

引用本文:张迈,宋到福,王铁冠,等.鄂尔多斯盆地杭锦旗地区天然气地球化学特征及气源探讨[J].石油实验地质,2024,46(1):124-135.
DOI:10.11781/sysydz202401124.
ZHANG Mai, SONG Daofu, WANG Tieguan, et al. Geochemical characteristics and sources of natural gas in Hangjinqi area of Ordos Basin[J].
Petroleum Geology & Experiment, 2024, 46(1): 124-135. DOI: 10.11781/sysydz202401124.

鄂尔多斯盆地杭锦旗地区 天然气地球化学特征及气源探讨

张迈¹, 宋到福¹, 王铁冠¹, 何发岐², 张威², 安川², 刘悦¹, 陆振港¹

1. 中国石油大学(北京) 油气资源与工程全国重点实验室, 北京 102249;

2. 中国石化 华北油气分公司, 郑州 450000

摘要:为明确鄂尔多斯盆地杭锦旗地区不同区带天然气特征及来源上的差异,通过天然气气体组分分析和碳同位素分析等手段,对杭锦旗地区 3 个主要勘探区带天然气地球化学组成特征进行了详细的对比剖析,并结合各区带天然气在成藏过程中的差异,对其来源进行了分析探讨。研究区天然气烃类气体含量较高(以甲烷为主),干燥系数多低于 0.95,整体呈现出湿气特征,非烃类气体主要为二氧化碳和氮气,含量较低;天然气碳同位素 $\delta^{13}C_1$ 、 $\delta^{13}C_2$ 和 $\delta^{13}C_3$ 组成表现为正碳序列分布,但不同区带天然气碳同位素组成之间存在着差异,其中什股壕区带天然气 $\delta^{13}C_1$ 值最重,而新召区带天然气 $\delta^{13}C_2$ 和 $\delta^{13}C_3$ 值要明显重于其他 2 个区带。成因分析结果表明,研究区 3 个区带天然气均为有机成因气,呈现出煤型气(腐殖型气)的特征,主体为干酪根初次裂解气,且其气源岩处于高成熟—过成熟热演化阶段。结合气源对比结果与地质背景,推测新召区带天然气主要由下伏山西组烃源岩供烃,独贵加汗和什股壕区带天然气则来源于断裂南部太原组和山西组烃源岩的共同贡献,但前者太原组烃源岩贡献比例相对更高。

关键词:成因类型;气源对比;天然气;杭锦旗地区;鄂尔多斯盆地

中图分类号:TE122.113

文献标识码:A

DOI:10.11781/sysydz202401124

Geochemical characteristics and sources of natural gas in Hangjinqi area of Ordos Basin

ZHANG Mai¹, SONG Daofu¹, WANG Tieguan¹, HE Faqi²,

ZHANG Wei², AN Chuan², LIU Yue¹, LU Zhengang¹

1. National Key Laboratory of Petroleum Resources and Engineering,
China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China;

2. North China Company, SINOPEC, Zhengzhou, Henan 450000, China

Abstract: In order to clarify the differences of characteristics and sources of natural gas in different zones in Hangjinqi area of Ordos Basin, the geochemical composition characteristics of natural gas in three major exploration zones in Hangjinqi area were compared and analyzed in detail by means of gas composition analysis and carbon isotope analysis, and sources of natural gas in different zones were discussed based on the differences in the process of gas accumulation in different zones. The results show that the natural gas of the study area has a high content of hydrocarbon gases (mainly methane), and the drying coefficients are mostly lower than 0.95, suggesting that the natural gas is dominated by wet gases. The non-hydrocarbon gases are mainly carbon dioxide and nitrogen, which have lower contents. The carbon isotopes $\delta^{13}C_1$, $\delta^{13}C_2$ and $\delta^{13}C_3$ of natural gas show a positive carbon series distribution, but there are differences among natural gas carbon isotopes compositions in different zones. The $\delta^{13}C_1$ value of natural gas in Shiguhaio zone is the heaviest, and the $\delta^{13}C_2$ and $\delta^{13}C_3$ values of natural gas in Xinzhaio zone are significantly heavier than that in the other two zones. The genetic analysis results show

收稿日期(Received):2023-10-28;修订日期(Revised):2023-12-14;出版日期(Published):2024-01-28。

作者简介:张迈(1995—),男,博士生,从事有机地球化学、油藏地球化学等方面的研究。E-mail:zhangmai2024@163.com。

通信作者:宋到福(1983—),男,博士,副教授,从事有机地球化学、油藏地球化学等方面的研究。E-mail:songdaofu2008@163.com。

基金项目:国家重点研发计划项目“富氢天然气成藏机制及氮资源分布预测技术”(2021YFA0719000)资助。

© Editorial Office of Petroleum Geology & Experiment. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license.

that the natural gas in the three regions of the study area is of organic genesis, showing the characteristics of coal-type gas (humus-type gas), and the main body is kerogen primary cracking gas, and the source rocks are in the stage of high-mature to over-mature thermal evolution. Combined with the results of gas-source correlation and geological background, it is inferred that the natural gas in Xinzhao zone is mainly derived from the underlying source rocks of Shanxi Formation, and the natural gas in Dugujiahan and Shiguhaohao zones is sourced from the source rocks of Taiyuan and Shanxi formations in the southern part of the fault, but Taiyuan source rocks contribute more.

Key words: genetic type; gas-source correlation; natural gas; Hangjinqi area; Ordos Basin

鄂尔多斯盆地是我国重要的含油气盆地之一,其上古生界发育有大型岩性油气藏。近年来随着勘探开发工作的不断深入,在盆地北部先后发现了苏里格、榆林、乌审旗、大牛地以及东胜等大中型气田^[1-5]。杭锦旗地区隶属于东胜气田,截至目前该地区天然气探明储量已达千亿立方米,勘探潜力巨大^[6-7]。前人对杭锦旗地区天然气的成藏地质条件、成因类型以及成藏期次等方面开展了一系列研究,尤欢曾、杨华等^[8-9]基于对研究区成藏条件的分析,指出区内呈广覆性展布的石炭系—二叠系的太原组—山西组煤系烃源岩为油气成藏提供了优质的烃源条件,而二叠系广泛发育的河流相、三角洲相等沉积体系则形成了良好的储盖组合;彭威龙等^[10]通过将区内天然气与其他气田天然气进行对比分析,认为研究区天然气主要来源于下伏煤系烃源岩,而非相邻的气田;纪文明、徐波等^[11-12]针对这批煤系烃源岩开展了一系列研究,认为研究区气源岩生烃强度高,为较好—非常好烃源岩,其展布与演化主要受区内古构造及其演化控制,泊尔江海子断裂以南的烃源岩要优于断裂以北的烃源岩;倪春华、薛会等^[13-14]基于对天然气地球化学特征的分析认为其主体为煤型气,且处于成熟—高成熟演化阶段;此外薛会等^[15]还通过生烃时间法、流体包裹体法等方法指出研究区天然气存在 2 期成藏。以往的研究虽对区内天然气特征有了一定的认识,却均将其成藏视为一个整体的过程,笼统地认为石炭系—二叠系的煤系烃源岩为其主力气源岩,而不同层位烃源岩的贡献则缺乏进一步的探讨。近期我们的研究发现,杭锦旗地区不同区带天然气的地球化学特征存在着较明显的差异,且太原组和山西组 2 套气源岩之间也存在着明显差别^[16-17]。因此,详细对比剖析不同区带天然气的有机地球化学组成特征,厘清各区带天然气的具体来源及成藏过程的差异性,对该区下一步天然气勘探开发有着重要的意义。

本文通过气相色谱分析、碳同位素分析等技术手段,对杭锦旗地区 3 个主力勘探区带上古生界天

然气的地球化学特征进行了详尽的分析,进一步明确它们在成因以及来源上的区别,以期对该地区后续的天然气的运移成藏研究工作提供帮助。

1 区域地质概况

杭锦旗地区位于鄂尔多斯盆地北部(下面简称鄂北),其矿区跨越伊盟隆起、天环坳陷和伊陕斜坡 3 个一级构造单元,勘探面积约 8 940 km²^[6-7]。受到鄂北地形的影响,在构造上研究区呈现为“北高南低、东高西低”的大型单斜,区内主要发育有泊尔江海子、乌兰吉林庙和三眼井 3 条近东西向断裂。以泊尔江海子断裂为界,研究区可以划分为南、北 2 个区域,其中北部地区构造整体上比较复杂,断层发育,而南部地区构造则相对平缓^[16-21]。目前研究区天然气主要开发区为北部的什股壕区带以及南部的独贵加汗和新召区带(图 1)。

在加里东运动晚期,由于盆地北缘整体抬升遭受剥蚀,研究区上石炭统以前的地层均缺失,因此由老至新研究区先后沉积有石炭系、二叠系、三叠系、侏罗系、白垩系、古近系、新近系以及第四纪^[22-25](图 2)。上石炭统太原组与下二叠统山西组的煤系烃源岩是研究区油气的主要来源,其在全区均有分布,且在平面上呈现出“北厚南薄、东厚西薄”的展布特征,烃源岩有机质含量高,均以 III 型干酪根为主,成熟度也自西南向东北逐渐减小;二叠系下石盒子组发育有大套致密砂岩,分布较广,为天然气的运移和聚集提供了良好的条件,是研究区的主要产气层;二叠系上石盒子组与石千峰组发育的泥岩紧覆于致密砂岩之上,形成了较好的盖层^[26-29]。

2 样品采集与实验分析

本次研究在研究区不同区带采集上古生界天然气样品共 62 件,其中什股壕区带 15 件,独贵加汗区带 33 件,新召区带 14 件(表 1),采样点位分布如图 1 所示。所开展的天然气的色谱、同位素测试等分析实验均在中国石油大学(北京)油气资

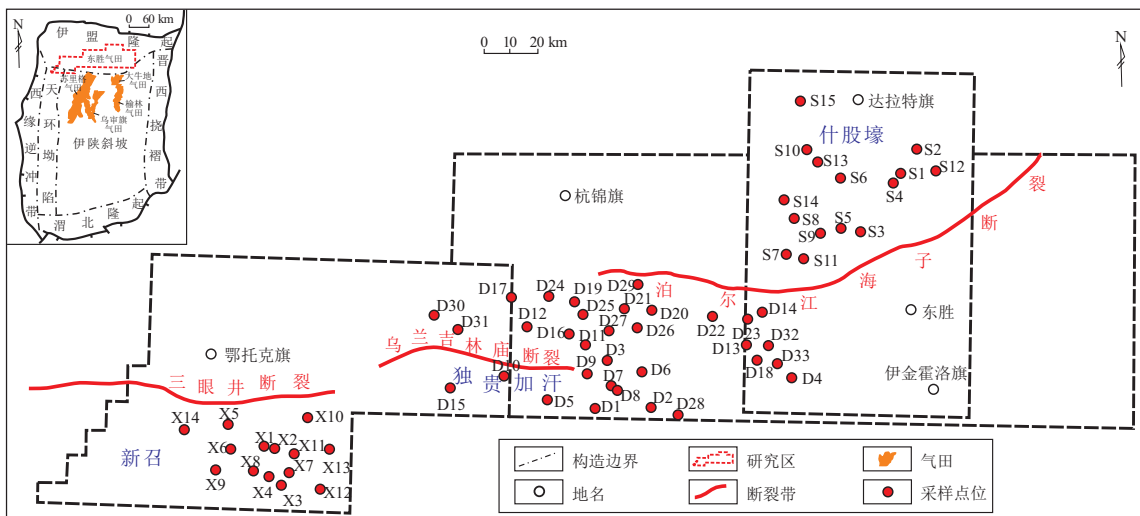


图 1 鄂尔多斯盆地杭锦旗地区位置及采样点分布
据文献[16]修改。

Fig.1 Location of Hangjinqi area in Ordos Basin and distribution of sampling points

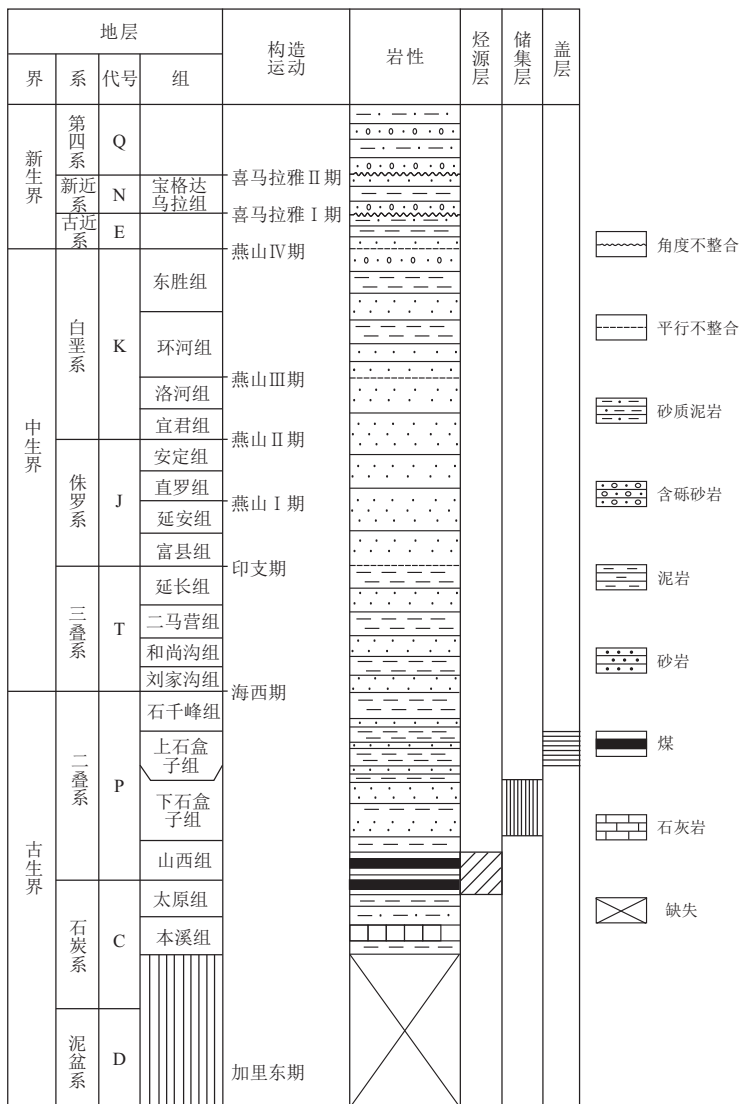


图 2 鄂尔多斯盆地杭锦旗地区地层分布
据文献[23]修改。

Fig.2 Stratigraphic distribution of Hangjinqi area in Ordos Basin

表 1 鄂尔多斯盆地杭锦旗地区上古生界天然气组分及稳定碳同位素数据

Table 1 Components and stable carbon isotopes of natural gas in Upper Paleozoic in Hangjinqi area of Ordos Basin

区带	井名	层位	组分含量/%			C ₁ /ΣC ₁₋₅	稳定碳同位素/‰		
			C ₁	N ₂	CO ₂		δ ¹³ C ₁	δ ¹³ C ₂	δ ¹³ C ₃
什股壕	S1	盒 2	89.03	2.62	0.03	0.92	-33.1	-25.5	-24.7
什股壕	S2	盒 2	88.57	2.72	0.14	0.92	-33.3	-25.9	-25.2
什股壕	S3	盒 3	69.98	23.21	0.01	0.92	-33.4	-25.5	-24.6
什股壕	S4	盒 2	71.10	20.44	0.45	0.93	-33.1	-25.5	-24.7
什股壕	S5	盒 2/3	87.94	2.20	0.01	0.91	-33.1	-25.4	-24.2
什股壕	S6	盒 2	82.17	7.70	0.35	0.92	-33.6	-25.6	-24.3
什股壕	S7	盒 2	70.28	21.14	0.37	0.92	-31.3	-25.5	-23.9
什股壕	S8	盒 2	64.30	28.60	0.40	0.94	-31.8	-25.6	-24.0
什股壕	S9	盒 2	90.64	1.91	0.00	0.94	-33.7	-25.8	-24.6
什股壕	S10	盒 2	88.99	2.35	0.10	0.92	-33.7	-26.3	-24.9
什股壕	S11	盒 2	89.59	2.05	0.07	0.92	-33.6	-26.5	-25.1
什股壕	S12	盒 2	75.62	4.10	0.41	0.82	-32.8	-25.9	-25.2
什股壕	S13	盒 2	59.08	33.64	0.28	0.93	-33.4	-26.2	-24.9
什股壕	S14	盒 2	67.58	24.16	0.38	0.92	-33.2	-25.5	-24.9
什股壕	S15	盒 2	86.19	5.67	0.10	0.91	-33.4	-27.3	-25.6
独贵加汗	D1	盒 1/2	92.22	2.02	0.06	0.96	-34.7	-27.7	-25.8
独贵加汗	D2	盒 1	81.38	1.09	2.26	0.86	-36.5	-27.8	-26.9
独贵加汗	D3	盒 1	90.01	2.06	0.33	0.94	-34.8	-27.3	-26.4
独贵加汗	D4	盒 1	76.17	1.57	0.46	0.79	-35.9	-26.5	-26.1
独贵加汗	D5	盒 3	92.84	2.23	0.06	0.96	-34.0	-27.3	-24.6
独贵加汗	D6	盒 2	90.20	3.90	0.05	0.95	-34.3	-27.9	-25.6
独贵加汗	D7	盒 2	89.81	3.38	0.13	0.94	-34.5	-27.7	-25.6
独贵加汗	D8	盒 2	92.33	2.59	0.06	0.96	-34.3	-28.2	-25.6
独贵加汗	D9	盒 2	86.20	5.39	0.03	0.92	-34.6	-26.4	
独贵加汗	D10	盒 2	94.55	1.70	0.13	0.97	-34.0	-27.2	-24.4
独贵加汗	D11	盒 1	67.38	23.33	0.57	0.91	-33.3	-26.3	-25.5
独贵加汗	D12	盒 1	84.53	5.56	0.55	0.93	-32.6		-24.0
独贵加汗	D13	盒 1	70.25	21.67	0.57	0.93	-33.1		-24.9
独贵加汗	D14	盒 1	84.96	6.67	0.79	0.92	-33.6	-26.9	-24.8
独贵加汗	D15	盒 1	83.14	3.99	0.37	0.87	-35.2	-27.5	-27.3
独贵加汗	D16	盒 1	80.51	5.88	0.76	0.86	-34.8	-25.6	-25.9
独贵加汗	D17	盒 1	79.95	7.58	0.52	0.87	-34.4	-26.0	-25.8
独贵加汗	D18	盒 1	74.15	3.19	0.98	0.77	-35.5	-26.1	-26.0
独贵加汗	D19	盒 1	86.38	6.09	0.88	0.93	-33.2	-28.1	-26.4
独贵加汗	D20	盒 1	86.80	4.86	0.93	0.92	-34.4	-26.6	-25.9
独贵加汗	D21	盒 1	85.40	4.45	0.97	0.90	-33.9	-26.3	-25.4
独贵加汗	D22	盒 1	88.64	3.74	0.72	0.93	-34.3	-27.2	-25.6
独贵加汗	D23	盒 1	84.39	7.74	0.90	0.92	-33.1	-28.1	-27.3
独贵加汗	D24	盒 1	87.65	5.25	0.55	0.93	-34.1	-27.0	-25.5
独贵加汗	D25	盒 1	89.34	3.55	0.66	0.93	-34.5	-27.0	-25.8
独贵加汗	D26	盒 1	89.93	3.74	0.52	0.94	-34.1	-26.6	-24.6
独贵加汗	D27	盒 1	89.06	5.03	0.41	0.94	-34.3	-27.4	-25.7
独贵加汗	D28	盒 1	85.01	5.05	0.48	0.90	-34.3	-26.4	-25.6
独贵加汗	D29	盒 1	83.85	6.80	0.34	0.90	-34.6	-26.6	-25.4
独贵加汗	D30	盒 1	88.28	3.81	0.88	0.93	-34.5	-26.6	-25.1
独贵加汗	D31	盒 1	84.11	2.98	0.70	0.87	-34.7	-26.8	-26.0
独贵加汗	D32	盒 2	57.57	31.78	0.91	0.90			
独贵加汗	D33	盒 1	81.01	9.02	0.97	0.90			
新召	X1	盒 1	84.25	1.67	0.71	0.88	-34.6	-24.9	-24.9

续表 1

Table 1 (continued)

区带	井名	层位	组分含量/%			$C_1/\Sigma C_{1-5}$	稳定碳同位素/‰		
			C_1	N_2	CO_2		$\delta^{13}C_1$	$\delta^{13}C_2$	$\delta^{13}C_3$
新召	X2	盒 1	84.19	2.78	0.68	0.89			
新召	X3	盒 1	81.79	2.84	1.57	0.87	-35.1	-24.0	-24.5
新召	X4	盒 1	86.73	2.28	1.13	0.91	-34.4	-24.4	-24.9
新召	X5	盒 1	87.12	3.80	0.06	0.92			
新召	X6	盒 1	85.56	8.16	0.12	0.95	-33.6	-24.4	-23.6
新召	X7	盒 1	64.75	22.73	0.54	0.87			
新召	X8	盒 1	74.26	13.27	0.91	0.90			
新召	X9	盒 1	80.53	3.33	1.27	0.84	-34.2	-24.2	-23.2
新召	X10	盒 1	81.53	2.89	1.66	0.85	-33.8	-23.9	-23.0
新召	X11	盒 1	78.56	3.79	2.01	0.83	-34.8	-24.0	-23.9
新召	X12	盒 1	79.14	3.74	1.52	0.84	-34.4	-24.2	-24.0
新召	X13	盒 1	55.12	32.76	0.85	0.83			
新召	X14	盒 1	67.06	20.28	1.51	0.86			

源与工程全国重点实验室完成。

2.1 天然气气相色谱分析

通过不锈钢管将气瓶与进样口连接,打开气瓶出口阀,用气样对进样系统进行吹扫 15~30 s 后,启动采集程序并关闭出口阀,使气样随载气流进入色谱柱中。本次所用仪器为 Agilent 8890 气相色谱仪,色谱柱 HP-5MS (30 m×0.25 mm×0.25 μm),载气为氦气,柱流量 1.0 mL/min。

2.2 天然气同位素测定

在过饱和盐水中通过排水集气法富集天然气后,用注射器抽取 50 μL 天然气样品注入仪器,随后启动采集程序,天然气各烃类组分在氧化装置中转化为二氧化碳并随载气流进入同位素质谱仪进行碳同位素组成测定。所选用仪器为 MAT 253 稳定同位素测定仪,色谱柱 HP-PLOT Q (30 m×0.53 mm×40 μm),载气为氦气,柱流量 1.3 mL/min。为确保实验数据准确性,在样品测定过程中,每测 12 个样品后插入一个标准样品对仪器工作状态进行监测。

3 天然气地球化学特征

3.1 天然气组分特征

本次分析所检测到的天然气烃类气体组分包括甲烷、乙烷、丙烷、正丁烷、异丁烷、正戊烷和异戊烷等(表 1)。甲烷为烃类气体的主要成分,其相对含量占总组分的 55.12%~94.55%,平均值为 81.45%,其中什股壕、独贵加汗、新召区带天然气甲烷含量分别为 59.08%~90.64%、57.57%~94.55%、55.12%~87.12%,平均值分别为 78.74%、84.18%、

77.90%(图 3)。

研究区天然气干燥系数($C_1/\Sigma C_{1-5}$)变化范围为 0.77~0.97,平均值为 0.90,整体上呈现出湿气的特征^[30-31]。就不同区带而言,什股壕区带干燥系数为 0.82~0.94,平均值为 0.92,均为湿气;独贵加汗区带干燥系数为 0.77~0.97,平均值为 0.91,其中干燥系数小于 0.95 的样品占 87.88%,以湿气为主;新召区带干燥系数为 0.83~0.95,平均值为 0.87,均为湿气(图 4)。

二氧化碳、氮气等非烃类气体在所有样品中均有检测到,其中二氧化碳相对含量普遍较低,最高仅达 2.26%;氮气含量大部分低于 6%,但部分井位(如 S4 井、S7 井、S13 井等)氮气含量明显较高(>30%)。由于采样时部分地区正在开展连续油管氮气气举排液工艺,故推测该工艺导致了天然气中氮气含量远高于正常范围。

3.2 天然气碳同位素特征

杭锦旗地区上古生界天然气甲烷、乙烷、丙烷等烷烃气的碳同位素分布范围分别为-36.5‰~-31.3‰、-28.2‰~-23.9‰、-27.3‰~-23.0‰(表 1)。其中,什股壕区带烷烃气碳同位素为-33.7‰~-31.3‰($\delta^{13}C_1$)、-27.3‰~-25.4‰($\delta^{13}C_2$)和-25.6‰~-23.9‰($\delta^{13}C_3$);独贵加汗区带烷烃气碳同位素为-36.5‰~-32.6‰($\delta^{13}C_1$)、-28.2‰~-25.6‰($\delta^{13}C_2$)和-27.3‰~-24.0‰($\delta^{13}C_3$);新召区带烷烃气碳同位素为-35.1‰~-33.6‰($\delta^{13}C_1$)、-24.9‰~-23.9‰($\delta^{13}C_2$)和-24.9‰~-23.0‰($\delta^{13}C_3$)。主体上,3 个区带烷烃气碳同位素均呈现出 $\delta^{13}C_1 < \delta^{13}C_2 < \delta^{13}C_3$ 的正碳序列分布特征(图 5),

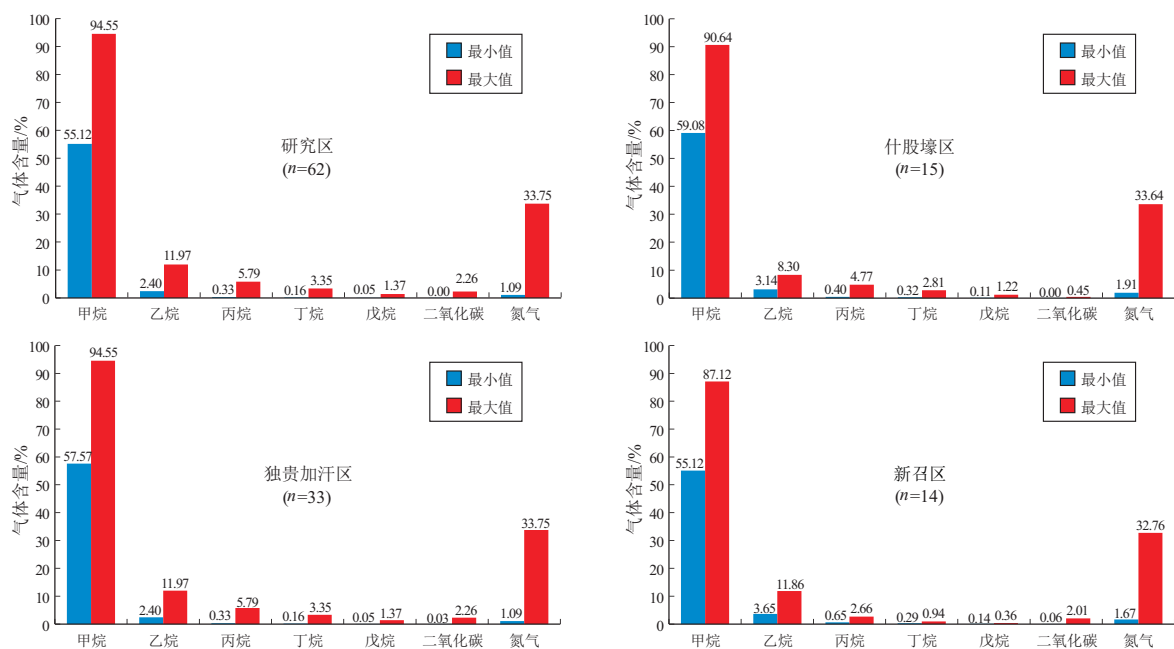


图 3 鄂尔多斯盆地杭锦旗地区不同区带天然气组分含量

Fig.3 Component contents of natural gas in different zones of Hangjinqi area in Ordos Basin

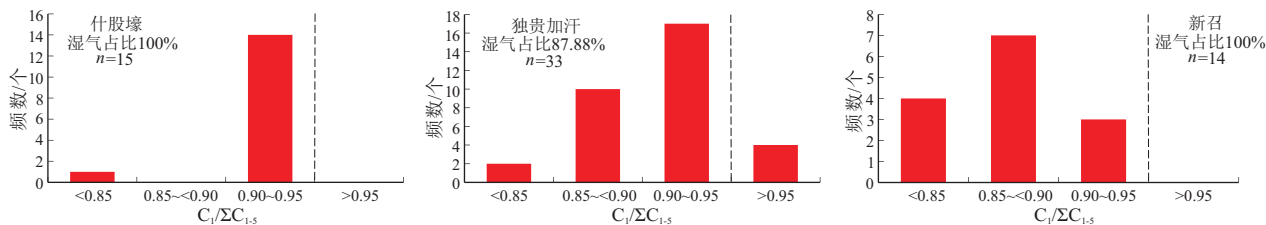


图 4 鄂尔多斯盆地杭锦旗地区不同区带天然气干燥系数频数分布直方图

Fig.4 Frequency distribution histogram of drying coefficient of natural gas in different zones of Hangjinqi area in Ordos Basin

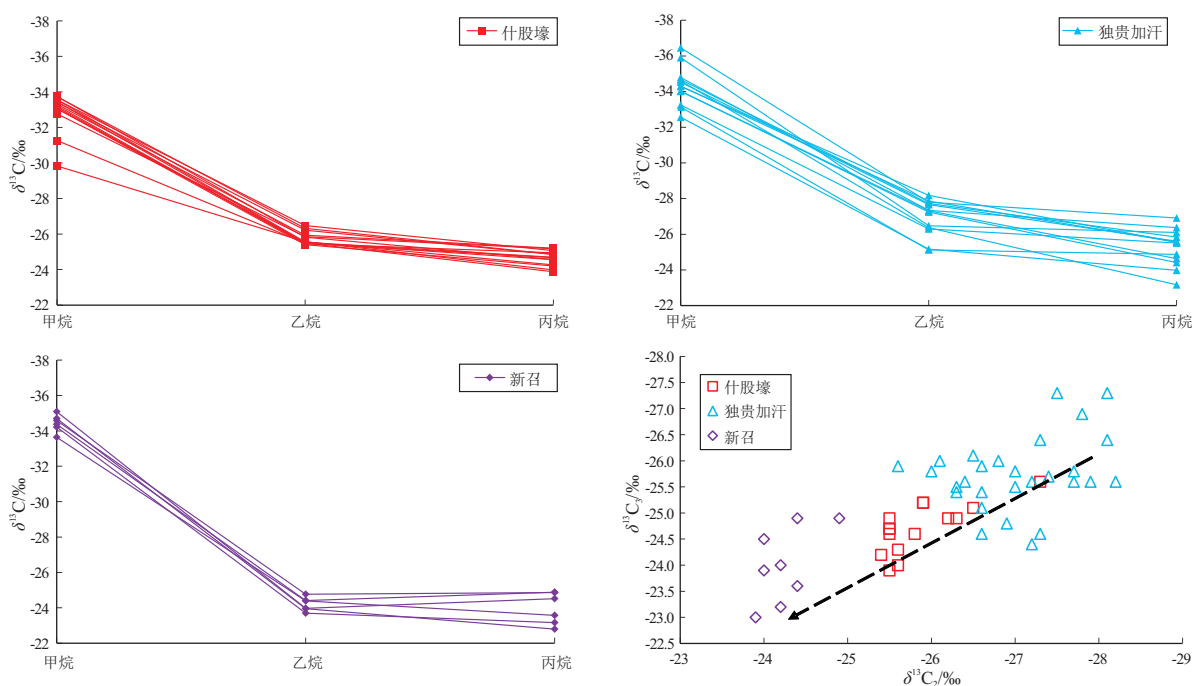


图 5 鄂尔多斯盆地杭锦旗地区不同区带烷烃气碳同位素组成特征

Fig.5 Characteristics of alkane carbon isotopic compositions in different zones of Hangjinqi area in Ordos Basin

但不同区带天然气碳同位素组成之间仍存在差异。在甲烷碳同位素方面,什股壕区带的 $\delta^{13}C_1$ 值普遍偏重,独贵加汗区带次之,新召区带 $\delta^{13}C_1$ 值最轻,这可能与油气运移过程中甲烷碳同位素分馏效应有关,但不排除母源与成熟度的影响;在乙烷、丙烷等重烃气碳同位素方面,新召区带天然气 $\delta^{13}C_2$ 值和 $\delta^{13}C_3$ 值明显重于独贵加汗区带和什股壕区带天然气,表明它们的天然气来源可能不同。

4 天然气成因类型鉴别及气源探讨

4.1 天然气成因类型鉴别

天然气的碳同位素值一般与烃源岩母质类型及成熟度有关,故而通常将天然气碳同位素组成作为鉴别成因类型的指标^[32-34]。通常无机成因气具有负碳同位素系列,即 $\delta^{13}C_1 > \delta^{13}C_2 > \delta^{13}C_3$,而有机成因烷烃气则具有正碳同位素系列,即 $\delta^{13}C_1 < \delta^{13}C_2 < \delta^{13}C_3$ 。根据前文对研究区天然气碳同位素组成分析结果可知,什股壕、独贵加汗以及新召区带的天然气碳同位素均呈正序列分布,说明天然气为有机成因气。此外,与有机成因气相比,无机成

因气的碳同位素往往要重得多。戴金星提出,以 $\delta^{13}C_1$ 值为 $-30‰$ 作为划分天然气无机成因和有机成因的界限,当 $\delta^{13}C_1 > -30‰$ 时为无机成因气,而当 $\delta^{13}C_1 < -30‰$ 时则为有机成因气^[35-36]。研究区3个区带 $\delta^{13}C_1$ 最大值分别为 $-31.3‰$ 、 $-32.6‰$ 和 $-33.6‰$,进一步证明其均为有机成因天然气。

根据油型气和煤型气在天然气碳同位素组成方面的差异,国内外学者编制了一系列成因类型鉴别图版。例如,在天然气 $\delta^{13}C_1 - \delta^{13}C_2$ 成因鉴别图(图6)中,什股壕、独贵加汗以及新召3个区带的天然气与腐殖气(煤型气) $\delta^{13}C_1 - \delta^{13}C_2$ 分布特征一致,表明其主要为腐殖气(煤型气)^[37-38]。同样,从戴金星提出的有机不同成因烷烃气 $\delta^{13}C_1 - \delta^{13}C_2 - \delta^{13}C_3$ 鉴别图(图7)中我们可以看出,研究区3个区带天然气的数据点主要分布于I类煤型气区,反映研究区天然气整体上具有煤型气的特点^[35,39]。从天然气 $\delta^{13}C_2$ 与 $(\delta^{13}C_2 - \delta^{13}C_1)$ 相关关系鉴别图(图8)中可以发现,研究区天然气均以中—晚期腐殖型气为主,说明其气源岩处于高成熟—过成熟热演化阶段^[40]。

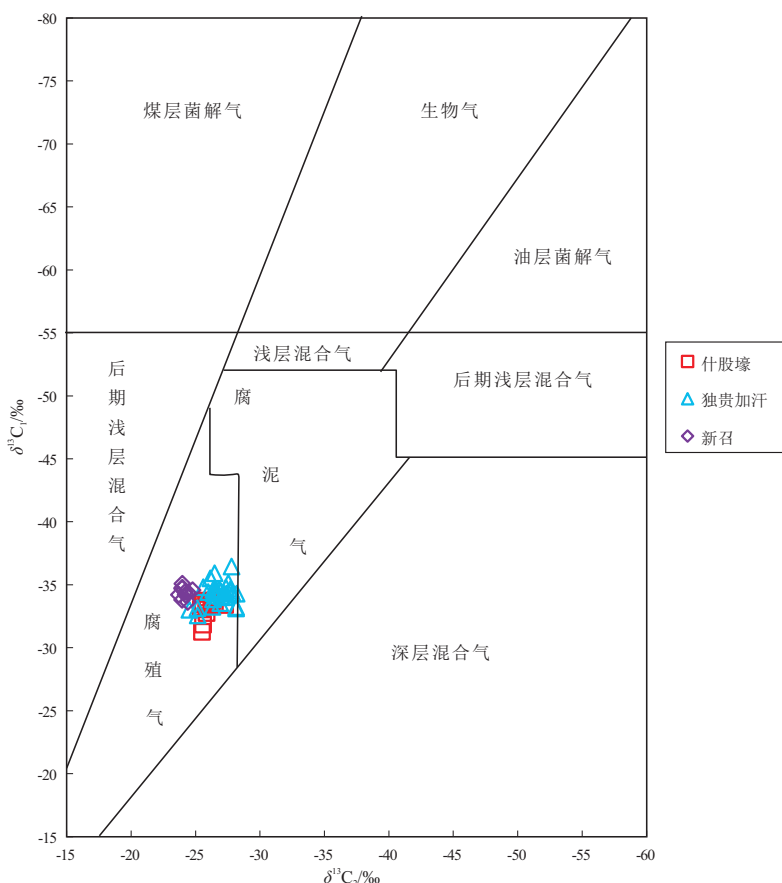


图 6 鄂尔多斯盆地杭锦旗地区有机成因气 $\delta^{13}C_1 - \delta^{13}C_2$ 鉴别

据文献[37-38]修改。

Fig.6 Identification of organic gases in Hangjinqi area of Ordos Basin via $\delta^{13}C_1 - \delta^{13}C_2$

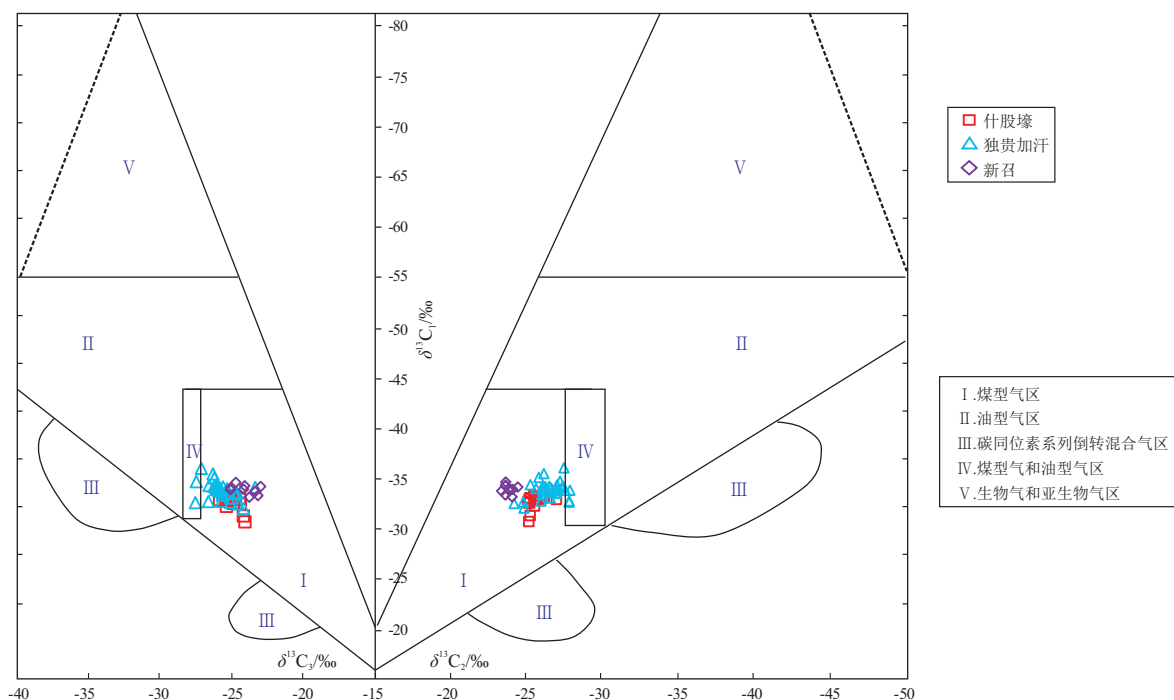


图 7 鄂尔多斯盆地杭锦旗地区有机成因烷烃气 $\delta^{13}C_1-\delta^{13}C_2-\delta^{13}C_3$ 划分
根据文献 [35,39] 修改。

Fig.7 Classification of organic alkane gases in Hangjinqi area of Ordos Basin via $\delta^{13}C_1-\delta^{13}C_2-\delta^{13}C_3$

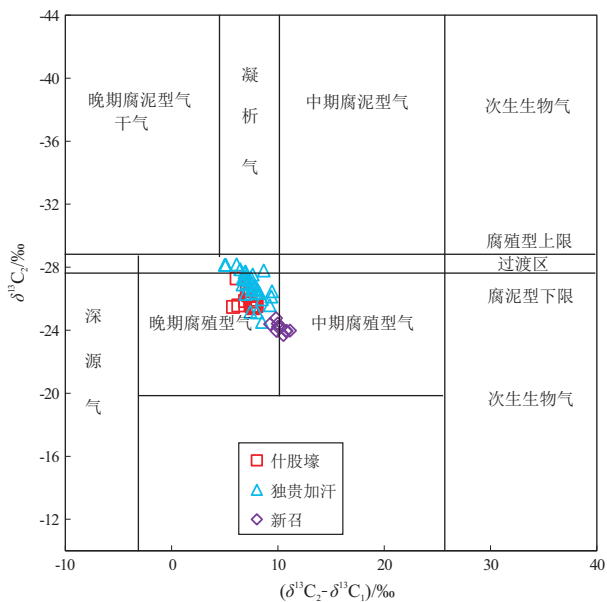


图 8 鄂尔多斯盆地杭锦旗地区天然气 $\delta^{13}C_2$ 与 $\delta^{13}C_2-\delta^{13}C_1$ 相关关系鉴别
根据文献 [40] 修改。

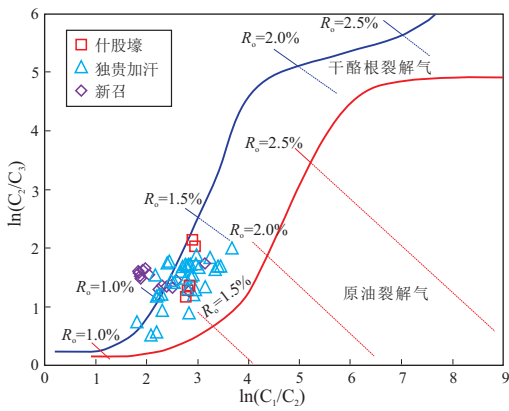
Fig.8 Identification of correlations between $\delta^{13}C_2$ and $\delta^{13}C_2-\delta^{13}C_1$ for natural gas in Hangjinqi area of Ordos Basin

除碳同位素外,天然气组分含量特征以及其比值特征也可以作为鉴别天然气成因类型的指标。谢增业等^[41]根据 $\ln(C_2/C_3)$ 随 $\ln(C_1/C_2)$ 变化的速率建立了干酪根裂解气和原油裂解气判别图版,由图 9 可见,3 个区带的天然气数据点基本上都落

在干酪根裂解气区域,说明天然气主要为干酪根裂解气。此外, $\ln(C_2/C_3)$ 和 $\ln(C_1/C_2)$ 变化速率的相关关系还可以用于区分干酪根初次裂解气和二次裂解气。PRINZHOFER 等^[42]指出, $\ln(C_1/C_2)$ 变化速率较快,而 $\ln(C_2/C_3)$ 变化速率较缓,为干酪根初次裂解气,反之则为干酪根二次裂解气。研究区 3 个区带天然气 $\ln(C_1/C_2)$ 变化速率明显较 $\ln(C_2/C_3)$ 快,说明研究区天然气可能以干酪根初次裂解气为主。

4.2 天然气气源探讨

天然气乙烷、丙烷碳同位素主要取决于其气源岩的碳同位素组成,虽然在运移过程中会产生一定的分馏,但较甲烷而言,由于乙烷和丙烷的相对分子质量较大,同位素分馏程度相对要小得多,故而 $\delta^{13}C_2$ 与 $\delta^{13}C_3$ 可以作为较好的气源判别参数^[43]。从图 5 和图 10 中不难发现,新召区带天然气 $\delta^{13}C_2$ 和 $\delta^{13}C_3$ 值较其余 2 个区带明显偏重,而在什股壕和独贵加汗 2 个区带天然气数据点中后者 $\delta^{13}C_2$ 和 $\delta^{13}C_3$ 值相对更轻。根据对研究区 2 套烃源岩的地球化学特征进行对比分析发现,山西组烃源岩有机质来源中高等陆生植物输入较多,而太原组烃源岩有机质来源中低等水生生物的贡献更高,因而太原组烃源岩干酪根碳同位素整体上要轻于山西组^[14]。由此分析推测,新召区带天然气可能多为

图 9 鄂尔多斯盆地杭锦旗地区天然气 $\ln(C_1/C_2)$ — $\ln(C_2/C_3)$ 交会图

根据文献[41-42]修改。

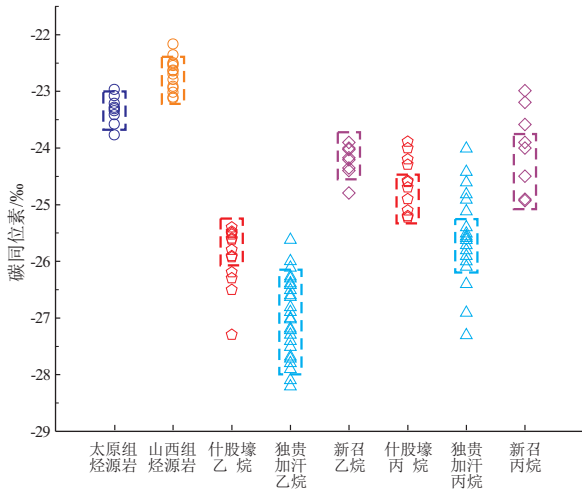
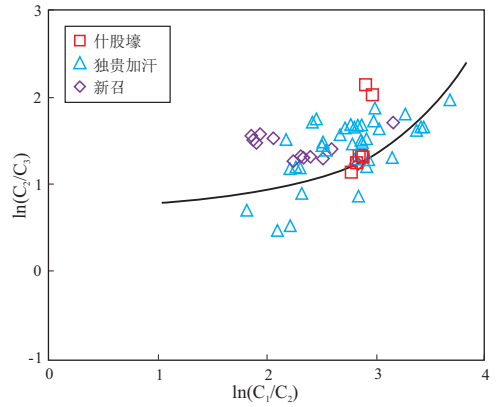
Fig.9 Cross plots between $\ln(C_1/C_2)$ and $\ln(C_2/C_3)$ of natural gas in Hangjinqi area of Ordos Basin

图 10 鄂尔多斯盆地杭锦旗地区天然气烷烃碳同位素气源识别

Fig.10 Gas-source identification in Hangjinqi area of Ordos Basin via alkane carbon isotopes

山西组煤系烃源岩供烃,而什股壕和独贵加汗区带天然气则来源于 2 个层位烃源岩的共同贡献,其中太原组煤系地层对后者的贡献可能相对更高。

结合烃源岩展布等地质背景来看,杭锦旗地区烃源岩主要分布于独贵加汗区带以东的伊金霍洛旗一带,且呈现由东南向西北厚度逐渐减薄的趋势^[14,44]。新召地区由于距离东部烃源灶太远,且砂体储层较致密,东部生成的天然气无法长距离运移至该区成藏,故而该区带以源内致密岩性成藏为主^[45],天然气主要来源于下伏烃源岩。然而,由于沟通储层与烃源岩的通道为加里东运动时期形成的小断裂,这些断裂断距小,开启性差,太原组烃源岩生成的天然气很难向上穿过山西组煤和泥岩等致密岩层到达下石盒子组,因此新召区带天然气可能以邻近的山西组烃源岩生成的天然气为

主^[20,46]。独贵加汗地区靠近东南部烃源灶,且有乌兰吉林庙断裂作为通道^[47],早期太原组烃源岩生成的天然气能够运移至该区成藏。随后在燕山运动作用下,东部地层强烈抬升,研究区整体呈现为“北东高、南西低”的构造格局,山西组烃源岩进入生烃高峰期后生成的天然气主要向北东方向运移^[8,48],因此西部独贵加汗区带天然气中西组烃源岩生成天然气的贡献较低,以太原组烃源岩生成的天然气为主。什股壕地区位处泊尔江海子断裂以北,区内太原组烃源岩不发育,山西组烃源岩厚度普遍较薄且生气强度低^[13],无法源内成藏;但由于该地区位于烃源灶北部,早期太原组烃源岩和后期山西组烃源岩生成的天然气均能运移至此处成藏,故该区带天然气主要来自断裂南部的太原组和山西组烃源岩^[13,20]。

综上所述,研究区 3 个区带天然气的来源存在明显差异,天然气成藏过程也不尽相同。造成这种现象的原因除与烃源岩的分布有关外,还与输导体性能及区域构造演化过程有关。因此,精细分析不同区带天然气成藏及控制因素的区别,建立各区带天然气差异成藏模式,能为研究区下一步天然气勘探研究提供有利的方向。

5 结论

(1) 鄂尔多斯盆地杭锦旗地区天然气中甲烷含量高达 55.12%~94.55%,为烃类气体的主要成分。干燥系数为 0.77~0.97,整体上呈现出湿气的特征。其中什股壕和新召区带干燥系数均低于 0.95,皆为湿气;而独贵加汗区带天然气干燥系数仅少部分高于 0.95,以湿气为主。二氧化碳、氮气等非烃组分的相对含量在研究区普遍较低。

(2)研究区天然气的 $\delta^{13}\text{C}_1$ 、 $\delta^{13}\text{C}_2$ 和 $\delta^{13}\text{C}_3$ 值分别为 $-36.5\text{‰} \sim -31.3\text{‰}$ 、 $-28.2\text{‰} \sim -23.9\text{‰}$ 和 $-27.3\text{‰} \sim -23.0\text{‰}$,不同区带碳同位素组成特征之间存在差异。在甲烷碳同位素方面,什股壕区带天然气 $\delta^{13}\text{C}_1$ 值最重($-33.7\text{‰} \sim -31.3\text{‰}$),新召区带天然气 $\delta^{13}\text{C}_1$ 值最轻($-35.1\text{‰} \sim -33.6\text{‰}$);而在乙烷、丙烷碳同位素方面,新召区带天然气 $\delta^{13}\text{C}_2$ 、 $\delta^{13}\text{C}_3$ 值($-24.9\text{‰} \sim -23.9\text{‰}$ 、 $-24.9\text{‰} \sim -23.0\text{‰}$)要明显重于其他2个区带天然气。不同区带天然气碳同位素之间的差异表明这3个区带天然气的来源可能不同。

(3)3个区带天然气烷烃气碳同位素均表现为 $\delta^{13}\text{C}_1 < \delta^{13}\text{C}_2 < \delta^{13}\text{C}_3$ 的正碳序列分布,且 $\delta^{13}\text{C}_1$ 值均低于 -30‰ ,呈现有机成因气的特征。根据 $\delta^{13}\text{C}_1$ 、 $\delta^{13}\text{C}_2$ 、 $\delta^{13}\text{C}_3$ 组成特征,研究区天然气以煤型气(腐殖型气)为主,且气源岩处于高成熟—过成熟热演化阶段;根据组分含量比值特征,研究区天然气均以干酪根初次裂解气为主。

(4)结合气源对比结果与烃源岩展布、构造演化等地质背景,新召区带天然气可能主要来源于下部烃源岩,且以山西组烃源岩供烃为主;独贵加汗与什股壕区带天然气均来源于泊尔江海子断裂南部太原组和山西组烃源岩的共同贡献,但由于后期构造抬升的影响,独贵加汗区带天然气中太原组烃源岩的贡献比例可能更高。

利益冲突声明/Conflict of Interests

所有作者声明不存在利益冲突。

All authors disclose no relevant conflict of interests.

作者贡献/Authors' Contributions

张迈、王铁冠、何发岐、张威、安川参与论文设计与审核;张迈、刘悦、陆振港完成实验操作;张迈、宋到福参与论文写作和修改。所有作者均阅读并同意最终稿件的提交。

The study was designed and examined by ZHANG Mai, WANG Tieguan, HE Faqi, ZHANG Wei and AN Chuan. The experimental operation was completed by ZHANG Mai, LIU Yue and LU Zhengang. The manuscript was drafted and revised by ZHANG Mai and SONG Daofu. All the authors have read the last version of paper and consented for submission.

参考文献:

- [1] 李春光.鄂尔多斯盆地赋存特大型古生界天然气田的地质依据[J].海相油气地质,2009,14(3):19-30.
LI Chunguang.Geology condition analysis of a huge-scaled Paleozoic gas field hosted in Ordos Basin[J].Marine Origin Petroleum Geology,2009,14(3):19-30.
- [2] 戴金星,倪云燕,吴小奇.中国致密砂岩气及在勘探开发上的重要意义[J].石油勘探与开发,2012,39(3):257-264.

DAI Jinxing, NI Yunyan, WU Xiaoqi. Tight gas in China and its significance in exploration and exploitation [J]. Petroleum Exploration and Development, 2012, 39(3): 257-264.

- [3] 过敏.鄂尔多斯盆地北部上古生界天然气成藏特征研究[D].成都:成都理工大学,2010.
GUO Min. Research on characteristics of natural gas reservoiring in the Upper Paleozoic in the northern Ordos Basin [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2010.
- [4] 何发岐,王付斌,王杰,等.鄂尔多斯盆地东胜气田氦气分布规律及特大型富氦气田的发现[J].石油实验地质,2022,44(1):1-10.
HE Faqi, WANG Fubin, WANG Jie, et al. Helium distribution of Dongsheng gas field in Ordos Basin and discovery of a super large helium-rich gas field [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2022, 44(1): 1-10.
- [5] 何发岐,董昭雄.深部煤层气资源开发潜力:以鄂尔多斯盆地东胜地气田为例[J].石油与天然气地质,2022,43(2):277-285.
HE Faqi, DONG Zhaoxiong. Development potential of deep coalbed methane: a case study in the Daniudi gas field, Ordos Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2022, 43(2): 277-285.
- [6] 何发岐,王杰,赵永强,等.鄂尔多斯盆地东胜富氦气田成藏特征及其大地构造背景[J].古地理学报,2022,24(5):937-950.
HE Faqi, WANG Jie, ZHAO Yongqiang, et al. Accumulation characteristics of Dongsheng helium-rich gas field in Ordos Basin and its tectonic background [J]. Journal of Palaeogeography, 2022, 24(5): 937-950.
- [7] 王杰,贾会冲,陶成,等.鄂尔多斯盆地杭锦旗地区东胜气田氦气成因来源及富集规律[J].天然气地球科学,2023,34(4):566-575.
WANG Jie, JIA Huichong, TAO Cheng, et al. Source and enrichment regularity of helium in Dongsheng Gas Field of Hangjinqi area, Ordos Basin [J]. Natural Gas Geoscience, 2023, 34(4): 566-575.
- [8] 尤欢曾,李良.鄂北上古生界天然气成藏地质特征[J].天然气工业,2001,21(S1):14-17.
YOU Huanzeng, LI Liang. Formation features and exploration trend of gas reservoirs in Upper Paleozoic in north E' erduost Basin [J]. Natural Gas Industry, 2001, 21(S1): 14-17.
- [9] 杨华,张文正,李剑锋,等.鄂尔多斯盆地北部上古生界天然气的地球化学研究[J].沉积学报,2004,22(S1):39-44.
YANG Hua, ZHANG Wenzheng, LI Jianfeng, et al. Geochemical study of the Upper Paleozoic gas in the northern Ordos Basin [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2004, 22(S1): 39-44.
- [10] 彭威龙,胡国艺,黄士鹏,等.天然气地球化学特征及成因分析:以鄂尔多斯盆地东胜气田为例[J].中国矿业大学学报,2017,46(1):74-84.
PENG Weilong, HU Guoyi, HUANG Shipeng, et al. Natural gas geochemical characteristics and genetic analysis: a case study of the Dongsheng gas field in the Ordos Basin of China [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2017, 46(1): 74-84.
- [11] 纪文明,李淮莲,刘震,等.鄂尔多斯盆地北部杭锦旗地区上古生界气源岩分析[J].天然气地球科学,2013,24(5):905-914.

- Ji Wenming, LI Weilian, LIU Zhen, et al. Research on the Upper Paleozoic gas source of the Hangjinqi block in the northern Ordos Basin [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2013, 24(5): 905-914.
- [12] 徐波, 聂海宽, 王敏, 等. 鄂尔多斯盆地杭锦旗探区烃源岩生烃能力 [J]. *油气地质与采收率*, 2009, 16(4): 38-40.
- XU Bo, NIE Haikuan, WANG Min, et al. A study of hydrocarbon-generating potential of Hangjinqi prospect area in Ordos Basin [J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2009, 16(4): 38-40.
- [13] 倪春华, 刘光祥, 朱建辉, 等. 鄂尔多斯盆地杭锦旗地区上古生界天然气成因及来源 [J]. *石油实验地质*, 2018, 40(2): 193-199.
- NI Chunhua, LIU Guangxiang, ZHU Jianhui, et al. Origin and source of natural gas in the Upper Paleozoic in Hangjinqi area, Ordos Basin [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2018, 40(2): 193-199.
- [14] 薛会, 张金川, 徐波, 等. 鄂尔多斯北部杭锦旗探区上古生界烃源岩评价 [J]. *成都理工大学学报(自然科学版)*, 2010, 37(1): 21-28.
- XUE Hui, ZHANG Jinchuan, XU Bo, et al. Evaluation of Upper Paleozoic source rocks of the Hangjinqi block in the northern Ordos Basin, China [J]. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 2010, 37(1): 21-28.
- [15] 薛会, 王毅, 毛小平, 等. 鄂尔多斯盆地北部上古生界天然气成藏期次: 以杭锦旗探区为例 [J]. *天然气工业*, 2009, 29(12): 9-12.
- XUE Hui, WANG Yi, MAO Xiaoping, et al. The timing of gas pooling in the Upper Paleozoic in the northern Ordos Basin: a case study of the Hangjinqi block [J]. *Natural Gas Industry*, 2009, 29(12): 9-12.
- [16] 张迈, 宋到福, 王铁冠, 等. 鄂尔多斯盆地杭锦旗地区山西组—太原组烃源岩地球化学特征对比研究及意义 [J]. *长江大学学报(自然科学版)*, 2023, 20(5): 55-66.
- ZHANG Mai, SONG Daofu, WANG Tieguan, et al. Comparative study and its significance of geochemical characteristics of source rocks from Shanxi Formation and Taiyuan Formation in Hangjinqi area of Ordos Basin [J]. *Journal of Yangtze University (Natural Science Edition)*, 2023, 20(5): 55-66.
- [17] 赵永强, 许锦, 倪春华, 等. 鄂尔多斯盆地杭锦旗地区上古生界原油成因及勘探前景 [J]. *石油实验地质*, 2022, 44(3): 487-496.
- ZHAO Yongqiang, XU Jin, NI Chunhua, et al. Origin and exploration prospect of Upper Paleozoic crude oil from Hangjinqi area, Ordos Basin [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2022, 44(3): 487-496.
- [18] 倪春华, 朱建辉, 刘光祥, 等. 鄂尔多斯盆地杭锦旗地区上古生界煤系烃源岩生烃潜力再评价 [J]. *石油实验地质*, 2021, 43(5): 826-834.
- NI Chunhua, ZHU Jianhui, LIU Guangxiang, et al. Re-evaluation of hydrocarbon generation potential of the Upper Paleozoic coal-measure source rocks in the Hangjinqi area of Ordos Basin [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2021, 43(5): 826-834.
- [19] 王明健, 何登发, 包洪平, 等. 鄂尔多斯盆地伊盟隆起上古生界天然气成藏条件 [J]. *石油勘探与开发*, 2011, 38(1): 30-39.
- WANG Mingjian, HE Dengfa, BAO Hongping, et al. Upper Paleozoic gas accumulations of the Yimeng Uplift, Ordos Basin [J]. *Petroleum Exploration & Development*, 2011, 38(1): 30-39.
- [20] 刘俞佐, 石万忠, 刘凯, 等. 鄂尔多斯盆地杭锦旗东部地区上古生界天然气成藏模式 [J]. *岩性油气藏*, 2020, 32(3): 56-67.
- LIU Yuzuo, SHI Wanzhong, LIU Kai, et al. Natural gas accumulation patterns of Upper Paleozoic in eastern Hangjinqi area, Ordos Basin [J]. *Lithologic Reservoirs*, 2020, 32(3): 56-67.
- [21] 何发岐, 王付斌, 郭利果, 等. 鄂尔多斯盆地古生代原型盆地演化与构造沉积格局变迁 [J]. *石油实验地质*, 2022, 44(3): 373-384.
- HE Faqi, WANG Fubin, GUO Ligu, et al. Evolution of prototype basin and change of tectonic-sedimentary pattern in Paleozoic, Ordos Basin [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2022, 44(3): 373-384.
- [22] CUI Jingwei, ZHANG Zhongyi, LIU Jianliang, et al. Hydrocarbon generation and expulsion quantification and contribution of multiple source rocks to hydrocarbon accumulation in Yanchang Formation, Ordos Basin, China [J]. *Journal of Natural Gas Geoscience*, 2021, 6(6): 375-391.
- [23] YANG Peng, REN Zhanli, ZHOU Renjie, et al. Tectonic evolution and controls on natural gas generation and accumulation in the Ordovician system of the Ordos Basin, North China [J]. *Energy Reports*, 2021, 7: 6887-6898.
- [24] 赵承锦. 鄂尔多斯盆地临兴地区上古生界天然气成藏机理与成藏模式研究 [D]. 青岛: 山东科技大学, 2017.
- ZHAO Chengjin. Natural gas accumulation mechanism and models in the Upper Paleozoic of Linxing area, Ordos Basin [D]. Qingdao: Shandong University of Science and Technology, 2017.
- [25] 赵永强, 倪春华, 吴小奇, 等. 鄂尔多斯盆地杭锦旗地区二叠系地层水地球化学特征和来源 [J]. *石油实验地质*, 2022, 44(2): 279-287.
- ZHAO Yongqiang, NI Chunhua, WU Xiaoqi, et al. Geochemical characteristics and source of Permian formation water in Hangjinqi area, Ordos Basin [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2022, 44(2): 279-287.
- [26] 姜生玲, 郑兆惠, 邓飞涌, 等. 鄂尔多斯盆地杭锦旗地区两种类型天然气资源量计算 [J]. *石油天然气学报*, 2008, 30(5): 184-187.
- JIANG Shengling, ZHENG Zhaohui, DENG Feiyong, et al. Calculation of two types of natural gas resources in Hangjinqi area of Ordos Basin [J]. *Journal of Oil and Gas Technology*, 2008, 30(5): 184-187.
- [27] 赵国玺. 泊尔江海子断裂带岩性特征及封闭性演化史研究 [D]. 西安: 西北大学, 2007.
- ZHAO Guoxi. Study on lithologic characteristics and evolution of sealing properties of Borjianghaizi fault zone [D]. Xi'an: Northwest University, 2007.
- [28] 彭清泉. 鄂尔多斯盆地北部杭锦旗地区天然气成藏特征研究 [D]. 成都: 成都理工大学, 2012.
- PENG Qingquan. Research on characteristics of natural gas reservoiring in Hangjinqi of the northern Ordos Basin [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2012.

- [29] 李浩.鄂尔多斯盆地古生界气藏成藏模式及优势储层预测[J].特种油气藏,2022,29(2):57-63.
LI Hao.Accumulation pattern and favorable reservoir prediction of Paleozoic gas reservoirs in Ordos Basin[J].Special Oil & Gas Reservoirs,2022,29(2):57-63.
- [30] 印峰,刘若冰,王威,等.四川盆地元坝气田须家河组致密砂岩气地球化学特征及气源分析[J].天然气地球科学,2013,24(3):621-627.
YIN Feng,LIU Ruobing,WANG Wei,et al.Geochemical characters of the tight sandstone gas from Xujiahe Formation in Yuanba gas field and its gas source[J].Natural Gas Geoscience,2013,24(3):621-627.
- [31] 胡炜,朱扬明,李颖,等.川东北元坝地区陆相气地球化学特征及来源[J].浙江大学学报(理学版),2014,41(4):468-476.
HU Wei,ZHU Yangming,LI Ying,et al.Geochemical characteristics and origin of natural gases from terrestrial strata in Yuanba area of the northeastern Sichuan Basin[J].Journal of Zhejiang University (Science Edition),2014,41(4):468-476.
- [32] 沈平,申歧祥,王先彬,等.气态烃同位素组成特征及煤型气判识[J].中国科学(B辑 化学 生物学 农学 医学 地学),1987(6):647-656.
SHEN Ping,SHEN Qixiang,WANG Xianbin,et al.Isotopic composition characteristics of gaseous hydrocarbons and identification of coal-type gas[J].Scientia Sinica (Chimica),1987(6):647-656.
- [33] 陈践发,李春园,沈平,等.煤型气烃类组分的稳定碳、氢同位素组成研究[J].沉积学报,1995,13(2):59-69.
CHEN Jianfa,LI Chunyuan,SHEN Ping,et al.Carbon and hydrogen isotopic characteristics of hydrocarbons in coal type gas from China[J].Acta Sedimentologica Sinica,1995,13(2):59-69.
- [34] 刘文汇,徐永昌.天然气成因类型及判别标志[J].沉积学报,1996,14(1):110-116.
LIU Wenhui,XU Yongchang.Genetic indicators for natural gases[J].Acta Sedimentologica Sinica,1996,14(1):110-116.
- [35] 戴金星.各类烷烃气的鉴别[J].中国科学(B辑 化学 生命科学 地学),1992(2):185-193.
DAI Jinxing.Identification of various types of alkane gases[J].Scientia Sinica (Chimica),1992(2):185-193.
- [36] 戴金星.中国含油气盆地的无机成因气及其气藏[J].天然气工业,1995,15(3):22-27.
DAI Jinxing.A biogenic gas in oil-gas bearing basins in China and its reservoirs[J].Natural Gas Industry,1995,15(3):22-27.
- [37] 杨峰平,王玉华,杨步增.松辽盆地北部深层天然气系统成藏史研究[J].成都理工学院学报,2002,29(6):621-626.
YANG Fengping,WANG Yuhua,YANG Buzeng.Accumulation history of natural gas systems in the northern depth of Songliao Basin[J].Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition),2002,29(6):621-626.
- [38] 庄新兵,邹华耀,李楠,等.秦南地区天然气成因与油气勘探潜力分析[J].吉林大学学报(地球科学版),2011,41(3):680-688.
ZHUANG Xinbing,ZOU Huayao,LI Nan,et al.Origin of natural gas and exploration potential of hydrocarbon, Qinan area[J].Journal of Jilin University (Earth Science Edition),2011,41(3):680-688.
- [39] 戴金星.天然气碳氢同位素特征和各类天然气鉴别[J].天然气地球科学,1993,4(2/3):1-40.
DAI Jinxing.Carbon and hydrogen isotope composition characteristics of natural gas and identification of various types of natural gas[J].Natural Gas Geoscience,1993,4(2/3):1-40.
- [40] 王勇刚,陈岑,谭先锋,等.西湖凹陷中央反转带天然气地球化学特征及其成因探讨[J].重庆科技学院学报(自然科学版),2018,20(6):31-34.
WANG Yonggang,CHEN Cen,TAN Xianfeng,et al.Geochemical characteristics and origin of natural gas in the central inversion zone of Xihu Depression[J].Journal of Chongqing University of Science and Technology (Natural Sciences Edition),2018,20(6):31-34.
- [41] 谢增业,李志生,魏国齐,等.腐泥型干酪根热降解成气潜力及裂解气判识的实验研究[J].天然气地球科学,2016,27(6):1057-1066.
XIE Zengye,LI Zhisheng,WEI Guoqi,et al.Experimental research on the potential of sapropelic kerogen cracking gas and discrimination of oil cracking gas[J].Natural Gas Geoscience,2016,27(6):1057-1066.
- [42] PRINZHOFER A A,HUC A Y.Genetic and post-genetic molecular and isotopic fractionations in natural gases[J].Chemical Geology,1995,126(3/4):281-290.
- [43] DAI Jinxing,GONG Deyu,NI Yunyan,et al.Stable carbon isotopes of coal-derived gases sourced from the Mesozoic coal measures in China[J].Organic Geochemistry,2014,74:123-142.
- [44] 李周波,陈振林,彭兴芳.鄂尔多斯北部地区烃源岩评价[J].资源环境与工程,2007,21(1):18-20.
LI Zhoubo,CHEN Zhenlin,PENG Xingfang.Evaluation of oil source rock in the northern Ordos Basin[J].Resources Environment & Engineering,2007,21(1):18-20.
- [45] 张威.鄂尔多斯盆地北部上古生界源储配置演化与气水分布响应[D].武汉:中国地质大学,2022.
ZHANG Wei.Upper Paleozoic source-reservoir configuration evolution and gas-water distribution response in northern Ordos Basin [D].Wuhan:China University of Geosciences,2022.
- [46] 陈谋.鄂尔多斯盆地北部上古生界断裂对油气成藏条件的影响[D].青岛:中国石油大学(华东),2021.
CHEN Mou.Influence of the Upper Paleozoic faults on hydrocarbon accumulation conditions in the northern Ordos Basin [D].Qingdao:China University of Petroleum(East China),2021.
- [47] 李功强,贾会冲,潘和平,等.内蒙古杭锦旗探区石炭-二叠系天然气成藏模式[J].现代地质,2017,31(3):587-594.
LI Gongqiang,JIA Huichong,PAN Heping,et al.The Permian-Carboniferous gas reservoir forming model of Hangjinqi exploration area in northern Ordos Basin, Inner Mongolia [J].Geoscience,2017,31(3):587-594.
- [48] 罗开平,杨帆,陆永德,等.鄂尔多斯盆地杭锦旗地区关键构造期与二叠系致密气成藏响应[J].石油实验地质,2021,43(4):557-568.
LUO Kaiping,YANG Fan,LU Yongde,et al.Key structural periods and Permian tight gas accumulation response in Hangjinqi area, Ordos Basin [J].Petroleum Geology & Experiment,2021,43(4):557-568.