

引用格式:段杨弟,陈旋,徐雄飞,等. 2026. 三塘湖盆地马朗凹陷二叠系芦草沟组二段古环境与有机质富集机制[J]. 沉积学报, 44(4): 1523-1534.
DUAN YangDi, CHEN Xuan, XU XiongFei, et al. 2026. Paleoenvironment and Organic Matter Enrichment Mechanism in the Second Member, Permian Lucaogou Formation, Malang Sag, Santanghu Basin, China[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 44(4): 1523-1534.
DOI: 10.14027/j.issn.1000-0550.2025.010 CSTR: 32268.14/j.cjxb.62-1038.2025.010

三塘湖盆地马朗凹陷二叠系芦草沟组二段古环境与有机质富集机制

段杨弟¹, 陈旋², 徐雄飞², 蔡苏阳¹, 刘俊田², 张亦婷², 肖七林¹

1. 长江大学资源与环境学院, 武汉 430100
2. 中国石油吐哈油田公司, 新疆哈密 839009

摘要 【目的】中二叠统芦草沟组二段(芦二段)是三塘湖盆地湖相碳酸盐岩型页岩油的主要富集层位,明确其沉积期古环境特征,厘清该层段有机质富集机制,可为研究区页岩油勘探开发提供基础科学理论依据。【方法】通过对三塘湖盆地马朗凹陷芦页1井芦二段页岩样品进行总有机碳含量、主—微量元素和原生碳酸盐岩碳—氧同位素组成等分析,明确了芦二段沉积期古环境和有机质富集特征,探讨了古生产力、古气候、古盐度、古氧化还原条件对有机质富集的影响和控制效应。【结果】三塘湖盆地芦二段形成于封闭湖泊环境。其中,中“甜点”下部旋回形成于干旱、咸水、还原的深水环境,古生产力较低,中“甜点”上部旋回形成于半干旱、半咸水、弱还原的深水环境,古生产力较高;上“甜点”形成于干旱、咸水、弱还原的半深水环境,古生产力中等。【结论】三塘湖盆地芦二段不同“甜点”段有机质富集机制具有一定差异性。中“甜点”下部旋回有机质富集受水体氧化还原条件和古生产力共同控制;中“甜点”上部旋回有机质富集受古气候条件和古生产力共同控制;上“甜点”有机质富集则主要受古生产力控制。该研究对三塘湖盆地芦二段页岩油勘探开发具有一定的指导意义。

关键词 三塘湖盆地;芦草沟组;碳—氧同位素;微量元素;古环境;有机质富集
第一作者 段杨弟,男,2000年出生,硕士研究生,油气地球化学,E-mail: 2021936346@qq.com
通信作者 肖七林,男,教授,E-mail:qilinxiao@cug.edu.cn
中图分类号:P618.13 **文献标志码**:A **文章编号**:1000-0550(2026)04-1523-12

0 引言

页岩油在全球油气资源版图中占据重要地位,是当前非常规油气勘探的热点领域之一(邹才能等, 2023)。页岩油勘探实践证实,沉积盆地页岩层系发育规模和有机质富集程度在很大程度上决定了页岩油资源的勘探潜力和实际经济收益(赵文智等, 2023)。因此,有机质富集机制已成为页岩油勘探开发领域的重要基础研究内容之一。大量研究表明页岩层系沉积古环境在有机质富集过程中扮演着重要角色(张妍等, 2024)。例如,美国威利斯顿盆地巴肯页岩沉积于半咸水、气候温暖湿润的还原环境,古生产力较高(Abdi *et al.*, 2024);与之类似,我国松辽盆地古龙凹陷青山口组页岩油沉积于淡水、气候温暖

湿润的还原环境,古生产力也较高(Wang *et al.*, 2023)。

二叠系芦草沟组页岩是我国西部沉积盆地页岩油勘探主要目的层。目前针对准噶尔盆地吉木萨尔凹陷芦草沟组已进行了大量研究,普遍认为其形成于半干旱—半湿润的半咸水湖相环境,水体较深,沉积速率较慢(蒋中发等, 2020;谢再波等, 2023)。芦草沟组一段(芦一段)沉积期气候干旱,沉积水体处于弱还原环境,有机质富集受古生产力和古环境控制,芦草沟组二段(芦二段)沉积期气候潮湿,沉积水体处于弱还原—弱氧化环境,有机质富集主要受古生产力控制(张妍等, 2024)。与准噶尔盆地吉木萨尔凹陷芦草沟组类似,三塘湖盆地二叠系芦草沟组页岩油资源潜力巨大,是吐哈油田页岩油勘探重点

层系(梁世君等,2019)。已有研究认为三塘湖盆地芦草沟组烃源岩形成于咸化深湖—半深湖还原环境,有机质丰度高、类型好,以I~II₁型干酪根为主,处于低熟—成熟阶段(Liu *et al.*, 2017; 范谭广等, 2021; 徐银波等, 2022)。截至目前,三塘湖盆地芦二段古环境和有机质富集机制研究尚未形成统一的认识。Zhang *et al.* (2018)认为芦二段形成于还原性的碱湖环境,碎屑岩矿物含量与总有机碳(TOC)含量正相关性指示陆源有机质输入有利于有机质富集。其中,芦二段中一下部形成于咸水环境,上部沉积于淡水环境(Zhang *et al.*, 2018)。然而,Yu *et al.* (2024)研究认为芦二段沉积期气候炎热、干旱,水体盐度普遍较高,陆源有机质输入相对有限,高盐度的强还原水体环境有利于藻类勃发和有机质保存,是有机质富集的主要控制因素;Pan *et al.* (2020)则认为沉积水体原始生产力是芦二段有机质富集的主要控制因素,而沉积水体原始生产力主要取决于火山活动强度。

本文以三塘湖盆地马朗凹陷芦页1井芦二段中一上“甜点”为主要研究对象,基于总有机碳测试结果,挑选代表性源岩样品进行主量元素、微量元素和原生碳酸盐岩碳—氧同位素分析,以期重建马朗凹陷芦二段页岩油勘探中“甜点”下部旋回、中“甜点”上部旋回和上“甜点”三个层段沉积期古环境,厘清这三个层段沉积古环境与有机质富集机制之间的

内在关联性,进一步明确不同层段有机质富集机制主控因素的差异性,以期三塘湖盆地芦草沟组页岩油勘探提供基础理论依据。

1 地质概况

三塘湖盆地位于新疆维吾尔自治区东北部(图1),介于莫钦乌拉山和苏海图山之间,呈北西—南东向展布,经历了海西运动期、印支运动期、燕山运动期及喜马拉雅运动期构造运动改造,发育北部冲断隆起带、中央凹陷带、南缘逆冲推覆带三个构造单元(陈旋等,2019),研究区马朗凹陷隶属于中央凹陷带(图1)。二叠系缺失上、下二叠统,中二叠统与石炭系和三叠系不整合接触,中二叠统自下而上发育芦草沟组和条湖组(图1)。芦草沟组是三塘湖盆地页岩油的主力产层,地层北薄南厚,纵向上整体富含油气,厚度介于100~400 m(梁世君等,2019)。据岩性和测井资料,芦草沟组自下而上可划分为芦一段(P_2l^1)、芦二段(P_2l^2)和芦三段(P_2l^3),发育上、中、下三套“甜点”,下“甜点”位于芦一段,中“甜点”和上“甜点”位于芦二段(范谭广等,2021)。本次研究目的层芦二段形成于咸化湖相环境,薄层凝灰岩发育,白云石含量较高(陈旋等,2019)。纵向上,芦二段可进一步划分为三个沉积旋回:中“甜点”下部旋回、中“甜点”上部旋回和上“甜点”旋回(图1)。

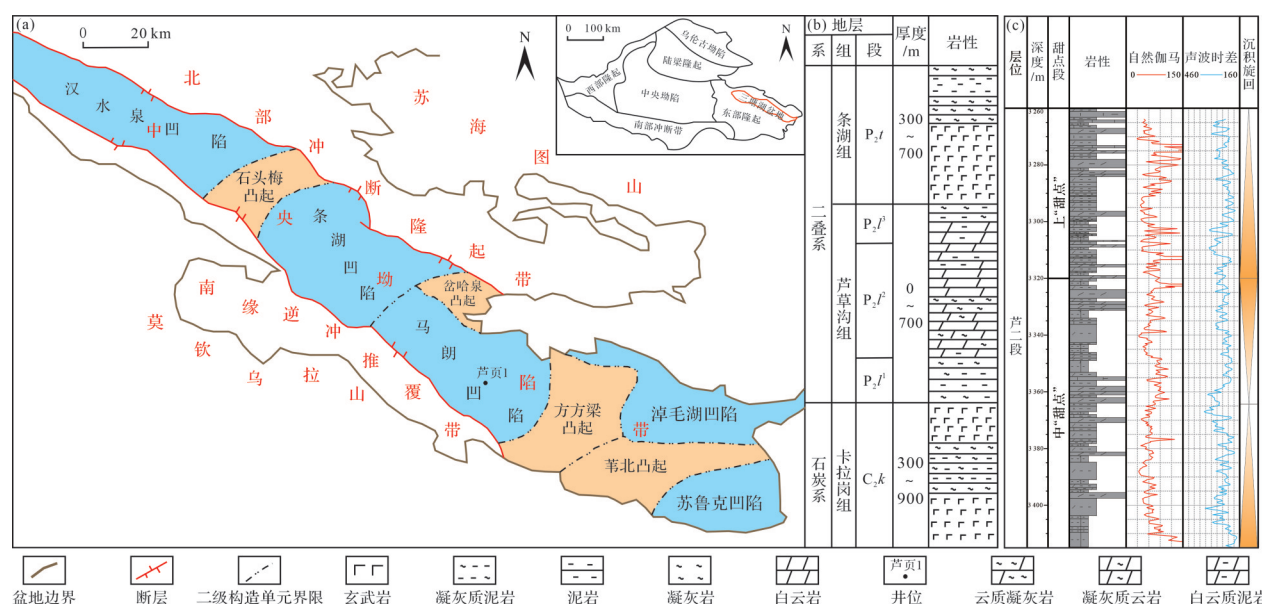


图1 三塘湖盆地地理位置(a)及芦二段沉积旋回划分(b)和“甜点”段(c)(据范谭广等,2021修改)

Fig.1 Geographical location of Santanghu Basin (a) and the division map of sedimentary cycle (b) and sweet spot (c), Second member of the Lucaogou Formation (modified from Fan *et al.*, 2021)

2 样品与实验

2.1 样品

本次研究采集芦页1井99块岩心样品,避开了方解石脉,所有岩心样品均进行了碳—氧同位素分析,挑选其中47块样品进行了总有机碳、主—微量元素分析。上“甜点”和中“甜点”分别取样25块和22块,岩性为深灰色泥质灰岩、深灰色泥质白云岩、深灰色灰质泥岩、深灰色凝灰质泥岩、深灰色白云质泥岩(附表1)。

2.2 总有机碳

首先,将47块样品碎至200目以下,称量100 mg放入石英坩埚,在80℃水浴条件下,用稀盐酸反复淋滤2 h以去除无机碳。然后,用去离子水反复清洗样品,直至其pH达到7左右。最后,将样品低温烘干,处理好的样品置于LECO CS230碳—硫分析仪内,测试流程及检测依据GB/T19145,样品分析在长江大学地球化学实验室完成(蔡苏阳等,2021)。

2.3 主量元素

将47块样品研磨至200目以下,准确称量50 mg样品放入螺旋盖PTFE内衬不锈钢高压容器,在185℃下与1 mL浓硝酸和2 mL氢氟酸反应24 h。将残余物置于酸驱动处理器,加入5 mL浓硝酸消化3 h,用稀硝酸稀释至25 mL,使用X射线荧光光谱仪(PW2404)测试,依据GB/T 14506.28—2010进行检测,相对标准偏差小于0.1%,样品分析在中国石油大学(北京)油气资源与工程全国重点实验室完成(Li *et al.*, 2020)。

2.4 微量元素

用玛瑙研钵将47块样品磨至200目以下,在60℃的恒温下干燥,直到样品重量保持不变。然后称取0.04 g样品置于不锈钢容器,并与4 mL浓硝酸和6 mL氢氟酸混合以诱导溶解。样品残留物在酸驱动处理器中以160℃进行干燥,样品体积用5%硝酸定容在50 mL。使用电感耦合等离子体质谱分析仪(NexION300D)测试,依据GB/T14506.30—2010检测,分析精度绝大多数优于5%,样品分析在中国石油大学(北京)油气资源与工程全国重点实验室完成(刘汉彬等,2013)。

2.5 碳—氧同位素

将99块样品磨至200目以下,放入烘箱,在105℃条件下烘干,取约0.1 mg干燥样品放入样品管

并封盖,将样品管中的空气用高纯氮气排出。用酸泵向样品管中加入过量的磷酸,样品中的碳酸盐岩与磷酸反应产生CO₂气体,用高纯氮气将生成的CO₂气体带入同位素质谱仪MAT 253中进行测试。测量结果以PDB为标准,测试误差均小于±0.2‰,样品分析在中国石油大学(北京)油气资源与工程全国重点实验室完成(周传明等,1997)。

3 实验结果

3.1 总有机碳

芦二段TOC整体较高,均值为4.72%。相对而言,中“甜点”下部旋回TOC相对较低,均值为2.63%,中“甜点”上部旋回TOC相对较高,均值为6.93%,上“甜点”TOC介于两者之间,均值为4.84%(附表1、图2)。

3.2 碳—氧同位素

芦二段中“甜点”下部旋回碳酸盐岩碳—氧同位素值介于两者之间, $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ 均值为5.43‰, $\delta^{18}\text{O}_{\text{PDB}}$ 均值为-10.67‰。中“甜点”上部旋回相对较低, $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ 均值为2.99‰, $\delta^{18}\text{O}_{\text{PDB}}$ 均值为-10.93‰。上“甜点”较高, $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ 均值为6.89‰, $\delta^{18}\text{O}_{\text{PDB}}$ 均值为-10.78‰(附表1、图2)。

3.3 主量元素

芦二段检测的主量元素主要有Ca、Mg、Al、Fe、Mn、P等。其中,Ca、Mg、Al的含量较高,P、Ti等含量较低(附表2)。具体而言,芦二段中“甜点”下部旋回Ca、Mg含量较高,均值分别为9.57%和7.24%,Al和P含量较低,其均值分别为2.89%和119.17 μg/g。中“甜点”上部旋回Mg含量较低,均值为3.18%,Al和P含量较高,均值分别为4.09%和1 415.00 μg/g。上“甜点”Ca含量较低,均值为8.46%,Al和P含量介于中“甜点”两旋回之间,均值分别为3.39%和660.40 μg/g。

3.4 微量元素

芦二段检测的微量元素主要有Ba、Sr、Th、U、V、Ni、Cu等,其中Ba、Sr含量明显较高,Th、U等含量相对较低(附表3)。相对而言,中“甜点”下部旋回Sr含量较高,均值为1 332.67 μg/g,Ba、Cu、Th、U和Ni含量较低,均值分别为309.79 μg/g、21.49 μg/g、1.38 μg/g、1.53 μg/g和15.97 μg/g。中“甜点”上部旋回Cu、Th、U和Ni含量较高,均值分别为32.93 μg/g、6.42 μg/g、5.34 μg/g和27.70 μg/g。上“甜点”Ba含量较高,均值为387.52 μg/g,Sr含量相对较低,均值为982.36 μg/g。

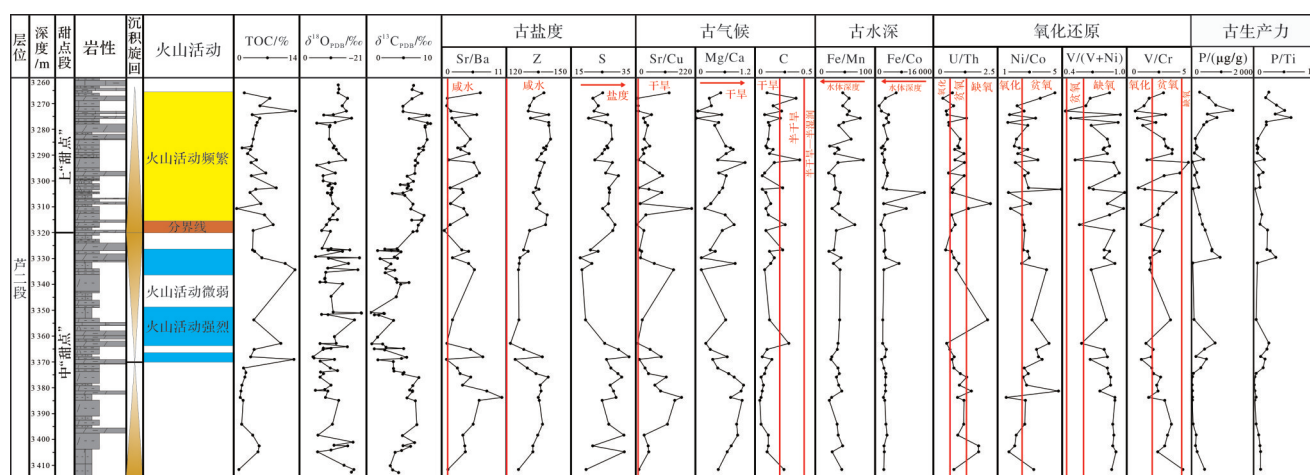


图2 芦二段碳酸盐岩碳—氧同位素、古盐度、古气候、古水深和氧化还原参数纵向变化(芦页1井)

Fig.2 Vertical variation in carbon-oxygen isotopes, paleosalinity, paleoclimate, paleowater depth and redox parameters of the Second member of the Lucaogou Formation (well Luye 1)

4 讨论

4.1 碳酸盐岩碳—氧同位素测试结果的有效性

通常,碳酸盐岩碳—氧同位素组成可能会受后期次生成岩作用影响,因此在利用页岩内原生碳酸盐岩碳—氧同位素进行古环境判识之前需要对其进行有效性检验。目前常用的检验方法有2种:(1)Mn/Sr 比值识别法。通常认为 $Mn/Sr < 10$ 时,碳酸盐岩原生性较好,保留了原始沉积信息; $Mn/Sr > 10$ 则指示其遭受了后期成岩作用改造(Pan *et al.*, 2022b)。(2) $\delta^{13}C_{PDB}$ 和 $\delta^{18}O_{PDB}$ 相关性识别法。当 $\delta^{18}O_{PDB} < -10\text{‰}$,且 $\delta^{13}C_{PDB}$ 与 $\delta^{18}O_{PDB}$ 变化趋势高度一致,表明碳酸盐岩遭受了强烈成岩作用改造,其碳—氧同位素组成不能用来指示原始沉积环境(Zhang *et al.*, 2018)。

本次研究取样过程中避开了方解石脉体发育段,从测试结果来看,芦二段页岩样品 Mn/Sr 比值较

低,均小于3(附表1);中“甜点”下部旋回、上部旋回以及上“甜点”段页岩样品内碳酸盐岩 $\delta^{13}C_{PDB}$ 和 $\delta^{18}O_{PDB}$ 两者之间没有显著相关性(图3)。这表明所取样品内碳酸盐岩原生性较好,受后期次生成岩作用改造影响小, $\delta^{13}C_{PDB}$ 和 $\delta^{18}O_{PDB}$ 可以用来指示原始沉积环境。

4.2 古湖泊类型

碳酸盐岩碳—氧同位素组成可以反映湖泊水体开放程度(Satish-Kumar *et al.*, 2021)。通常,开放型湖泊水体频繁变换,原生碳酸盐岩碳—氧同位素组成受各种注入水同位素组成影响,因此不具相关性,一般呈离散状, $\delta^{18}O_{PDB}$ 和 $\delta^{13}C_{PDB}$ 均为负值;对于水体长时间滞留的封闭型湖泊而言,蒸发作用可导致湖水中较轻的碳—氧同位素优先逸出,造成水体中 $\delta^{18}O_{PDB}$ 和 $\delta^{13}C_{PDB}$ 增大(周传明等, 1997),原生碳酸盐岩 $\delta^{18}O_{PDB}$ 有正有负,而 $\delta^{13}C_{PDB}$ 多为正值(Li and Ku,

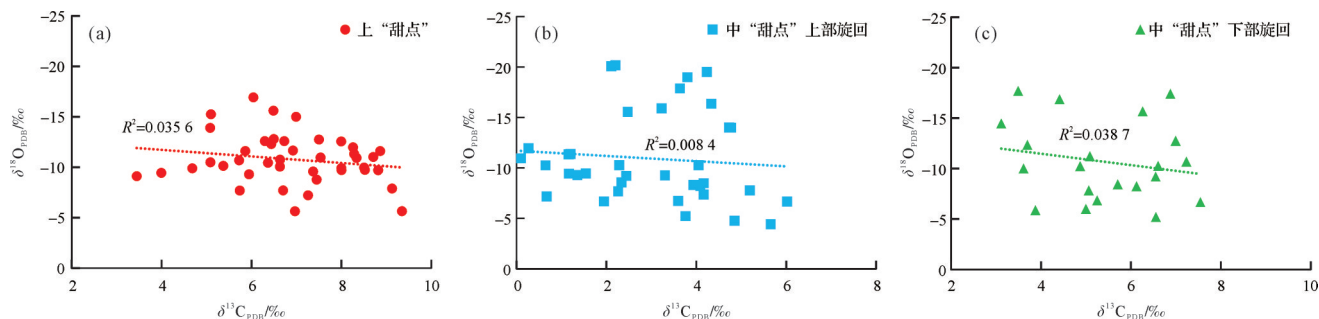


图3 芦二段页岩内碳酸盐岩 $\delta^{13}C_{PDB}$ 与 $\delta^{18}O_{PDB}$ 值交会图

(a)上“甜点”;(b)中“甜点”上部旋回;(c)中“甜点”下部旋回

Fig.3 $\delta^{13}C_{PDB}$ vs. $\delta^{18}O_{PDB}$ of carbonate rocks in shale, Second member of the Lucaogou Formation

(a) upper sweet spot; (b) upper cycle of mid-sweet spot; (c) lower cycle of mid-sweet spot

1997)。基于典型开放性和封闭性湖泊原生碳酸盐岩—氧同位素组成,前人构建了 $\delta^{18}\text{O}_{\text{PDB}}$ 和 $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ 交会图用以指示湖泊的开放或封闭程度(Li and Ku, 1997)。三塘湖盆地马朗凹陷芦页1井芦二段页岩内原生碳酸盐岩 $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ 和 $\delta^{18}\text{O}_{\text{PDB}}$ 值分别为0.10‰~9.35‰和-20.16‰~-4.42‰。这与Great Salt Lake原生碳酸盐岩碳—氧同位素组成具有一定类似性,表明芦二段沉积期湖泊封闭性较强(图4a),水体盐度可能也相对较高。

页岩内TOC和Mo含量也可以反映沉积期水体滞留程度,Mo/TOC比值越高,沉积水体滞留程度越弱,反之亦然(Algeo and Lyons, 2006)。从TOC和Mo交会图可以看出,三塘湖盆地马朗凹陷芦页1井芦二段页岩样品多位于强封闭区,这可能说明中—上“甜点”沉积期湖泊封闭程度相对较高,这与 $\delta^{18}\text{O}_{\text{PDB}}$ 和 $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ 交会图所指示的状况相一致(图4b)。由此可知,芦二段沉积期湖盆处于强滞留封闭状态。这与前人利用生物标志化合物取得的认识基本一致(Liu *et al.*, 2017)。

4.3 古环境

4.3.1 古气候及古水深

三塘湖盆地马朗凹陷芦页1井芦二段页岩沉积期湖盆处于封闭状态(图4)。封闭湖泊原生碳酸盐岩 $\delta^{18}\text{O}_{\text{PDB}}$ 组成主要受古气候和湖水氧同位素组成影响和控制(Li and Ku, 1997)。一般来讲,干旱气候条件下,降水量小于蒸发量,强烈的蒸发作用可导致富含 ^{16}O 的水分子优先从湖中逸出,残留湖水相对富集 ^{18}O ,原生碳酸盐岩 $\delta^{18}\text{O}_{\text{PDB}}$ 值因此变重;反之,湖泊

中原生碳酸盐岩 $\delta^{18}\text{O}_{\text{PDB}}$ 值则会变轻(Li and Ku, 1997)。芦页1井芦二段自下而上原生碳酸盐岩 $\delta^{18}\text{O}_{\text{PDB}}$ 值呈“高一低—高”的变化趋势,与之对应,其沉积期的气候可能呈“干旱—半干旱—干旱”的变化特征(图2)。

页岩主微量元素比值也可用来表征古气候及古水深变化特征(Wang *et al.*, 2024)。干旱气候条件下, $\text{Sr}/\text{Cu}>10$ 、 Mg/Ca 值较大,且C值 $[C=(\text{Fe}+\text{Mn}+\text{Cr}+\text{Ni}+\text{V}+\text{Co})/(\text{Ca}+\text{Mg}+\text{Sr}+\text{Ba}+\text{K}+\text{Na})]$ 较低(Wang *et al.*, 2024)。由于Fe比Co和Mn更容易在水体中沉淀,离湖岸越远,Fe含量越低,因此Fe/Co和Fe/Mn比值减小意味着水体加深,这两个比值增大,指示水体变浅(范玉海等, 2012)。芦页1井芦二段Sr/Cu和Mg/Ca比值自下而上具有“高一低—高”的演化特征(图2),C值则呈相反变化趋势(图2、图5a)。这表明中“甜点”下部旋回和上“甜点”沉积期气候较干旱,中“甜点”上部旋回沉积期气候相对湿润,这与原生碳酸盐岩 $\delta^{18}\text{O}_{\text{PDB}}$ 值所指示的结果大体一致(图2);中“甜点”下部和上部旋回Fe/Co、Fe/Mn值大体类似,Fe/Co,尤其Fe/Mn值在上“甜点”上部有增大趋势(图5b),这可能表明芦二段沉积期水体整体较深,上“甜点”沉积期水体呈现出由深变浅趋势。

4.3.2 古盐度

湖泊水体盐度可利用页岩原生碳酸盐岩碳—氧同位素组成和Sr/Ba值来加以约束(Tang *et al.*, 2020)。Keith and Weber (1964)提出利用Z值 $[Z=2.048\times(\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}+50)+0.498\times(\delta^{18}\text{O}_{\text{PDB}}+50)]$ 区分淡水碳酸盐岩和咸水碳酸盐岩,Z值以120为界限,大于120

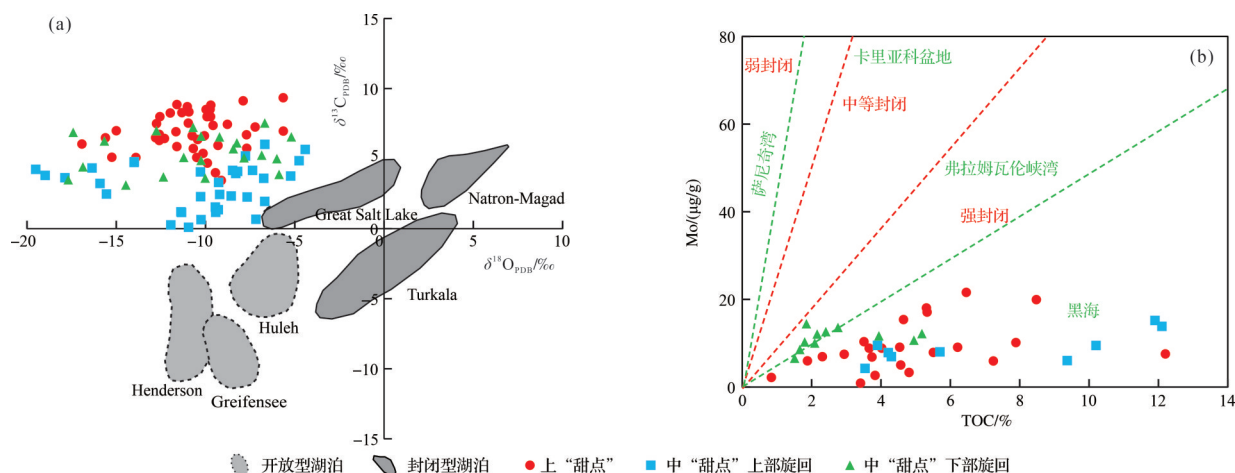


图4 芦二段湖泊封闭特征

(a) $\delta^{18}\text{O}_{\text{PDB}}$ 和 $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ 交会图(据 Li *et al.*, 1997 修改); (b) TOC 和 Mo 交会图(据 Pan *et al.*, 2020 修改)

Fig.4 Characteristics of lake closure in the Second member of the Lucaogou Formation

(a) $\delta^{18}\text{O}_{\text{PDB}}$ vs. $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ (modified from Li *et al.*, 1997); (b) TOC vs. Mo content (modified from Pan *et al.*, 2020)

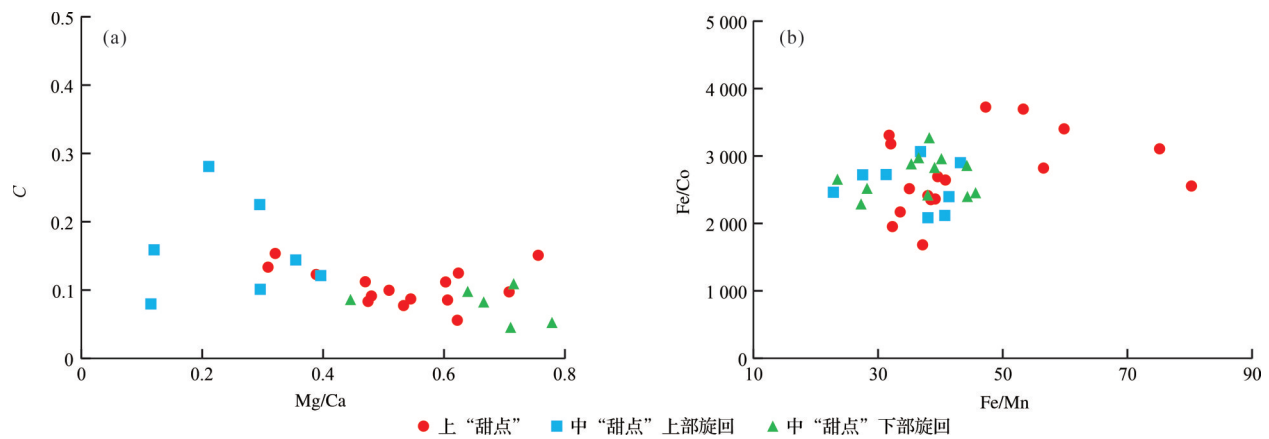


图5 芦二段古气候与古水深特征

(a) Mg/Ca 和 C 值交会图; (b) Fe/Mn 和 Fe/Co 交会图; $C = (Fe + Mn + Cr + Ni + V + Co) / (Ca + Mg + Sr + Ba + K + Na)$

Fig.5 Characteristics of paleoclimate and paleowater depth in the Second member of the Lucaogou Formation

(a) Mg/Ca vs. C content; (b) Fe/Mn vs. Fe/Co

为咸水环境, Z 值小于 120 为淡水环境; S 值 ($S = \delta^{18}O_{PDB} + 21.2/0.61$) 也被用来指示沉积水体盐度变化 (王兵杰等, 2014)。众所周知, 水体蒸发过程中会产生碳—氧同位素分馏, 对于封闭湖泊而言, 蒸发量越大, 湖水盐度越高, 原生碳酸盐岩碳—氧同位素组成将会随之变重, Z 和 S 值均会升高。由于 Z 和 S 值计算公式主要基于中生代以前的碳酸盐岩碳—氧同位素测试数据所构建, 受成岩作用和年代效应影响, 二叠系碳酸盐岩 $\delta^{13}C_{PDB}$ 较新生代高约 1.50‰, 二叠系碳酸盐岩 $\delta^{18}O_{PDB}$ 较新生代低 2.60‰ (Tang *et al.*, 2020), 因此需对芦页 1 井芦二段碳—氧同位素测试结果进行校正。计算结果显示, 芦二段页岩内原生碳酸盐岩 Z 值较高, 均大于 120, 表明芦二段沉积期水体盐度较高, 为咸化湖泊。 Z 和 S 值中“甜点”下部旋回和

上“甜点”相对较高, 中“甜点”上部旋回相对较低 (图 2、图 6a), 表明中“甜点”上部旋回沉积期湖泊水体有所淡化, 这可能与此阶段气候相对湿润, 降水量增加有一定关系 (图 5a)。

Sr/Ba 值也可有效反映湖泊水体盐度变化 (刘汉彬等, 2013)。Sr 比 Ba 溶解度大, 随水体盐度增加, Ba 首先以硫酸盐的形式从水体中析出, 当盐度到达一定阈值后 Sr 才析出, 因此 Sr/Ba 值越大, 指示水体盐度越高 (刘汉彬等, 2013)。芦页 1 井芦二段页岩样品 Sr/Ba 值均较高, 介于 0.45~10.24, 可能与沉积水体盐度普遍较高关系密切 (图 6b)。比较而言, 该值在中“甜点”上部旋回相对较低 (图 6b), 表明该阶段水体盐度有所降低。这与 Z 和 S 值所指示的情形一致 (图 6a)。

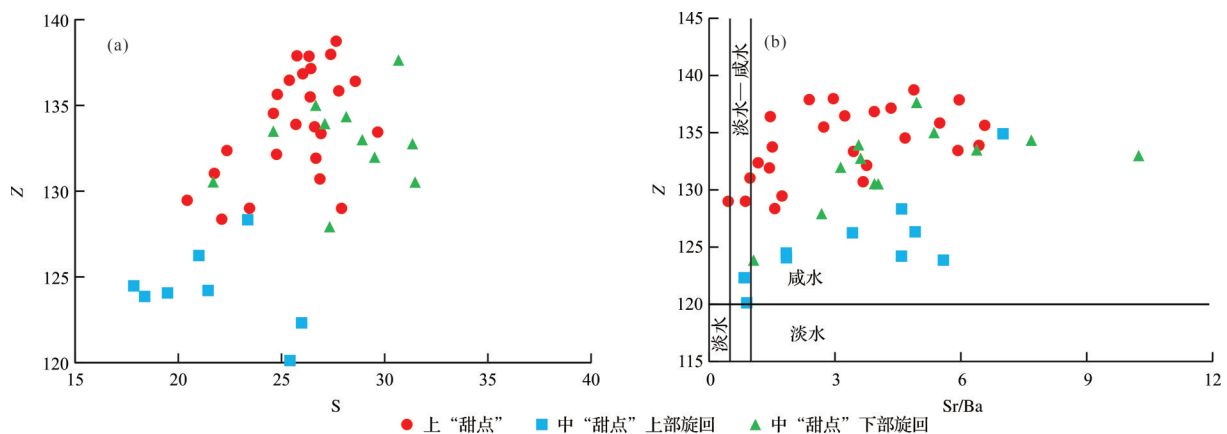


图6 芦二段古盐度特征

(a) S 值与 Z 值交会图; (b) Sr/Ba 与 Z 值交会图

Fig.6 Paleosalinity of the Second member of the Lucaogou Formation

(a) S vs. Z ; (b) Sr/Ba vs. Z

4.3.3 古氧化还原条件

沉积水体古氧化还原条件可通过原生碳酸盐岩碳同位素来判断(张一范等,2023)。一般地,湖泊水体由还原变为氧化会使得有机质发生氧化分解生成 CO_2 ,富含重碳同位素的 $^{13}\text{CO}_2$ 参与碳酸盐岩沉淀,导致其 $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ 值偏重(张一范等,2023)。芦页1井芦二段上“甜点”原生碳酸盐岩 $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ 均值为6.89‰,高于中“甜点”(均值为3.88‰),指示上“甜点”沉积期水体氧化性有所增强,这可能与该时期沉积水体变浅关系密切(图5b)。

氧化还原敏感元素比值 $\text{V}/(\text{V}+\text{Ni})$ 、 U/Th 、 Ni/Co 、 V/Cr 等是指示沉积水体氧化还原条件的良好指标(Jones and Manning, 1994; Pan *et al.*, 2022a)。芦页1井芦二段页岩样品 $\text{V}/(\text{V}+\text{Ni})$ 、 Ni/Co 、 V/Cr 、 U/Th 值整体较高,分别介于0.43~0.98、1.53~4.95、0.65~4.77、0.37~2.22,均值分别为0.79、2.82、2.39、0.96,多位于贫氧—缺氧区域(图2、图7a)。值得注意的是,上“甜点”段 U/Th 、 $\text{V}/(\text{V}+\text{Ni})$ 和 V/Cr 值从下向上呈减小的趋势(图2),可能指示上“甜点”段沉积期水体还原性逐渐减弱,氧化性逐步增强。这与原生碳酸盐岩 $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ 值所指示的结果相符。

4.3.4 古生产力

TOC是沉积水体古生产力的直接反映。通常,古生产力越高,TOC也越高(曲长胜等,2017)。三塘湖盆地马朗凹陷芦页1井芦二段页岩样品TOC含量整体较高,自下而上表现出“低—高一中”的变化趋势(图2),表明中“甜点”上部旋回沉积期古生产力相对较高,其次为上“甜点”段,中“甜点”下部旋回沉积

期古生产力相对较低。

P是生命必需元素,其含量也可反映沉积水体古生产力状况(Pujol *et al.*, 2006),但在实际应用中,需用Ti对其进行校正(徐银波等,2022)。三塘湖盆地马朗凹陷芦页1井芦二段页岩样品P含量和P/Ti值中“甜点”下部旋回较低,中“甜点”上部旋回较高,两者与TOC均具有较好的协同演变关系(图2),可能指示中“甜点”上部旋回古生产力较高,而中“甜点”下部旋回古生产力较低。

芦二段古生产力之所以出现上述变化,这可能与区域火山活动关系密切。研究证实凝灰质组分主要来源于火山灰,以长英质矿物为主,长英质矿物含量高表明火山活动强烈,碳酸盐矿物含量高表明火山活动微弱,长英质和碳酸盐矿物含量变化频繁表明火山活动频繁(图8)(Pan *et al.*, 2020)。芦二段中“甜点”下部旋回沉积期火山活动较弱,以碳酸盐矿物为主,碳酸盐岩含量较高(图8g~i),中“甜点”上部旋回沉积期火山活动较为强烈,以长英质矿物为主,凝灰岩含量较高(图8d~f),上“甜点”沉积期虽然火山活动频繁,但强度相对较弱(Liu *et al.*, 2019),长英质和碳酸盐矿物含量变化频繁(图8a~c)。

在火山活动强烈期,火山灰可落入湖泊,其所携带的Fe、P和Ba等营养物质大量输入导致藻类和细菌等繁殖勃发,湖泊水体古生产力增大(Pan *et al.*, 2020),芦二段中“甜点”上部旋回TOC因此相对较高;在火山活动间歇期,湖泊内营养物质供给相对有限,生物生长受限,古生产力减小(Pan *et al.*, 2020),芦二段中“甜点”下部旋回TOC因此相对较低。

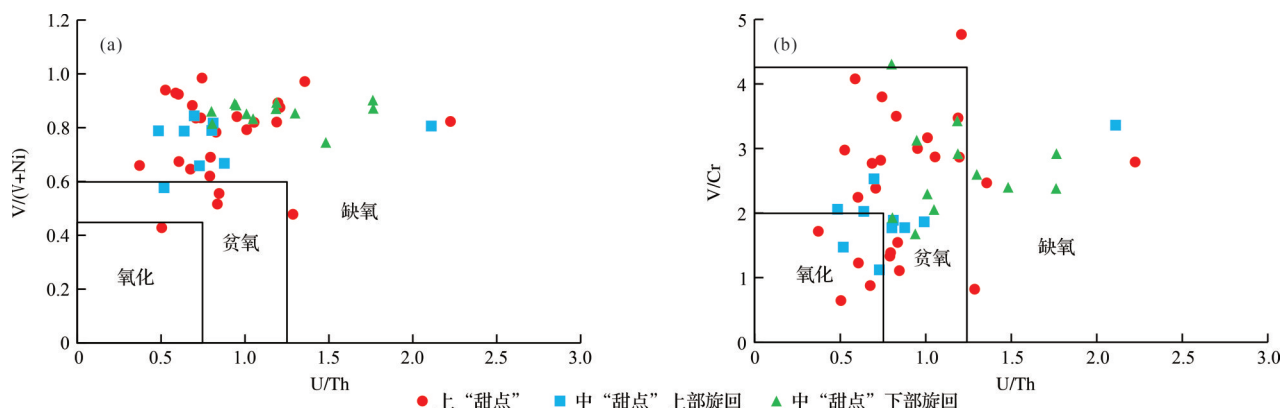


图7 芦二段古氧化还原条件

(a) U/Th 值与 $\text{V}/(\text{V}+\text{Ni})$ 值交会图; (b) U/Th 值与 V/Cr 值交会图

Fig.7 Paleoredox conditions of the Second member of the Lucaogou Formation

(a) U/Th vs. $\text{V}/(\text{V}+\text{Ni})$; (b) U/Th vs. V/Cr

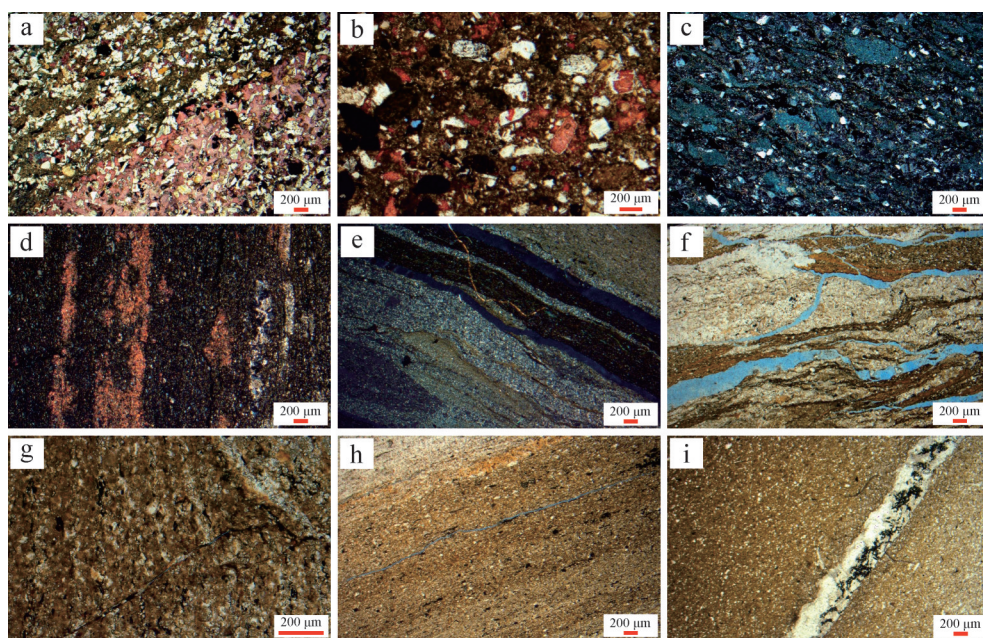


图8 芦二段镜下显微照片

上“甜点”: (a)强碳酸盐化细粒凝灰岩, 3 261.08 m, 单偏光; (b)云质复屑凝灰岩, 3 278.39 m, 单偏光; (c)凝灰质泥晶砂屑含灰白云岩, 3 306.79 m, 正交偏光; 中“甜点”上部旋回: (d)蚀变火山尘凝灰岩, 3 325.90 m, 正交偏光; (e)火山尘凝灰岩, 3 329.24 m, 正交偏光; (f)云质火山尘凝灰岩, 3 354.52 m, 单偏光; 中“甜点”下部旋回: (g)凝灰质粉/泥晶云岩, 3 381.03 m, 单偏光; (h)云质泥岩, 3 394.70 m, 单偏光; (i)含碳酸盐含粉砂泥岩, 3 405.27 m, 单偏光

Fig.8 Photomicrographs of the Second member of the Lucaogou Formation

upper sweet spot: (a) strongly carbonatized fine-grained tuff, 3 261.08 m, plane-polarized light (PPL); (b) dolomitic complex elastic sedimentary tuff, 3 278.39 m, PPL; (c) tuffaceous mud-crystalline sandy elastic calcite-bearing dolomite, 3 306.79 m, cross-polarized light (XPL); upper cycle of the middle sweet spot: (d) altered volcanic-dust tuff, 3 325.90 m, XPL; (e) volcanic dust tuff, 3 329.24 m, XPL; (f) dolomitic volcanic dust tuff, 3 354.52 m, PPL; lower cycle of the middle sweet spot: (g) tuffaceous silty-micritic dolostone, 3 381.03 m, PPL; (h) dolomitic mudstone, 3 394.70 m, PPL; (i) carbonate-bearing silty mudstone, 3 405.27 m, PPL.

4.4 有机质富集机制

三塘湖盆地芦二段不同“甜点”段有机质富集机制既有共性,也有一定的差异性。中“甜点”下部旋回、上部旋回和上“甜点”段TOC与古生产力指标P/Ti均具有正相关关系(图9a),证实湖泊沉积水体古生产力在芦二段有机质富集过程中扮演了重要角色。如上所述,湖泊古生产力与不同时期火山活动强度关系密切,中“甜点”上部旋回沉积期火山活动强烈(Liu *et al.*, 2019; Jiao *et al.*, 2020)。不仅如此,该阶段古气候条件相对湿润,降水量增加,湖泊水体淡化有利于生物繁盛(图5),这可能是中“甜点”上部旋回TOC与古气候指标Mg/Ca值负相关的主要原因(图9b)。沉积水体盐度越高,还原性越好,有利于有机质富集(徐银波等, 2022)。然而,中“甜点”上部旋回TOC与古盐度指标Z值以及古氧化还原指标V/(V+Ni)值呈负相关关系(图9c, d)。这进一步表明在有机质保存条件相对较好的情况下,较高的古生产力和相对湿润的古气候条件联合作用是中“甜点”上部旋回有机质相对富集的主要原因。

上“甜点”沉积期火山活动频繁但强度较弱(Pan *et al.*, 2020),加之相对干旱的气候条件导致原始湖泊古生产力降低,有机质富集程度减弱,TOC减小(图2)。虽然在此阶段中一晚期湖泊水体变浅(图5b),水体氧化程度有所增加(图7),但是这还不足以动摇古生产力在有机质富集中的主导地位。这也许是TOC与古气候指标Mg/Ca值、古盐度指标Z值、古氧化还原环境指标V/(V+Ni)在上“甜点”具有负相关性的内在原因(图9b~d)。

对于中“甜点”下部旋回而言,TOC不仅与古生产力指标P/Ti正相关(图9a),同时也与古氧化还原环境指标V/(V+Ni)表现出一定的正相关性(图9d)。这可能表明虽然保存条件不是上“甜点”和中“甜点”上部旋回有机质富集的主要控制因素,但是其对于中“甜点”下部旋回有机质富集则具有相对重要的控制效应。中“甜点”下部旋回沉积期整体处于火山活动间歇期(Pan *et al.*, 2020),在营养物质供给相对有限、古生产力较低的情况下,水体氧化还原条件对有机质富集的重要性因此得以凸显。

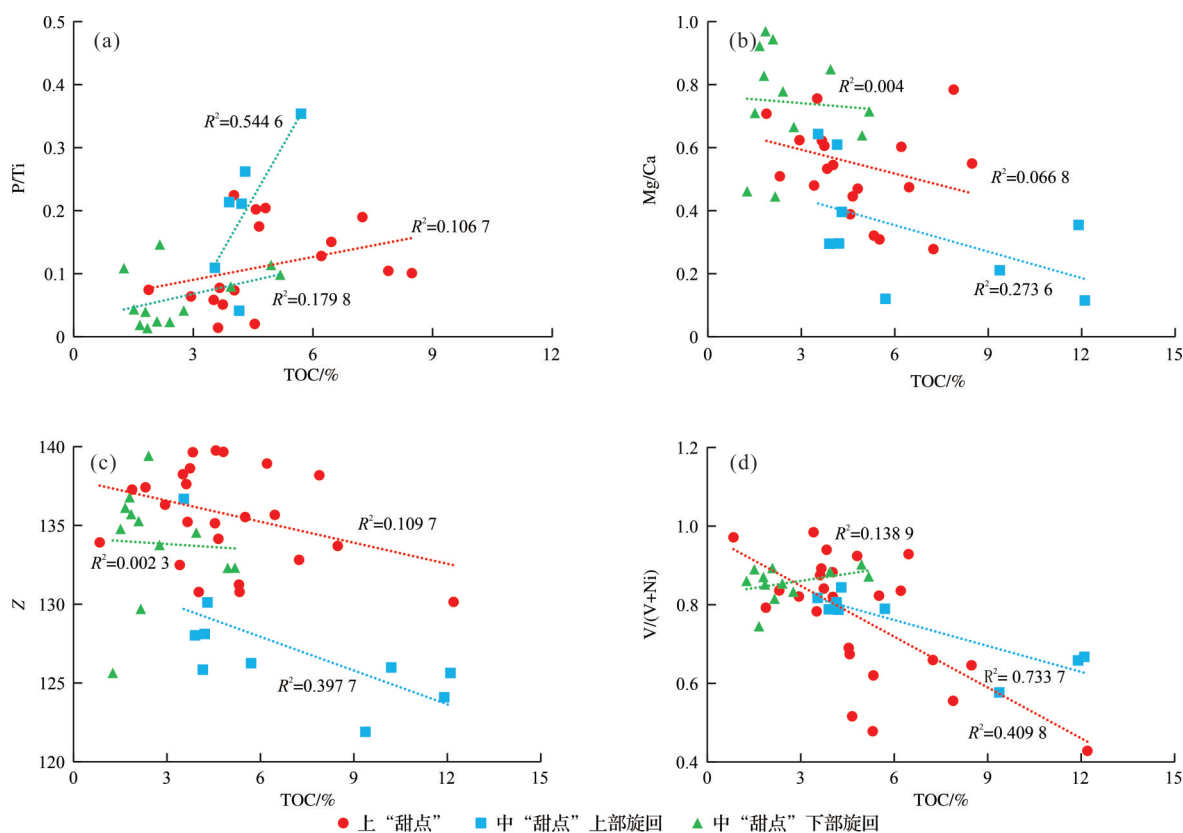


图9 芦二段 TOC 含量与古环境指标相关性分析

(a) TOC 与 P/Ti 交会图; (b) TOC 与 Mg/Ca 交会图; (c) TOC 与 Z 值交会图; (d) TOC 与 V/(V+Ni) 交会图

Fig.9 Correlation of TOC and paleoenvironmental index, Second member of the Lucaogou Formation

(a) TOC vs. P/Ti; (b) TOC vs. Mg/Ca; (c) TOC vs. Z; (d) TOC vs. V/(V+Ni)

5 结论

(1) 三塘湖盆地芦二段形成于强滞留封闭湖泊环境,从中“甜点”下部旋回、中“甜点”上部旋回至上“甜点”,沉积期古气候呈干旱—半干旱—干旱变化特征,相应地,水体盐度呈高一低—高变化趋势。湖泊水体整体较深,上“甜点”沉积期水体呈现出由深变浅趋势。受水体盐度和深度影响,芦二段沉积期水体还原性整体较好,上“甜点”沉积期水体还原性逐渐减弱。古生产力自下而上呈低—高一中演变特征。

(2) 三塘湖盆地芦二段不同“甜点”段有机质富集机制具有一定的差异性。中“甜点”下部旋回有机质富集受水体氧化还原条件和古生产力共同控制;中“甜点”上部旋回有机质富集受古气候条件和古生产力共同控制;上“甜点”有机质富集则主要受古生产力控制。

数据可用性声明

支撑本研究的科学数据(附表1~3)已在中国

科学院科学数据银行(Science Data Bank, ScienceDB)平台公开发布,访问地址为 <https://doi.org/10.57760/sciencedb.cjxb.00018> 和 <https://cstr.cn/31253.11.sciencedb.cjxb.00018>。

致谢 衷心感谢审稿专家的精心指导和宝贵意见。

参考文献(References)

- 蔡苏阳,肖七林,朱卫平,等. 2021. 渝东南地区五峰—龙马溪组页岩储层纳米孔隙发育特征及影响因素:以重庆石柱剖面为例[J]. 科学技术与工程, 21(25): 10603-10612. [Cai Suyang, Xiao Qilin, Zhu Weiping, et al. 2021. Nanopore structure characteristics and impacting factors of Wufeng-Longmaxi Formation shale in south-east Chongqing: A case study of Shizhu outcrop[J]. Science Technology and Engineering, 21(25): 10603-10612.]
- 陈旋,刘小琦,王雪纯,等. 2019. 三塘湖盆地芦草沟组页岩油储层形成机理及分布特征[J]. 天然气地球科学, 30(8): 1180-1189. [Chen Xuan, Liu Xiaoqi, Wang Xuechun, et al. 2019. Formation mechanism and distribution characteristics of Lucaogou shale oil reservoir in Santanghu Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 30(8):

- 1180-1189.]
- 范潭广,徐雄飞,范亮,等. 2021. 三塘湖盆地二叠系芦草沟组页岩油地质特征与勘探前景[J]. 中国石油勘探, 26(4): 125-136. [Fan Tanguang, Xu Xiongfei, Fan Liang, et al. 2021. Geological characteristics and exploration prospect of shale oil in Permian Lucaogou Formation, Santanghu Basin[J]. China Petroleum Exploration, 26(4): 125-136.]
- 范玉海,屈红军,王辉,等. 2012. 微量元素分析在判别沉积介质环境中的应用:以鄂尔多斯盆地西部中区晚三叠世为例[J]. 中国地质, 39(2): 382-389. [Fan Yuhai, Qu Hongjun, Wang Hui, et al. 2012. The application of trace elements analysis to identifying sedimentary media environment: A case study of Late Triassic strata in the middle part of western Ordos Basin[J]. Geology in China, 39(2): 382-389.]
- 蒋中发,丁修建,王忠泉,等. 2020. 吉木萨尔凹陷二叠系芦草沟组烃源岩沉积古环境[J]. 岩性油气藏, 32(6): 109-119. [Jiang Zhongfa, Ding Xiujian, Wang Zhongquan, et al. 2020. Sedimentary paleoenvironment of source rocks of Permian Lucaogou Formation in Jimsar Sag[J]. Lithologic Reservoirs, 32(6): 109-119.]
- 梁世君,罗劝生,王瑞,等. 2019. 三塘湖盆地二叠系非常规石油地质特征与勘探实践[J]. 中国石油勘探, 24(5): 624-635. [Liang Shijun, Luo Quansheng, Wang Rui, et al. 2019. Geological characteristics and exploration practice of unconventional Permian oil resources in the Santanghu Basin[J]. China Petroleum Exploration, 24(5): 624-635.]
- 刘汉彬,金贵善,李军杰,等. 2013. 铀矿地质样品的稳定同位素组成测试方法[J]. 世界核地质科学, 30(3): 174-179. [Liu Hanbin, Jin Guishan, Li Junjie, et al. 2013. Determination of stable isotope composition in uranium geological samples[J]. World Nuclear Geoscience, 30(3): 174-179.]
- 曲长胜,邱隆伟,杨勇强,等. 2017. 吉木萨尔凹陷芦草沟组碳酸盐岩碳氧同位素特征及其古湖泊学意义[J]. 地质学报, 91(3): 605-616. [Qu Changsheng, Qiu Longwei, Yang Yongqiang, et al. 2017. Carbon and oxygen isotope compositions of carbonatic rock from Permian Lucaogou Formation in the Jimsar Sag, NW China and their paleolimnological significance[J]. Acta Geologica Sinica, 91(3): 605-616.]
- 王兵杰,蔡明俊,林春明,等. 2014. 渤海湾盆地塘沽地区古近系沙河街组湖相白云岩特征及成因[J]. 古地理学报, 16(1): 65-76. [Wang Bingjie, Cai Mingjun, Lin Chunming, et al. 2014. Characteristics and origin of lacustrine dolostone of the Paleogene Shahejie Formation in Tanggu area, Bohai Bay Basin[J]. Journal of Palaeogeography, 16(1): 65-76.]
- 谢再波,曲永强,吴涛,等. 2023. 准噶尔盆地吉木萨尔凹陷二叠系芦草沟组沉积古环境与生物来源探讨[J]. 天然气地球科学, 34(8): 1328-1342. [Xie Zaibo, Qu Yongqiang, Wu Tao, et al. 2023. Discussion on the sedimentary paleoenvironment and biological source of Permian Lucaogou Formation in Jimusar Sag, Junggar Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 34(8): 1328-1342.]
- 徐银波,李锋,张家强,等. 2022. 三塘湖盆地石头梅地区二叠系芦草沟组有机质富集特征[J]. 地质学报, 96(11): 4010-4022. [Xu Yinbo, Li Feng, Zhang Jiaqiang, et al. 2022. Enrichment characteristics of organic matter in the Permian Lucaogou Formation in Shitoumei area, Santanghu Basin[J]. Acta Geologica Sinica, 96(11): 4010-4022.]
- 张妍,吴欣松,康积伦,等. 2024. 准东吉南凹陷二叠系芦草沟组烃源岩有机质富集机制[J]. 天然气地球科学, 35(9): 1574-1589. [Zhang Yan, Wu Xinsong, Kang Jilun, et al. 2024. Mechanism of organic matter enrichment in the Permian Lucaogou Formation, Ji'nan Sag, eastern Junggar Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 35(9): 1574-1589.]
- 张一范,高远,陈积权,等. 2023. 松辽盆地晚白垩世湖相白云岩碳氧同位素特征及其古环境意义[J]. 现代地质, 37(5): 1243-1253. [Zhang Yifan, Gao Yuan, Chen Jiquan, et al. 2023. Carbon and oxygen isotope characteristics of Late Cretaceous lacustrine dolomite in the Songliao Basin and their paleoenvironmental implications[J]. Geoscience, 37(5): 1243-1253.]
- 赵文智,朱如凯,刘伟,等. 2023. 中国陆相页岩油勘探理论与技术进展[J]. 石油科学通报, 8(4): 373-390. [Zhao Wenzhi, Zhu Rukai, Liu Wei, et al. 2023. Advances in theory and technology of non-marine shale oil exploration in China[J]. Petroleum Science Bulletin, 8(4): 373-390.]
- 周传明,张俊明,李国祥,等. 1997. 云南永善肖滩早寒武世早期碳氧同位素记录[J]. 地质科学, (2): 201-211. [Zhou Chuanming, Zhang Junming, Li Guoxiang, et al. 1997. Carbon and oxygen isotopic record of the early Cambrian from the Xiaotan section, Yunnan, South China[J]. Scientia Geologica Sinica, (2): 201-211.]
- 邹才能,杨智,张国生,等. 2023. 非常规油气地质学理论技术及实践[J]. 地球科学, 48(6): 2376-2397. [Zou Caineng, Yang Zhi, Zhang Guosheng, et al. 2023. Theory, technology and practice of unconventional petroleum geology[J]. Earth Science, 48(6): 2376-2397.]
- Abdi Z, Rimmer S M, Rowe H D, et al. 2024. Assessment of bi-metal paleo-redox proxies in the Bakken Formation black shales, Williston Basin, North Dakota, USA[J]. Chemical Geology, 670: 122439.
- Algeo T J, Lyons T W. 2006. Mo-total organic carbon covariation in modern anoxic marine environments: Implications for analysis of paleoredox and paleohydrographic conditions[J]. Paleoceanography, 21(1): PA1016.
- Jiao X, Liu Y Q, Yang W, et al. 2020. Fine-grained volcanic-hydrothermal sedimentary rocks in Permian Lucaogou Formation, Santanghu Basin, NW China: Implications on hydrocarbon source rocks and accumulation in lacustrine rift basins[J]. Marine and Petroleum Geology, 114: 104201.
- Jones B, Manning D A C. 1994. Comparison of geochemical indices used for the interpretation of palaeoredox conditions in ancient mudstones[J]. Chemical Geology, 111(1/2/3/4): 111-129.
- Keith M L, Weber J N. 1964. Carbon and oxygen isotopic composition of selected limestones and fossils[J]. Geochimica et Cosmochimi-

- ca Acta, 28(10/11): 1787-1816.
- Li H C, Ku T L. 1997. $\delta^{13}\text{C}$ - $\delta^{18}\text{C}$ covariance as a paleohydrological indicator for closed-basin lakes[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 133(1/2): 69-80.
- Li Q, Wu S H, Xia D L, et al. 2020. Major and trace element geochemistry of the lacustrine organic-rich shales from the Upper Triassic Chang 7 member in the southwestern Ordos Basin, China: Implications for paleoenvironment and organic matter accumulation[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 111: 852-867.
- Liu B, Bechtel A, Sachsenhofer R F, et al. 2017. Depositional environment of oil shale within the Second member of Permian Lucaogou Formation in the Santanghu Basin, Northwest China[J]. *International Journal of Coal Geology*, 175: 10-25.
- Liu G H, Zhai G Y, Huang Z L, et al. 2019. The effect of tuffaceous material on characteristics of different lithofacies: A case study on Lucaogou Formation fine-grained sedimentary rocks in Santanghu Basin[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 179: 355-377.
- Pan Y S, Huang Z L, Guo X B, et al. 2022a. A re-assessment and calibration of redox thresholds in the Permian Lucaogou Formation of the Malang Sag, Santanghu Basin, Northwest China[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 135: 105406.
- Pan Y S, Huang Z L, Li T J, et al. 2020. Environmental response to volcanic activity and its effect on organic matter enrichment in the Permian Lucaogou Formation of the Malang Sag, Santanghu Basin, Northwest China[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 560: 110024.
- Pan Y S, Huang Z L, Li T J, et al. 2022b. Study on the origin and hydrocarbon generation potential of lacustrine organic-rich dolomite affected by volcanism: A case study of Lucaogou Formation in the Malang Sag, Santanghu Basin, western China[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 141: 105699.
- Pujol F, Berner Z, Stüben D. 2006. Palaeoenvironmental changes at the Frasnian/Famennian boundary in key European sections: Chemostratigraphic constraints[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 240(1/2): 120-145.
- Satish-Kumar M, Shirakawa M, Imura A, et al. 2021. A geochemical and isotopic perspective on tectonic setting and depositional environment of Precambrian meta-carbonate rocks in collisional orogenic belts[J]. *Gondwana Research*, 96: 163-204.
- Tang L, Song Y, Pang X Q, et al. 2020. Effects of paleo sedimentary environment in saline lacustrine basin on organic matter accumulation and preservation: A case study from the Dongpu Depression, Bohai Bay Basin, China[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 185: 106669.
- Wang X L, Zhu X M, Lai J, et al. 2024. Palaeoenvironmental reconstruction and organic matter accumulation of the Paleogene Shahejie oil shale in the Zhanhua Sag, Bohai Bay Basin, eastern China[J]. *Petroleum Science*, 21(3): 1552-1568.
- Wang Y C, Li P P, Feng Z H, et al. 2023. Geochemical characteristics of shales from the First member of Qingshankou Formation in Gulong Sag, Songliao Basin, China: Implication for mechanism of organic matter enrichment[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 150: 106142.
- Yu M, Gao G, Liu M, et al. 2024. Sedimentary environment shift and organic matter enrichment mechanism in response to volcanic ash influence: A case study of the Permian Lucaogou Formation, Santanghu Basin, NW China[J]. *Journal of Palaeogeography*, 13(4): 793-822.
- Zhang S H, Liu C Y, Liang H, et al. 2018. Palaeoenvironmental conditions, organic matter accumulation, and unconventional hydrocarbon potential for the Permian Lucaogou Formation organic-rich rocks in Santanghu Basin, NW China[J]. *International Journal of Coal Geology*, 185: 44-60.

Paleoenvironment and Organic Matter Enrichment Mechanism in the Second Member, Permian Lucaogou Formation, Malang Sag, Santanghu Basin, China

DUAN YangDi¹, CHEN Xuan², XU XiongFei², CAI SuYang¹, LIU JunTian², ZHANG YiTing²,
XIAO QiLin¹

1. College of Resources and Environment, Yangtze University, Wuhan 430100, China

2. PetroChina Tuha Oilfield Company, Hami, Xinjiang 839009, China

Abstract: [Objective] The Second member of the Middle Permian Lucaogou Formation is the main exploration target for lacustrine carbonate shale oil in the Santanghu Basin, Xinjiang province, China. Clarifying its paleoenvironment and organic matter enrichment mechanism provides scientific evidence in support of shale oil exploration and development in the study area. [Methods] Tests for total organic carbon content, major and trace elements and carbon-oxygen isotopic composition of primary carbonate rocks were conducted on shale samples collected from the well Luye 1 in the Second member of the Lucaogou Formation in the Malang Sag, Santanghu Basin. These deciphered the paleoenvironment and associated organic matter enrichment mechanism of the shale sequence, hence helping to gain a better understanding of the effects of paleoproductivity, paleoclimate, paleosalinity and paleoredox conditions on the organic matter enrichment and the key elements. [Results] Shale oil sweet spots are present in the middle and upper parts of this shale sequence. The tests indicated a closed lacustrine setting. The lowest part of the middle sweet spot was deposited in an arid, saline and reduced deep-water environment with low paleoproductivity, whereas its upper section has high paleoproductivity and was deposited in a semi-arid, brackish and weakly reducing deep-water environment. The upper sweet spot was deposited in an arid, saline and weakly reduced semi-deep water setting with medium paleoproductivity. [Conclusions] The organic matter enrichment mechanisms vary between the different shale sections. The influencing elements were the redox conditions and paleoproductivity in the lowest part of the middle sweet spot, paleoclimatic conditions and paleoproductivity for the upper part of the middle sweet spot, and paleoproductivity in the upper sweet spot. This study will assist in shale oil exploration and development in the Second member of the Lucaogou Formation in the Santanghu Basin.

Key words: Santanghu Basin; Lucaogou Formation; carbon-oxygen isotopes; trace elements; paleoenvironment; organic matter enrichment