

doi : 10. 3799/dqkx. 2022. 472

以初级生产力与固碳规律为线索探讨陆相页岩中有机质的富集规律

毛小平^{1*}, 陈修蓉², 陈永进¹, 李岁岁¹, 李振¹, 朱启轩¹

1. 中国地质大学(北京), 北京 100083

2. 清华大学, 北京 100083

摘要: 一般认为在陆相盆地深湖-半深湖等深水环境易富集油气, 但大量页岩气勘探证实, 页岩气藏一般更靠近湖盆边缘, 因此有必要深入剖析陆相湖盆有机质富集的规律。本文采用类比法对比了页岩油气、煤的成矿条件, 结合湖泊的初级生产力、固碳速率、化石发育, 采用古地貌及埋藏史恢复手段, 提出了页岩发育于浅水局限环境的六大证据。研究发现, 页岩油气和煤具有相似的成矿模式; 与浅水环境的煤、蒸发盐岩等具有共生关系; 浅水环境下固碳速率远大于深水环境。结论是, 页岩油气富集于浅水湖湾、间湾等封闭-半封闭环境; 最大湖泛期凝缩段应为贫有机质段。最后以松南等地区进行验证, 说明本结论具有普适性, 可更好地指导页岩油气勘探。

关键词: 页岩气; 烃源层; 湖湾; 最大湖泛期; 叶肢介; 初级生产力.

中图分类号: P618 **收稿日期:** 2022-11-25

Discussion on the enrichment law of organic matter in continental shale with the clue of primary productivity and carbon carbon storage law

Mao Xiaoping¹, Chen Xiurong², Chen Yongjin¹, Li Suisui¹, Li Zheng¹, Zhu Qixuan¹

1. *China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China*

2. *Tsinghua University, Beijing 100083, China*

Abstract: It is generally believed that it is easy to enrich oil and gas in deep-water environments such as deep lacustrine to semi-deep lacustrine in continental basins, but a large number of shale gas exploration has proved that shale gas reservoirs are generally located closer to the edge of lacustrine basins, so it is necessary to further study the law of organic matter enrichment in continental lacustrine basins. In this paper, the metallogenic conditions of shale oil, gas and coal are compared by analogy method. Combined with the primary productivity of the lake, the rate of carbon sequestration and fossil development, the paleo-geomognomy and burial history recovery means are used to put forward six evidence that shale developed in shallow water restricted environment. It is found that shale oil, gas and coal have similar

基金项目: 省级重大创新工程, 贵州磷、锰、铝优势资源成矿规律与快速高效智慧化勘查技术研究及示范--黔科合战略找矿[2022]ZD003.

作者简介: 毛小平(1965-), 男, 博士, 副教授, 主要从事烃源岩评价、油气地质、地热方面的研究工作. E-mail:

maoxp9@163.com, ORCID: 0000-0002-2284-8833, Tel: 13911360200.

引用格式: 毛小平, 陈修蓉, 陈永进, 等, 2022. 以初级生产力与固碳规律为线索探讨陆相页岩中有机质的富集规律, x(x):1-30.

metallogenic patterns, and have a symbiotic relationship with coal and evaporative salt in shallow water environment. The carbon sequestration rate in shallow water environment is much higher than that in deep water environment. The conclusion is that shale oil and gas are enriched in closed to semi-closed environment such as shallow lake bay and interbay. The condensed section of the maximum flood period should be the organic-poor section. Finally, the results are verified in Songnan area, indicating that this conclusion is universal and can guide shale oil and gas exploration better.

Key words: Shale gas; Hydrocarbon source bed; Lake Bay; Maximum flooding period; Leaf limb medium; primary productivity.

随着涪陵海相页岩气田的开发,近年来陆相页岩气也受到越来越多的关注,并陆续有了新的发现,但有机质的富集规律仍存在一些问题,主要体现在页岩气富集规律和实际勘探成果不太一致。对于陆相盆地有机质的富集环境,一般认为是深湖-半深湖的还原环境(刘官植,1959;邓茨兰,1963;锦言,1977)^[41,8,31],并从层序地层学角度给予了其解释,认为湖盆最大湖泛期,沉积沉降缓慢,产生了凝缩层(体),其中富含有机质(徐怀大,1997;顾家裕等,2005)^[65,17]。在湖盆中部深水湖相则常富含有机质(胡见义,1991)^[22];深湖和半深湖亚相可形成巨厚暗色泥岩,为良好的生油环境(朱筱敏,2008)^[78];深湖亚相以纯泥岩、页岩为主,有机质含量高(林春明,2019)^[39]。在大型深水湖盆中,盆地形成早期的沉降—沉积中心是深湖、半深湖及浅湖厚层—巨厚层富有机质页岩发育的有利场所(张金川等,2004)^[70];烃源岩所处的地方,有大量植物、浮游生物沉淀堆积,最佳富集环境可以是浅湖-半深湖(黄东,2018;何江林,2022)^[23,20]、深湖-半深湖环境(姜在兴,2013;倪冬梅,2021)^[25,47]、深湖环境(邹才能等,2010)^[76]。即多数学者倾向于认为深湖、半深湖和浅湖环境才富有机质。姑且不论此环境正确与否,这类指标只代表水体深度,在实际寻找页岩气甜点中勘探指导价值不高。环湖盆一周,存在多圈浅湖、半深湖区域,但多数区域并不含天然气,其根本原因或机制是什么值得深入研究。

虽然争议较大,但有一点是共同认可的,那就是页岩发育于低能还原环境。那么作为湖泊相的低能环境,前人更多地关注是深湖-半深湖这种低能环境(张君峰等,2020;Gemaison和Moore,1980)^[71,16],理由是深水还原环境有利于有机质保存,同时,远洋考察中深海放射虫软泥的发现(金性春,1981)^[30],导致找到放射虫化石的地层都划为深海相(李道琪,1984)^[34],更加夯实了这一理念。一个理想的陆源碎屑湖泊的沉积模式具有沉积物绕湖盆呈环带状分布的特点,即从湖岸至湖盆中央大致依次出现砂砾岩、砂岩、粉砂岩、泥岩、高碳泥岩(林春明,2019)^[39],从这个角度上看,页岩和泥岩在粒度上相当,理当属于更深的深水环境。从湖泊相的7个亚相:湖成三角洲亚相、滨湖亚相、浅湖亚相、半深湖亚相、深湖亚相、湖湾亚相和湖泊重力流亚相中看,只有深湖-半深湖亚相、湖湾亚相被认为是低能环境。然而,前者在下层水体的确是低能和还原环境;而后者湖湾亚相也是低能环境,可能因其水体浅,被误认为不会出现强还原环境,而未受到足够重视。一些学者(袁选俊等,2015;朱如凯等,2017)^[69,79]关注到并引用了Picard(1971)^[49]所提出的富有机质黑色页岩的4种沉积模式:海(湖)侵模式、水体分层模式、门槛模式等,有一定参考价值,但其主要考虑的因素仍强调强还原环境(作者注:Picard的原文并未提到4种沉积模式)。

大量的陆相页岩油、气的勘探成果表明,一些较浅的水体或一些坡折带而不

是盆地中心是最富有机质的层段(拜文华等, 2010; 蒋恕等, 2017)^[2,26], 这显然和层序地层中的最大湖泛期的凝缩段发育不完全一致。造成这种偏差的原因, 会不会是因为有机质在深水环境中不富集, 而是在湖泊相 7 个亚相中另一个低能环境: 湖湾亚相这种浅水环境中富集?

为此, 本文拟从生态学的初级生产力和固碳规律角度, 深入探究页岩油气与煤、蒸发岩等矿种的关系与成矿模式类比, 得出陆相页岩中的有机质可能富集于封闭或半封闭的浅水湖湾亚相, 而不是深湖半深湖亚相。

1 含油气页岩发育于浅水湖湾亚相的几大证据

含油气页岩发育于浅水湖湾亚相有 6 大证据, 具体如下。

1.1 叶肢介化石的发育

叶肢介化石最适宜生活的水深是 1-20 cm, 一般在现代池塘、水田、水坑等, 特点是水体安静、波浪小(低能), 在较深水环境(>20 m)含量极少, 是重要的指相化石。

拜文华等最早于 2010 年^[2]通过野外观察和综合研究, 发现银额盆地北部苏红图坳陷在深湖-半深湖相地层中, 其下白垩统巴音戈壁组 K₁b 暗色泥岩单层厚度小、累积厚度大, 化石少; 而靠近盆地边缘的浅水湖湾地区, 页岩发育, 单层厚度大, 累积厚度小, 油页岩含油率高, 化石丰富, 特别代表浅水环境的叶肢介化石丰富, 如图 1 所示为该地区油页岩总厚度及含油率平面等值线图。盆地北部深湖-半深湖泥厚, 化石少, 累积油页岩厚度大, 但单层厚度薄, 含油小 4.2%, 不具工业开采价值; 东南浅湖-半深湖湖湾亚相叶肢介丰富, 油页岩累厚小, 但单层厚度大, 含油高 6.9%, 叶肢介丰富。

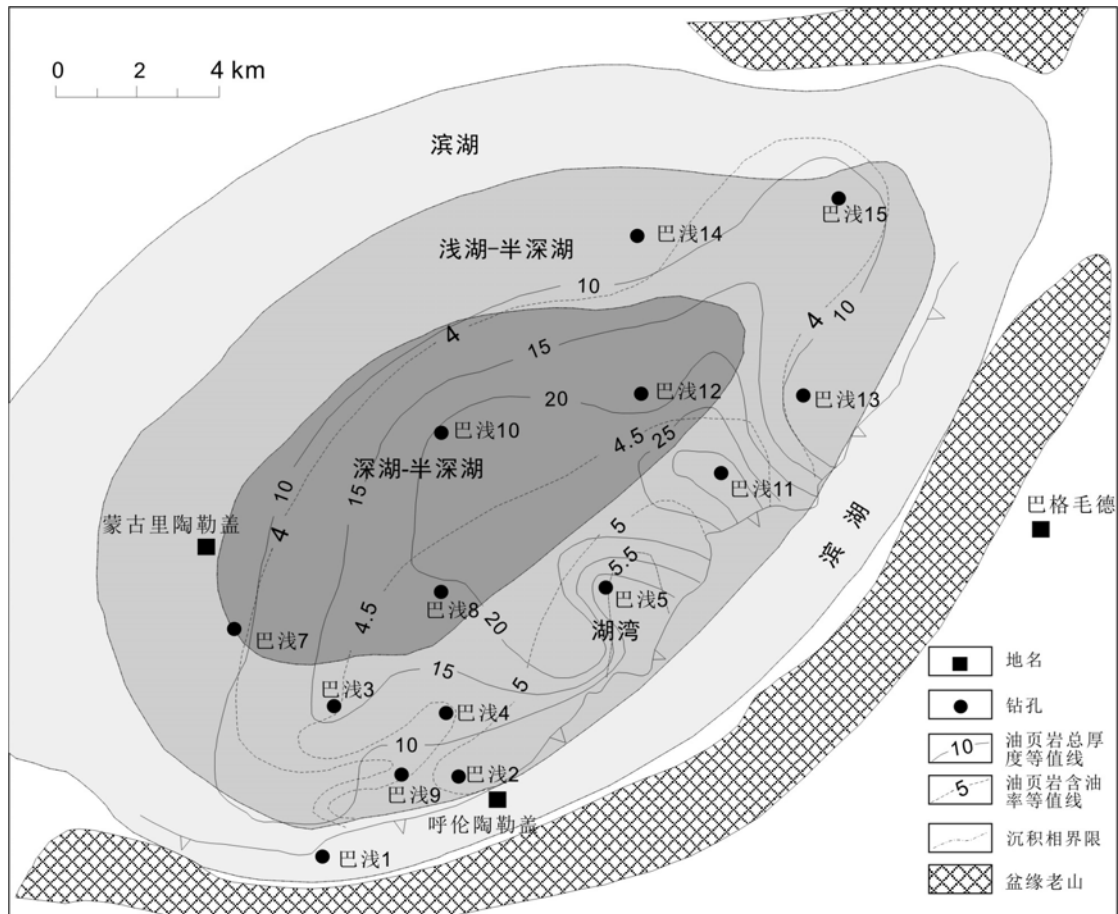


图 1 银额盆地北部苏红图坳陷东北端下白垩统巴格毛德 K₁b² 油页岩分布^[2]

Fig. 1 Distribution of bagmaud oil shale at the northeast end of Suhongtu depression in the north of yine Basin

据拜文华 (2010) 修改

四川盆地侏罗系大安寨段发育陆相烃源岩，为厚层页岩（黄东等, 2018）^[23]，广泛发育的淡水双壳类生物（介壳、叶肢介及介形虫）以及沉积大规模的介壳滩是大安寨段重要的沉积特征，叶肢介化石显示水体浅、低能静水环境，黑色的富含有机质的泥页岩发育，并见黄铁矿分布。厚刚福等（2017）^[21]通过化石发育与沉积相分析得出，整个四川盆地此时被介壳滩分隔成多个浅水水体。

除此之外，几乎陆相湖盆中高含气量页岩层中均能发现叶肢介化石，如梨树断陷(倪冬梅, 2021)^[59]、松辽青一段为 I 型，发育大量介形虫、叶肢介及植物碎屑化石(林铁锋等, 2021, 丁聪等, 2021)^[40,11]；十屋断陷、松辽盆地嫩江组油页岩，页理发育，富含介形虫和叶肢介化石；重庆酉阳、巴南三叠系上统须家河组内植物、叶肢介和煤层（柳青青等, 2018）^[43]；吐鲁番塔尔朗组烃源岩中含有叶肢介、双壳类及腹足类化石、塔尔朗组泥质碳酸盐类烃源层中鱼化石、双壳类(苗建宇等, 2004)^[46]；准噶尔盆地吉木萨尔凹陷芦苇沟组,湖相，含有鱼、叶肢介、双壳类等(高岗等, 2017)^[15]；库车坳陷中侏罗统克孜勒努尔组(肖飞等, 2014)^[63]；松辽盆地西缘、大兴安岭中南部地区林西组为陆相沉积建造，含双壳类、叶肢介、植物(张健等, 2013)^[72]。甚至陆相碳酸盐岩烃源岩也同样含有叶肢介化石，如酒西盆地地下白垩统下沟组,赤金堡组湖相含有叶肢介(彭楠等, 2011)^[48]、孢粉体、壳屑体等化石(涂建琪等, 2012)^[56]。

也就是说，叶肢介化石锁定了陆相含油气页岩层发育于极浅水环境，水深多

数小于 10-20m。

1.2 页岩油气与煤具有相似的成矿模式

煤层主要发育于极浅水湖湾与沼泽环境。经典的成煤模式如图 2 所示(郭彪等, 2017) [18], 煤层发育从湖盆边缘向湖泊中心呈透镜状。越靠近盆地边缘煤层厚度大, 而逐渐向盆地沉积沉降中心尖灭, 形成垂向叠置的多层煤透镜体, 除非盆地处于发育晚期, 准平原化阶段, 出现沼泽化, 煤层可能在盆地中心成矿, 如图 2 中伊敏组。如果盆地边缘长期保持泥炭沼泽环境, 则形成类似于图 3 的马尾状(黄铁栋等, 2011) [24], 向陆一端发育巨厚煤层, 向湖盆中心尖灭。图 3 为探明储量我国第一, 也是亚洲第一的吐哈盆地南缘沙尔湖煤田, 发育巨厚煤层, 剖面中部的古隆起区长期维持了西侧煤田主产区的沼泽环境, 单层煤厚度最厚达 276 m, 马尾尾部白色部分为小规模湖侵, 沉积砂泥岩, 之后又淤平成沼泽成煤, 有多个旋回, 但剖面左侧始终保持了沼泽环境, 导致多套煤层呈连续分布。抚顺盆地古近系煤层也具有类似的马尾状分布(吴冲龙等, 2001) [61], 南部靠近盆地边缘为巨厚煤层, 向北至盆地中心则厚度减薄。一套煤层或煤线就对应一个盆地中的局部低洼、低能、低水位环境。盆地发育时, 一个地区的水体深度并不会一直保持一成不变。煤是一个重要的深度指示指标, 只要有煤层出现, 必然对应水体较浅的沼泽化阶段, 相当于一个深度指示器。如华北地区石炭-二叠纪的煤层, 从北至南在同一时期会出现多个小型的局部封闭水体, 在浅水碳酸盐岩沉积地层中穿插了多套垂向叠置的煤系地层, 南部靠近盆地边缘煤层厚度大, 向北至盆地中心变薄, 也呈现为马尾模式(图 4)。

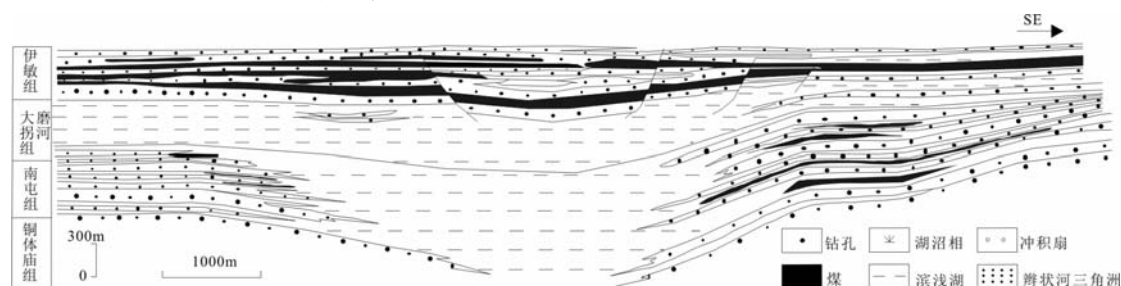


图 2 伊敏凹陷东西向下白垩统沉积断面图

Fig. 2 East West sedimentary section of Yimin Sag

据郭彪等(2017) [18]

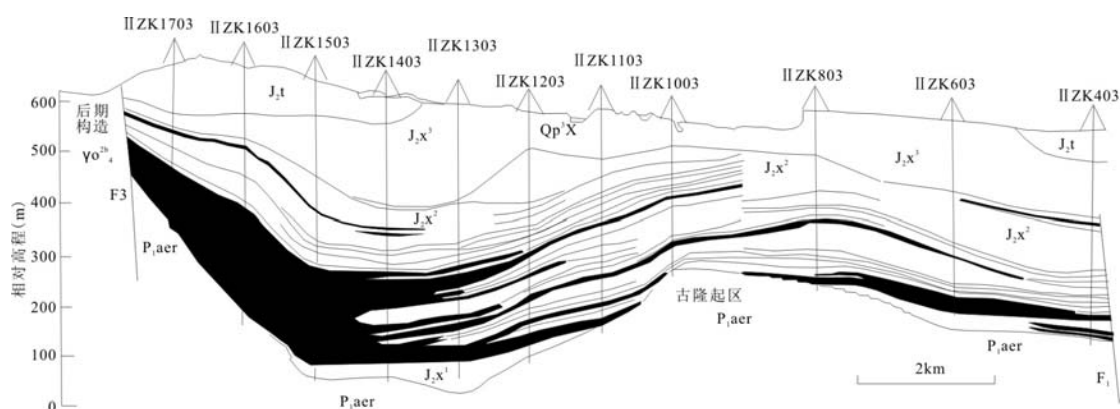


图 3 吐哈盆地南缘沙尔湖煤田东部侏罗系煤层剖面特征

Fig.3 Profile characteristics of coal seams in the east of Shaerhu coalfield on the southern

margin of Turpan Hami basin.

据黄铁栋等(2011)^[24]

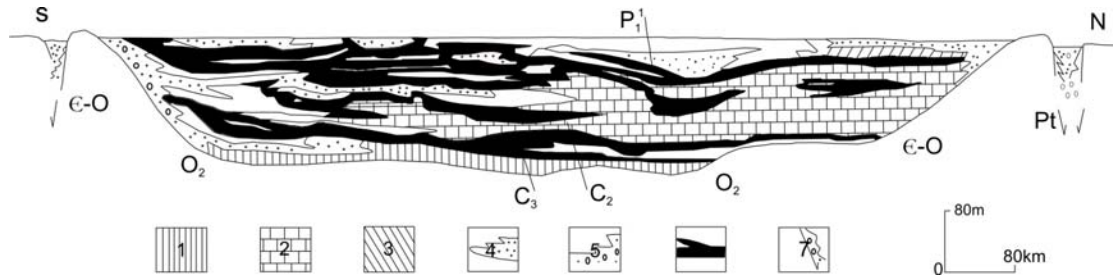


图4 华北地区石炭-二叠煤盆地沉积-构造剖面示意图

- 1-潟湖-滨海铁铝质粘土沉积；2-潟湖-障壁含煤沉积；3-海湾-潮坪含煤沉积；
4-浅水三角洲含煤沉积；5-冲积扇-河流含煤沉积；6-煤层；7-断陷盆地

Fig. 4 sedimentary structural profile of Carboniferous Permian coal basin in North China

- 1-lagoon coastal ferroaluminous clay deposit; 2-lagoon barrier coal bearing deposit; 3-bay tidal flat coal bearing deposit; 4-shallow water delta coal bearing deposit; 5-alluvial fan fluvial coal bearing deposit; 6- coal seams; 7-faulted Basin

据邱震杰等(1993)^[51]

Dickinson(1976)^[10]很早就发现了油气的分布也存在这种现象,他根据美国内陆 20 个盆地的含油气情况得出,盆地离最近的前陆褶皱-冲断带的距离决定含油丰度,随距离增大,石油储量呈对数下降,但他推断这是油气侧向运移造成的。近年来,随着页岩油气的大量勘探实践说明,页岩油气的发育和煤有类似的规律,富有机质的页岩层分布由陆向深水水体方向成马尾状,以盆地边缘最为发育,向陆一端厚,向湖盆中心一端薄,如图 5 所示,为岐北斜坡区-岐口主凹烃源岩对比剖面(姜文亚等,2005)^[27],从图中看出,好烃源岩、厚层烃源岩的主要部位并非盆地沉积中心。松辽盆地齐家-古龙凹陷西部油页岩厚度分布(陆军,2017)^[44]也呈类似的规律,青山口组厚层暗色页岩出现在靠陆(西部)一边,而越向湖盆中心则越薄至尖灭。结合前述银额盆地页岩油的分布可以看出,页岩气、页岩油和煤的分布模式三者剖面具有极高的相似度,异曲同工。

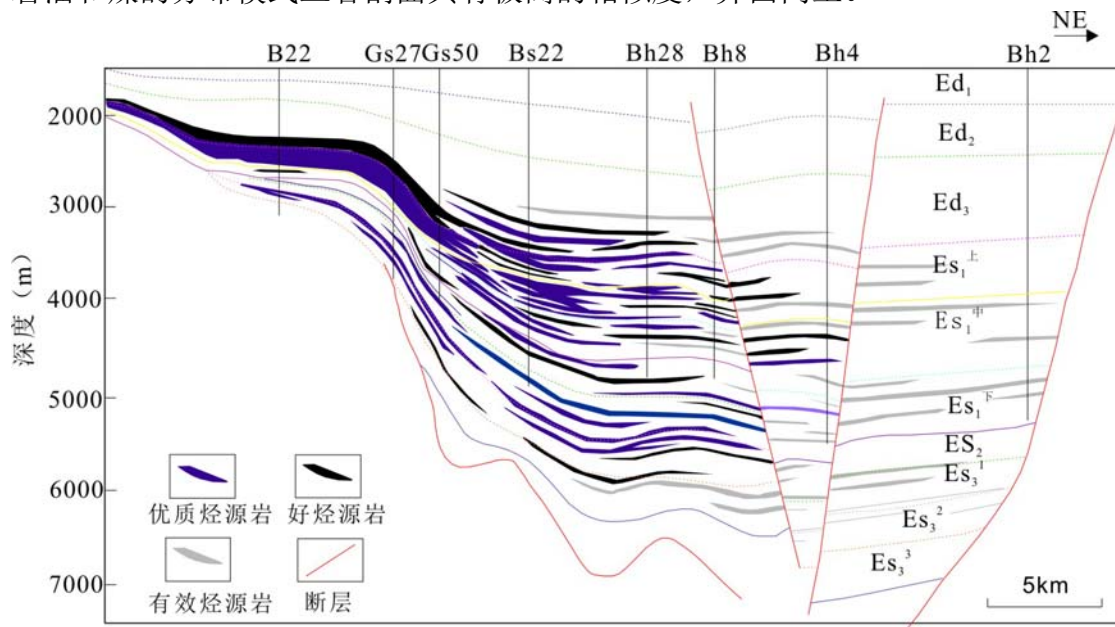


图5 岐口凹陷古近系渐新统烃源岩对比剖面

Fig. 5 Correlation Profile of Paleogene Oligocene Source Rocks in Qikou Depression

据姜文亚等(2015) [27]

因此, 页岩油气与煤具有相似的成矿模式, 高有机质丰度烃源层和煤层的出现具有同等的指相性的标志, 代表比煤层所发育的沼泽环境更深的低能、浅水湖湾亚相(或间湾), 而不是最大湖泛期所发育的密集段或凝缩段, 所处环境不是深湖-半深湖亚相。

1.3 页岩与煤、蒸发盐岩伴生

一般认为细粒页岩沉积与煤层应具有截然不同的沉积环境, 从河流沉积体系的沼泽亚相, 至湖泊相的深湖亚相, 中间跨越了多个相带, 据此煤层与页岩是不能直接接触的。但如果考虑湖泊相中的湖湾亚相, 则在相序上它们之间是可以连续过渡的, 具有伴生、直接接触关系。因为湖湾可以演化成沼泽; 沼泽也能演化成湖湾, 但深湖-半深湖亚相却不能直接演化成沼泽。有大量的实例说明页岩与煤、蒸发盐岩之间具有伴生关系。抚顺西露天矿的巨厚油页岩与含油率高达 10% 左右的下部长焰煤伴生, 油页岩层的厚度达 48 m ~ 190 m, 含油率也达 6.6% (傅丛等, 2021) [14]。重庆酉阳、巴南三叠系上统须家河组内有植物、叶肢介化石, 和煤层伴生 (柳青青等, 2018) [43]。此外, 山东黄县盆地古近系 (李丽等, 2021) [38]、黑龙江省的依兰盆地、老黑山盆地、抚顺盆地、广东茂名地区、吉林省桦甸和新安、青海柴达木盆地北缘鱼卡地区、内蒙古的东胜、甘肃兰州市郊的侏罗系窑街油页岩 (李靖和秦荣芳, 2018) [37]、海南儋州中新统长坡组四段 (郭敏等, 2006) [19]、新疆乌鲁木齐与昌吉地区、潍坊市昌乐县五图煤矿、内蒙金宝屯矿区、甘肃永发县 (炭山岭、永登、华亭)、陕西分平县永寿等都有油页岩与煤伴生现象。与煤伴生的油页岩矿床比单独的油页岩矿床占比更多, 尤其是中生代以后的矿床更是如此, 而晚古生代的伴生矿床相对较少 (傅丛等, 2021) [14], 这说明伴生现象具有普遍性。

王东东 (2016) [58] 系统地总结了陆相断陷盆地煤与油页岩共生的五种组合特征, 得出煤和油页岩中均含有高等植物和藻类; 从滨湖到湖中心, 共生组合中煤层厚度逐渐减小。在煤与油页岩共生组合中, 靠近煤层的油页岩中高等植物组分含量较高; 靠近油页岩的煤层中, 低等植物 (藻类) 的含量也较高, 表现为富氢化, 反映了煤与油页岩之间的转换是连续的, 而非突变, 进一步证明二者具有亲缘性。

油页岩还与蒸发盐、煤三者共生, 如河南桐柏盆地始新统五里堆组, 为油页岩与蒸发盐互层 (如图 6 所示); 美国绿河盆地为油页岩、蒸发盐、煤三者互层, 辽宁抚顺盆地为煤与油页岩共生, 再演化至西露天组为蒸发性白云质泥岩 (许圣传等, 2012) [66]; 还有羌塘盆地胜利河组、东营凹陷沙四段、江汉盆地小板凹陷潜江组为膏盐与油页岩互层 (李乐等, 2019) [38], 更加说明页岩的发育与这些浅水环境是过渡关系, 并非截然不同的环境。

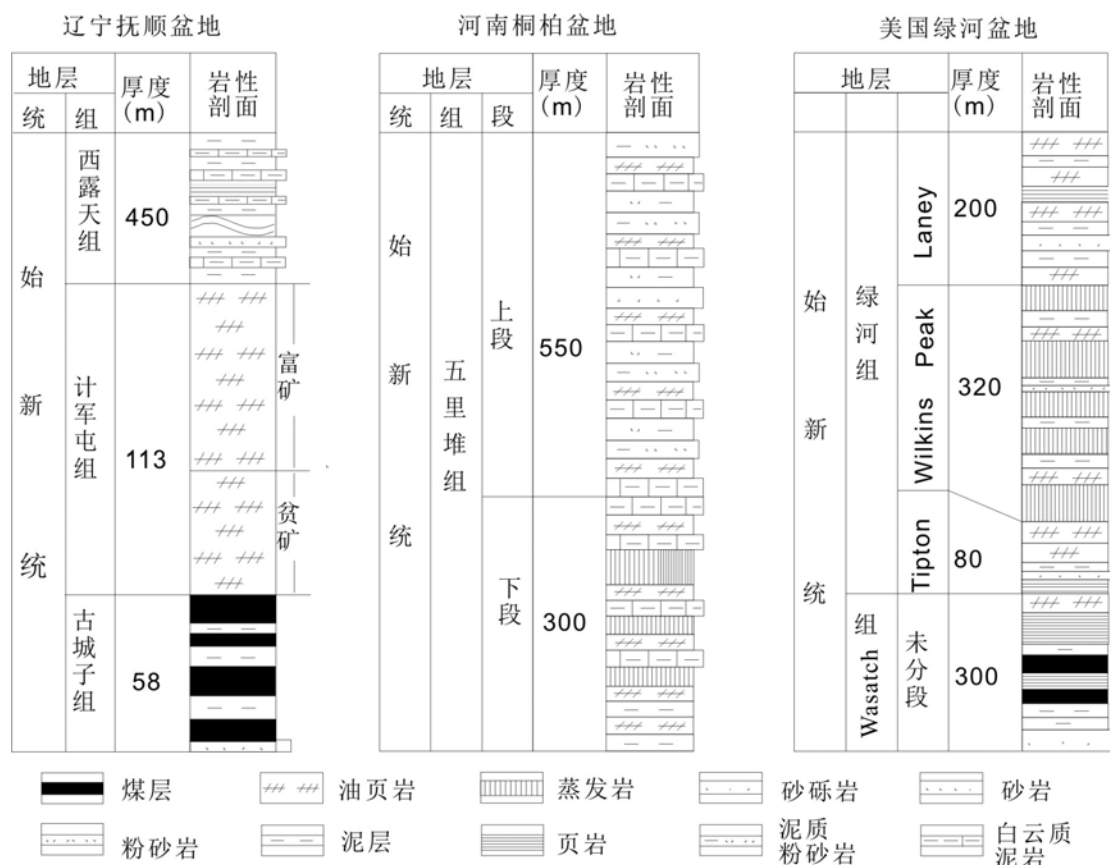


图 6 页岩层与煤、蒸发岩共生现象

Fig. 6 Symbiosis between shale and coal and evaporite

据许圣传等 (2012) [66]

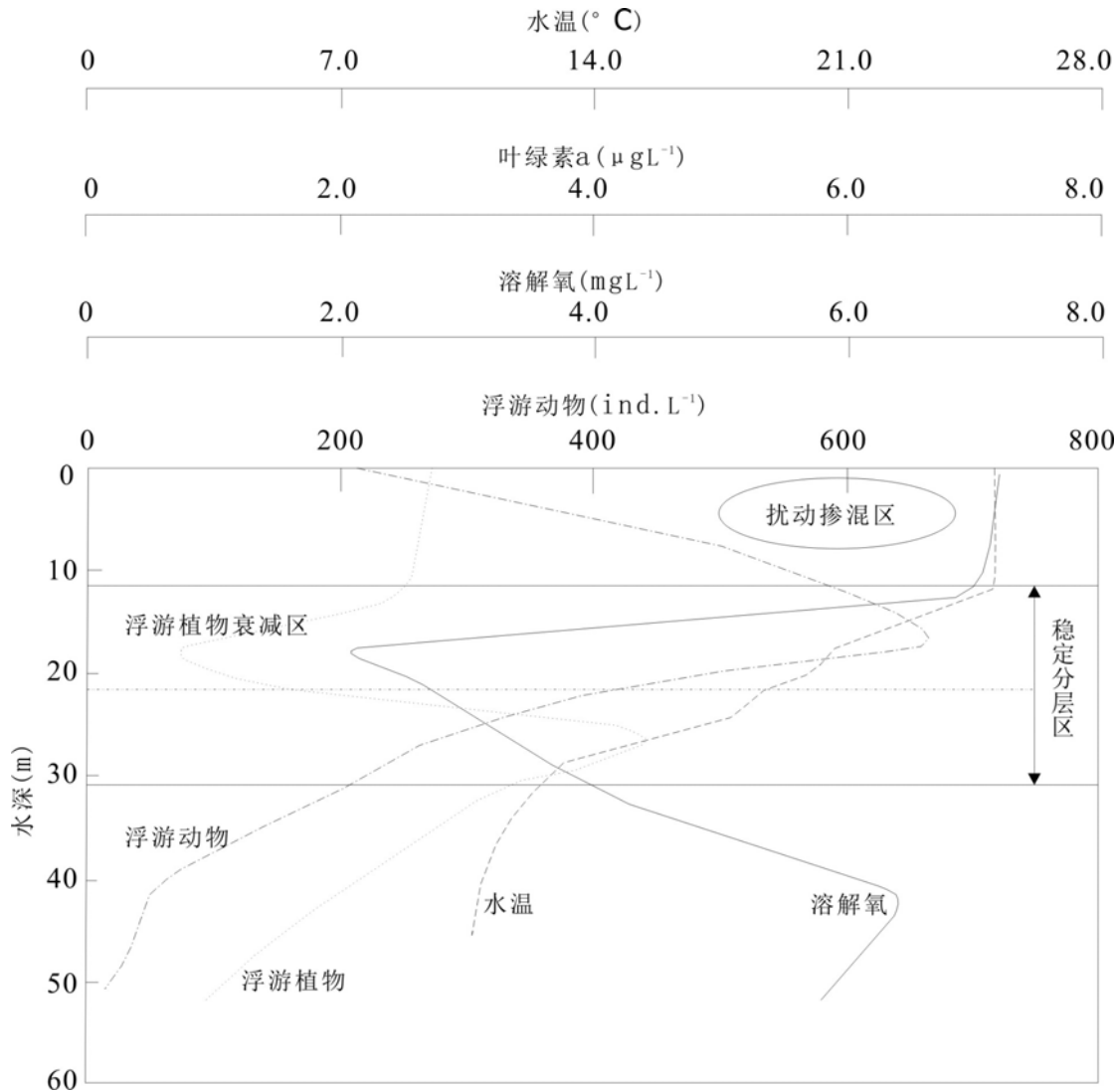
因此，油页岩与煤、蒸发盐伴生的较普遍的现象否定了页岩发育于深水环境。

1.4 初级生产力与固碳速率不支持深水环境富集有机质

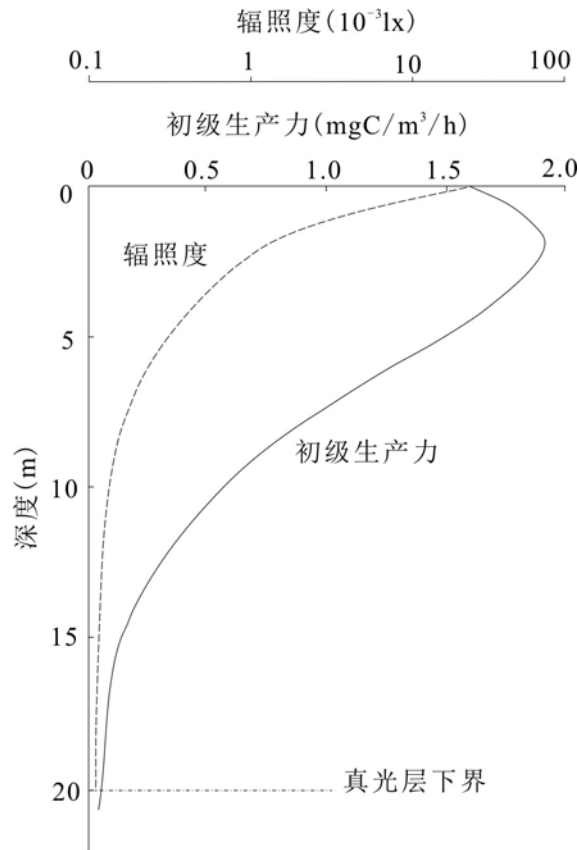
初级生产力对于最终的碳储影响较大，它决定了次级生产力、碳汇速率和碳储（固碳）速率等，这一过程包含生产、消耗、分解、运移、存贮。当生产力远大于分解、消耗时，则有可能富有机质；而生产力低时，即使是强还原环境，仍不可能富集有机质。在陆地上，唯一能在一定氧化条件下富集有机质的，只有带一定潮湿度的沼泽环境，其有机质分解速度远低于生产速度，泥炭富集，即碳汇，在消耗一定有机质后，形成碳储，最终变质成煤。Jun 等 (2022) [32]通过实验研究认为，博格达山脉北麓地区的油页岩的主要有机质丰度受湖泊生产力的控制，生物的保存条件对油页岩质量影响不大；Calvert 等(1993) [6]认为高生产率是主导因素。为此，本文对初级生产力等多种过程在垂向和平面上的特征进行了分析。

1.4.1 初级生产力与固碳的垂向特征

湖泊中的初级生产力与水温、光线强度、溶解氧、叶绿素浓度等成正比。溶解氧在 10-20 m 湖水深度处将降低至浅层水的 1/3-1/4，几乎等于缺氧状态，属浮游植物衰减区，30 m 以下，浮游植物含量单调下降（如图 7a 所示）；叶绿素受溶解氧、光线强弱的影响较大，叶绿素浓度随深度呈指数下降趋势，水深 0 m 约为 45 $\mu\text{g/L}$ ，10 m 处约为 15 $\mu\text{g/L}$ ，50 m 处约仅为 5 $\mu\text{g/L}$ （吴锋等，2012）^[62]。俞焰等(2017)^[68]研究了千岛湖东南部新安江大坝附近的水环境，温度、溶解氧、浮游植物和浮游动物，水温从湖面的 25 $^{\circ}\text{C}$ 迅速降至水深 40 m 处的 10 $^{\circ}\text{C}$ ；浮游动物在 10-20 m 有一个高峰，之后单调下降，在 50 m 深处，几乎绝迹。



(a)



(b)

图 7 湖泊溶解氧和初级生产力随水体深度的变化

(a) 湖泊溶解氧与相关因子垂向分布; (b) 初级生产力

Fig. 7 Vertical distribution model of dissolved oxygen and related factors in Qiandao Lake area
 (a) Vertical distribution of dissolved oxygen and related factors in lakes; (b) Primary productivity
 据俞焰等(2017)^[68]及费尊乐(1988)^[13]

据其垂向分布规律，可以计算湖泊初级生产力，高峰在水深 15 m 左右(Tait, 1981)^[55]，超过补偿深度（约 50 m）之下就没有净生产力了，只有消耗，没有生产，如图 7b 所示。

水体中的有机碳包含溶解有机碳(DOC)和颗粒有机碳(POC)，其中，对固碳有贡献的是沉降至湖底或海底的 POC（也称沉积通量）。在真光层浮游植物通过光合作用生产了大量的 POC，在 POC 向下沉降过程中，随着深度的增加，不断地被浮游动物摄食和微生物分解（Boyd 和 Newton, 1999）^[5]。Benjamin 等(2002)^[4]在热带太平洋东北部使用小的圆柱形沉积物捕捉器所获得的 POC 在不同深度的通量发现，在 130 m 水层，POC 的通量为 $(123.6 \pm 94.8) \text{ mgCm}^{-2}\text{d}^{-1}$ ，在 480m 其通量下降为 $(44.4 \pm 7.2) \text{ mgCm}^{-2}\text{d}^{-1}$ ，下降了近 1/3，所以，迄今为止，没能在海水深度 >4 km 的远洋洋壳上发现油田，也缘于此。国际大洋发现计划(IODP)对大洋洋壳进行了大量钻探，同时也对烃类进行检测，但含烃量均较小，属于痕量级别，如第 351 航次在西太平洋菲律宾海东部 4700 m 水深的 U1438 号场地钻

探 1461 m 厚的沉积物，样品中的甲烷浓度均较低，平均为 2.35 ppm (Arculus 等, 2015) [1]; 344 航次在北美南部太平洋水深 2km 处钻探中，沉积物总有机碳 TOC 含量为 4-9 ppm (Baxter 等, 2013) [3], 远小于有效烃岩源的门槛值 (>2000 - 4000 ppm)。

因此，是否是深水、深海还原环境，并不重要；浅水水体中的 POC 能快速沉降到湖底，即使不是强还原环境，仍有碳储。从图 7a 可以看出，在水深 15 m 左右会出现一个溶解氧的“黑障区”或称氧跃层-浮游植物衰减区，该区域溶解氧只有 2 mg/L，为水面至 10 m 深 7 mg/L 的 1/3；抚仙湖 20 m-30 m 水深溶解氧最低 4.5 mg/L，而 40-140 m 则缓慢增加至 6.4 mg/L(周天旭等, 2022) [77]；而海洋环境在 1000 m 深度溶解氧最低值为 2-3 mg/L(李鹤等, 2017) [36]。

综上，初级生产力和固碳速率的垂向特征否定了深湖-半深湖环境更有利于有机质的富集的说法；水体越深就一定处于更强的还原环境是错误认识，在 15 m-20 m 水深处才是溶解氧最少的强还原环境，较浅的水体是陆相湖盆有机质生产和保存的必要条件。

1.4.2 初级生产力与固碳的平面特征

在平面上，也因环境不同，初级生产力差异较大。陆地及沼泽环境平均达到 780 g/(m²y)，其中热带森林地区可达 2000-3000 g/(m²y)，但陆地除沼泽外，均在强氧化条件下，不利于有机质保存，而湖泊、海洋的初级生产力只有 147 g/(m²y)。太湖北部和东南的湖湾地区的生产力，是广大的开阔湖面的 2-10 倍，均值在 4 倍以上 (张运林等, 2008) [73]，如图 8 所示；我国海区凹岸靠岸一侧浅水区(深度 <50 m)的生产力，比水深大于 120 m 的海域的生产力大 10 倍以上。Sugimura 和 Suzuki(1988) [53]研究了我国东部及日本南部海域的溶解有机碳分布得出，溶解有机碳 DOC 在远洋低，近海 484 μM，远洋 188 μM，这说明水体的有机质主要来源于陆地。

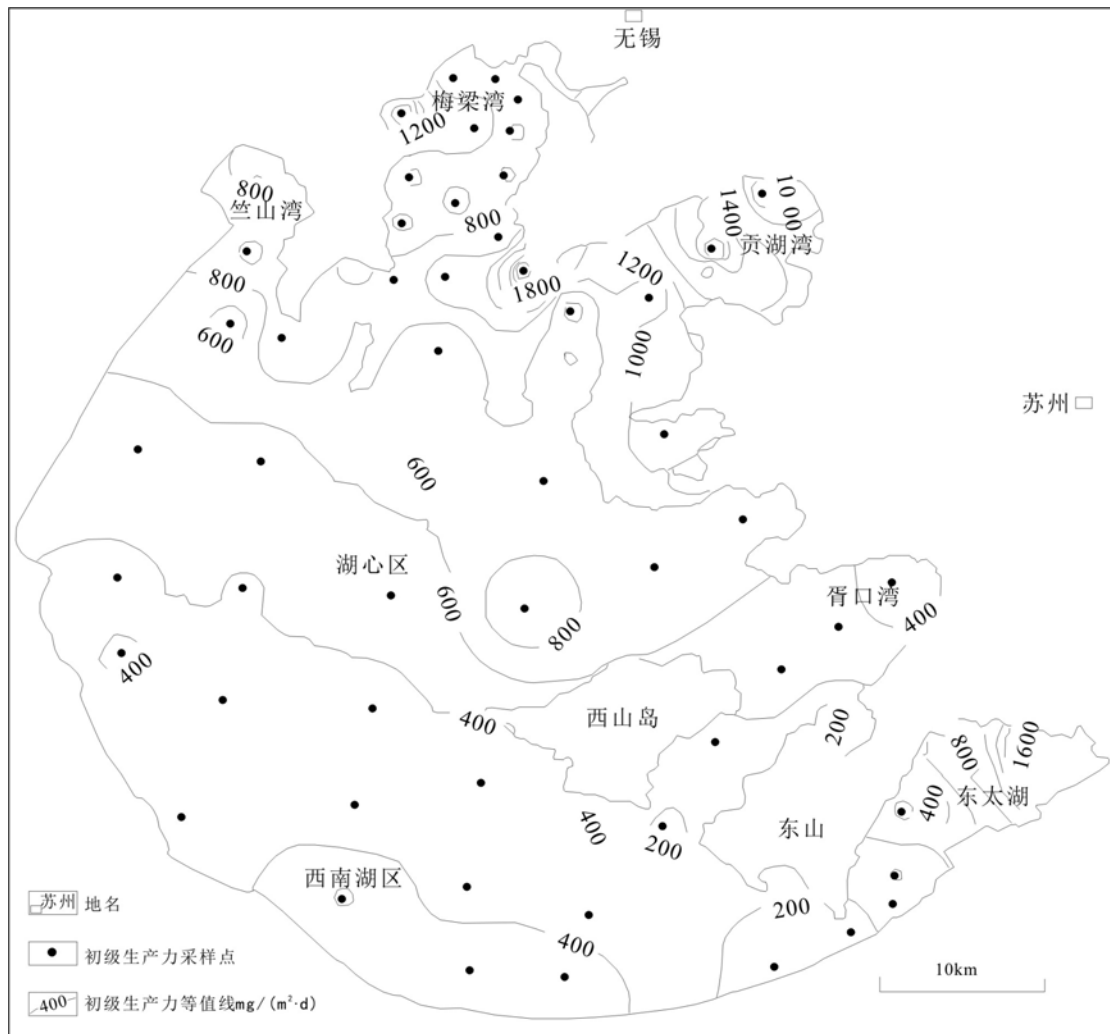


图 8 太湖初级生产力空间分布(单位 $\text{mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$)

Fig. 8 Spatial distribution of primary productivity in Taihu Lake

据张运林(2008)^[73]修改

有了高的生产力，按比例就会有高的固碳能力。在固碳方面，本文统计了我国主要湖泊水体固碳（碳汇）能力与温度、湖泊面积的关系（资料取自段晓男等，2008）^[12]。固碳速率为考虑了氧化分解因素的结余有机质，如图 9 和表 1 所示，发现湖泊水体年平均气温越高、面积越小的湖泊，固碳速率越高，而冷的环境固碳能力低，相差 25 倍。面积越大，湖面越开阔，固碳速率低，高低数值相差 5 倍，其本质是面积越大，陆源有机碎屑供给少，而面积越小，湖泊弯曲度大的区域，接受陆源有机质也多，因而固碳速率越高；另一个原因是，湖盆中心深湖-半深湖地区的开阔湖面，表层水体受波浪作用（非低能环境），浅层水体的有机质在形成与沉降过程中被大量分解，因而固碳速率不大。因此，用排除法，在低能环境中，只剩下湖湾亚相最有可能富含有机质了。

表 1 我国主要湖泊固碳速度与年平均气温、湖泊面积的关系表

Table 1 Relationship between carbon fixation rate of main lakes and annual average temperature and lake area

湖泊名	固碳速率 ($\text{gm}^{-2}\text{a}^{-1}$)	水深 (m)	海拔 (m)	年平均 气温($^{\circ}\text{C}$)	面积 (km^2)
独山湖	63.71	1.50	32	15	144.61
微山湖	24.91	3.00	32	15	660
洪湖	29.81	1.35	25	16.6	350
巢湖	40.78	2.89	15	16	780
太湖	16.82	1.90	62	17.1	2427.8
东湖	129.36	6.00	20	17.7	31.75
乌梁素海	48.84	1.00	1021	8.2	300
岱海	30.33	7.00	1220	8	70
青海湖	22.95	21.00	3196	1.2	4625.6
呼伦湖	45.43	5.70	545.59	-0.1	2339
红碱淖	20.45	15.00	1242	8.9	31.51
安固里淖	32.21	3.00	1312	2.8	47.6
滇池	35.43	5.00	1886	14.7	330
泸沽湖	6.6	40.30	2690	9.5	50.1
程海	34.8	25.74	1622	17.6	78.8
洱海	3.48	10.50	1972	15.7	246
洞错	6.47	68.70	4396	0	87.7
苟鲁错	5.6	1.30	4666	-5	23.5
色林错	3.85	33.00	4530	-6	2391
希门错	10.47	40.00	4020	-2	50
清水河	5.12	15.00	4480	-6.2	689
小月亮泡	5.47	4.70	125	4.3	205

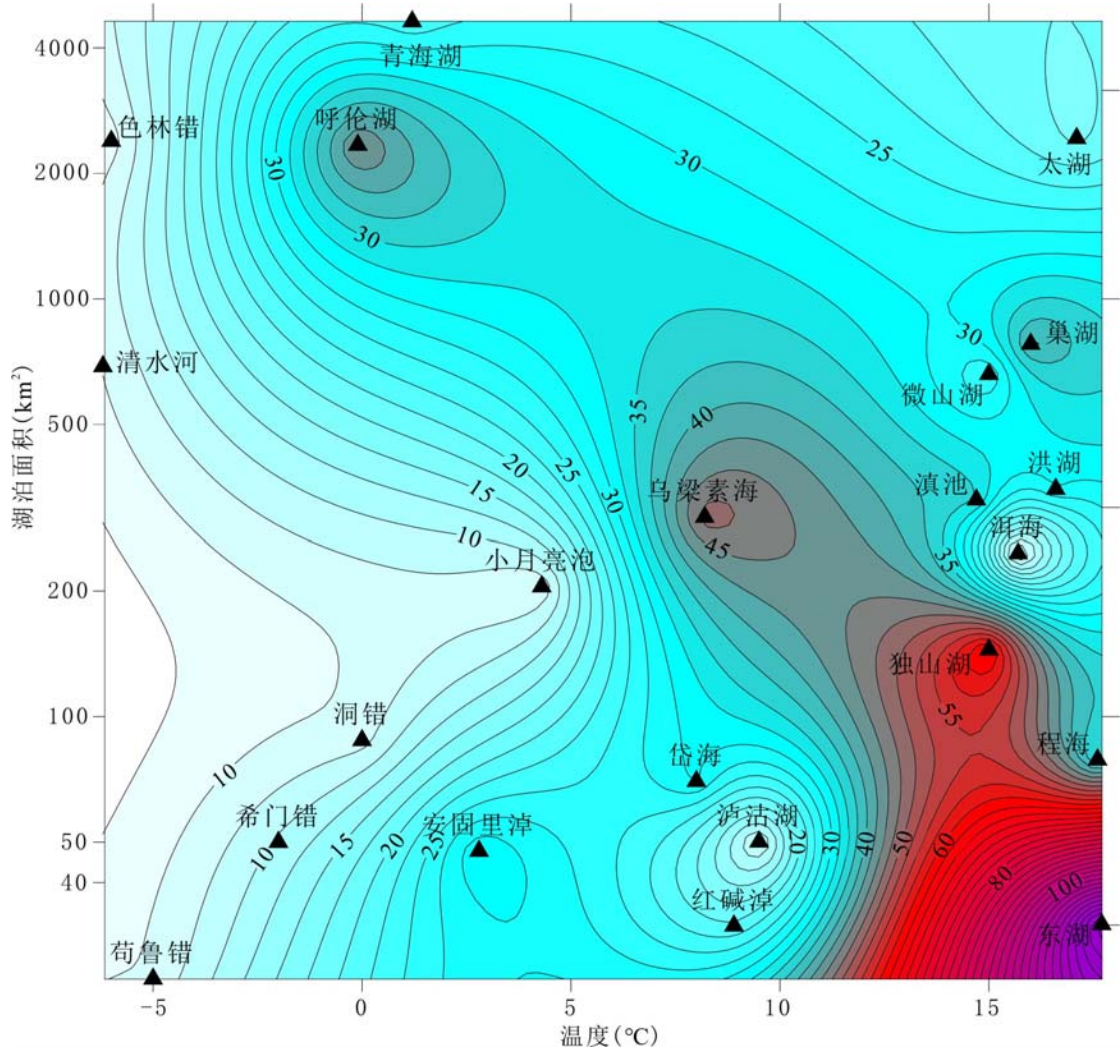


图 9 我国主要湖泊水体固碳速率与温度、湖泊面积的关系平面图 (单位: $gm^{-2}a^{-1}$)

Fig. 9 Plan of the relationship between carbon sequestration rate, temperature and Lake area of major lakes in China (unit: $gm^{-2}a^{-1}$)

1.5 有机质类型

前述推论可能存在一个疑问,如果是浅水环境,那么页岩中的有机质应该是 III 型或 II 型为主,那如何解释很多页岩层是 I 型的?这其实是个误解。为此,本文统计了我国主要陆相湖盆页岩地层有机质类型及含气量统计表,如表 2 所示。从表中看出,陆相页岩有机质类型为 I 型的并不多,主要是 III 型和 II 型。即,从页岩层有机质类型上看,和本次研究所提出的观点并不矛盾。

表中有 3 个地区陆相页岩有机质类型为 I 型,具体情况如下。(1)松辽盆地青一段,发育大量介形虫、叶肢介及植物碎屑化石(林铁锋, 2021)^[40]、介形虫和壳类化石(郑国栋等, 2020)^[75]。叶肢介化石、植物碎屑化石这些均指向浅水封闭环境。(2)济阳拗陷,沙一段和沙三下段为 I 型,其中沙一段大量发育遗迹化

石, 为无脊椎动物线虫、节肢动物、环节动物和腹足类等形成的牧食迹和进食迹, 发育于富氧的低能湖泊, 环境的细粒软底沉积物中, 代表稳定的环境条件, 通常沉积速率较低 (施振生等, 2005) [52]。低能、稳定环境不能是开阔湖区, 富氧指示为浅水环境。(3)泌阳凹陷核桃园组, 发育大量遗迹化石含 5 个遗迹组合: 稍有覆水并周期性暴露的低能滨湖环境; 湖泊中上临滨环境; 与低能浅湖环境有关; 浅湖的远源风暴沉积; 贫氧的深水环境 (齐永安等, 2007) [50], 前 4 个组合均为浅水环境。

表 2 我国主要陆相页岩地层有机质类型及含气量统计表

Table 2 Statistical table of organic matter types and gas content in continental shale formations

盆地	层位	含气量 (m ³ /t)	有机质类型
鄂尔多斯盆地	长 7	1.60~4.95	II
	长 9		II
松辽盆地	松辽盆地青一段		I-II
	营一段	0-4.5/2.0	II ₁ -II ₂
	松辽盆地青二、三段		II
济阳拗陷	济阳拗陷沙一段		I-II ₁
	济阳拗陷沙三下亚段		I-II ₁
	济阳拗陷沙四上亚段		II ₁
辽河拗陷	辽河拗陷沙三段	2.74~5.58/4.37	II ₁
四川盆地	侏罗系自流井组	1.35-1.66	腐泥型, 腐殖-腐泥型
	大安寨二亚段	0.78-5.8/4.31	II ₂
	千佛崖组二段	0.68-5.69/3.53	II ₁ 、II ₂
	东岳庙段	0.47-4.82/2.27	II、III
	须家河三段	0.98-41.81/11.31	II ₂ 、III
	川东北地区大安寨段	0.87-1.98/1.49	II ₂ 、III
	川西拗陷	1.37	III 型, 少量 II ₂ 型
	川北川东北川中一带	1.28	III 型, 少量 II ₂ 型
	川东北地区大安寨段	0.87~1.98/1.49	II ₂ 或 III 型
	阜新盆地	沙海组和九佛堂组	0.5-2.5
阜新组		1.5	III 型
南襄盆地	泌阳凹陷下侏罗统	1.35-1.66	混合-腐殖
	泌阳凹陷核桃园组	2.5~6.1	I-II ₁

1.6 地球化学证据

为了说明黑色页岩来自于深湖环境, 目前主要用铁锰含量比例作为主要依据并认为该比值越小, 水体越深, 已应用于多个盆地(李浩等, 2017; 张永生等, 2003; 王春连等, 2012) [35,74,57]。事实上, 这些认识主要来源于刘平略等 (1986) [42] 和邓宏文 (1993) [9] 的成果, 前者只是提到了浅湖和半深湖锰/铁比例偏高, 未提到深湖亚相; 而后者认为, Mn 在半咸水-咸水的间歇性闭塞-半封闭湖相泥质岩中含量

最高,故 Fe/Mn 可以作为离岸距离(或水深)的标志,Fe/Mn 数值最小时是封闭、半封闭的湖湾环境,而未明确指出一定是深湖环境。松南伏龙泉 SL3 井沙二段页岩层的 Fe/Mn 数值在所有层系中最小(李浩等,2017)^[35],反映它处于封闭的环境,或咸化环境。即,地球化学证据说明了 SL3 井页岩是水体较封闭的环境。其它地化指标,如 Mo、Pr/Ph、Th、U、Th/U、Rb/K 等可以反映水体的氧化还原环境,间接反映溶解氧的含量,而溶解氧随水体深度增加不是单调降低,因而目前没有较好的地化指标能直接反映出水体深浅。

通过上面 6 大证据,可以明确地提出,几乎所有陆相页岩富有机质层段,均发育于这种浅水湖湾等局限环境,局限环境是有机质富集的充分条件。

2 页岩气富集规律的验证

本文利用上面的思路,研究了松辽盆地几个断陷及鄂尔多斯南部陆相页岩层中有机质富集规律,验证了富有机质页岩发育于湖湾环境的结论。

2.1 松辽盆地南部梨树断陷

松南梨树断陷以下白垩统营城子组一段和底部沙河子组二段为主力烃源岩,发育黑色泥页岩、深灰色泥岩,富含叶肢介化石,干酪根类型为 II 型、III 型,营城子组一段内部可见大量的叶肢介化石及高等植物残片分布(倪冬梅,2021)^[47],如图 10a,b 所示,为梨树断陷西北部苏家屯地区 L1 井营一段所观察到的叶肢介化石。苏家屯地区相对于整个梨树断陷而言,在早白垩世是一个半封闭的湖湾环境,被苏家屯东部北东-南西向的古隆起分隔成一个宽度 5-6km 的半封闭湖湾(如图 11 所示),并富含有机质。从图 11 沙河子组二段 TOC 平面分布图来看,东部的 L2 井也为半封闭湖湾环境,该井也有较好的页岩气显示,发育浅水环境的叶肢介化石(图 10c)。从图中还可看出,梨树断陷南部 S1 井区,东北部的 S167, S119, N2 井区各自形成封闭或半封闭的湖湾,并富含有机质,垂向运移到营城子组顶部砂体形成常规油气藏金山气田、十屋油田、七棵树油田及双龙油田。

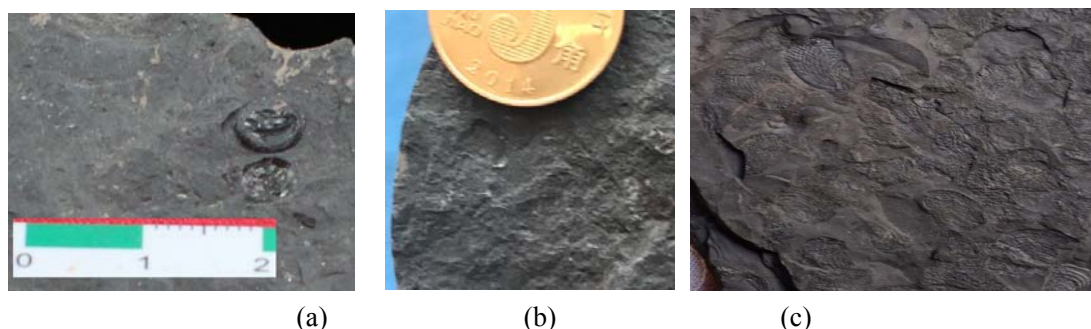


图 10 梨树断陷下白垩统营一段叶肢介化石

(a) L2 井,3165.67m; (b)L2 井, 3146.21m; (c) L1 井,3241.15m

Fig. 10 Leptopoda fossils from Ying-1 Member of Lower Cretaceous in Lishu Fault Depression
(a) Well L2, 3165.67m; (b) Well L2, 3146.21m; (c) Well L1, 3241.15m

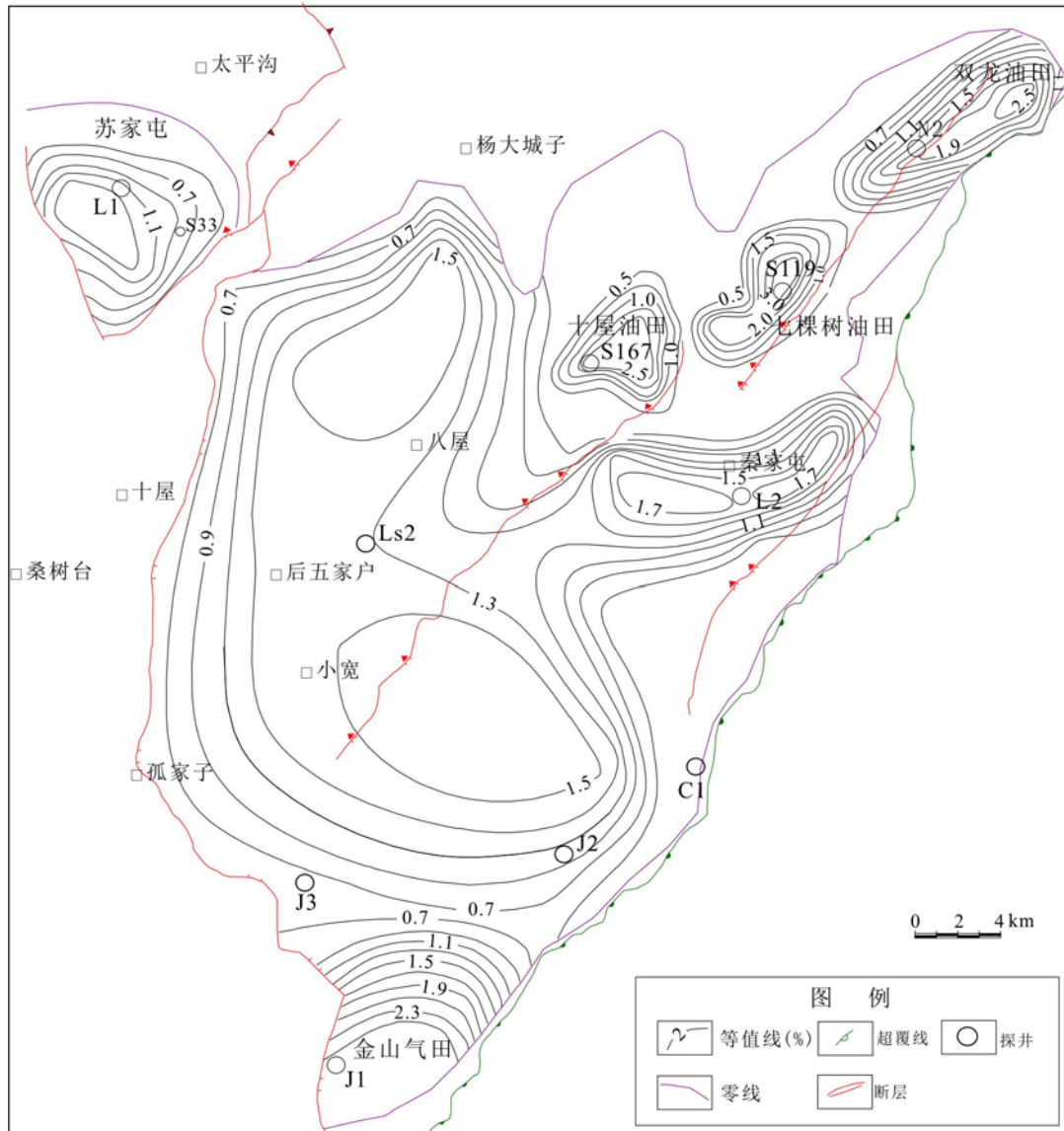
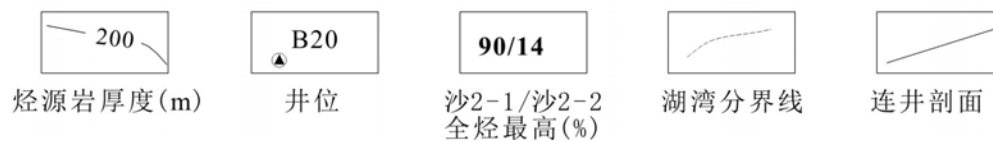
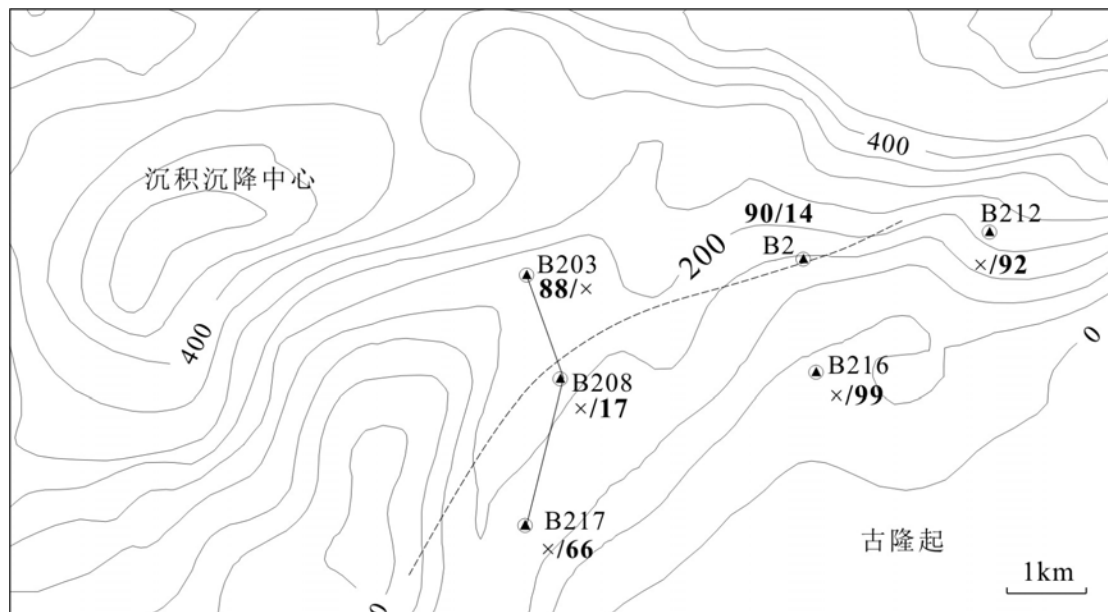


图 11 松辽盆地南部梨树断陷沙河子组二段烃源岩 TOC 分布平面图

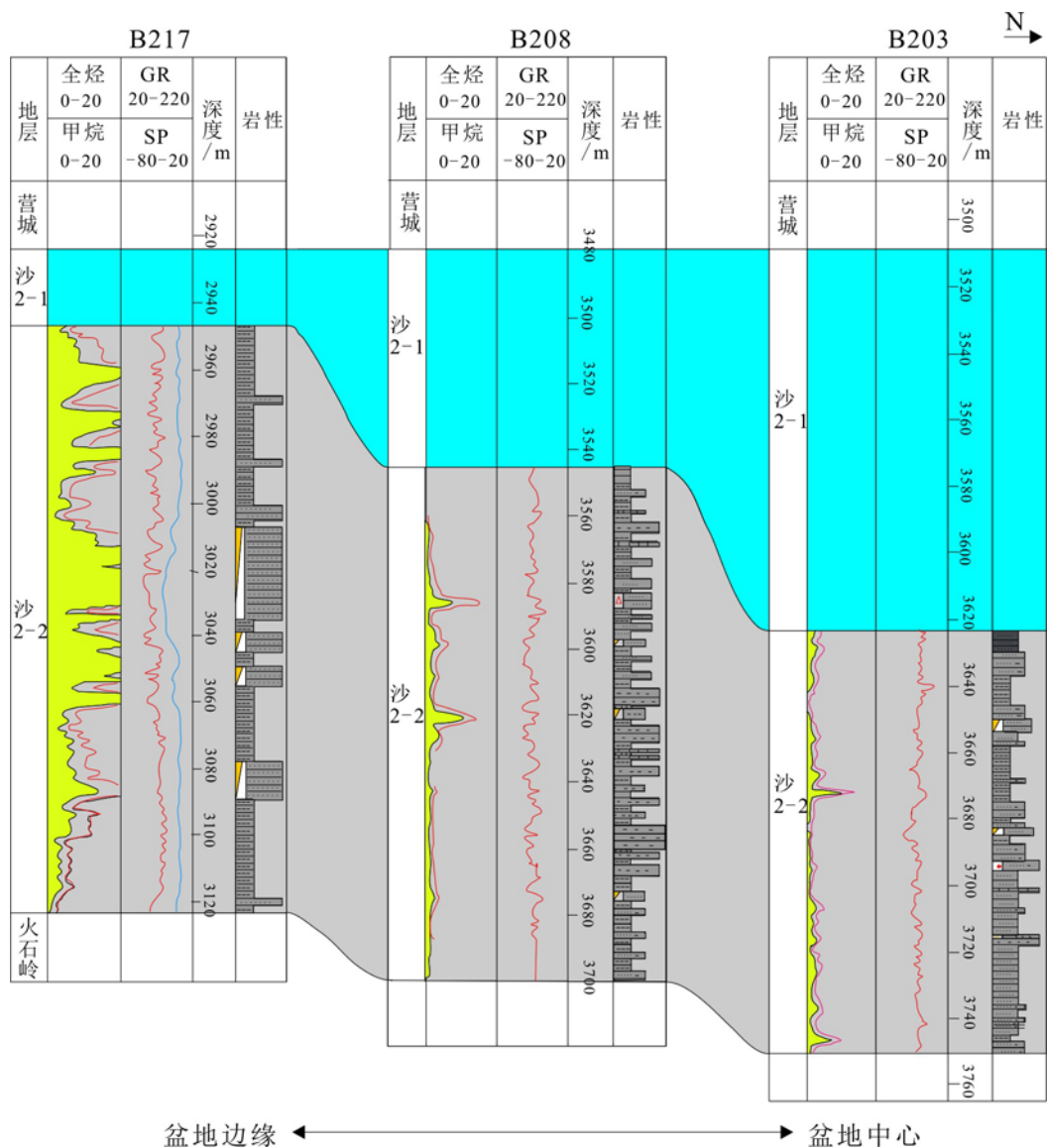
Fig.11 Total organic carbon (Toc) distribution of source rocks in the second member of Shahezi formation in Lishu fault depression, southern Songliao basin

2.2 龙凤山断陷

离梨树断陷不远同属于松南断陷的龙凤山地区沙河子组页岩也发育代表浅水环境的叶肢介化石, 有机质丰度与沉积中心的关系如图 12a 所示。更靠近湖盆地中心的 B203, B208 井的沙 2-2 段为含多套砂泥互层, 如图 12b 所示, 其中砂体并非滑塌沉积, 而是从西南侧翼进积过来的三角洲前缘或前三角洲, 这种快速的物源供给, 会使其中的泥岩有机碳含量偏低; 而其东南部靠近湖盆地边缘的 B217、B216、B212 井, 发育厚层富有机质的页岩层, 显然它与北部的深湖-半深湖地区不同, 是一个半封闭的湖湾, 为浅水低能环境。如前所述与之相邻的伏龙泉地区 SL3 井的沙二段页岩的 Fe/Mn 数值较小, 代表了其环境为半封闭的湖湾而非深湖环境。



(a)



(b)

图 12 松南龙凤山断陷沙 2-1/沙 2-2 段全烃与沉积中心的关系
 龙凤山断陷烃源岩厚度平面图; (b)B217-B208-B203 连井剖面

Fig. 12 Relationship between total hydrocarbon and sedimentary center of Sha2-1/Sha2-2 members in Longfengshan fault depression, Songnan

(a) Thickness plan of source rock in Longfengshan fault depression; (b) B217-B208-B203 Well Tie Profile.

2.3 齐家古龙凹陷油页岩

大庆西部的齐家-古龙凹陷青山口组产页岩油，其中，青一段、青二段发育厚层油页岩，青二段下部到青一段整体含油，干酪根类型为 I 型，目前几乎一致认为它为深湖相沉积（孙龙德等，2021；崔宝文等，2021；林铁锋等，2021）^[54,7,40]。表面上看，从青一段到青三段整体上向上为一个粒度变粗的过程，但也是水体变深的过程，具体证据如下：

(1)青山口组 TOC 分布与沉积中心不一致。高 TOC 分布范围在安达以东至

肇东、肇源等盆地边缘较浅的地区，远离大庆以东，大安以东，双城西的沉积中心（崔宝文, 2021）^[7]。

(2)泰康北的青二、青三段海绿石发育(邢顺淦等, 1985)^[64]，指示为深水环境。海绿石发育于开阔的深水湖泊环境，如在抚仙湖现代沉积物中，海绿石分布在 35-150m 的湖底表层(王云飞,1983)^[60]，位于深湖半深湖。青一段没有海绿石发育。

(3)硅质页岩富铀，黏土页岩贫铀(杨洋等, 2021)^[67]。由三角洲进积而快速充填（淤浅）的深湖则为硅质含量高的岩石，缺有机质，但富铀，而湖湾地区为黏土页岩，TOC 高，但贫铀。如松辽盆地西南部白垩系姚家组的暗色泥岩含铀高达 299ppm，TOC<0.4%(江文剑等, 2022)^[27]，并它并非烃源岩；青二、青三段含硅质，相对富铀（卢胜军, 2022）^[45]，而青一段则贫铀，TOC 高。

(4)青一段类型是 I 型，但发育大量介形虫、叶肢介及植物碎屑化石（林铁锋, 2021），这些均为浅水环境的证据。从前述生态学角度看，对于滞水（局限）湖湾环境，水深 0-20 m 的初级生产力最高，在这样的浅水环境可以发育 I 型有机质并保存下来。

(5)从齐家-古龙凹陷西部高有机质页岩发育剖面看，靠近湖盆西部边缘厚度大，而越靠近湖盆中心厚度小（陆军,2017）^[44]，具有典型的马尾模式。

(6)青一段为 I 型干酪根并不代表它一定需要处于深湖强还原环境。SL-1 井青一段页岩地化指标 Mo 含量、Pr/Ph 值等显示其沉积环境为弱还原-氧化环境(王岚等, 2019)^[59]。从前述水体中溶解氧的垂向分布看(图 7)，在浅水湖湾环境下从强还原环境到氧化环境均可出现，因此，并不是说浅水湖湾一定是氧化环境而不利于有机质保存。

2.4 鄂尔多斯盆地南部

鄂尔多斯盆地南部三叠系延长组长 7 油页岩发育叶肢介化石，属浅水湖湾亚相环境(拜文华等, 2010)^[2]。如图 13 所示，坡折带以下的深湖地区，化石少，油页岩薄；而坡折带之上的浅水地区，化石丰富，含叶肢介等双壳类化石，油页岩单层厚度大，如图 14d 所示，也同样具有马尾模式。本文通过小尺度的埋藏史恢复，按层序等时线精细计算，发现这里所指的坡折带只是按现今构造形态来定义的，在页岩层发育期，这个斜坡带右侧有一个局部负地形，且长期发育，和前述湖湾古地貌一致（图 14a-14d）。里 1 与庙 37 井之间的砂体应是分隔深湖与湖湾的屏障（前人解释为浊积砂），即此处并非坡折带，而是湖中低凸或坝隔离了主体湖泊。

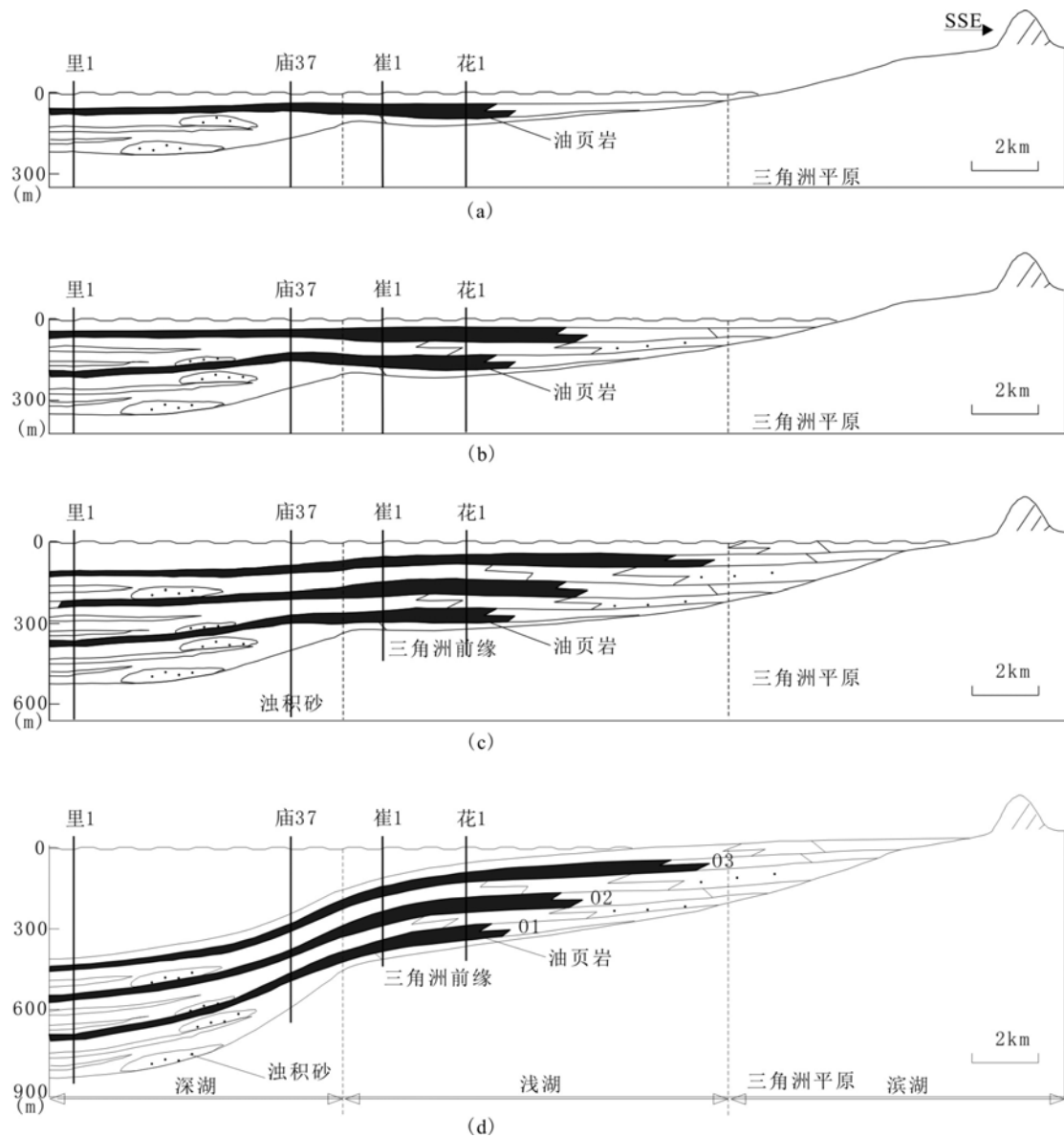


图 13 鄂尔多斯盆地南部三叠系延长组长 7 油页岩对比及构造发育剖面图
 (a) 油页岩 T₃Y₃¹⁻¹ 沉积末; (b) T₃Y₃¹⁻² 沉积末; (c) T₃Y₃¹⁻³ 沉积末;
 (d) 长 7 段沉积末

Fig. 13 Triassic Yanchang 7 oil shale correlation and structural development profile in southern Ordos Basin

(a) Oil shale O1 sedimentary end; (b) O2 water deposition end; (c) O3 sedimentary end; (d) The end of deposition of Chang 7 member

3 结果与结论

据以上分析, 得出以下结果。

(1) 页岩中的化石及有机质类型支持陆相页岩层发育于浅水湖湾环境。大量发育的指相性化石叶肢介表明水体极浅, 其最适宜的深度仅 20 cm; 有机质类型主要为 II 型和 III 型, 化石中含植物碎屑表明存在大量陆源有机质供给。

(2)初级生产力和固碳速率在浅水环境远大于在深水环境，且越靠近陆地一侧越高；煤的成矿模式说明了当初级生产力远大于有机质分解的速度时，烃源岩是否处于氧化还原环境并不重要。水体越深就一定处于更强还原环境是错误认识，在0 m-20 m的浅水湖湾环境，氧化-弱还原-还原-强还原环境均有可能出现。

(3)页岩与煤、蒸发盐岩不是截然不同的沉积环境，在很多盆地都有共生互层关系，是环境的渐变而不是突变接触；页岩油气与煤有相似的成矿模式，均具有马尾模式，向陆地一侧厚，越向盆地中心越薄，均证明了与陆地一侧浅水环境有关，也说明了页岩层的发育和煤一样，具有浅水、封闭-半封闭环境的指示层。

据此得出以下结论：

(1)最大湖泛期的凝缩段(密集段)为贫有机质段。

(2)陆相页岩层有机质最富集的层段发育于湖湾、沼泽等封闭-半封闭水体；每一套页岩油气层的发育意味着盆地此时处于浅水环境，和煤一样，是一个水体深度或环境指示标志。盆地真正的深水区多数情况下是被不含或贫有机质的细砂、泥质等陆源碎屑所充填，故不能完全以粒度大小区分沉积环境。

(3)页岩气富集的必要条件是位于较浅的水体，而充分条件是水体为封闭或半封闭的环境。

(4)梨树断陷、龙凤山断陷等大量实例说明了本文观点具有普适性。

该认识对于我国陆相页岩油气勘探具有重要的意义，可以很具体地指出页岩油气甜点。建议在陆相盆地的“斜坡”带上，经精细小尺度埋藏史分析，以浅水、局限水体环境为线索，寻找可能存在的古湖湾、间湾、沼泽等滞水环境，作为陆相页岩油气勘探的首选目标；在页岩油气资源评价中，也应将水体深度及封闭性作为重要指标。

致谢：感谢中石化东北分公司及中石化无锡石油实验地质研究所提供了资料支撑，感谢论文评审专家给出了很详细、很具体的修改意见，也感谢中国地质大学（北京）张金川、肖建新等教授，中国石油勘探开发研究院刘银河教授提供了很好的修改意见。

References

- [1] Arculus, R. J., Ishizuka, O., Bogus, K., et al., 2015. Expedition 351 summary. *Proceedings of the International Ocean Discovery Program Volume 351*, 1-26.
- [2] Bai, W.H., Wu, Y.B., Gao, Z.L., et al., 2010. Study on the Mechanism of Oil Shale Minerogenetic Enrichment in the Arm of Shallow to Half-deep Lake Depositional Environment. *Geological survey and research*, 33(3): 207-214.
- [3] Baxter, A. T., Burkett, A. M., Charpentier, D., et al., 2013. Expedition 344 summary. *Proceedings of the International Ocean Discovery Program Volume 344*, 1-26.
- [4] Benjamin, A. S. V. M., Richard, G. K., Allan, H. D., 2002. Impact suboxia on sinking particulate organic carbon: Enhanced Carbon flux and preferential degradation of amino acids via denitrification. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 66: 457~465.
- [5] Boyd, P. W. and Newton, P. P., 1999. Does planktonic community structure determine downward particulate organic carbon flux in different oceanic provinces? *Deep Sea Research I*, 46: 63~91.
- [6] Calvert, S. E., Pedersen, T. F., 1993. Geochemistry of recent oxic and anoxic marine sediments: Implications for the geological record[J]. *Marine Geology*, 113(1/2): 67-88.

- [7] Cui,B.W., Zhang,S., Fu,X.L., et al., 2021. Organic sequence stratigraphic division and its influencing factors'analyses for Gulong shale in Songliao Basin. *Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing*, 15(2): 109-114.
- [8] Deng, C. L., Chen, K. R., 1963. Application and interpretation of petrochemical data in postgraduate oil layers[J], *Abstract of Petroleum Geology Experiment*, 3: 21-27.
- [9] Deng,H.W., 1993. Sedimentary geochemistry and environmental analysis. *Lanzhou: Gansu Science and Technology Press*, 111-115.
- [10] Dickinson, W. R., 1976. Plate tectonic evolution of sedimentary basin//Dickinson W R, Yarborough H.Plate Tectonics and Hydrocarbon Accumulation. *Tulsa: AAPG Continuing Education Course Note Series*, 1:1-63.
- [11] Ding, C., Sun, P. C., Rexiti, Y.L.K., et al., 2021. Classification and Genesis of Fine Grained Sedimentary Rocks of Qingshankou Formation in Songliao Basin. *Xinjiang petroleum geology*, 42(4): 418-427.
- [12] Duan,X.N., Wang,X.K., Lu,F., et al., 2008. Carbon sequestration and its potential by wetland ecosystems in China. *Acta Ecologica Sinica*, 28(2) : 463-469.
- [13] Fei,Z.L., Mao,X. H., Zhu,M.Y., et al., 1988. Studies on the productivity of the Bohai sea II . estimation of primary productivity and potential fishing yield. *Acta Oceanologica Sinica*, 10(4): 481-489.
- [14] Fu,C., Ding,H., Chen,W.M., 2021. Resources distribution and comprehensive utilization of oil shale and coal symbiosis in China. *Coal Quality Technology*, 2021, 36 (3) : 1—13.
- [15] Gao,G, Xiang,B.L., Li,T.T., et al., 2017. Tight Oil System Particularity of Lucaogou Formation in Jimusaer Sag, Junggar Basin. *Acta Sedimentologica Sinica*, 35(4):824-833.
- [16] Gemaison, G. J., Moore, G. T., 1980. Anoxic environments and oil source bed genesis[J]. *AAPG Bulletin*, 64: 1179-1209.
- [17] Gu,J.Y., Guo,B.C., Zhang,X.Y., 2005. Sequence stratigraphic framework and model of the continental basins in China. *Petroleum exploration and development*, 32(5): 11-15.
- [18] Guo,B., Shao,L.Y., Ma,S.M., et al., 2017. Coal–accumulating and coal-forming patterns within sequence stratigraphy framework of Early Cretaceous in Hailar basins. *Coal geology & exploration*, 45(1): 14–19.
- [19] Guo,M., Zhu,J.W., Gong,Q.H., et al., 2006. Sedimentary Characteristic and Formation Environment of Oil Shale in Danzhou,Hainan Province. *Journal of Jilin University(Earth Science Edition)*, 36(6): 959-962.
- [20] He, J. L., Chen, Z. H., Dong, D. Z., et al., 2022. The evolution of sedimentary environments of Dongyuemiao Member and key factors for enrichment of shale oil and gas, northeastern Sichuan Basin. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 42(3):385–397.
- [21] Hou,G.F., Ni,C., Chen,W., et al., 2017. Sedimentary Characteristics and Factors Controlling the Shell Beach in the Da'anzhai Member of the Central Sichuan Basin[J]. *Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition)*, 39(1): 25–34.
- [22] Hu,J.Y., Huang,D.F., Xu,S.B., et al., 1991. Theoretical basis of continental petroleum geology in China. *Beijing: Petroleum Industry Press*, 173.
- [23] Huang,D., Duan,Y., Li,Y.C., et al., 2018. Study on the TOC lower limit of shale oil and gas of freshwater lake facies:a case study on the Jurassic Da'anzhai member in the Sichuan Basin. *China petroleum exploration*, 23(6): 38-45.
- [24] Huang,T.D., Wang,P., Li,H., et al., 2011. The analysis of heterotopic formation about

- extremely-thick coal seam in shaerhu coalfield. *Xinjiang geology*, 29(3): 324-326.
- [25] Jiang, Z.X., Zhao, C.L., Xiong, J.H., 1989. Isoabyssal rocks of the Middle and Lower Silurian in Anhui and their geological significance [J]. *Chinese Science Bulletin*, 34(20): 1575-1576.
- [26] Jiang, S., Tang, X.L., Steve Osborne, et al., 2017. Enrichment Factors and Current Misunderstanding of Shale Oil and Gas: Case Study of Shales in U.S., Argentina and China. *Earth Science*, 42(7): 44-52.
- [27] Jiang, W.J., Qin, M.K., Fan, H.H., et al., 2022. Study on the Relationship Between Diagenesis of Cretaceous Yaojia Formation Clastic Rocks and Uranium Mineralization in the Southwest of Songliao Basin. *Uranium Geology*, 38(2): 181-193.
- [28] Jiang, W.Y., Liu, S., 2005. Distribution and Controlling Factors of High-quality Hydrocarbon Source Rock in Sequential Stratigraphic Framework -- Taking Paleogene System in Qikou Depression for Instance. *China petroleum exploration*, 20(2): 51-58.
- [29] Jiang, Z.X., Liang, C., Wu, J., et al., 2013. Several issues in sedimentological studies on hydrocarbon-bearing fine-grained sedimentary rocks. *Acta Petrolei Sinica*, 34(6): 1031-1039.
- [30] Jin, X.C., 1981. Origin, classification and mineral composition of deep-sea sediments. *Marine Science Bulletin*, 06: 51-59.
- [31] Jin, Y., 1977. Some basic geological characteristics and formation conditions of continental source rocks in China [J], *Journal of Geology*, 01: 21-30.
- [32] Jun, J., Jian, W., Ying, M., et al., 2022. Main Controlling Factors and Development Model of the Oil Shale Deposits in the Late Permian Lucaogou Formation, Junggar Basin. *ACS Earth Space Chem*, 6(4): 1080-1094.
- [33] Li, L., Meng, Q.T., Liu, Z.J., et al., 2021. Organic geochemical characteristics and organic matter source analysis of oil shale and coal in Paleogene Lijiaya Formation in Huangxian Basin. *Global geology*, 40(2): 343-353.
- [34] Li, D.Q., 1984. On organic origin of ore deposit in view of the sedimentary environment of dark siliceous rocks of sedimentary type. *Experimental petroleum geology*, 6(2): 59-62.
- [35] Li, H., Huang, B.Q., Wang, N., 2017. Changes of the palaeo-sea surface productivity and bottom water dissolved oxygen content at MD12-3429, Northern south China sea. *Acta Palaeontologica Sinica*, 56(2): 238-248.
- [36] Li, H., Lu, J.L., Li, R.L., et al., 2017. Generation Paleoenvironment and Its Controlling Factors of Lower Cretaceous Lacustrine Hydrocarbon Source Rocks in Changling Depression, South Songliao Basin. *Earth Science*, 42(10): 1774-1786.
- [37] Li, J., Qin, R. F., 2018. Characteristics and metallogenic control factors of oil shale in Yaojie oil shale bearing area. *Coal & Chemical Engineering (in Chinese)*, 41(4): 43-47.
- [38] Li, L., Wang, Z.X., Zhen, Y.H., et al., 2019. Mechanism of Shale Oil Enrichment from the Salt Cyclotherm in Qian3 Member of Qianjiang Sag, Jiangnan Basin. *Earth Science*, 44(3): 1012-1023.
- [39] Lin, C. M., 2019. *Sedimentary Petrology*. Beijing: Science Press, 303-304.
- [40] Lin, T.F., Bai, Y.F., Zhao, Y., 2021. Cyclic stratigraphy of fine-grained sedimentary rocks and sedimentary filling response characteristics of Member Qing-1 in Gulong Sag, Songliao Basin. *Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing*, 40(5): 29-49.
- [41] Liu, G. Z., 1959. New data of oil bearing property in Songliao Plain [J]. *Journal of Beijing University of Geosciences*, 2: 99-106.
- [42] Liu, P.L., Zhou, H.Q., Kang, G.Y., 1986. Distribution of elements and its relation with

- sedimentary environment in Songliao basin. *Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing*, 5(2):11-18.
- [43] Liu, Q. Q., Chi, Q. H., Wang, X. Q., et al., 2018. Distribution and influencing factors of rare earth elements in carbonate rocks along three continental-scale transects in eastern China. *Earth Science Frontiers*, 25(4):099-115.
- [44] Lu, J., 2017. Fine-grained sedimentary cycle and heterogeneity of Qingshankou Formation in Gulong area. *Master Degree Dissertation of Northeast Petroleum University*, 25.
- [45] Lu, S. J., 2022. Analysis on Sedimentary Characteristics and Uranium Mineralization Conditions of the Second and Third Members of Qingshankou Fm in Songliao Basin. *Uranium mining and metallurgy*, 41(1): 12-20.
- [46] Miao, J. Y., Zhou, L. F., Deng, K., et al., 2004. Relationship between the depositional environment and geochemistry of Permian hydrocarbon source rocks in the Turpan depression. *Geology in China*, 31(4):424-430.
- [47] Ni, D. M., 2021. Geological features of continental shale reservoir in Lishu fault depression of Songliao Basin. *Unconventional Oil & Gas*, 8(3):33-42.
- [48] Peng, N., Kuang, H. W., Liu, Y. Q., 2011. Sedimentary evolution and palaeogeography of the Early Cretaceous basins from the northern Qilian Mountains to Jiuxi areas. *Earth Science Frontiers*, 18 (4): 077-087.
- [49] Picard, M. D., 1971. Classification of fine-grained sedimentary rocks[J]. *Journal of Sedimentary Research*, 41: 179-195.
- [50] Qi, Y. A., Zeng, G. Y., Hu, B., et al., 2007. Trace fossil assemblages and their environmental significance from Hetaoyuan formation of palaeogene In Biyang depression of Henan province. *Acta Palaeontologica Sinica*, 46(4): 441—452.
- [51] Qiu, Z. J., Ren, W. Z., Chen, J. L., 1993. Coal field geology, *Beijing: Coal Industry Press*, 139.
- [52] Si, Z. S., Zhu, X. M., Hu, B., et al., 2005. Deep water trace fossils from the Shahejie Formation of Paleogene of Chezhen Sag in Jiyang Depression. *Journal of palaeogeography*, 7(002):233-242.
- [53] Sugimura, Y., and Suzuki, Y., 1988. A high-temperature catalytic oxidation method for the determination of non-volatile dissolved organic carbon in seawater by direct injection of a liquid sample. *Marine Chemistry*, 24: 105–131.
- [54] Sun, L. D., Liu, H., He, W. Y., et al., 2021. An analysis of major scientific problems and research paths of Gulong shale oil in Daqing Oilfield, NE China. *Petroleum Exploration and Development*, 48(3): 453-463.
- [55] Tait, R. V., 1981. Elements of marine ecology an introductory course. (3rd Edition) London: Butterworths & Co (Publishers) Ltd, 207-218.
- [56] Tu, J. Q., Chen, J. P., Zhang, D. J., et al., 2012. A petrographic classification of macerals in lacustrine carbonate source rocks and their organic petrological characteristics: A case study on Jiuxi basin, NW China. *Acta Petrologica Sinica*, 28(3): 917 — 926.
- [57] Wang, C. L., Liu, C. L., Hu, H. B., et al., 2012. Sedimentary characteristics and its environmental significance of salt-bearing strata of the Member 4 of Paleocene Shashi Formation in southern margin of Jiangling Depression, Jiangnan Basin. *Journal of Palaeogeography*, 14(2):165-175.
- [58] Wang, D. D., Li, Z. X., Lv, D. W., et al., 2016. Coal and Oil Shale Paragenetic Assemblage

- and Sequence Stratigraphic Features in Continental Faulted Basin. *Earth Science*, 41(3): 508-522.
- [59] Wang, L., Zeng, W. T., Xia, X. M., et al., 2019. Study on lithofacies types and sedimentary environment of black shale of Qingshankou Formation in Qijia-Gulong Depression, Songliao Basin[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2019, 30(8): 1125-1133.
- [60] Wang, Y.F., 1983. Discovery of glauconite in modern lake sediments of Fuxian Lake and preliminary study on its genesis[J]. *Science Bulletin*, 22: 1388-1388.
- [61] Wu, C. L., Wang, X. Q., Liu, G., et al., 2001. Tectonic evolution dynamics of Fushun Basin. *Science in China (Series D)*, 31(6): 477-485.
- [62] Wu, F., Zhan, J. Y., Deng, X. Z., et al., 2012. Influencing factors of lake eutrophication in China—A case study in 22 lakes in China. *Ecology and Environmental Sciences*, 21(1): 94-100.
- [63] Xiao, F., Liu, L. F., Gao, X. Y., et al., 2014. Geological features and favorable area prediction of the Mid-Jurassic shale gas in Kuqa Depression[J]. *Natural Gas Geoscience*, 25(10): 1668-1677.
- [64] Xing, S. Q., Xiao, Z. S., Zhang, S. G., 1982. Mineralogical characteristics of Glauconite and conditions of its formation in the Taikang inlet, Songliao basin. *Acta Mineralogica Sinica*, 1: 52-58.
- [65] Xu, H. D., 1997. Some problems in the study of continental sequence stratigraphy. *Oil and gas geology*, 18 (002): 83-89.
- [66] Xu, S. C., Liu, Z. J., Dong, Q. S., et al., 2012. The Characteristics and the Formation Mechanism of the Oil Shale in Huangxian Faulted Basin ,Shandong Province. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 42(2):296-303.
- [67] Yang, Y., Shi, W. Z., Zhang, X. M., et al., 2021. Identification method of shale lithofacies by logging curve: a case study from Wufeng-Longmaxi Formation in Jiaoshiba area, SW China. *Lithologic Reservoirs*, 33 (2): 135-146.
- [68] Yu, Y., Liu, D. F., Yang, Z. J., et al., 2017. Vertical Stratification Characteristics of Dissolved Oxygen and Phytoplankton in Thousand-Island Lake and Their Influencing Factors. *Environmental Science*, 38(4): 1393-1402.
- [69] Yuan, X.J., Lin, S.H., Liu, Q., et al., 2015. Lacustrine fine-grained sedimentary features and organic-rich shale distribution pattern: A case study of Chang 7 Member of Triassic Yanchang Formation in Ordos Basin, NW China. *Petroleum exploration and development*, 42(1): 34-43.
- [70] Zhang, J. C., Jin, Z. J., Yuan, M. S., 2004. Accumulation types and resources characteristics of shale gas in China. *Natural gas industry*, 24(7): 15-18.
- [71] Zhang, J.F., Xu, X.Y., Bai, J., et al., 2020. Enrichment and exploration of deep lacustrine shale oil in the first Member of Cretaceous Qingshankou Formation, southern Songliao Basin, NE China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 47(4): 637-652.
- [72] Zhang, J., Bian, X. F., Chen, S. W., et al., 2013. Shale gas resources prospect of late Permian Linxi Formation in the middle-southern part of the Da Hinggan Mountains. *Geological Bulletin of China*, 32(8):1297-1306.
- [73] Zhang, Y. L., Feng, S., Ma, R. H., et al., 2008. Spatial pattern of euphotic depth and estimation of phytoplankton primary production in Lake Taihu in autumn 2004. *Lake Sciences*, 20(3): 380-388.
- [74] Zhang, Y. S., Yang, Y. Q., Qi, Z. X., et al., 2003. Sedimentary characteristics and

environments of the salt-bearing series of Qianjiang formation of the paleogene in Qianjiang sag of Jiangnan basin. *Journal of Palaeogeography*, 5(1):29-35.

- [75] Zheng,G.D., Meng,Q.T., Liu,Z.J., 2020. Geochemical Characteristics and Paleolimnological Information of Oil Shale in 1st Member of Qingshankou Formation in Northern Songliao Basin. *Journal of Jilin University(Earth Science Edition)* , 50(2):392-404.
- [76] Zhou, C. N., Dong, D. Z., Wang, S. J., et al., 2010. Geological characteristics, formation mechanism and resource potential of shale gas in China. *Petroleum Exploration and Development*, 37(6): 641-653.
- [77] Zhou, T. X., Luo, W. L., Da, J., et al., 2022. Spatial distribution of bacterioplankton community composition and their diversity in Lake Fuxian during thermal stratification period. *Lake Sciences*, 34(5): 1-15.
- [78] Zhu, X. M., 2008. Sedimentary Petrology (4th Edition). *Beijing: Petroleum Industry Press*, 289.
- [79] Zhu,R.K., Zhou,C.N., Yan,X.J., et al., 2017. Research Progress and Development Strategic Thinking on Energy Sedimentolog. *Acta Sedimentologica Sinica*, 35(5): 1004-1015.

附中文参考文献

- 拜文华, 吴彦斌, 高智梁,等, 2010. 浅湖-半深湖相湖湾环境油页岩成矿富集机理研究[J]. 地质调查与研究, 33(3): 207-214.
- 崔宝文, 张顺, 付秀丽,等, 2021. 松辽盆地古龙页岩有机层序地层划分及影响因素[J]. 大庆石油地质与开发, 40(5):13-28.
- 邓茨兰, 陈克仁, 1963. 岩石化学资料在研究生油层中的运用和解释[J]. 石油地质实验文摘, 3: 21-27.
- 邓宏文, 1993. 沉积地球化学与环境分析. 兰州: 甘肃科学技术出版社, 111-115.
- 丁聪, 孙平昌, 热西提·亚力坤,等, 2021. 松辽盆地青山口乡青山口组细粒沉积岩分类及其成因[J]. 新疆石油地质, 42(4): 418-427.
- 段晓男, 王效科, 逯非, 欧阳志云, 2008. 中国湿地生态系统固碳现状和潜力. 生态学报, 28(2): 463-469.
- 费尊乐, 毛兴华, 朱明远等, 1988. 渤海生产力研究——II. 初级生产力及潜在渔获量的估算, 10(4): 481-489.
- 傅丛,丁华,陈文敏, 2021. 我国油页岩与煤共生资源分布及综合利用[J]. 煤质技术, 36 (3): 1-13.
- 高岗, 向宝力, 李涛涛,等, 2017. 吉木萨尔凹陷芦苇沟组致密油系统的成藏特殊性[J]. 沉积学报, 35(4):824-833.
- 顾家裕, 郭彬程, 张兴阳, 2005. 中国陆相盆地层序地层格架及模式[J]. 石油勘探与开发, 32(5): 11-15.
- 郭彪, 邵龙义, 马施民, 等, 2017. 海拉尔盆地群下白垩统层序格架内聚煤特征与成煤模式 [J]. 煤田地质与勘探, 45(1): 14-19.
- 郭敏,朱建伟,宫清华等, 2006. 海南儋州长坡组油页岩矿沉积特征及形成环境. 吉林大学学报(地球科学版), 36(6): 959-962.
- 何江林, 陈正辉, 董大忠等, 2022. 川东地区东岳庙段沉积环境演化及其页岩油气富集主控因素分析.沉积与特提斯地质, 42(3):385-397.
- 厚刚福, 倪超, 陈薇, 等, 2017. 川中地区大安寨段介壳滩沉积特征及控制因素[J]. 西南石油大学学报(自然科学版), 39(1): 25-34.

- 胡见义, 黄第藩, 徐树宝等, 1991. 中国陆相石油地质理论基础. 北京: 石油工业出版社, 173.
- 黄东, 段勇, 李育聪, 等, 2018. 淡水湖相页岩油气有机碳含量下限研究——以四川盆地侏罗系大安寨段为例[J]. 中国石油勘探, 23(6): 38-45.
- 黄铁栋, 王平, 李慧, 等, 2011. 沙尔湖煤田巨厚煤层异地成煤分析[J]. 新疆地质, 29(3): 324-326.
- 江文剑, 秦明宽, 范洪海, 等, 2022. 松辽盆地西南部白垩系姚家组碎屑岩成岩作用与铀成矿[J]. 铀矿地质, 38(2):181-193.
- 姜文亚, 柳 飒, 2005. 序地层格架中优质烃源岩分布与控制因素——以歧口凹陷古近系为例. 中国石油勘探, 20(2): 51-58.
- 姜在兴, 梁超, 吴靖, 等, 2013. 含油气细粒沉积岩研究的几个问题[J]. 石油学报, 34(6): 1031-1039.
- 蒋恕, 唐相路, Steve Osborne, 等, 2017. 页岩油气富集的主控因素及误辩:以美国、阿根廷和中国典型页岩为例[J]. 地球科学: 中国地质大学学报, 42(7): 44-52.
- 金性春, 1981. 深海沉积物的来源、分类与矿物组成[J]. 海洋通报, 06: 51-59.
- 锦言, 1977. 我国陆相生油岩的若干基本地质特征及其形成条件[J]. 地质学报, 01: 21-30.
- 李道琪, 1984. 从暗色沉积型硅质岩的形成环境看有机成矿[J]. 石油实验地质, 6(2): 59-62
- 李浩, 陆建林, 李瑞磊, 等, 2017. 长岭断陷下白垩统湖相烃源岩形成古环境及主控因素. 地球科学: 中国地质大学学报, 42(10): 1774-1786.
- 李鹤, 黄宝琦, 王娜. 2017. 南海北部 MD12-3429 站位海水古生产力和溶解氧含量特征[J]. 古生物学报, 36(2): 238-248.
- 李靖, 秦荣芳, 2018. 窑街油页岩含矿区油页岩特征及成矿控制因素. 煤炭与化工, 41(4): 43-47.
- 李乐, 王自翔, 郑有恒等, 2019. 江汉盆地潜江凹陷潜三段盐韵律层页岩油富集机理. 地球科学: 中国地质大学学报, 44(3): 1012-1023.
- 李丽, 孟庆涛, 刘招君等, 2021. 黄县盆地古近系李家崖组油页岩与煤有机地球化学特征及有机质来源分析. 世界地质, 40(2): 343-353.
- 林春明, 2019. 沉积岩石学. 北京: 科学出版社, 303-304.
- 林铁锋, 白云风, 赵莹, 等, 2021. 松辽盆地古龙凹陷青一段细粒沉积岩旋回地层分析及沉积充填响应特征[J]. 大庆石油地质与开发, 40(5): 29-49.
- 刘官植, 1959. 松辽平原含油性的新资料[J]. 北京地质学院学报, 2: 99-106.
- 刘平略, 周厚清, 康桂云. 1986. 松辽盆地元素分布及其与沉积环境的关系[J]. 大庆石油地质与开发, 5(2):11-18.
- 柳青青, 迟清华, 王学求等, 2018. 中国东部大陆尺度地球化学走廊带碳酸盐岩稀土元素分布特征与影响因素. 地学前缘 (中国地质大学 (北京); 北京大学), 25(4):099-115.
- 卢胜军. 2022. 松辽盆地青山口组二、三段沉积特征及铀成矿分析[J]. 铀矿冶, 41(1): 12-20.
- 陆军. 2017. 古龙地区青山口组细粒沉积旋回及非均质性. 东北石油大学硕士研究生学位论文, 25.
- 苗建宇, 周立发, 邓昆, 等, 2004. 吐鲁番坳陷二叠系烃源岩地球化学与沉积环境的关系[J]. 中国地质, 31(4): 424-430.
- 倪冬梅, 2021. 松辽盆地梨树断陷陆相页岩储层地质特征及地质意义. 非常规油气, 8(3): 33-42.
- 彭楠, 旷红伟, 柳永清, 2011. 北祁连—酒西地区早白垩世盆地沉积特征与古地理演化[J]. 地学前缘, 18(4): 77-87.
- 齐永安, 曾光艳, 胡斌等, 2007. 河南泌阳凹陷古近纪核桃园组遗迹化石组合及其环境意义

- 兼论深水湖泊遗迹相特征[J]. 古生物学报, 46(4): 441—452.
- 邱震杰, 任文忠, 陈家良, 1993. 煤田地质学. 北京: 煤炭工业出版社, 139.
- 施振生, 朱筱敏, 胡斌, 等, 2005. 济阳拗陷车镇凹陷古近系沙河街组深水沉积中的遗迹化石[J]. 古地理学报, 7(002):233-242.
- 孙龙德, 刘合, 何文渊, 等, 2021. 大庆古龙页岩油重大科学问题与研究路径探析[J]. 石油勘探与开发, 48(3):453-463.
- 涂建琪, 陈建平, 张大江, 等, 2012. 湖相碳酸盐岩烃源岩有机显微组分分类及其岩石学特征——以酒西盆地为例[J]. 岩石学报, 28(3): 917-926.
- 王春连, 刘成林, 胡海兵, 等, 2012. 江汉盆地江陵凹陷南缘古新统沙市组四段含盐岩系沉积特征及其沉积环境意义[J]. 古地理学报, 14(2):165-175.
- 王东东, 李增学, 吕大伟, 等, 2016. 陆相断陷盆地煤与油页岩共生组合及其层序地层特征. 地球科学, 41(3): 508-522.
- 王岚, 曾雯婷, 夏晓敏, 等, 2019. 松辽盆地齐家—古龙凹陷青山口组黑色页岩岩相类型与沉积环境[J]. 天然气地球科学, 30(8): 1125-1133.
- 吴冲龙, 汪新庆, 刘刚, 等, 2001. 抚顺盆地构造演化动力学研究. 中国科学(D 辑), 31(6): 477-485.
- 吴锋, 战金艳, 邓祥征, 等, 2012. 中国湖泊富营养化影响因素研究——基于中国 22 个湖泊实证分析[J]. 生态环境学报, 21(1): 94-100.
- 肖飞, 刘洛夫, 高小跃, 等, 库车拗陷中侏罗统页岩气地质特征及有利区预测[J]. 天然气地球科学, 2014, 25(10):1668-1677.
- 邢顺淦, 肖祝胜, 张书贵. 1982. 泰康湖湾海绿石矿物学特征及其形成条件的探讨[J]. 矿物学报, 1: 52-58.
- 徐怀大, 1997. 陆相层序地层学研究中的某些问题[J]. 石油与天然气地质, 18(002): 83-89.
- 许圣传, 刘招君, 董清水, 等, 2012. 陆相盆地含煤、油页岩和蒸发盐地层单元沉积演化[J]. 吉林大学学报: 地球科学版, 42(2):296-303.
- 杨洋, 石万忠, 张晓明, 等, 2021. 页岩岩相的测井曲线识别方法——以焦石坝地区五峰组—龙马溪组为例[J]. 岩性油气藏, 33(2):135-146.
- 王云飞, 1983. 抚仙湖现代湖泊沉积物中海绿石的发现及成因的初步研究[J]. 科学通报, 22:1388-1388.
- 俞焰, 刘德富, 杨正健, 等, 2017. 千岛湖溶解氧与浮游植物垂向分层特征及其影响因素[J]. 环境科学, 38(4): 1393-1402.
- 袁选俊, 林森虎, 刘群, 等, 2015. 湖盆细粒沉积特征与富有机质页岩分布模式——以鄂尔多斯盆地延长组长 7 油层组为例. 石油勘探与开发, 42(1): 34-43.
- 张健, 卞雄飞, 陈树旺, 等, 大兴安岭中南部上二叠统林西组页岩气资源前景[J]. 地质通报, 2013, 32(8):1297-1306.
- 张金川, 金之钧, 袁明生, 2004. 页岩气成藏机理和分布[J]. 天然气工业, 24(7): 15-18.
- 张君峰, 徐兴友, 白静, 等, 2020. 松辽盆地南部白垩系青一段深湖相页岩油富集模式及勘探实践[J]. 石油勘探与开发, 2020, 47(4): 637-652.
- 张永生, 杨玉卿, 漆智先, 等, 2003. 江汉盆地潜江凹陷古近系潜江组含盐岩系沉积特征与沉积环境[J]. 古地理学报, 5(1):29-35.
- 张运林, 冯胜, 马荣华, 等, 2008. 太湖秋季真光层深度空间分布及浮游植物初级生产力的估算[J]. 湖泊科学, 20(3): 380-388.
- 郑国栋, 孟庆涛, 刘招君, 等, 2020. 松辽盆地北部青一段油页岩地球化学特征及其记录的古湖泊学信息. 吉林大学学报(地球科学版), 50(2):392-404.

- 周天旭, 罗文磊, 笪俊等, 2022. 抚仙湖垂向分层期间水体细菌群落结构组成及多样性的空间分布. 湖泊科学, 34(5): 1-15.
- 朱如凯, 邹才能, 袁选俊等, 2017. 中国能源沉积学研究进展与发展战略思考. 沉积学报, 35(5): 1004-1015.
- 朱筱敏. 2008. 沉积岩石学 (第四版). 北京: 石油工业出版社, 289.
- 邹才能, 董大忠, 王社教, 等, 2010. 中国页岩气形成机理、地质特征及资源潜力[J]. 石油勘探与开发, 37(6): 641-653.