	0	无扰动		
1	1~5	零星扰动, 层理清晰 仅有极少清晰遗迹化石		
2	6~30	扰动程度低, 层理清晰, 遗迹化石分布密度低		
3	31~60	中等扰动, 层理受干扰, 遗迹化石较分散		
4	61~90	扰动程度较高, 层理边界模糊, 遗迹化石密度高, 相互叠置		
5	91~99	生物扰动强烈, 层理难识别, 遗迹化石密度高		

图 4 辽河拗陷大民屯凹陷沈检 5 井生物扰动指数判识图 (据 Taylor and Goldring, 1993; Baniak et al. , 2014,略修改)
Fig. 4 Bioturbation index is described based on the study of the Well Shenjian-5 in the Damintun Sag, Liaohe Depression(modified after Taylor and Goldring, 1993; Baniak et al. , 2014)

于喜泥质沉积物并以此为食的软体或蠕虫动物的生存,从而利于产生和保存食沉积物生物形成的潜穴和觅食构造,即利于发育 *Palaeophycus* 和 *Planolites* 遗迹化石(李应暹等, 1997; 杨式溥等, 2004)。

垂向上,生物扰动层厚度在 5~51 cm,生物扰动指数以 3~5 级为主(图 5)。但生物扰动层厚度和扰动指数在垂向剖面上无显著变化规律(图 5)。虽如此,我们仍试图通过统计两者在 S_3^4 II 和 S_3^4 I 油层组上的差异来发现其变化的控制因素。 S_3^4 II 油层组岩芯长近 66 m,识别出 25 个生物扰动层,扰动层厚度主要在 5~34 cm,仅一层扰动层厚度为 51 cm,累积厚度为 5 m。 S_3^4 I 油层组岩芯长也近 66 m,识别出 28 个生物扰动层,扰动层厚度在 5~38 cm,累积厚度为 3.9 m。在扰动层厚度上, S_3^4 I 油层组厚度 ≤ 15 cm 的扰动层较发育,而 S_3^4 II 油层组厚度 >15 cm 的扰动层发育(图 6a);在扰动强度上, S_3^4 II 油层组扰动指数为 5 级的扰动层多于 S_3^4 I 油

层组,而 S_3^4 I 油层组扰动指数为 4 级的扰动层多于 S_3^4 II 油层组(图 6b)。因此,整体上 S_3^4 II 油层组发育的生物扰动层厚度和强度比 S_3^4 I 油层组略大,但并不显著。为什么两油层组生物扰动层厚度和扰动指数总体差异不明显? 我们推测这可能与两油层组的沉积条件变化密切相关。

3.4 生物扰动强度与沉积环境的响应

沉积物中生物扰动强度的大小除受底栖生物种类、丰度和生活习性的影响外,还受沉积环境古生产力、沉积速率、水体深度和沉积物粒度等多种因素的作用(杨群慧等, 2008)。本次研究主要依据微量元素相关参数(表 1),探讨古气候、古生产力、古盐度、古水深和沉积物粒度与生物扰动层厚度和扰动强度的响应关系。

(1)与古气候关系。Mg/Ca 值对古气候变化反映敏感,可用来指示古气候条件(熊小辉和肖加飞, 2011)。当 Mg/Ca <1 时,通常指示较为潮湿的环境; S_3^4 II 油层组 Mg/Ca 介于 0.04~2.26,均值为 1.01; S_3^4 I 油层组 Mg/Ca 介于 0.03~2.36,均值为 0.84(表 1)。 S_3^4 II 油层组的 Mg/Ca 均值略高于 S_3^4 I 油层组,反映 S_3^4 II 沉积期略比 S_3^4 I 沉积期干燥,但总体上都处于较为湿润的环境。从图 5 可以看出,垂向上生物扰动层厚度和强度与 Mg/Ca 比值曲线没有明显的协同性。这表明小幅度的气候波动没有对 S_3^4 II 和 S_3^4 I 油层组的生物扰动作用造成明显影响。

(2)与古生产力关系。相关研究已经证明,沉积有机质是大量底栖生物的食物来源,沉积有机质含量高低显著影响底栖动物的大小和生活习性(杨群慧等, 2008),进而影响生物扰动的深度和强度。

古生产力反映某一时期的生物生产力。通常利用沉积物中有机质的含量可以反映古生产力的变化,古生产力越高越有利于沉积有机质的富集。元素磷(P)是浮游生物生长所必须的营养元素,P/Ti 常被应用于判识古生产力(Latimer and Filippelli, 2001)。当 P/Ti 大于 0.79,指示高生产力,0.34 $<$ P/Ti $<$ 0.79 指示中生产力(Algeo et al. , 2011)。 S_3^4 II 油层组 P/Ti 介于 0.06~0.41,均值为 0.18; S_3^4 I 油

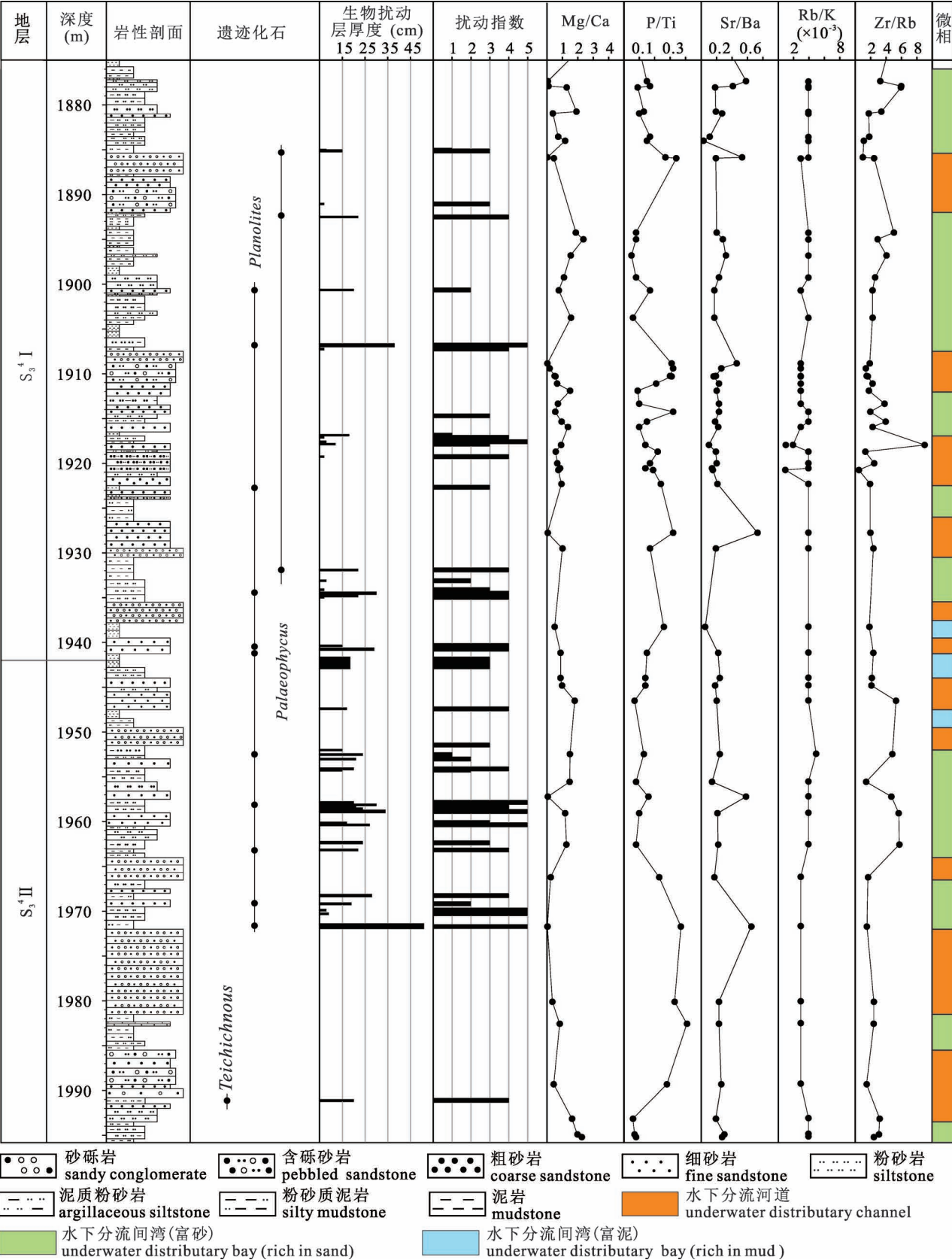


图 5 辽河拗陷大民屯凹陷沈井 5 井 S_3^4 II 和 S_3^4 I 油层组生物扰动层厚度、扰动指数、元素参数和沉积微相垂向分布特征

Fig. 5 Vertical profiles of bioturbated layer thickness, bioturbation index, elemental parameters and sedimentary microfacies along with the S_3^4 II and S_3^4 I oil layer groups from the Well Shenjian-5 in the Damintun Sag, Liaohede Depression

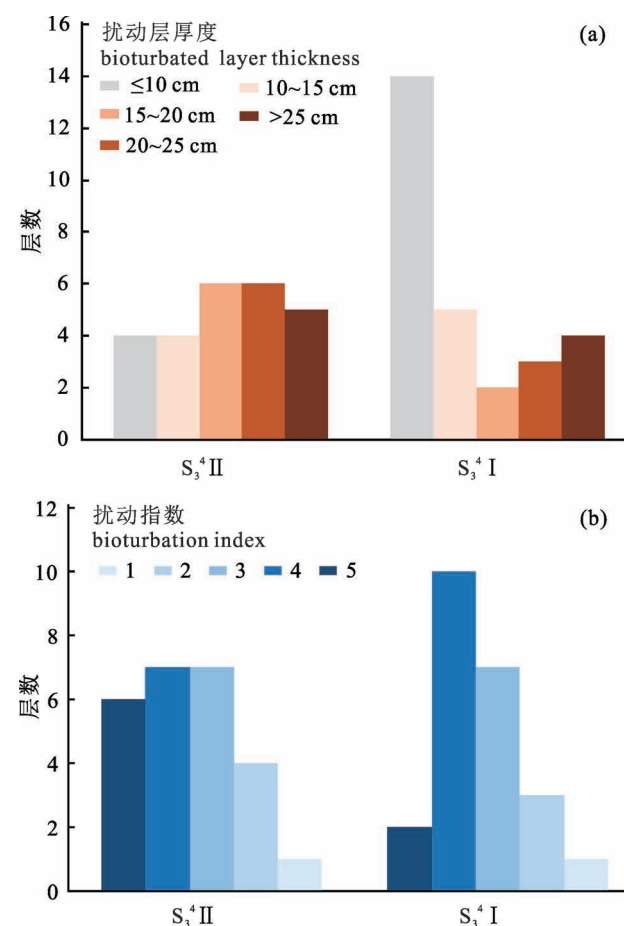


图 6 辽河拗陷大民屯凹陷沈检 5 井 S_3^4 II 和 S_3^4 I 油层组生物扰动层厚度 (a) 和扰动指数 (b) 对比图
Fig. 6 The comparison charts of bioturbation layers thick (a) and bioturbation index (b) in rock samples obtained from the S_3^4 II and S_3^4 I oil layer groups in the Well Shenjian-5 in the Damintun Sag, Liaohe Depression

层组 P/Ti 介于 0.05~0.34, 均值为 0.17 (表 1)。这说明 S_3^4 II 和 S_3^4 I 沉积期的古生产力相近且较低, 不利于沉积物中有机质的富集, 会引起底栖生物食物的相对匮乏。岩芯观察表明, S_3^4 II 和 S_3^4 I 油层组纯泥岩层发育非常少且颜色不深, 粉砂质泥岩和泥质粉砂岩较发育且主要为灰色或浅灰色, 均反映浅水扇三角洲前缘沉积有机质含量低的特点。因此古生产力相近也是造成 S_3^4 II 和 S_3^4 I 油层组生物扰动作用差异小的原因之一。

(3) 与古盐度关系。Sr/Ba 值常被用来指示古盐度变化 (Wei wei and Algeo, 2019)。实际运用中, 一般将 $Sr/Ba < 0.2$ 指示淡水环境, 0.2~0.5 指示半咸水环境, > 0.5 指示咸水环境 (Wei wei and Algeo, 2019)。 S_3^4 II 油层组 Sr/Ba 介于 0.14~0.65, 均值

为 0.25; S_3^4 I 油层组 Sr/Ba 介于 0.03~0.73, 均值为 0.24 (表 1), 表明 S_3^4 II 和 S_3^4 I 沉积期的水体盐度相近且不高, 主要为淡水—半咸水环境。从图 5 中可以发现, 由于垂向上沉积水体盐度整体差异小, 生物扰动层厚度和扰动指数与 Sr/Ba 比值的演化没有明显相关性。

(4) 与古水深关系。浅水地区生物扰动的混合速度高于深水地区 (杨群慧等, 2008)。Rb/K 值能较好地反映古水深的变化 (熊小辉和肖加飞, 2011)。当 $Rb/K < 0.007$, 指示水体较浅, 值越高代表水体深度越大 (孙中良等, 2020)。 S_3^4 II 油层组 Rb/K 介于 0.001~0.005, 均值为 0.004; S_3^4 I 油层组 Rb/K 介于 0.001~0.004, 均值为 0.004 (表 1), 指示 S_3^4 II 和 S_3^4 I 沉积期水体深度差异很小, 均为浅水环境。因此, 水体深度差异小也是造成 S_3^4 II 和 S_3^4 I 油层组生物扰动差异不明显的原因之一。

(5) 与沉积物粒度关系。沉积岩的 Zr/Rb 值可以用来反映沉积物颗粒的大小, 值越大表示颗粒越粗 (苏建锋等, 2017)。这是因为元素 Zr 主要赋存于粗粒沉积物中即本研究中的水下分流河道沉积物中, 而元素 Rb 主要赋存于细粒沉积物中即本研究中的水下分流间湾微相沉积物中 (王敏杰等, 2010), 而生物扰动作用主要发育于细粒沉积物中。 S_3^4 II 油层组 Zr/Rb 介于 1.42~16.24, 均值为 3.70; S_3^4 I 油层组 Zr/Rb 介于 0.48~9.00, 均值为 2.66 (表 1)。整体上 S_3^4 II 和 S_3^4 I 油层组的 Zr/Rb 值变幅小且岩性组成相似, 仅 S_3^4 II 油层组上部有 5 个样品的比值较高, 因此沉积物粒度相似也是造成 S_3^4 II 和 S_3^4 I 油层组生物扰动差异不明显的原因之一 (图 5)。本研究中沉积物粒度对生物扰动作用的影响主要表现在对生物扰动构造发育空间位置的控制, 即生物扰动构造主要发育于水下分流间湾微相细粒沉积物中。

综上, 通过对 S_3^4 II 和 S_3^4 I 油层组的古气候、古生产力、古盐度、古水深和沉积物粒度的分析对比, 我们发现 S_3^4 II 和 S_3^4 I 油层组的沉积条件很相近。这是导致整体上 S_3^4 II 油层组发育的生物扰动层厚度和强度与 S_3^4 I 油层组差异小的重要原因, 也就解释了为什么生物扰动层厚度和扰动强度在垂向剖面上无显著变化规律。

(6) 主控因素分析。元素地球化学参数综合分析表明研究区 S_3^4 II 和 S_3^4 I 沉积期古气候较为湿润, 古生产力较低, 水体盐度为淡水—半咸水, 水体

表 1 辽河拗陷大民屯凹陷沈检 5 井 S₃⁴ II 和 S₃⁴ I 油层组岩芯样品相关主微量元素参数

Table 1 The related major and trace element parameters in S₃⁴ II and S₃⁴ I oil layer groups from the Well Shenjian-5 in the Damintun Sag, Liaohe Depression

样品 编号	深度 (m)	Rb/K	Mg/Ca	P/Ti	Sr/Ba	Rb/K	Zr/Rb	样品 编号	深度 (m)	Rb/K	Mg/Ca	P/Ti	Sr/Ba	Rb/K	Zr/Rb
S ₃ ⁴ I								B54	1919.99	0.004	0.67	0.17	0.2	0.004	2.46
B19	1877.36	0.004	0.06	0.15	0.58	0.004	3.25	B39	1920.57	0.004	0.85	0.14	0.14	0.004	0.91
B21	1877.88	0.004	0.10	0.17	0.41	0.004	5.97	B55	1920.73	0.001	0.74	0.19	0.15	0.001	0.48
B22	1878.06	0.004	1.28	0.09	0.18	0.004	5.92	B56	1922.32	0.004	0.94	0.24	0.21	0.004	1.92
B25	1880.74	0.004	1.91	0.13	0.19	0.004	3.39	B57	1927.73	0.004	0.04	0.32	0.73	0.004	1.97
B26	1880.96	0.004	0.38	0.10	0.27	0.004	1.76	B58	1929.50	0.004	1.01	0.17	0.19	0.004	2.36
B27	1883.54	0.004	0.73	0.17	0.11	0.004	1.82	B59	1938.24	0.004	0.50	0.26	0.05	0.004	1.85
B28	1884.02	0.004	1.18	0.15	0.03	0.004	1.12	S ₃ ⁴ II							
B29	1885.87	0.004	0.03	0.27	0.53	0.004	0.99	B68	1941.14	0.004	0.88	0.15	0.22	0.004	2.35
B32	1885.95	0.003	0.45	0.34	0.19	0.003	2.45	B69	1943.95	0.004	0.88	0.14	0.24	0.004	2.16
B34	1894.26	0.004	1.87	0.08	0.20	0.004	5.02	B70	1944.82	0.004	0.98	0.14	0.18	0.004	2.10
B35	1894.98	0.004	2.36	0.08	0.28	0.004	2.91	B71	1946.49	0.004	1.80	0.07	0.20	0.004	5.29
B37	1896.79	0.004	1.54	0.05	0.32	0.004	4.06	B72	1952.47	0.005	1.49	0.13	0.24	0.005	4.81
B38	1899.25	0.004	1.10	0.08	0.23	0.004	2.58	B73	1955.53	0.004	1.47	0.08	0.14	0.004	1.42
B40	1900.72	0.003	0.77	0.17	0.17	0.003	2.25	B74	1957.18	0.004	0.05	0.16	0.58	0.004	4.69
B41	1903.75	0.004	1.56	0.06	0.17	0.004	2.26	B75	1959.07	0.004	1.18	0.10	0.21	0.004	5.63
B42	1908.87	0.003	0.04	0.31	0.46	0.003	1.89	B76	1962.57	0.004	1.26	0.08	0.22	0.004	5.73
B43	1909.39	0.003	0.17	0.32	0.26	0.003	1.38	B77	1966.18	0.003	0.25	0.23	0.17	0.003	1.67
B44	1910.26	0.003	0.50	0.30	0.19	0.003	1.49	B79	1971.70	0.003	0.04	0.37	0.65	0.003	1.51
B45	1910.30	0.003	0.55	0.31	0.16	0.003	1.64	B80	1980.12	0.003	0.35	0.33	0.23	0.003	2.42
B46	1911.10	0.003	0.66	0.21	0.23	0.003	2.25	B81	1982.57	0.003	0.83	0.41	0.23	0.003	2.40
B47	1911.91	0.003	1.50	0.09	0.20	0.003	1.78	B61	1989.30	0.003	0.44	0.28	0.26	0.003	1.49
B48	1913.35	0.003	0.71	0.10	0.23	0.003	3.81	B62	1993.16	0.004	1.63	0.06	0.19	0.004	3.17
B49	1914.25	0.004	0.54	0.32	0.23	0.004	1.96	B63	1994.90	0.004	1.98	0.07	0.30	0.004	3.08
B50	1915.36	0.004	0.95	0.15	0.18	0.004	3.95	B64	1995.22	0.004	2.26	0.08	0.27	0.004	2.42
B51	1915.94	0.003	1.36	0.10	0.22	0.003	2.26	B65	1999.38	0.001	0.51	0.11	0.10	0.001	16.24
B52	1917.94	0.002	0.92	0.14	0.10	0.002	9.00	B66	2002.59	0.004	0.97	0.17	0.21	0.004	1.63
B53	1918.72	0.004	0.57	0.22	0.19	0.004	1.32								

深度小为浅水环境。现仅从古气候、古生产力、古盐度和古水深等 4 个因素出发,探讨生物扰动层厚度和扰动指数变化的主控因素。古气候是一个宏观因素,极端气候条件不利于底栖造迹生物的生存和繁衍,但 S₃⁴ II 和 S₃⁴ I 沉积期气候条件较湿润且变化幅度小,并非极端气候。古气候的变化对湖泊古生产力有重要影响,并通过降水和蒸发量的差异调节湖泊水体古盐度和古深度的变化(Warren, 2006)。因此相比于古气候条件,古生产力、古盐度和古水深的变化对生物扰动层厚度和扰动指数的影响更为直接。

Yang Qunhui 和 Zhou Huaiyang(2004)发现即使在低古生产力的贫营养深海环境中,也发育明显的生物扰动作用。本研究也表明在低古生产力条件下,湖相三角洲前缘环境中也能发育明显的生物扰

动作用且扰动指数较高。但这并不是指低古生产力有利于生物扰动发育,相反生产力的提高利于底栖生物的繁衍和生物扰动发育(杨群慧等, 2008)。图 5 可以看出,在低古生产力背景下,古生产力与生物扰动厚度和扰动指数的关系较为复杂,没有明显相关性。在部分相对高生产力的沉积层内,生物扰动构造并未发育(图 5)。古盐度的变化会改变水体物理化学条件,并直接影响底栖生物的种属和数量(Warren, 2006; 夏刘文等, 2017; 宫红波等 2019)。S₃⁴ II 和 S₃⁴ I 沉积期的水体盐度为淡水—半咸水,但其与古生产力变化相似,与生物扰动层厚度和扰动指数的变化未有明显相关性(图 5)。当前难以明确古生产力和古盐度的低幅变化对底栖生物种群和丰度的影响。

底栖生物种群和丰度与水体深度有密切关联,

故岩芯遗迹化石和组构类型常被用于判识古水深(李应暹等, 1997; 卢宗盛等, 2003)。然而关于古水深与沉积物生物层扰动厚度和扰动指数的关系尚未有明确认识。但 S_3^4 II 和 S_3^4 I 沉积期水体浅且变化幅度极小, 古水深难以成为剖面上生物扰动层厚度和扰动指数变化的主控因素。最后, 需要注意到 S_3^4 II 和 S_3^4 I 沉积期相对连续稳定的沉积环境对生物扰动的发育起积极作用。相反剧烈的环境变化会对造迹生物类型、生物扰动层厚度和扰动指数带来幕式变化(赵小明和童金南, 2010)。

简言之, 针对陆相湖泊浅水扇三角洲前缘沉积环境, 当前还难以明确生物扰动层厚度和扰动指数变化的主控因素。我们推测古生产力和古盐度的变化可能会起更为关键的作用, 但目前证据不足, 还需后续更多相关研究的支持。

4 结论

通过对辽河拗陷大民屯凹陷沈检5井生物遗迹化石和生物扰动作用的研究, 得到以下认识:

(1) 沈检5井 S_3^4 II 和 S_3^4 I 油层组浅水扇三角洲前缘沉积主要发育古藻迹(*Palaeophycus*)和漫游迹(*Planolites*)遗迹化石, 墙形迹(*Teichichnus*)遗迹化石仅少量发育。垂向上, 生物扰动构造主要发育于水下分流间湾微相的泥岩、粉砂质泥岩、泥质粉砂岩和粉砂岩中, 扰动层厚度在5~51 cm之间, 扰动指数以3~5级为主。生物扰动层厚度和扰动指数在 S_3^4 II 和 S_3^4 I 油层组的垂向剖面上无明显变化规律。

(2) 主微量元素参数分析表明 S_3^4 II 和 S_3^4 I 油层组沉积期的古气候、古生产力、古盐度和古水深条件相近, 即为相对温湿的古气候、低古生产力、淡水—微咸水盐度条件和浅水沉积环境。这是导致整体上 S_3^4 II 油层组发育的生物扰动层厚度和扰动指数与 S_3^4 I 油层组差异小的主要原因。从而也解释了为什么生物扰动层厚度和扰动指数在 S_3^4 II 和 S_3^4 I 油层组的垂向剖面上无显著变化趋势。然而目前还难以明确剖面上生物扰动层厚度和扰动指数变化的主控因素, 未来还需更多相关研究的探索。

致谢: 张霞、陶欣参加了本文研究工作, 河南理工大学资源环境学院胡斌教授给予有益指导, 岩芯观察和研究过程中得到了蔡超、郑阳等协助和支持, 编辑部和审稿专家给予有益修改意见。在此, 对上述人员表示衷心地感谢!

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)
- 陈浩, 黄继新, 常广发, 武军昌, 孙天建. 2018. 基于全岩心 CT 的遗迹化石识别及沉积环境分析: 以加拿大麦克 III 油砂区块为例. 古地理学报, 20(4): 703~712.
- 陈翔, 袁训来, 周传明, 陈哲. 2018. 湖北三峡地区埃迪卡拉系灯影组“蝌蚪状”遗迹化石. 古生物学报, 57(1): 1~10.
- 丁奕, 时敏敏, 刘伟楠. 2016. 遗迹化石三维重建研究新进展. 地层学杂志, 40(4): 401~410.
- 宫红波, 孙耀庭, 刘静, 李辉. 2019. 济阳拗陷沾化凹陷沙一下亚段优质烃源岩成因分析. 地质论评, 65(3): 632~644.
- 龚一鸣, 胡斌, 卢宗盛, 齐永安, 张国成. 2009. 中国遗迹化石研究 80 年. 古生物学报, 48(3): 322~337.
- 胡斌, 陈传浩, 王长征, 常龙. 2017. 东濮凹陷文留地区沙三中(E_3 中)遗迹化石与沉积环境. 河南理工大学学报(自然科学版), 36(3): 40~46.
- 李维锋, 高振中, 彭德堂, 王成善. 2000. 塔里木盆地库车拗陷中三叠统辫状河三角洲沉积. 石油实验地质, 22(1): 55~58.
- 李晓光, 单俊峰, 陈永成. 2017. 辽河油田勘探开发 50 年技术系列丛书—辽河油田精细勘探. 北京: 石油工业出版社.
- 李晓光, 刘兴周, 李金鹏, 田志. 2019. 辽河拗陷大民屯凹陷沙四段湖相页岩油综合评价及勘探实践. 中国石油勘探, 24(5): 636~648.
- 李应暹, 卢宗盛, 王丹. 1997. 辽河盆地陆相遗迹化石与沉积环境研究. 北京: 石油工业出版社.
- 林春明. 2019. 沉积岩石学. 北京: 科学出版社.
- 刘彦博, 严德天, 王华, 卢宗盛, 喻建新. 2009. 岐口凹陷新近系生物——遗迹相及环境解释. 地球科学(中国地质大学学报), 34(3): 412~418.
- 卢宗盛, 郝朝坤, 马宏斌, 张兴华. 2003. 辽河油田陆相遗迹组构类型及其环境解释. 地质学报, 77(1): 9~15.
- 孟卫工. 2006. 断陷盆地复杂斜坡带油气分布与成藏规律研究. 导师: 陈景山. 西南石油大学博士学位论文, 1~168.
- 牛永斌, 钟建华, 胡斌. 2008. 小尺度地质体三维建模研究—以遗迹化石 Chondrites 和岩心三维建模为例. 古地理学报, 10(2): 207~214.
- 宋慧波, 李娟, 胡斌. 2019. 华北盆地西部太原组遗迹化石组合对古水深变化的响应. 古地理学报, 21(6): 999~1012.
- 苏建锋, 范代读, 冷伟, 陈玲玲, 印萍. 2017. 冰后期以来长江水下三角洲层序地层特征及沉积环境演化. 古地理学报, 19(3): 541~556.
- 孙中良, 王芙蓉, 侯宇光, 罗京, 郑有恒, 吴世强, 朱钢添. 2020. 盐湖页岩有机质富集主控因素及模式. 地球科学, 45(4): 1375~1387.
- 王立武. 2012. 拗陷湖盆浅水三角洲的沉积特征—以松辽盆地南部姚一段为例. 沉积学报, 30(6): 1053~1060.
- 王敏杰, 郑洪波, 谢昕, 范代读, 杨守业, 赵泉鸿, 王可. 2010. 长江流域 600 年来古洪水: 水下三角洲沉积与历史记录对比. 科学通报, 55(34): 3320~3327.
- 王约, 赵元龙, 林日白, 王萍丽. 2004. 贵州台江凯里生物群中遗迹化石(*Gordia*)与水母状化石(*Pararotadiscus*)的关系及其意义. 地质论评, 50(2): 113~119+225~226.
- 武毅, 李铁军, 赵洪岩. 2017. 辽河油田勘探开发 50 年技术系列丛书—辽河油田高效开发. 北京: 石油工业出版社.

- 夏刘文, 曹剑, 徐田武, 王婷婷, 张云献, 边立曾, 姚素平. 2017. 盐湖生物发育特征及其烃源意义. 地质论评, 63(6): 1549~1562.
- 熊小辉, 肖加飞. 2011. 沉积环境的地球化学示踪. 地球与环境, 39(3): 405~414.
- 徐振华, 吴胜和, 刘钊, 赵军寿, 耿红柳, 吴峻川, 张天佑, 刘照玮. 2019. 浅水三角洲前缘指状砂坝构型特征—以渤海湾盆地渤海BZ25油田新近系明化镇组下段为例. 石油勘探与开发, 46(2): 322~333.
- 杨群慧, 周怀阳, 季福武, 王虎, 杨伟芳. 2008. 海底生物扰动作用及其对沉积过程和记录的影响. 地球科学进展, 9: 932~941.
- 杨式溥, 张建平, 杨美芳. 2004. 中国遗迹化石. 北京: 科学出版社: 1~353.
- 张立军, 赵翌, 龚一鸣. 2015. 遗迹化石对显生宙5大生物—环境事件的响应. 地球科学(中国地质大学学报), 40(2): 381~396.
- 张妮, 武毅, 张霞, 黄舒雅, 李铁军, 张新培, 林春明, 江凯禧, 夏长发. 2020. 辽河拗陷大民屯凹陷古近系沙河街组三段地球化学特征及其地质意义. 地质学报, 94. DOI: 10.19762/j.cnki.dizhixuebao.2020252.
- 赵明, 季峻峰, 陈振岩, 陈小明, 崔向东, 王延山. 2011. 大民屯凹陷古近系高岭石亚族和伊/蒙混层矿物特征与盆地古温度. 中国科学: 地球科学, 41(2): 169~180.
- 赵小明, 童金南. 2010. 浙江煤山钻孔二叠—三叠系界线剖面遗迹化石的两幕式变化. 中国科学: 地球科学, 40(9): 1241~1249.
- 周志澄, 杨昊, 李罡, 祝幼华, Willems H, 罗辉, 蔡华伟, 许波, 陈金华. 2014. 四川广安谢家槽早三叠世遗迹化石及其古生态意义. 古生物学报, 53(1): 52~69.
- 朱筱敏, 潘荣, 赵东娜, 刘芬, 吴冬, 李洋, 王瑞. 2013. 湖盆浅水三角洲形成发育与实例分析. 中国石油大学学报(自然科学版), 37(5): 7~14.
- Algeo T J, Kuwahara K, Sano H, Steven B, Timothy, Erika E, Linda H, Brooks E, Jessa M and J Barry M. 2011. Spatial variation in sediment fluxes, redox conditions, and productivity in the Permian—Triassic Panthalassic Ocean. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 308(1~2): 65~83.
- Ayranci K, Dashtgard S E and MacEachern J A. 2014. A quantitative assessment of the neoichnology and biology of a delta front and prodelta, and implications for delta ichnology. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 409: 114~134.
- Baniak G M, Gingras M K, Burns B A and George P S. 2014. An example of a highly bioturbated, storm-influenced shoreface deposit: Upper Jurassic Ula Formation, Norwegian North Sea. *Sedimentology*, 61(5): 1261~1285.
- Buatois L A and Mángano M. G. 1995. The paleoenvironmental and paleoecological significance of the lacustrine Mermia ichnofacies: an archetypical subaqueous nonmarine trace fossil assemblage. *Ichnos: An International Journal of Plant & Animal*, 4(2): 151~161.
- Buatois L A and Mángano M G. 2011. *Ichnology: Organism—substrate interactions in space and time*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Chen Hao, Huang Jixin, Chang Guangfa, Wu Juncang, Sun Tianjin. 2018#. Ichnology identification and sedimentary environment analysis based on CT scanning: A case study from Mackay III oil sands, Canada. *Journal of Palaeogeography*, 20(4): 703~712.
- Chen Xiang, Yuan Xunlai, Zhou Chuanming, Chen Zhe. 2018#. Ediacaran tadpole-like trace fossils from the Dengying formation in the Yangtze Gorges area, Hubei Province. *Acta Palaeontologica Sinica*, 57(1): 1~10.
- Corner G D and Fjalstad A. 1993. Spreite trace fossils (Teichichnus) in a raised Holocene fjord-delta, Breidvikeidet, Norway. *Ichnos: An International Journal of Plant & Animal*, 2(2): 155~164.
- Ding Yi, Shi Minmin, Liu Yinan. 2016#. New advances in the three-dimensional reconstruction of trace fossils. *Journal of Stratigraphy*, 40(4): 401~410.
- Frey R W and Pemberton S G. 1987. The Psilonichnus ichnocoenose, and its relationship to adjacent marine and nonmarine ichnocoenoses along the Georgia coast. *Bulletin of Canadian Petroleum Geology*, 35(3): 333~357.
- Gong Hongbo, Sun Yaoting, Liu Jing, Li Hui. 2019#. Origin analysis of high-quality source rocks in the lower Es1 of Zhanhua Sag, Jiyang Depression. *Geological Review*, 65(3): 632~644.
- Gong Yiming, Hu Bin, Lu Zongsheng, Qi Yongan, Zhang Guoan. 2009#. Study of Trace Fossils in the Past Eighty Years in China. *Acta Palaeontologica Sinica*, 48(3): 322~337.
- Hu Bin, Chen Chuanhao, Wang Changzheng, Chang Long. 2017#. Trace fossils and sedimentary environments in the middle part of third member Shahejie Formation in Wenliu area, Dongpu Sag. *Journal of Henan Polytechnic University (Natural Science)*, 36(3): 40~46.
- Latimer J C and Filippelli G M. 2001. Terrigenous input and paleoproductivity in the Southern Ocean. *Paleoceanography*, 16(6): 627~643.
- Li Weifeng, Gao Zhenzhong, Peng Detang, Wang Chengshan. 2000#. Raided-river deltas of middle Triassic Kuqa Depression, Tarim Basin. *Experimental Petroleum Geology*, 22(1): 55~58.
- Li Xiaoguang, Liu Xingzhou, Li Jinpeng, Tian Zhi. 2019#. Comprehensive evaluation and exploration practice of Sha 4 lacustrine shale oil in Damintun sag, Liaohe depression. *China Petroleum Exploration*, 24(5): 636~648.
- Li Xiaoguang, Shan Junfeng, Chen Yongcheng. 2017#. 50 years of technical series in petroleum exploration and development in Liaohe oilfield—Fine exploration of Liaohe oilfield. Beijing: Petroleum Industry Press.
- Li Yingxian, Lu Zongsheng, Wang Dan. 1997#. Continental trace fossils and sedimentary environments in Liaohe Basin. Beijing: Petroleum Industry Press.
- Lin Chunming. 2019#. *Sedimentary Petrology*. Beijing: Science Press.
- Liu Yanbo, Yan Detian, Wang Hua, Lu Zongshen, Yu Jianxin. 2009#. Biofacies and Ichnofacies of Neogene in the Qikou Depression and Their Environmental Interpretation. *Earth Science — Journal of China University of Geosciences*, 34(3): 412~418.
- Lu Zongsheng, Hao Chaokun, Ma Hongbin, Zhang Xinghua. 2003#. Continental Ichnofabric Types in the Liaohe Oilfield and Their Environmental Interpretation, China. *Acta Geological Sinica*, 77(1): 9~15.
- McIlroy D. 2004. Ichnofabrics and sedimentary facies of a tide-dominated delta: Jurassic Ile Formation of Kristin Field, Haltenbanken, offshore Mid-Norway. London: Geological Society, Special Publications, 228(1): 237~272.
- Meng Weigong. 2006#. The research on distribution and formation regularity of oil and gas pool in the complicated slope of faulted basin—a case of western slope of Damintun Sag. Tutor: Chen Jingshan. Chengdu: Doctoral Thesis of Southwest Petroleum University, 1~168.
- Niu Yongbin, Zhong Jianhua, Hu Bin. 2008#. Research of 3D modeling on small-scale geologic body—Taking 3D modeling on

- trace fossil Chondrites and drilling core as an example. *Journal of Palaeogeography*, 10(2): 207~214.
- Olariu C, Steel R J and Petter A L. 2010. Delta-front hyperpycnal bed geometry and implications for reservoir modeling: Cretaceous Panther Tongue delta, Book Cliffs, Utah. *AAPG Bulletin*, 94(6): 819~845.
- Paz D M, Richiano S, Varela A N, Dacól A R G and Poiré D G. 2020. Ichnological signatures from wave- and fluvial-dominated deltas: The La Anita Formation, Upper Cretaceous, Austral—Magallanes Basin, Patagonia. *Marine and Petroleum Geology*, 114: 104168.
- Seilacher A. 1967. Bathymetry of trace fossils. *Marine geology*, 5(5~6): 413~428.
- Seilacher A. 2007. Trace fossil analysis. Berlin: Heidelberg: Springer-Verlag, 1~226.
- Smith R M H, Mason T R and Ward J D. 1993. Flash-flood sediments and ichnofacies of the late Pleistocene Homeb Silts, Kuiseb River, Namibia. *Sedimentary Geology*, 85(1~4): 579~599.
- Song Huiibo, Li Juan, Hu Bin. 2019#. Responses of ichnoassemblages to paleo-water-depth of the Taiyuan Formation in western North China Basin. *Journal of Palaeogeography*, 21(6): 999~1012.
- Su Jianfeng, Fan Daidu, Leng Wei, Chen Lingling, Yin Ping. 2017#. Postglacial sequence stratigraphy and sedimentary environment evolution of the Yangtze River subaqueous delta. *Journal of Palaeogeography*, 19(3): 541~556.
- Sun Zhongliang, Wang Furong, Hou Yuguang, Luo Jing, Zheng Youheng, Wu Shiqiang, Zhu Gangtian. 2020#. Main Controlling Factors and Modes of Organic Matter Enrichment in Salt Lake Shale. *Earth Science*, 45(4): 1375~1387.
- Taylor A M and Goldring R. 1993. Description and analysis of bioturbation and ichnofabric. *Journal of the Geological Society*, 150(1): 141~148.
- Wang Liwu. 2012#. Forming conditions and depositional characteristics of shallow-water deltas in depression basins: a case study of K₂yl in the south of Songliao Basin. *Acta Sedimentologica Sinica*, 30(6): 1053~1060.
- Wang Minjie, Zheng Hongbo, Xie Xin, Fan Daidu, Yang Shouye, Zhao Quanhong, Wang Ke. 2010#. A 600-year flood history in the Yangtze River drainage: Comparison between a subaqueous delta and historical records. *Chinese Science Bulletin*, 55(34): 3320~332.
- Wang Yue, Zhao Yuanlong, Lin Ribai, Wang Pingli. 2004#. Relationship between Trace Fossil Gordia and Medusiform Fossils Pararotadiscus from the Kaili Biota, Taijiang, Guizhou, and Its Significance. *Geological Review*, 50(2): 113~119+225~226.
- Warren, J. K. *Evaporites: Sediments, Resources and Hydrocarbons*; Springer-Verlag; Berlin, 2006.
- Wei Wei and Algeo T J. 2019. Elemental proxies for paleosalinity analysis of ancient shales and mudrocks. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, doi: 10. 1016/j. gca. 2019. 06. 034.
- Wu Yi, Li Tiejun, Zhao Hongyan. 2017#. 50 years of technical series in petroleum exploration and development in Liaohe oilfield—Efficient development of Liaohe oilfield. Beijing: Petroleum Industry Press.
- Xia Liuwen, Cao Jian, Xu Tianwu, Wang Tingting, Zhang Yunxian, Bian Lizeng, Yao Suping. 2017#. Development characteristics of biologies in saline lake environments and their implications for hydrocarbon source. *Geological Review*, 63(6): 1549~1562.
- Xiong Xiaohui, Xiao Jiafei. 2011#. Geochemical indicators of sedimentary environments—a summary. *Earth and Environment*, 39(3): 405~414.
- Xu Zhenhua, Wu Shenghe, Liu Zhao, Zhao Junshou, Geng Hongliu, Wu Junchuan, Zhang Tianyou, Liu Zhaowei. 2019#. Sandbody architecture of the bar finger within shoal water delta front: Insights from the Lower Member of Minghuazhen Formation, Neogene, Bohai BZ25 Oilfield, Bohai Bay Basin, East China. *Petroleum Exploration and Development*. 46(2): 322~333.
- Yang Qunhui, Zhou Huaiyang, Ji Fuwu, Wang Hu, Yang Weifang. 2008#. Bioturbation in Seabed Sediments and Its Effects on Marine Sedimentary Processes and Records. *Advances in Earth Science*, 9: 932~941.
- Yang Qunhui, Zhou Huaiyang. 2004. Bioturbation in near surface sediments from the COMRA polymetallic Nodule Area: Evidence from excess ²¹⁰Pb measurements. *Chinese Science Bulletin*, 49(23): 2538~2542.
- Yang Shifu, Zhang Jianping, Yang Meifang. 2004#. Trace fossils of China. Beijing: Science Press.
- Zhang Lijun, Zhao Zhao, Gong Yiming. 2015#. Trace Fossils as a Proxy of the Big 5 Biotic- and Environmental Events in the Phanerozoic. *Earth Science (Journal of China University of Geosciences)*, 40(2): 381~396.
- Zhang Ni, Wu Yi, Zhang Xia, Huang Shuya, Li Tiejun, Zhang Xinpei, Lin Chunming, Jiang Kaixi, Xia Changfa. 2020#. Geochemical Characteristics and its implications of the third Member in the Paleogene Shahejie Formation from the Damintun Sag, Liaohe Depression. *Acta Geologica Sinica* 94. DOI: 10. 19762/j. cnki. dzhixuebao. 2020252.
- Zhao Ming, Ji Junfeng, Chen Zhenyan, Chen Xiaoming, Cui Xiangdong, Wang Yanshan. 2011#. Evolution of kaolinite subgroup minerals and mixed-layer illite/smectite in the Paleogene Damintun Depression in Liaohe Basin of China and its implication for paleotemperature. *Science China—Earth Sciences*, 41(2): 169~180.
- Zhao Xiaoming, Tong Jinnan. 2010#. Two episodic changes of trace fossils through the Permian—Triassic transition in the Meishan cores, Zhejiang Province. *Science China—Earth Sciences*, 40(9): 1241~1249.
- Zhou Zhicheng, Yang Hao, Li Gang, Zhu Youhua, Willems H, Luo Hui, Cai Huawei, Xu Bo, Chen Jinhua. 2014#. Early Triassic trace fossils from the Xiejiaocao Section, Guang'an, Sichuan and their paleoecologic significances. *Acta Palaeontologica Sinica*, 53(1): 52~69.
- Zhu Xiaomin, Pan Rong, Zhao Dongna, Liu Fen, Wu Dong, Li Yang, Wang Rui. 2013#. Formation and development of shallow-water deltas in lacustrine basin and typical case analyses. *Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)*, 37(5): 7~14.

Bioturbation in fan delta front deposits in the 3rd Member of the Paleogene Shahejie Formation in the Damintun Sag, Liaohe Depression

JIANG Kaixi¹⁾, LI Xiaoguang²⁾, LI Tiejun²⁾, HUANG Shuya¹⁾, ZHANG Ni³⁾, ZHAO Xuepei¹⁾,
XIA Changfa¹⁾, ZHANG Xinpei²⁾, FAN Zuochun²⁾, LIN Chunming¹⁾

1) School of Earth Sciences and Engineering, Nanjing University, Nanjing, 210023;

2) Research Institute of Petroleum Exploration and Development, PetroChina Liaohe Oilfield Company, Panjin, Liaoning, 124010;

3) College of Material Engineering, Jinling Institute of Technology, Nanjing, 211169

Objectives: To investigate the features of bioturbation in shallow-water fan delta front deposits. The core from the 3rd Member of the Paleogene Shahejie Formation from the Well Shenjian-5 was studied, which was deposited in the shallow-water fan delta front in the Damintun Sag, Liaohe Depression.

Methods: We have identified the trace fossils, counted the bioturbated layers thickness and bioturbation index along with the vertical core profile. Based on the elemental composition analysis of rock samples, we discussed the relationships between the depositional environment and the bioturbated layer thickness and bioturbation index.

Results: The results show that bioturbation structures were observed on the core of S₃⁴ II and S₃⁴ I oil layer groups, characterized by the dominance of the *Palaeophycus* and *Planolites* trace fossils. Bioturbation structures were found mainly developed in the inter-distributary bay deposits. The thickness of bioturbated layers is from 5 to 51 cm, and the bioturbation index is from 3 to 5. The thickness of bioturbated layers and bioturbation index vary with no clear evolutionary trend along the vertical profile.

Conclusion: The analysis of elemental parameters demonstrate the paleoclimate, paleoproductivity, paleosalinity, and paleowater depth conditions of S₃⁴ II and S₃⁴ I oil layer groups are similar, they were deposited in relatively warm and humid paleoclimate, low paleoproductivity, freshwater to brackish water salinity, and shallow water environments. The similar depositional environment is the main reason causing the small differences in the thickness and bioturbation index of bioturbated layers between S₃⁴ II and S₃⁴ I oil layer groups, as well as for the non-significant evolutionary trend of bioturbated layer thickness and bioturbation index along the vertical profile. However, it is still difficult to determine the main factors influencing the bioturbated layer thickness and bioturbation index in a single oil layer group. This study provides further evidence for identifying the terrestrial shallow-water fan delta front environment and improves understanding of the features of the trace fossils and bioturbation intensity in the environment.

Keywords: Liaohe Depression; Damintun Sag; Paleogene Shahejie Formation; shallow-water fan delta; trace fossils; bioturbation

Acknowledgements: This study is supported by the project of “Fine description and evaluation of reservoir characteristics of high pour point oil reservoir at the late waterflooded stage” from the key project of “Research and application of key technologies to sustain 10 million tons of petroleum production of Liaohe oilfield” (No. 2017E-1063)

First author: JIANG Kaixi, male, born in 1987, Ph. D. student in Nanjing University, mainly engaged in sedimentology and sedimentary geochemistry; Email: haokaisi5535553@163.com

Corresponding author: LIN Chunming, male, born in 1964, professor, mainly engaged in sedimentology; Email: cmlin@nju.edu.cn

Manuscript received on: 2020-08-05; Accepted on: 2021-01-30; Network published on: 2021-02-20

Doi: 10. 16509/ j. georeview. 2021. 02. * * *

Edited by: LIU Zhiqiang

