王安,胡明毅,高家俊,等.松南长岭凹陷青山口组一段泥页岩元素地球化学特征及古环境意义.吉林大学学报(地球科学版),2024,54(6):2075-2088.doi:10.13278/j.cnki.jjuese.20230225.

Wang An, Hu Mingyi, Gao Jiajun, et al. Element Geochemical Characteristics and Paleoenvironmental Significance of Mud Shale in the First Member of Qingshankou Formation of Changling Depression in Southern Songliao Basin. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2024, 54(6): 2075-2088. doi: 10.13278/j.cnki.jjuese.20230225.

松南长岭凹陷青山口组一段泥页岩元素地球化学特征及古环境意义

王 安[1],胡明毅[2],高家俊[3],杨 亮[4],邢济麟[4]

1.长江大学资源与环境学院,武汉 430100
2.长江大学地球科学学院,武汉 430100
3.中国石油化工股份有限公司东北油气分公司,长春 130062
4.中国石油吉林油田公司勘探开发研究院,吉林 松原 138000

摘要:松辽盆地长岭凹陷青山口组一段是页岩油主力勘探目标,但目前其古环境研究程度较低。通过元素地球化学手段研究古环境演化特征,分析环境因素对有机质富集的影响,对理清页岩油富集主控因素和选区评价具有重要现实意义。本次研究对长岭凹陷青一段P1—P3小层73件泥页岩样品进行总有机碳和主微量元素测试,讨论了研究区样品的有机质丰度和主微量元素特征,运用元素地球化学指标恢复了目的层的古气候、古生产力、古水深、古盐度和古氧化性,重建了研究区青一段的古环境变化特征。结果表明:研究区泥页岩有机质丰度较高,平均w(TOC)为2.14%。在平面上大情字井工区—余字井工区—塔虎城工区,以及垂向上P1—P3小层,随湖泊水体加深,古生产力和有机质丰度增大。研究区古气候条件整体为温暖湿润气候,自P1—P3小层气候变得更温湿。古水体性质表现为淡水—半咸水的贫氧还原环境,较大的盐度形成盐度分层,使研究区的还原环境不易被破坏,有利于有机质的保存。有机质来源与古盐度是导致研究区有机质差异富集的关键因素,大情字井工区—余字井工区—塔虎城工区湖泊有机质输入增加,古盐度增大,有机质相对富集,垂向上P1—P3小层也表现类似的规律变化,在青一段下部形成了一套品质较高的黑色泥页岩,是研究区页岩油富集的有利层段。

关键词:松辽盆地;长岭凹陷;青山口组一段;泥页岩;元素地球化学;古环境;页岩油

doi:10.13278/j.cnki.jjuese.20230225 **中图分类号**:P59;P618.13 **文献标志码**:A

Element Geochemical Characteristics and Paleoenvironmental Significance of Mud Shale in the First Member of Qingshankou Formation of Changling Depression in Southern Songliao Basin

Wang An[1], Hu Mingyi[2], Gao Jiajun[3], Yang Liang[4], Xing Jilin[4]

收稿日期:2023-09-06

作者简介:王安(1995—),男,硕士研究生,主要从事地质学方面的研究,E-mail:775226049@qq.com

通信作者:胡明毅(1965—),男,教授,博士,主要从事沉积学方面的研究,E-mail:humingyi65@163.com

基金项目:吉林省自然科学基金面上项目(20230101081JC)

Supported by the Project of Natural Science Foundation Jilin Province (20230101081JC)

1. *College of Resources and Environment, Yangtze University, Wuhan* 430100, *China*
2. *College of Geosciences, Yangtze University, Wuhan* 430100, *China*
3. *Northeast Oil and Gas Branch of SINOPEC, Changchun* 130062, *China*
4. *Exploration and Development Research Institute of Jilin Oilfield Company, PetroChina, Songyuan* 138000, *Jilin, China*

Abstract: The First Member of Qingshankou Formation in the Changling depression of the Songliao basin is a major exploration target for shale oil, but the current level of research on its paleoenvironment is relatively low. This paper studies the paleoenvironment changes based on elemental geochemical methods and analyzes the impact of environmental factors on organic matter enrichment, which is of great practical significance for clarifying the main controlling factors of shale oil enrichment and selected-area evaluation. 73 shale samples from the P1 - P3 layers of the Upper Cretaceous Qingshankou Formation in the Changling depression were tested for total organic carbon and major and trace elements. The organic matter abundance and major and trace element characteristics of the samples in the study area were discussed. The paleoclimate, paleoproductivity, paleowater depth, paleosalinity, and paleooxidation of the target layer were restored using elemental geochemical indicators, and the paleoenvironmental change characteristics of the First Member of Qingshankou Formation in the study area were reconstructed. The results indicate that the organic matter abundance of shale in the study area is relatively high, with an average TOC of 2.14%. From the Daqingzijing to the Yuzijing to the Tahucheng work areas, as well as vertically from the P1 to P3 layers, the lake water deepens, and the paleoproductivity and organic matter abundance increase. The overall paleoclimate in the study area are warm and humid, with a slightly warmer and wetter climate to the P3 layer. The paleowater is characterized by an oxygen deficient reduction environment of fresh to brackish water, with high salinity forming salinity stratification, making the reduction environment in the study area less susceptible to damage and conducive to the preservation of organic matter. The source of organic matter and paleosalinity are the key factors that lead to the differential enrichment of organic matter in the study area. The input of organic matter and paleosalinity in lakes increases from Daqingzijing to Yuzijing to Tahucheng work area, organic matter is relatively enriched. Vertically, the P1 to P3 layers also exhibit similar patterns of change, forming a set of high-quality black shale in the lower part of the First Member of Qingshankou Formation, which is a favorable interval for shale oil enrichment in the study area.

Key words: Songliao basin; Changling depression; First Member of Qingshankou Formation; mud shale; element geochemistry; paleoenvironment; shale oil

0 引言

近年来,非常规油气资源受到了广泛关注。页岩油气作为一种重要的非常规油气资源,被认为是可接替传统油气资源的对象,由于具有重要的经济价值和科研意义受到广泛重视,页岩油也在我国的多个盆地中均有重要的勘探发现[1]。松辽盆地上白垩统青一段泥页岩具有分布广泛、有机质丰度高的特点,是盆地中重要的一套烃源岩[2],也是目前松辽盆地页岩油勘探的首选目标。明确富有机质页岩的形成环境对于理清页岩油富集主控因素和选区评价具有重要的现实意义[3]。

元素地球化学主要通过元素的分布特性和规律研究该时期的地质现象,在油气领域主要应用于古环境的研究和油气藏勘探[4-5]。前人曾在松辽盆地长岭凹陷进行过大量的研究工作,对烃源岩和原油的地球化学特征、油气成藏机理和油藏勘探等方面取得了重大突破,而在元素地球化学方面的研究较少[6-12]。本文运用元素地球化学手段,开展松南长岭凹陷青山口组一段泥页岩主微量元素特征研究,恢复泥页岩形成时期的古气候、古生产力、古水深、古盐度和古氧化性等古环境因子,综合分析古环境

演化对有机质富集的影响，该研究将为揭示泥页岩成因及页岩油选层地质评价提供依据。

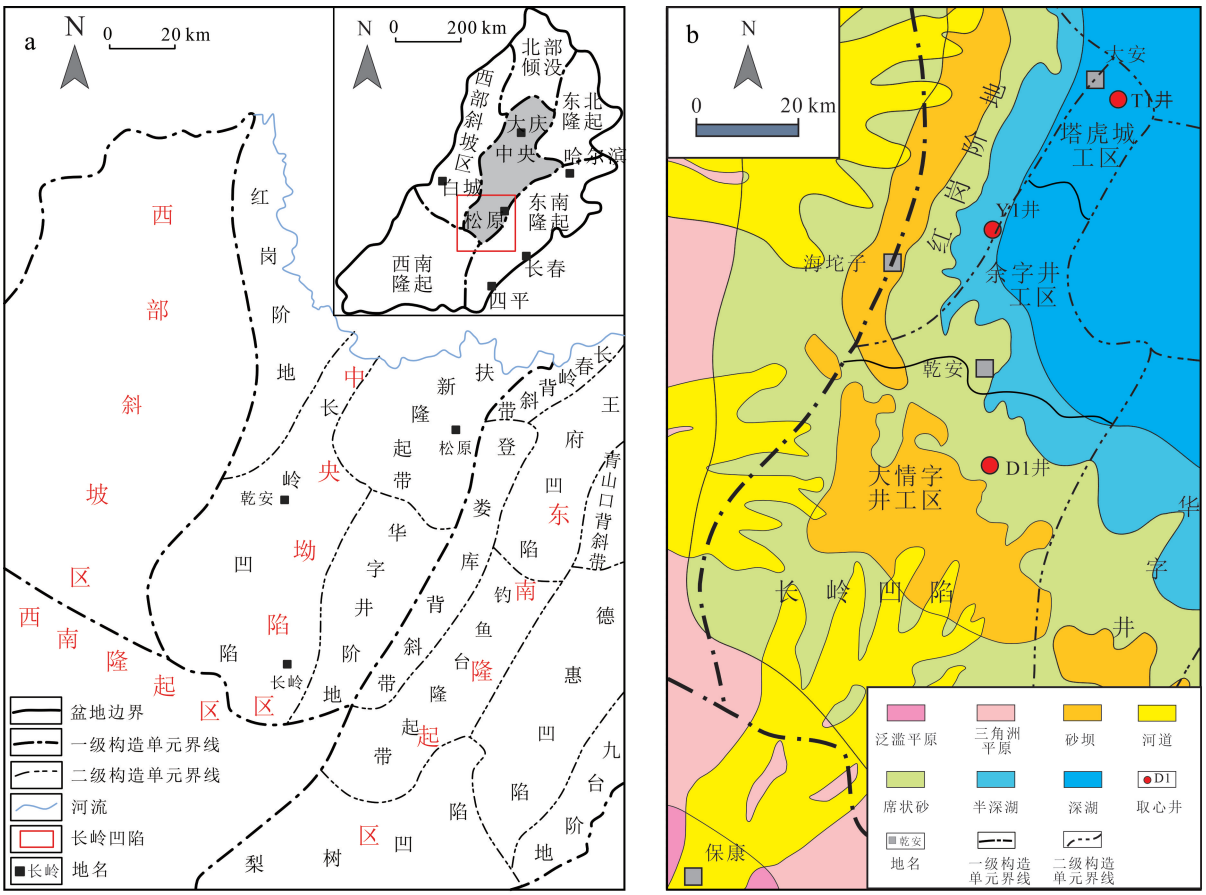
1　区域地质背景

松辽盆地是白垩纪时期形成的大型陆相含油气沉积盆地，南北向长约 750 km，东西向宽约 350 km，总面积达 26×10^4 km^2[8]。本文的研究区长岭凹陷位于松辽盆地中央坳陷区，整体呈现南北向宽缓展布，面积约为 6 500 km^2（图 1a），由南向北可细分为大情字井工区、余字井工区和塔虎城工区（图 1b）。

青山口组形成于松辽盆地的湖盆扩张期，青一段广泛沉积一套暗色泥页岩，该时期沉积相带为三角洲前缘席状砂—半深湖—深湖，其中塔虎城和余字井工区为半深湖—深湖相沉积，大情字井工区为三角洲前缘席状砂—半深湖相沉积。基于层序地层学理论，松辽盆地青一段可划分为 1 个三级层序，进一步划分为水进、高水位和水退 3 个体系域[9]。水进体系域主要表现为一套向上沉积物粒度逐渐变细的岩性组合，总有机碳质量分数向上逐渐增大，水体逐渐变深。本次研究取样目的层位于青一段下部水进体系域的 P1—P3 小层。

2　样品及测试方法

为了研究不同沉积环境中有机质差异富集规律，本次研究在长岭凹陷每个工区选取一口资料较齐全的系统取心井开展泥页岩地球化学特征及古环境研究，分别为塔虎城工区的 T1 井、余字井工区的 Y1 井和大情字井工区的 D1 井，共采集 73 件泥页岩样品进行总有机碳和主微量元素分析，所有实验均在吉林油田勘探开发研究院测试中心进行。其中，T1 井共 27 件样品，Y1 井共 27 件样品，D1 井共 19 件样品。



据文献[10]修编。

图 1　松南长岭凹陷构造单元划分（a）及研究区青山口组一段沉积相与井位分布图（b）

Fig.1　Division of structural units (a) and distribution of sedimentary facies and well positions (b) of K_2qn^1 in the study area of Changling depression in southern Songliao basin

总有机碳测试采用美国 Leco 公司的 CS230 碳硫分析仪完成,检测依据为 GB/T 19145—2022《沉积岩中总有机碳测定》[13]。主量元素分析测试仪器采用岛津 XRF-1800 型 X 射线荧光光谱仪完成,微量元素分析测试仪器采用 Aglient 7500 ICP-MS 电感耦合等离子质谱仪完成,检测依据为 GB/T 14506.30—2010《硅酸盐岩石化学分析方法 第30部分:44个元素量测定》[14]。

3 泥页岩地球化学特征

3.1 总有机碳(TOC)质量分数

青一段 P1—P3 小层广泛发育黑色和灰黑色泥页岩,整体 w(TOC)较高,介于 0.49%~5.12%之间,平均值为 2.14%。T1、Y1、D1 井平均 w(TOC)分别为 2.79%、2.09%、1.29%,P1—P3 小层平均 w(TOC)分别为 1.91%、2.20%、2.27%。有机碳总体演化趋势表现为:在平面上由南(D1 井)至北(T1 井)w(TOC)逐渐升高(图 2)。

3.2 主量元素丰度

青山口组一段 P1—P3 小层泥页岩主量元素测试结果显示:SiO_2、Al_2O_3、Fe_2O_3 和 K_2O 氧化物质量分数较高,平均质量分数分别为 63.93%、17.60%、5.24% 和 4.07%,四者总和为 90.84%;CaO、MgO 和 Na_2O 氧化物质量分数较低,平均质量分数分别为 3.10%、2.19%和 2.26%,三者总和为 7.55%。此外,TiO_2、P_2O_5 和 MnO 氧化物的质量分数很低,均低于 1%。相比于全球大陆上地壳(UCC)元素丰度,P1—P3 小层泥页岩表现出富 Al_2O_3、Fe_2O_3、Ti_2O,贫 CaO、Na_2O、P_2O_5、MnO 的特征,其他主量元素与 UCC 质量分数接近(表 1)。3 口井的各主量元素丰度比较近似,仅 CaO 的质量分数存在明显差异,T1 井—Y1 井—D1 井呈明显增大的趋势(图 3)。

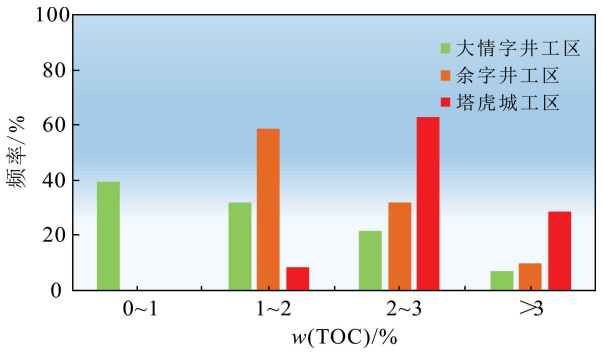


图 2 松南长岭凹陷青一段 P1—P3 小层 w(TOC)频率分布图

Fig.2 w(TOC) frequency distribution in Layer P1-P3 of K_2qn^1 of Changling depression in southern Songliao basin

3.3 微量元素丰度

微量元素在沉积物中质量分数极低,常与主量元素结合应用于沉积环境的研究中。青山口组一段

表 1 松南长岭凹陷青一段 P1—P3 小层泥页岩与 UCC 主量元素质量分数

Table 1 Major elements mass fraction of mud shale and UCC in Layer P1-P3 of K_2qn^1 of Changling depression in southern Songliao basin %

样品采集位置		SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	K_2O	Na_2O	TiO_2	P_2O_5	MnO
T1 井	P3 小层	64.23	17.62	5.32	2.78	2.25	3.94	2.28	0.71	0.10	0.05
	P2 小层	65.99	17.40	5.18	1.57	2.14	3.97	2.06	0.73	0.10	0.04
	P1 小层	63.18	18.45	5.44	3.35	2.17	3.96	1.94	0.72	0.11	0.04
Y1 井	P3 小层	64.42	17.74	5.33	2.54	2.11	4.24	2.22	0.75	0.09	0.04
	P2 小层	65.16	17.41	5.01	2.69	2.15	3.91	2.38	0.72	0.09	0.05
	P1 小层	63.16	17.84	5.07	3.95	2.31	4.10	2.07	0.72	0.11	0.05
D1 井	P3 小层	62.22	16.72	5.07	3.96	2.21	4.00	2.48	0.75	0.10	0.06
	P2 小层	65.00	17.12	5.10	3.11	2.10	4.10	2.70	0.72	0.10	0.06
	P1 小层	62.74	17.88	5.66	3.77	2.15	4.59	2.29	0.72	0.10	0.06
平均值		63.93	17.60	5.24	3.10	2.19	4.07	2.26	0.73	0.10	0.05
UCC		65.89	15.17	4.49	4.19	2.20	3.39	3.89	0.50	0.20	0.07

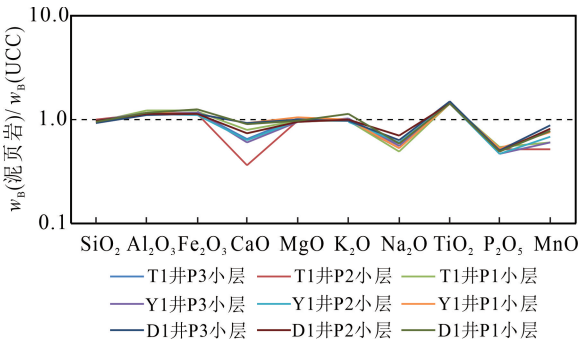


图 3　松南长岭凹陷青一段 P1—P3 小层泥页岩主量元素 UCC 标准化模式图

Fig. 3　Plot of major elements mass fraction and UCC normalized pattern of mud shale in Layer P1－P3 of K_2qn^1 of Changling depression in southern Songliao basin

P1—P3 小层泥页岩微量元素测试结果表明,V 平均质量分数为 105.28×10^{-6},Cr 平均质量分数为 49.70×10^{-6},Ni 平均质量分数为 26.05×10^{-6},Cu 平均质量分数为 105.89×10^{-6},Rb 平均质量分数为 151.57×10^{-6},Sr 平均质量分数为 406.76×10^{-6},Ba 平均质量分数为 578.14×10^{-6},U 平均质量分数为 4.06×10^{-6},Th 平均质量分数为 12.08×10^{-6},Zr 平均质量分数为 121.13×10^{-6}(表 2)。相比于 UCC 元素丰度,Cr、Ni 和 Zr 相对亏损,Cu、Rb 和 U 相对富集。除 Cu 元素以外,3 口井的微量元素差异不明显,T1 井的 Cu 丰度极高,而 Y1 井和 D1 井 Cu 元素则略高于 UCC(图 4)。

4　古环境分析

4.1　古气候

在世界范围内,古气候的变化对生物群落的大规模爆发和有机质的大量富集都存在控制作用[11]。盆地在构造运动稳定时期,古气候通常是控制其有机质沉积的最重要因素。古气候对元素的富集和分散有重要的影响,不同气候下的沉积物中元素构造存在差异[12]。化学蚀变指数(CIA)和 Fe/Mn 值常用来研究古气候。CIA 值介于 50～60 之间指示寒冷、干燥气候,介于 60～80 之间指示温暖、湿润气候,介于 80～100 之间指示干旱、炎热气候[15]。Fe/Mn 值的相对高低也能反映古气候条件的变化,在温暖、湿润气候背景下 Fe/Mn 值较高,在极端寒冷或炎热气候下 Fe/Mn 值较低[16]。SiO_2/Al_2O_3 值通过 Si 元素的化学搬运情况反映古气候,SiO_2/Al_2O_3 值大于 4 时,Si 的运移作用不明显,以物理风化为主,指示寒冷、干燥气候;SiO_2/Al_2O_3 值小于 4 时,Si 大量运移,化学风化作用明显,指示温暖、湿润气候[17]。

研究区 CIA 值介于 53.91～72.67 之间,平均值为 65.22;Fe/Mn 值介于 29.68～190.61 之间,平均值为 99.74,SiO_2/Al_2O_3 值介于 2.97～4.61 之间,平均值为 3.65(表 3),指示温暖、湿润气候,风化程度较强。垂向上,自下而上 SiO_2/Al_2O_3 值整体呈略增大的趋势,CIA、Fe/Mn 值存在一定的变化,反映了纵向古气候的波动变化(表 3),指示在水进体系域晚期古气候更加的温暖、湿润。

表 2　松南长岭凹陷青一段 P1—P3 小层泥页岩与 UCC 微量元素质量分数

Table 2　Trace elements mass fractions of mud shale and UCC in Layer P1－P3 of K_2qn^1 of Changling depression in southern Songliao basin

10^{-6}

样品采集位置		V	Cr	Ni	Cu	Rb	Sr	Ba	U	Th	Zr
T1 井	P3 小层	107.59	62.67	27.84	263.01	145.12	392.93	560.38	4.01	11.91	120.00
	P2 小层	107.66	65.12	31.02	205.11	143.92	352.74	543.54	4.28	11.43	118.03
	P1 小层	107.24	55.85	24.78	216.05	145.29	390.48	674.20	4.09	11.41	114.09
Y1 井	P3 小层	111.86	38.24	23.00	30.59	148.93	452.37	519.93	4.49	11.72	125.45
	P2 小层	102.03	34.66	26.49	28.22	144.34	457.11	590.58	4.06	11.74	118.54
	P1 小层	101.41	35.97	24.26	26.60	146.63	519.33	472.60	4.40	12.00	120.34
D1 井	P3 小层	108.88	50.76	27.63	26.14	171.00	330.07	562.50	4.13	13.09	126.52
	P2 小层	93.63	46.81	26.44	24.88	154.89	389.59	827.64	2.96	12.87	109.30
	P1 小层	99.46	57.71	24.06	23.97	173.83	299.56	610.59	3.57	12.94	134.53
平均值		105.28	49.70	26.05	105.89	151.57	406.76	578.14	4.06	12.08	121.13
UCC		107	85	44	25	112	350	550	2.8	10.7	190

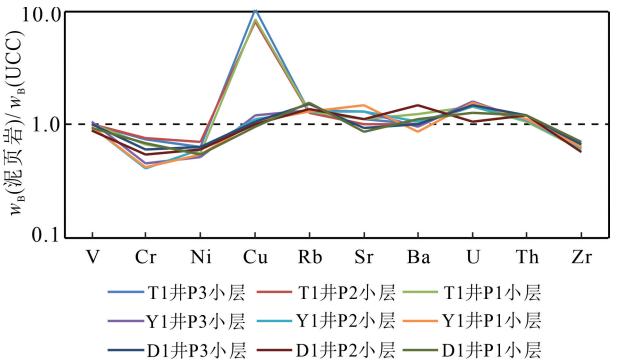


图4 松南长岭凹陷青一段P1—P3小层泥页岩微量元素UCC标准化蛛网图

Fig.4 Plot of trace elements mass fraction and UCC normalized pattern of mud shale in Layer P1 – P3 of K_2qn^1 of Changling depression in southern Songliao basin

4.2 古生产力

有机质的来源包括水生的藻类、浮游生物、细菌等,这些有机质为湖泊提供了古生产力[19]。一般情况下,微量元素中P、Cu、Mn等营养元素可以指示有机碳的输入,反映湖泊古生产力。w(TOC)常用于反映古生产力的高低,其高值对应较高的古生产力,低值则指示较低的古生产力。w(TOC)通常与古生产力和古水深呈良好的正相关性[16,20]。研究区w(TOC)介于0.49%～5.12%之间,平均值为2.14%。在平面上D1井—Y1井—T1井,w(TOC)均值分别为1.29%、2.09%、2.79%;在垂向上P1—P3小层,w(TOC)均值分别为1.91%、2.20%、2.27%(表3),w(TOC)整体表现为增大的趋势,指示由南部三角洲前缘区到北部深湖区、自水进初期到晚期,湖泊生产力均呈现逐渐增大的趋势。

4.3 古水深

古水深的研究对盆地古环境恢复具有重要意义,一些元素的分布受沉积水体的古水深影响明显。在实际的研究中,常用离岸距离来反映古水深,离岸距离越远,古水深越大,同时,亲陆性元素质量分数明显减少[21]。Zr是典型的亲陆性元素,离岸距离越近Zr质量分数越高,Zr/Rb值能反映古水深相对深浅,Zr/Rb值越小,指示古水深越大[22]。V、Ni、Mn几种元素同样在离岸距离更远的深水区相对富集,(V+Ni+Mn)元素丰度可反映古水深,古水深越大,w(V+Ni+Mn)越高,一般在半深湖—深湖区w(V+Ni+Mn)超过190×10^{-6}[23]。

研究区样品的Zr/Rb值介于0.37～0.98之间,平均值为0.83;w(V+Ni+Mn)介于(310.33～1 516.55)$\times10^{-6}$之间,平均值为528.84 $\times10^{-6}$。在

表3 松南长岭凹陷青一段P1—P3小层泥页岩元素参数

Table 3 Elemental parameters of mud shale and shales in Layer P1 – P3 of K_2qn^1 of Changling depression in southern Songliao basin

样品采集位置		w(TOC)/%	CIA	Fe/Mn	SiO_2/Al_2O_3	Zr/Rb	w(V+Ni+Mn)/10^{-6}	w(Sr)/10^{-6}	Sr/Ba	V/(V+Ni)	V/Cr
研究区	范围值/平均值	0.49～5.12/2.14	53.91～72.67/65.22	29.68～190.61/99.74	2.97～4.61/3.65	0.37～0.98/0.83	310.33～1 516.55/528.84	249.15～748.98/406.76	0.32～1.67/0.74	0.73～0.88/0.80	2.00～4.50/2.38
T1井	P3小层	2.77	66.33	105.41	3.80	0.80	614.48	392.93	0.70	0.80	2.44
	P2小层	3.34	69.62	125.74	3.66	0.81	572.65	352.74	0.66	0.78	2.43
	P1小层	2.43	66.82	120.26	3.43	0.84	575.20	390.48	0.66	0.81	2.37
	全井均值	2.79	67.06	113.02	3.62	0.81	591.07	384.85	0.68	0.80	2.42
Y1井	P3小层	2.15	66.36	118.63	3.75	0.82	542.73	452.37	0.87	0.83	2.34
	P2小层	1.87	65.98	89.97	3.65	0.83	520.11	457.11	0.79	0.79	2.37
	P1小层	2.17	63.95	86.67	3.55	0.85	461.57	519.33	1.13	0.81	2.41
	全井均值	2.09	65.37	99.36	3.64	0.83	507.09	478.40	0.95	0.81	2.36
D1井	P3小层	1.47	61.53	75.82	3.83	0.71	554.20	330.07	0.59	0.80	2.35
	P2小层	1.52	63.25	80.25	3.76	0.74	432.39	389.59	0.50	0.78	2.29
	P1小层	0.88	62.78	89.83	3.53	0.81	459.49	299.56	0.50	0.80	2.31
	全井均值	1.29	65.13	81.41	3.70	0.84	506.81	336.10	0.54	0.80	2.32

注:CIA=$Al_2O_3/(Al_2O_3+K_2O+Na_2O+CaO^*)$;$CaO^*$是指硅酸盐矿物中的CaO,$CaO^*=\min(CaO-10/3\times P_2O_5, Na_2O)$[18]。

平面上从 D1 井至 T1 井，Zr/Rb 均值分别为 0.84、0.83、0.81，w(V＋Ni＋Mn)均值分别为 506.81×10^{-6}、507.09×10^{-6}、591.07×10^{-6}；在垂向上从 P1—P3 小层，Zr/Rb 均值分别为 0.84、0.83、0.82，w(V＋Ni＋Mn)均值分别为 523.05×10^{-6}、527.17×10^{-6}、537.51×10^{-6}(表 3)。整体上，由南到北和垂向上 P1—P3 小层古水深均呈增大的趋势，与古生产力和 w(TOC)变化趋势一致。

4.4　古盐度

古水体盐度是反映古水体条件的一个重要特征，对有机质的保存有显著影响，高盐度的环境使沉积下来的有机质分解变少，有利于有机质的保存[24]。Sr 元素在古盐度的研究中应用广泛，Sr 元素丰度或 Sr/Ba 值均能反映古盐度的高低，在水体中 Sr 的迁移能力比 Ba 强，且在盐度较大时 Ba 先沉淀下来，导致在高盐度环境下 Sr 比 Ba 富集，此时 Sr/Ba 值呈高值特征[25]。在淡水环境中，w(Sr)＜300×10^{-6}，Sr/Ba 值＜0.5；在半咸水环境中，w(Sr)介于(300～500)×10^{-6}之间，Sr/Ba 值介于 0.5～1.0之间；在咸水环境中，w(Sr)＞500×10^{-6}，Sr/Ba 值＞1[26]。研究区样品 w(Sr)介于(249.15～748.98)×10^{-6}之间，平均值为 406.76×10^{-6}，Sr/Ba 值介于 0.32～1.67 之间，平均值为 0.74，古水体盐度以半咸水为主。在平面上 D1 井到 T1 井，w(Sr)均值分别为 336.10×10^{-6}、478.40×10^{-6}、384.85×10^{-6}，Sr/Ba 均值分别为 0.54、0.95、0.68；在垂向上 P1—P3 小层，w(Sr)均值分别为 395.70×10^{-6}、406.55×10^{-6}、422.78×10^{-6}，Sr/Ba 均值分别为 0.67、0.73、0.82(表 3)。盐度整体呈现差异性变化，在平面上 Y1 井附近的古盐度最大，在垂向上 P3 小层的古盐度最大。前人研究认为，在松辽盆地青一段下部存在多期次的差异性海侵事件，导致湖泊整体水体盐度上升[27-28]。不规律的海侵事件导致研究区盐度增大整体达到半咸水，但在平面上和垂向上的演化规律性不强。

4.5　古氧化还原性

氧化还原条件对有机质保存同样起到重要的控制作用，湖泊水体的缺氧环境有利于有机质的保存[18]。V、Ni、Cr 等元素在不同的氧化还原条件下产生分异现象，一般在水体氧化条件下不易保存，在还原环境下容易富集。V/(V＋Ni)和 V/Cr 值可以反映古氧化性的可靠指标，V/(V＋Ni)和 V/Cr 值越大指示还原性越强。在缺氧还原环境下，V/(V＋Ni)值＞0.84，V/Cr 值＞4.5；在贫氧还原环境下，V/(V＋Ni)值介于 0.60～0.84 之间，V/Cr 值介于 2.0～4.5 之间；在氧化环境下，V/(V＋Ni)值＜0.60，V/Cr 值＜2.0[29-30]。研究区样品 V/(V＋Ni)值介于 0.73～0.88 之间，平均值为 0.80，V/Cr 值介于 2.00～4.50 之间，平均值为 2.38；在平面上从 D1 井到 T1 井，V/(V＋Ni)均值分别为 0.80、0.81、0.80，V/Cr 均值分别为 2.32、2.36、2.42；在垂向上 P1—P3 小层，V/(V＋Ni)均值分别为 0.81、0.78、0.81，V/Cr 均值分别为 2.37、2.36、2.39(表 3)，表明研究区整体上处于贫氧—缺氧环境，平面和纵向变化不明显，反映有机质保存条件均较好。

5　古环境恢复

古气候、古生产力、古水深、古盐度和古氧化性是控制泥页岩中有机质富集的重要因素，直接控制了沉积物中的元素差异分布，因此元素地球化学特征通常能为古环境的恢复提供证据[31]。根据不同工区 3 口井 TOC 和主微量元素垂向演化特征，分别建立 3 口井垂向上的古环境演化图(图 5—图 7)，揭示了 P1—P3 小层的古环境变化。

研究区 P1—P3 小层为水进体系域。P1 小层形成于水进体系域早期，在温暖、湿润的气候背景下，大情字井工区发育淡水—半咸水的三角洲前缘席状砂—半深湖环境，形成品质较差的泥页岩(平均 w(TOC)为 1.29%)；在余字井—塔虎城井工区，沉积环境逐渐过渡为半咸水为主的半深湖—深湖环境，湖泊水体的盐度和还原性均较高，形成的泥页岩品质变好。

P2 小层相比于 P1 湖泊范围变大，古构造及古气候较为相似，气候温湿程度表现为上升趋势。由于水深增加，古沉积环境发生了一定变化，大情字井工区席状砂的范围缩小，半深湖的范围增大，湖泊生产力增大，内源有机质输入增加。古水体整体仍是淡水—半咸水的贫氧还原环境，大情字井工区陆源供给降低，湖泊生产力整体增大，较高的盐度容易形成盐度分层，并在贫氧还原环境下有机质的保存条件较好，P2 小层泥页岩品质较 P1 明显变好，使得古盐度及有机质来源成为控制有机质富集的关键因素。

P3 小层时期的湖泊水体较 P2 进一步扩大，研究区主要发育半深湖—深湖相沉积，有机质高度富集。此时在温暖、湿润的气候下，巨大的湖泊水体使藻类高度繁盛[9]，较高的湖泊生产力和半咸水、贫氧还原的环境有利于有机质富集。在稳定的构造条件和气候背景下的大型坳陷湖盆中，高度繁盛的水生生物和较好的保存条件共同作用下，形成了研究区品质最好的一套黑色页岩(图 8)。

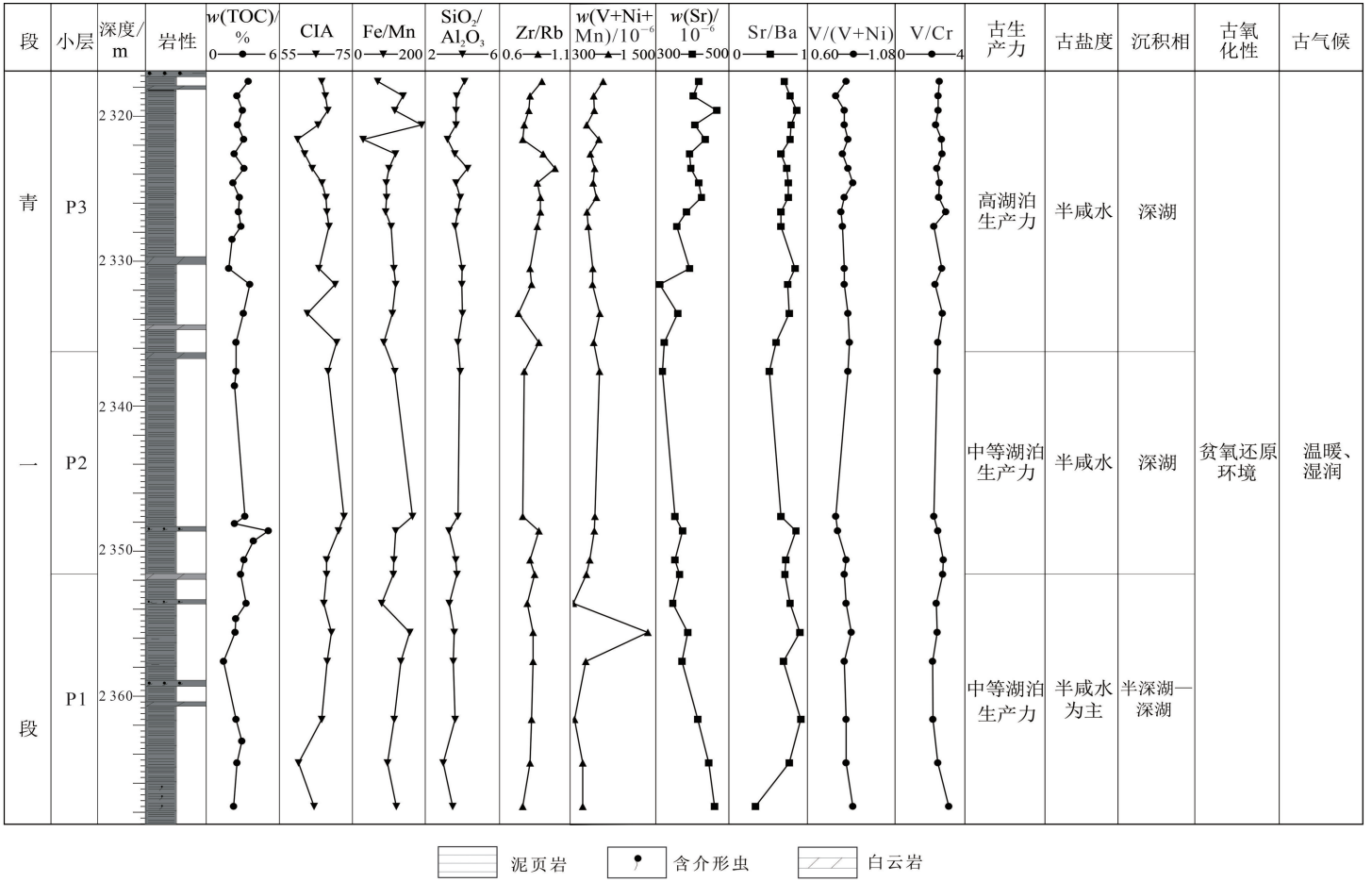


图 5　松南长岭凹陷 T1 井青一段 P1—P3 小层元素参数特征与古环境恢复

Fig.5　Element parameter characteristics and paleoenvironmental reconstruction of Well T1 in Layer P1 – P3 of K_2qn^1 of Changling depression in southern Songliao basin

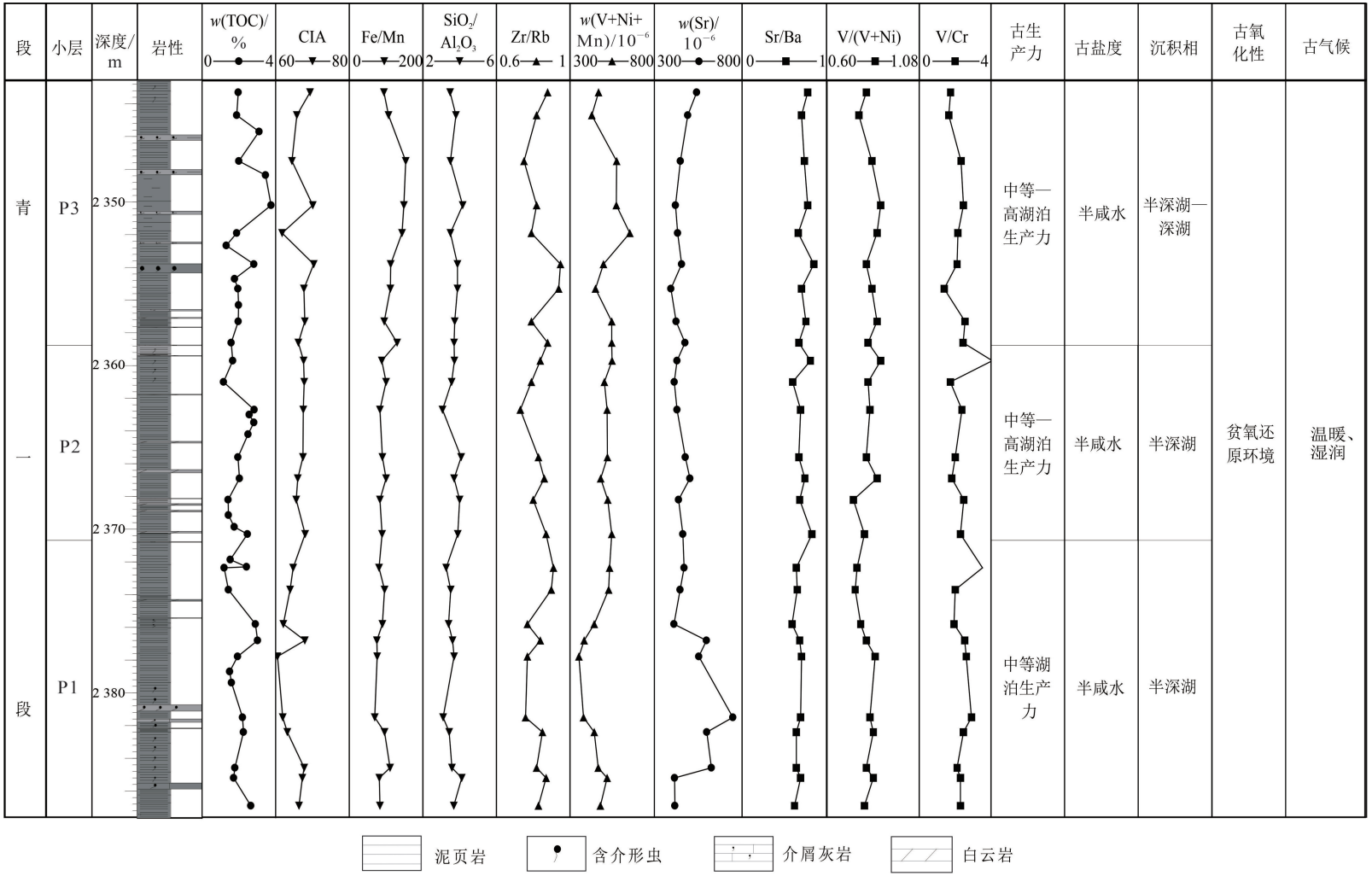


图 6　松南长岭凹陷 Y1 井青一段 P1—P3 小层元素参数特征与古环境恢复

Fig.6　Element parameter characteristics and paleoenvironmental reconstruction of Well Y1 in Layer P1 – P3 of K_2qn^1 of Changling depression in southern Songliao basin

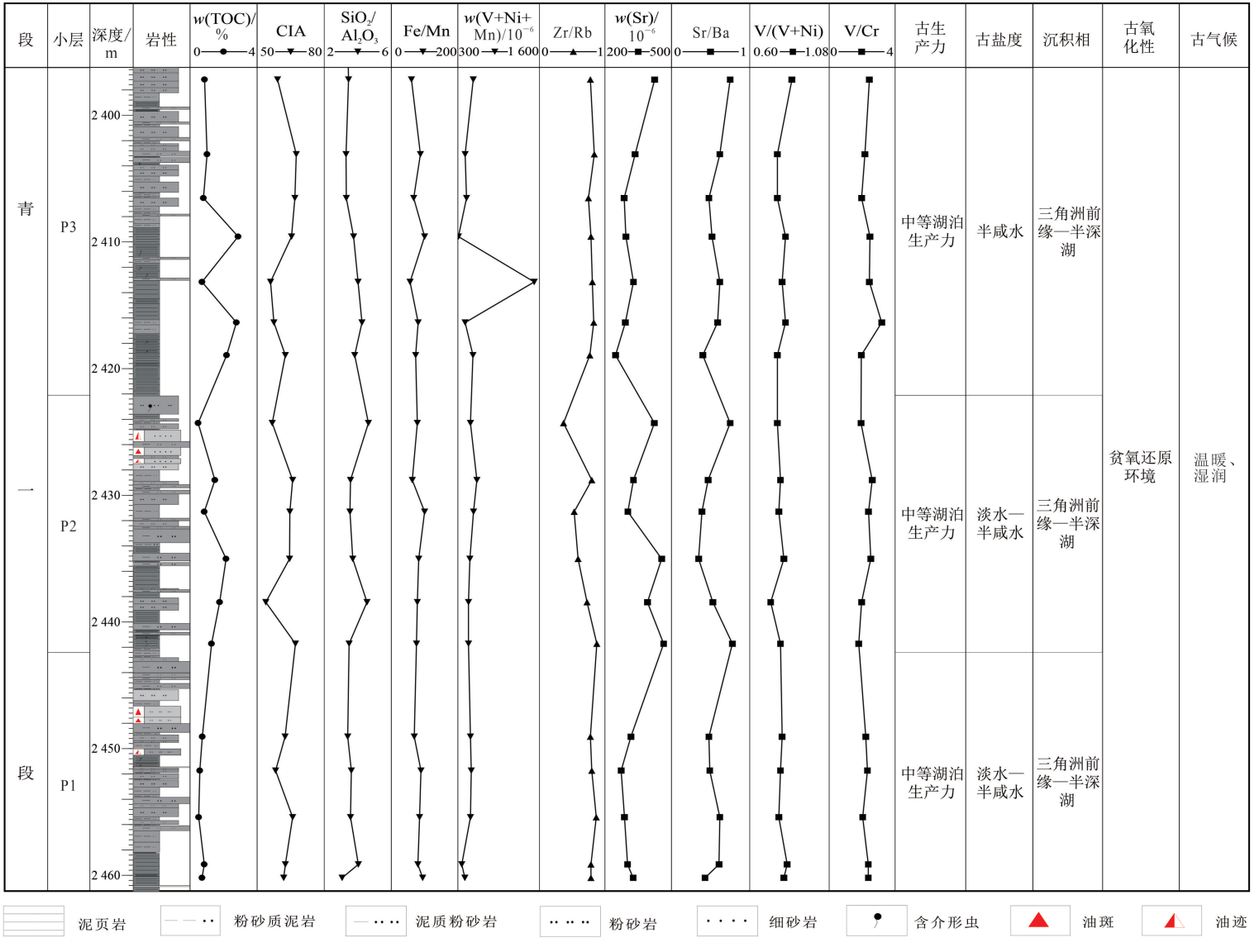


图 7　松南长岭凹陷 D1 井青一段 P1—P3 小层元素参数特征与古环境恢复

Fig.7　Element parameter characteristics and paleoenvironmental reconstruction of Well D1 in Layer P1 – P3 of K_2qn^1 of Changling depression in southern Songliao basin

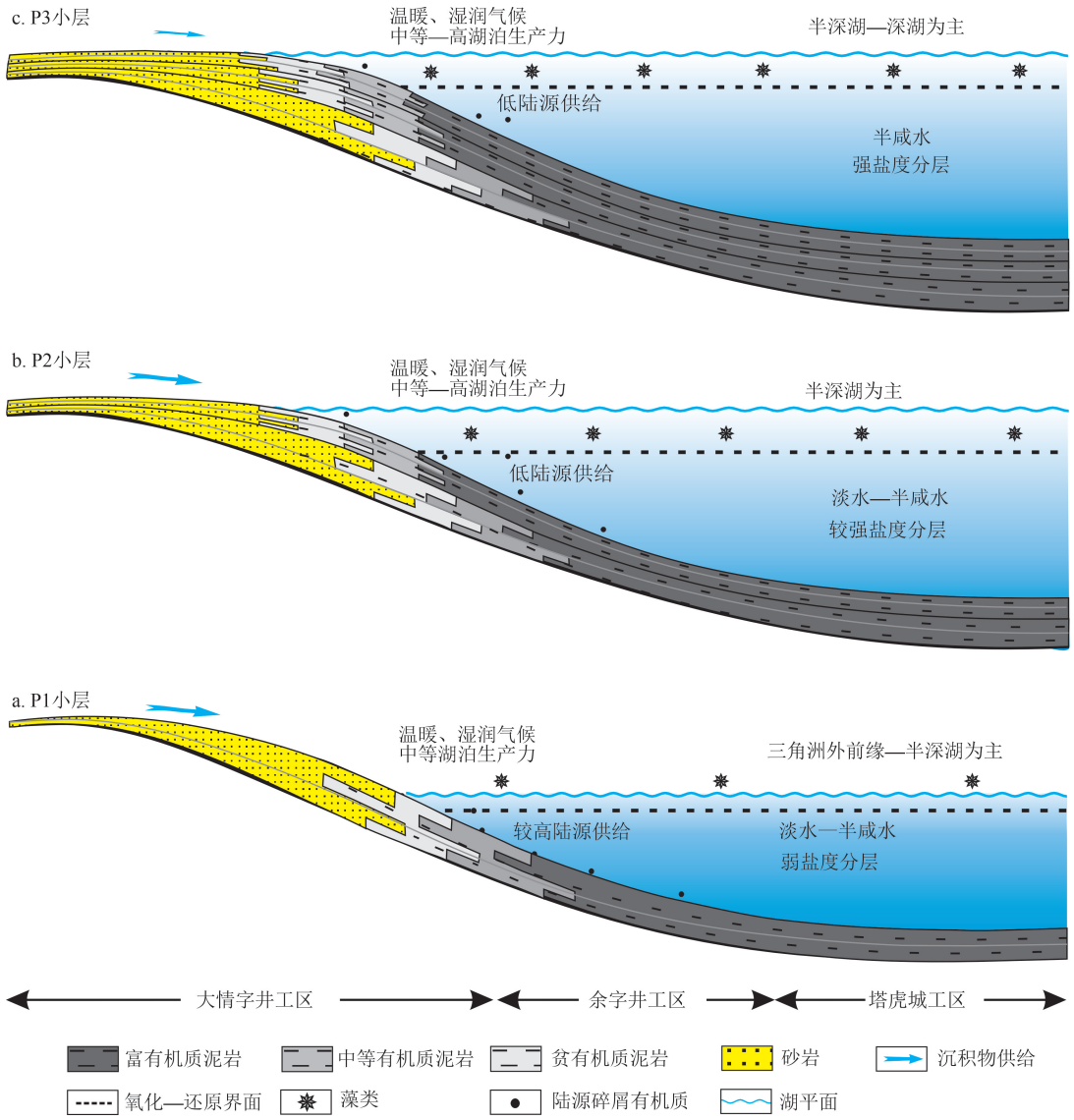


图 8　松南长岭凹陷青一段 P1—P3 小层泥页岩有机质聚集模式图

Fig.8　Organic matter accumulation pattern of mud shale in Layer P1 – P3 of K_2qn^1 in Changling depression in southern Songliao basin

6　结论

1）松南长岭凹陷青一段 P1—P3 小层泥页岩整体有机质丰度较高，平均 w(TOC)为 2.14%；在平面上大情字井—余字井—塔虎城工区和垂向上 P1—P2—P3 小层，随湖泊扩张、离岸距离变远、古水体深度增大，有机质丰度也明显增大。

2）CIA、Sr/Ba 和 V/(V＋Ni)等元素比值指示青一段 P1—P3 小层整体为温暖、湿润气候，湖泊水体表现为淡水—半咸水、贫氧—缺氧还原环境。

3）建立了长岭凹陷青一段 P1—P3 小层泥页岩有机质聚集模式，指出有机质来源和古盐度是导致有机质差异富集的关键因素。有机质演化表现为随湖盆扩张古水深增大，藻类等水生生物繁盛，大情字井—余字井—塔虎城工区湖泊有机质输入增加，古盐度增大，有机质相对富集；而垂向上 P1—P3 小层也表现出类似的规律变化，形成了一套品质较高的黑色泥页岩，是页岩油富集的有利层段。

参考文献(References)：

[1]　邹才能，杨智，崔景伟，等. 页岩油形成机制、地质特征及发展对策[J]. 石油勘探与开发，2013，40(1)：14－26.

Zou Caineng，Yang Zhi，Cui Jingwei，et al. Formation

Mechanism, Geological Characteristics and Evelopment Strategy of Nonmarine Shale Oil in China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2013, 40(1):14-26.

[2] 高瑞琪,蔡希源. 松辽盆地油气田形成条件与分布规律[M]. 北京:石油工业出版社, 1997:57-79.
Gao Ruiqi, Cai Xiyuan. Formation Conditions and Distribution Patterns of Oil and Gas Fields in the Songliao Basin [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1997:57-79.

[3] 邹才能,翟光明,张光亚,等. 全球常规—非常规油气形成分布、资源潜力及趋势预测[J]. 石油勘探与开发, 2015,42(1):13-25.
Zou Caineng, Zhai Guangming, Zhang Guangya, et al. Formation, Distribution, Notential and Prediction of Global Conventional and Unconventional Hydrocarbon Resources [J]. Petroleum Exploration and Development, 2015, 42(1): 13-25.

[4] Haschke M. The Eagle Ⅲ BKA System: A Novel Sediment Core X-Ray Fluorescence Analyser with Very High Spatial Resolution[J]. Geological Society, London, Special Publications, 2006, 267(1): 31-37.

[5] 范玉海,屈红军,王辉,等. 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,2015,61(增刊1):632-634.
Fan Yuhai, Qu Hongjun, Wang Hui, et al. 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, 2015, 61(Sup.1): 632-634.

[6] 张辉,王志章,杨亮,等. 松南上白垩统青山口组一段不同赋存状态页岩油定量评价[J]. 吉林大学学报(地球科学版),2022,52(2):315-327.
Zhang Hui, Wang Zhizhang, Yang Liang, et al. Quantitative Evaluation of Shale Oil in Different Occurrence States in First Member of Qingshankou Formation of Upper Cretaceousin South of Songliao Basin[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2022, 52(2): 315-327.

[7] 付晓飞,石海东,蒙启安, 等. 构造和沉积对页岩油富集的控制作用:以松辽盆地中央坳陷区青一段为例[J]. 大庆石油地质与开发,2020,39(3):56-71.
Fu Xiaofei, Shi Haidong, Meng Qi'an, et al. Controlling Effects of the Structure and Deposition on the Shale Oil Enrichment: Taking Formation qn_1 in the Central Depression of Songliao Basin as an Instance [J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2020, 39(3): 56-71.

[8] 刘招君,董清水,王嗣敏,等. 陆相层序地层学导论与应用[M]. 北京:石油工业出版社,2002:79-138.
Liu Zhaojun, Dong Qingshui, Wang Simin, et al. Introduction and Application of Continental Sequence Stratigraphy[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2002:79-138.

[9] 孙平昌. 松辽盆地东南部上白垩统含油页岩系有机质富集环境动力学[D]. 长春:吉林大学,2013.
Sun Pingchang. Environmental Dynamics of Organic Accumulation in the Oil Shale Bearing Layers in the Upper Cretaceous, Southeast Songliao Basin (NE China) [D]. Changchun: Jilin University, 2013.

[10] 柳波,孙嘉慧,张永清,等. 松辽盆地长岭凹陷白垩系青山口组一段页岩油储集空间类型与富集模式[J]. 石油勘探与开发,2021,48(3):521-535.
Liu Bo, Sun Jiahui, Zhang Yongqing, et al. Reservoir Space and Enrichment Model of Shale Oil in the First Member of Cretaceous Qingshankou Formation in the Changling Sag, Southern Songliao Basin, NE China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2021, 48(3): 521-535.

[11] 王岚,周海燕,商斐,等. 松辽盆地北部白垩纪青山口组黑色页岩元素地球化学特征及沉积古环境恢复[J]. 地质科学,2022,57(1):156-171.
Wang Lan, Zhou Haiyan, Shang Fei, et al. Element Geochemical Characteristics of Black Shale and Paleo-Sedimentary Environmental Restoration of Qingshankou Formation of the Cretaceous in the Northern Songliao Basin [J]. Chinese Journal of Geology, 2022, 57(1): 156-171.

[12] 李浩,陆建林,李瑞磊,等.长岭断陷下白垩统湖相烃源岩形成古环境及主控因素[J]. 地球科学,2017,42(10):1774-1786.
Li Hao, Lu Jianlin, Li Ruilei, et al. Generation Paleoenvironment and Its Controlling Factors of Lower Cretaceous Lacustrine Hydrocarbon Source Rocks in Changling Depression, South Songliao Basin [J]. Earth Science, 2017, 42(10): 1774-1786.

[13] 沉积岩中总有机碳测定:GB/T 19145—2022[S]. 北京:标准出版社,2022.
Determination of Total Organic Carbon in Sedimentary Rocks: GB/T 19145-2022[S]. Beijing: Standards Press of China, 2022.

[14] 硅酸盐岩石化学分析方法:第29部分:稀土等22个元素量测定:GB/T 14506.29—2010[S]. 北京:标准出版社,2012.
Methods for Chemical Analysis of Silicate Rocks: Part 29: Determination of 22 Elements Such as Rare Earths: GB/T 14506.29-2010[S]. Beijing:

Standards Press of China, 2012.

[15] Fedo C M, Nesbitt H W, Young G M. Unraveling the Effects of Potassium Metasomatism in Sedimentary Rocks and Paleosols, with Implications for Paleoweathering Conditions and Provenance[J]. Geology, 1995, 23(10): 921 - 924.

[16] 刘振庄. 宣城地区 GD1 井中上二叠统页岩元素地球化学研究[D]. 北京：中国地质大学(北京)，2020.
Liu Zhenzhuang. Elementary Geochemistry of Middle-Upper Permian Shale from Well GD1 in Xuancheng [D]. Beijing: China University of Geosciences(Beijing), 2020.

[17] 陈平，林卫兵，龚大建，等. 贵州岑巩区块下寒武统变马冲组黑色页岩沉积地球化学特征及其沉积环境意义[J]. 地质科学，2020,55(4): 1025 - 1043.
Chen Ping, Lin Weibing, Gong Dajian, et al. Sedimentary Geochemical Characteristics and Its Sedimentary Environment Significance of the Black Shale of the Lower Cambrian Bianmachong Formation in the Cengong Block, Guizhou Province [J]. Geological Sciences, 2020,55(4): 1025 - 1043.

[18] Jones B, Manning A C. Comparison of Geochemical Indices Used for the Interpretation Paleoredox Conditions in Ancient Mudstones [J]. Chemical Geology, 1994, 111(1/2/3/4): 111 - 129.

[19] Zeng S, Wang J, Fu X, et al. Geochemical Characteristics, Redox Conditions, and Organic Matter Accumulation of Marine Oil Shale from the Changliang Mountain Area, Northern Tibet, China [J]. Marine and Petroleum Geology, 2015, 64: 203 - 221.

[20] 王岚，周海燕，毕赫，等. 松辽盆地北部青山口组黑色页岩的地质特征与海水侵入的成因模式[J]. 西北大学学报(自然科学版)，2022,52(4):725 - 736.
Wang Lan, Zhou Haiyan, Bi He, et al. Geological Characteristics of Black Shale of Qingshankou Formation in Northern Songliao Basin and Genetic Model of Marion Transgression [J]. Journal of Northwest University (Natural Science Edition), 2022, 52(4): 725 - 736.

[21] 林森虎，袁选俊，杨智. 陆相页岩与泥岩特征对比及其意义：以鄂尔多斯盆地延长组 7 段为例[J]. 石油与天然气地质，2017,38(3):517 - 523.
Lin Senhu, Yuan Xuanjun, Yang Zhi. Comparative Study on Lacustrine Shale and Mudstone and Its Significance: A Case from the 7 th Member of Yanchang Formation in the Ordos Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2017, 38(3): 517 - 523.

[22] 刘惠民，杨怀宇，张鹏飞，等. 古湖泊水介质条件对混积岩相组合沉积的控制作用：以渤海湾盆地东营凹陷古近系沙河街组三段为例[J]. 石油与天然气地质，2022,43(2):297 - 306.
Liu Huimin, Yang Huaiyu, Zhang Pengfei, et al. Control Effect of Paleolacustrine Water Conditions on Mixed Lithofacies Assemblages: A Case Study of the Palaeogene Es_3, Dongying Sag, Bohai Bay Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2022, 43(2): 297 - 306.

[23] 邓宏文，钱凯. 沉积地球化学与环境分析[M]. 兰州：科学技术出版社，1993:1 - 262.
Deng Hongwen, Qian Kai. Sedimentary Geochemistry and Environmental Analysis [M]. Lanzhou: Science and Technology Press, 1993: 1 - 262.

[24] Rohling E J. Paleosalinity: Confidence Limits and Future Applications[J]. Marine Geology, 2000, 163 (1/2/3/4): 1 - 11.

[25] 李浩，徐怀民，王千军，等. 准东地区平地泉组微量元素地球化学特征及油气地质意义[J]. 断块油气田，2023,30(2):277 - 285.
Li Hao, Xu Huaimin, Wang Qianjun, et al. Geochemical Characteristics and Petroleum Geological Significance of Trace Elements of Pingdiquan Formation in Eastern Junggar Basin[J]. Fault-Block Oil and Gas Field, 2023,30(2): 277 - 285.

[26] 宁方兴，王学军，郝雪峰，等. 东营凹陷细粒沉积岩岩相组合特征[J]. 西南石油大学学报(自然科学版)，2020,42(4):55 - 65.
Ning Fangxing, Wang Xuejun, Hao Xuefeng, et al. Fine-Grained Sedimentary Rock Lithofacies Assemblage Characteristics in Dongying Depression [J]. Journal of Southwest Petroleum University (Natural Science Edition), 2020, 42(4): 55 - 65.

[27] 张顺. 松辽盆地晚白垩世“海侵”事件争论及其解决建议[J]. 大庆石油地质与开发，2021,40(3):1 - 12.
Zhang Shun. Arguments and Solutions on the Transgression Event in the Late Cretaceous of Songliao Basin [J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2021, 40(3): 1 - 12.

[28] 王璞珺，王东坡，杜小弟. 松辽盆地白垩系青山口组黑色页岩的形成环境及海水侵入的底流模式[J]. 岩相古地理，1996,16(1): 34 - 43.
Wang Pujun, Wang Dongpo, Du Xiaodi. The Origin of the Black Shales and the Bottom Current Model for Seawater Encroachment in the Cretaceous Qingshankou Formation, Songliao Basin Northeast China[J]. Sedimentary Facies and Palaeogeography, 1996, 16(1): 34 - 43.

[29] Holland H D. The Chemistry of the Ttmosphere and

Oceans[J]. New York, Wiley Intersci, 1978, 112(5): 351-373.

[30] Rimmer S M. Geochemical Paleoredox Indicators in Devonian-Mississippian Black Shales, Central Appalachian Basin (USA)[J]. Chemical Geology, 2003, 206(3): 373-391.

[31] Mclennan S M. Weathering and Global Denudation [J]. Journal of Geology, 1993, 101(2): 295-303.



CNKI中国知网 www.cnki.net

中国学术期刊影响因子年报

Annual Report for Chinese Academic Journals Impact Factors

统计刊源证书

《吉林大学学报(地球科学版)》

经过多项学术指标综合评定，贵刊入选

2024《中国学术期刊影响因子年报》统计源期刊。

特颁发此证书！

证书编号：LY 2024-CCDZ 证书有效期：2025年10月

《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司

中国科学文献计量评价研究中心

2024年10月10日