

文章编号: 1000-0550(2003)02-0355-05

柴达木盆地原油碳同位素组成的 主控因素与成因类型^①

段 毅^{1,2} 彭德华³ 张晓宝¹ 周世新¹ 王智平⁴ 张 辉¹

1(中国科学院兰州地质研究所气体地球化学国家重点实验室 兰州 730000)

2(兰州大学 兰州 730000) 3(青海油田分公司勘探开发研究院 甘肃敦煌 736202)

4(中国科学院植物研究所 北京 100093)

摘 要 对采集于柴达木盆地 16 个油田的 40 个原油进行了碳同位素测定,研究了它们碳同位素组成特征、主控因素及其成因类型。结果表明,柴达木盆地西部地区 and 北部地区原油碳同位素组成具有显著的差别,西部地区原油富集 ^{13}C ,北部地区原油富集 ^{12}C 。研究发现,成油环境(如盐度和湿度)是决定西部盐湖相原油碳同位素组成及其变化的主要因素,母源性质则控制了北部淡水湖沼相原油的碳同位素组成和变化。根据原油的碳同位素组成和 $\text{Ph}/n\text{C}_{18}$ 比值特征,将柴达木盆地原油划分为五种成因类型。

关键词 柴达木盆地 原油 碳同位素组成 主要因素 成因

第一作者简介 段 毅 男 1956 年出生 博士 研究员 有机地球化学、石油地质学

中图分类号 P593 **文献标识码** A

1 引言

原油碳同位素的研究可以提供原油的成油环境^[1]、母源性质^[2-3]、成熟度^[4]和运移过程^[5]以及生物降解^[6]等重要信息。可是,以往这种研究主要涉及海相(国外)和淡水—微咸水湖相(我国)原油,盐湖相原油的碳同位素系统研究相对较少,特别是在该环境下形成的未成熟—低成熟原油更是如此。

柴达木盆地位于青藏高原东北部,是一个典型的内陆高原含油气盆地,有趣的是其中含有两种成因截然不同的原油,即西部第三系盐湖相未成熟—低成熟原油和北部侏罗系淡水湖沼相成熟原油^[7-9]。从已发现的 18 个油田来看,油田主要分布在西部,原油主要为未成熟—低成熟盐湖相原油。本文对采集于该盆地 16 个油田的 40 个原油进行了碳同位素分析,系统地研究了它们的碳同位素组成特征,结合前期源岩碳同位素研究资料,讨论了原油碳同位素组成的主控因素与成因类型,这对于盐湖相原油碳同位素成因认识具有一定的科学意义。

2 样品与分析

样品均为 2001 年 7 月份采集,来自 16 个油田 40 个井位。样品具有下列几个特点:(1)绝大部分样品都

是采集于以前未分析过的井位,并且一部分样品都是来自近几年开采的油井;(2)样品在地区和层位上得到很好的控制;(3)为了原油的成因研究,采集了柴达木盆地和甘南沼泽植物样品。油样采集时,对油水进行了分离;样品运回实验室后在低温下保存。取微量样品进行燃烧,制备成 CO_2 ,然后在 Finnigan MAT 质谱公司生产的 MAT 252 碳同位素分析仪上,测定了样品的碳同位素组成。 $\delta^{13}\text{C}$ 值相对 PDB 标准,测定精度小于 $\pm 0.3\text{‰}$ 。

3 结果与讨论

3.1 原油碳同位素组成和分布特征

柴达木盆地西部原油产层均为第三系,北部产层除第三系外,还有侏罗系。对采集的 40 个油样进行了碳同位素分析,分析结果表明:(1)西部原油的碳同位素组成分布范围窄小,为 $-25.4\text{‰} \sim -27.5\text{‰}$,平均为 -26.6‰ ,主要分布在 $-26\text{‰} \sim -27\text{‰}$ 之间(图 1),并且发现随着埋深,总体上有变轻的趋势(图 2)。根据同位素组成,可以将西部原油分为三类,即碳同位素组成最重的样品只有一个,为 -25.4‰ ,碳同位素组成较轻,且 $\leq -27.0\text{‰}$ 的样品有 7 个,其他样品的碳同位素组成较接近,并介于上述两类原油之间,为 $-26.3\text{‰} \sim -26.8\text{‰}$ 。(2)北部原油碳同位素组成比西部轻的多。

① 中国科学院资源环境领域知识创新工程重要方向项目(KZCX2-111 和 KZCX3-SW-128)、气体地球化学国家重点实验室基金项目(SJF-01-06)资助。

收稿日期: 2002-07-05

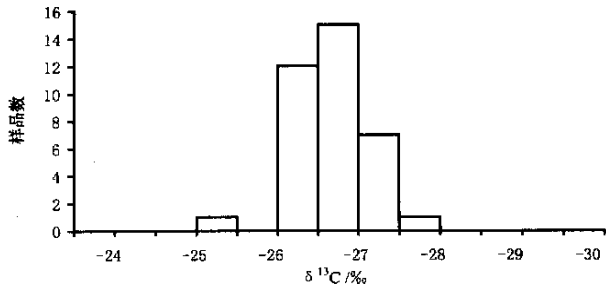
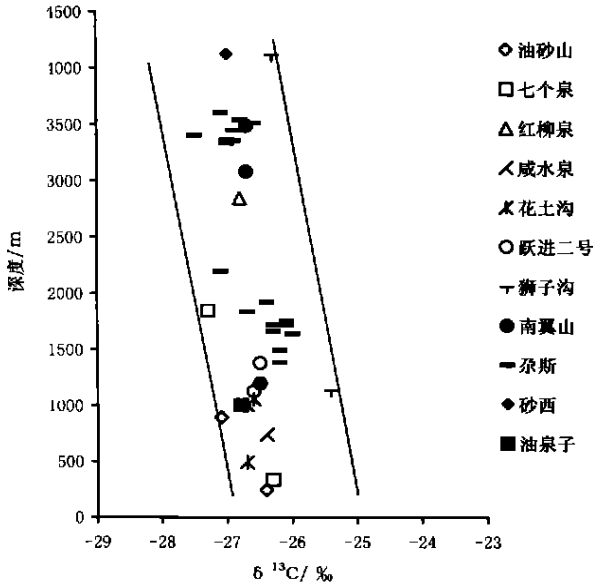


图 1 柴达木盆地西部原油碳同位素组成分布

Fig. 1 Carbon isotopic distributions of crude oils from the western part of Qaidam Basin

图 2 柴达木盆地西部原油 $\delta^{13}\text{C}$ 值与深度关系Fig. 2 Variation in the $\delta^{13}\text{C}$ values of crude

oils from the western part of Qaidam Basin with the depth

冷湖三号构造原油碳同位素最轻,为 -31.6‰ ,冷湖五号构造原油碳同位素最重,为 -26.7‰ ,冷湖四号构造和南八仙地区原油碳同位素组成介于上述两者之间,分别为 -28.3‰ 和 -28.1‰ (图 5)。

3.2 原油碳同位素组成的主控因素

柴达木盆地西部原油碳同位素组成特征与我国淡水湖相原油截然不同,表现为富集重碳同位素,与国外海相和我国江汉、中原盐湖相原油相当^[9,10],反映了高盐度成油环境的成因特征,这与其第三系烃源岩的形成环境是一致的。进一步认识这种成因原油碳同位素变化的主控因素,对于原油的成因分类研究很重要。一般说来,原油的碳同位素组成受许多因素所控制,其中原油的母质类型、成熟度、形成环境和运移地质色层效应为主要因素^[1-6]。原油的成熟度对碳同位素组成的影响表现为随着原油的成熟度增高其碳同位素变重,这种变化小于 2‰ 。盆地西部地区原油主要为未成熟

—低成熟原油,成熟度对它们的碳同位素影响甚微。当原油经过长距离运移时,地质色层效应会引起碳同位素分馏。可是经过石油地质和原油地球化学研究表明,盆地西部地区油藏中的原油一般经历了短距离运移^[11]。因此,原油运移引起的碳同位素变化一般是很小的。以往的研究表明,母质类型明显的影响着原油的碳同位素组成。水生生物成因的原油具有轻的碳同位素组成,而陆生植物成因的原油具有重的碳同位素组成^[12]。但是对于柴达木盆地西部来说,干燥炎热气候和盐湖沉积环境对原油碳同位素组成的影响,与母质类型具有相同或更为重要的作用。西部油源岩第三系是在干燥炎热气候条件下,水体不断咸化的盐湖盆地中形成的,其I型和III型母质碳同位素界线值,在半咸水—咸水环境中相差 0.5‰ ,在咸水—半咸水环境中相差 1.8‰ ^①。但是,盐度引起母质碳同位素的变化也为 1.8‰ (图 3)。湿度和盐度都是影响源岩和原油母质生物碳同位素分馏的重要因素。由于水胁迫作用,可以诱导植物叶子气孔关闭和导通系数降低,从而使光合植物富集 ^{13}C ^[13]。因此,在含水量低的土壤、降雨量小和干燥空气条件下生长的光合植物,都具有重的碳同位素组成。水体盐度和土壤盐分都对光合植物的碳同位素分馏产生重要影响^[10,14]。盐度(或盐分)的增加能降低溶解 CO_2 的可利用性,从而使光合植物的碳同位素变重。高盐度环境还限制了生物种类的发展,缺乏生物的多样性,那些耐盐而碳同位素分馏小的种类占优势,使该环境中生物总的碳同位素组成变的更重。例如,柴达木盆地西部干燥气候下盐湖中生长的现代芦苇植物碳同位素值为 -23.8‰ ,与甘南潮湿气候下淡水沼泽中生长的现代芦苇植物碳同位素组成(-28.2‰)相比,重 4.4‰ 。对柴达木盆地格尔木河流和达布逊盐湖底部淤泥中有机质类型和碳同位素分析表明,虽然它们有机质类型均为II型,但是它们的碳同位素组成却分别为 -25.0‰ 和 -19.5‰ ^②,这主要是前者为淡水沉积有机质,后者为盐水沉积有机质。因此,气候和盐度的明显变化,均会引起生物碳固定过程中碳同位素分馏的变化,从而影响沉积有机质及其液态产物原油的碳同位素组成。第三纪期间柴达木盆地气候干燥程度是逐渐增加的,以致从渐新世、中新世到上新世,柴达木盆地西部古湖泊水体盐度从半咸水变为咸水—盐湖,其中沉积有机质干酪根 $\delta^{13}\text{C}$ 值也依次增高,即从 -24.3‰ 变为 -22.5‰ (图 3)。同时,柴达木盆地西部

① 黄第藩,李晋超等.柴达木盆地西部第三系烃源岩的地球化学和生油评价.1987

② 周嘉虹,周瑞年等.柴达木盆地东部生物气的形成条件及资源评价.1989

原油随着储层深度变浅,碳同位素组成总体上呈变重的趋势(图 2),这与一般自然演化剖面原油碳同位素变轻不一致,而与研究区自然剖面盐度变化相吻合。如前所述,盆地西部原油只经历了短距离运移,并且以垂向兼侧向运移为主;一部分原油为自生自储。因此,大部分原油的埋深与其源岩的空间分布趋势是一致的。例如,尕斯库勒油田深层原油主要来自 E_3^2 ,而浅层原油主要来自 N_1-N_2 ,从而浅层原油与深层原油相比,其呈现出富集重碳同位素的趋势。这些资料表明,柴达木盆地西部未成熟—低成熟原油碳同位素组成主要受成油环境的控制,因此,柴达木盆地西部地区原油的碳同位素成因研究,应主要考虑成油环境

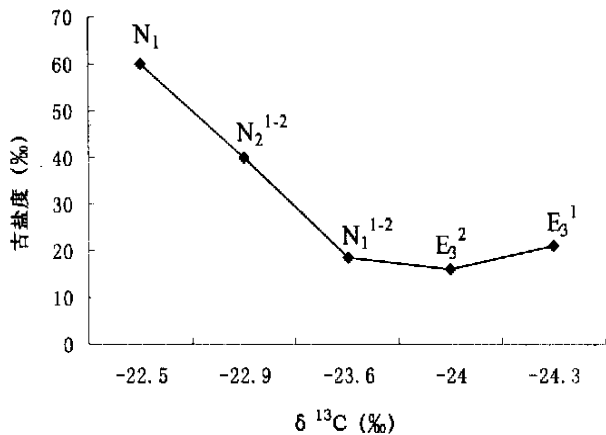


图 3 柴达木盆地西部第三系烃源岩干酪根碳同位素组成与古盐度关系

Fig. 3 Relationship between carbon isotopic compositions of Tertiary kerogens of the western Qaidam Basin and salinity

北部成油环境与西部的完全不同。北部油源岩侏罗系是在温暖潮湿气候条件下,形成于淡水沼泽和淡水湖泊环境,使其原油碳同位素组成比西部的轻。在有机质演化程度不太高的情况下,形成于这种环境下的原油碳同位素组成和变化主要取决于母源性质,既随着陆源有机质成因组分的增多,原油的碳同位素组成变重

3.3 原油成因类型

在柴达木盆地原油中, Ph/nC_{18} 比值的变化范围要比 Pr/Ph 比值的大,能更好的将不同成因的原油区分开来。虽然 Ph/nC_{18} 比值与成熟度有关,但是它仍然是一个很好的还原指标,特别是对于柴达木盆地原油来说更是如此。我们采用 Ph/nC_{18} 与 $\delta^{13}C$ 值的相关图,对柴达木盆地原油成因进行了研究(图 4)。图中可以划分出五种成因区域 A—E 区。A—B 区原油来自西部地区, C 区和 E 区原油来自北部地区。

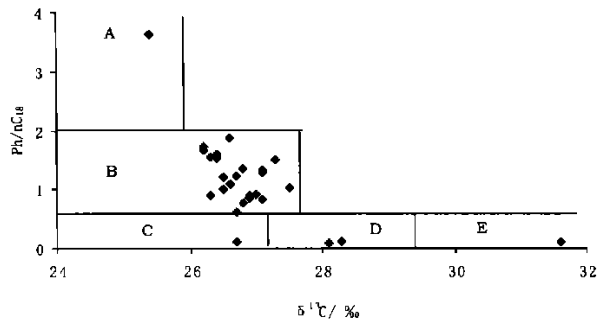


图 4 柴达木盆地原油碳同位素组成与 Ph/nC_{18} 比值关系
Fig. 4 Relationship between carbon isotopic compositions of crude oils from Qaidam Basin and Ph/nC_{18} values

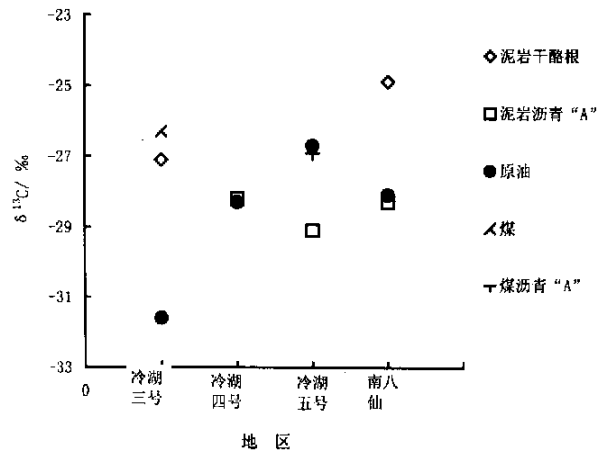


图 5 柴达木盆地北部原油和烃源岩碳同位素组成的地区分布
Fig. 5 Regional distribution of carbon isotopic compositions of crude oils and source rocks from the northern part of Qaidam Basin

(1) A 区。只有一个样品,为狮子沟浅层原油。其碳同位素组成最重,为 -25.4‰ ; Ph/nC_{18} 值最高,为 3.63,说明植烷 (Ph) 被很好的保存。这反映了超咸水强还原成油环境。样品所在的茫岸凹陷狮子沟地区古湖水盐度,在渐新世至中新世时为全区最高,主要为盐湖,为此提供了证据。因此,该原油应来自渐新统和中新统超咸水强还原环境下形成的烃源岩。(2) B 区。 $\delta^{13}C$ 值分布在 $-26.0\text{‰} \sim -27.5\text{‰}$, Ph/nC_{18} 值介于 0.7 ~ 2 之间,代表了盐湖还原成油环境。该区样品最多,柴达木盆地西部各油田原油样品主要分布在这个区域内,说明西部原油主要形成于这种成油环境。(3) C 区、D 区和 E 区。这三个区域均为北部的原油,其中 Ph/nC_{18} 值小于 0.12,为淡水弱还原成油环境。C 区原油产自冷湖五号构造,其碳同位素组成较重,并且 $\delta^{13}C$ 值与该地区煤中沥青“ A ”的一致(图 5),说明它来自煤或煤系地层,为淡水沼泽成油环境。D 区原油碳同位素较轻,其中冷湖四号构造和南八仙原油 $\delta^{13}C$ 值,与它们地区湖相泥岩沥青“ A ”的接近; E 区原油碳同位素组成最轻,从该地区的煤和湖相泥岩干酪根 $\delta^{13}C$ 值来看,

冷湖三号构造原油最可能来自于泥岩;这些资料表明,冷湖三号构造原油来自富水生生物有机质的淡水湖相烃源岩(即腐泥型母质成因),而冷湖四号构造和南八仙原油源于富陆生高等植物有机质的淡水湖相烃源岩(即混合型母质成因),它们均为淡水湖泊成油环境

4 结论

柴达木盆地西部地区和北部地区原油碳同位素组成差别显著。西部地区原油碳同位素较重,分布在 -25.4‰ ~ -27.5‰ 之间,平均为 -26.6‰ ,并且可以明显的划分为 3 种类型。北部地区原油碳同位素组成较轻,为 -26.7‰ ~ -31.6‰ ,可以明显的划分为 2 种类型

研究发现,西部盐湖相低成熟原油的碳同位素组成和变化主要受成油环境的控制。原油成油环境的盐度高,则原油碳同位素组成就较重,超咸水环境的原油碳同位素组成最重。北部淡水湖沼相成熟原油的碳同位素组成和变化主要受控于母源性质,湖相原油比煤成油的碳同位素轻 5‰ 。

根据原油的碳同位素组成和 $\text{Ph}/n\text{C}_{18}$ 比值特征,可以将柴达木盆地原油成油环境划分为超咸水强还原、盐湖还原、淡水沼泽、淡水湖泊混合型母质和淡水湖泊腐泥型母质五种类型

参考文献 (References)

- 1 Sofer Z. Stable carbon isotope compositions of crude oils application to source depositional environments and petroleum alterations [J]. AAPG Bull, 1984, 68: 31~49
- 2 Sandstrom M W, Philp R P. Biological marker analysis and stable carbon isotopic composition of oil seeps from Tonga [J]. Chem Geol, 1984, 43: 167~180
- 3 Schoell M. Stable isotopes in petroleum research [A]. In Brooks J, Welte D, eds. Advances in Petroleum Geochemistry [C]. London: Academic Press, 1984. 215~245
- 4 Peters K E, Rohrback B G, Kaplan I R. Carbon and hydrogen

- stable isotope variations in kerogen during laboratory simulated thermal maturation [J]. AAPG Bull, 1981, 65: 501~508
- 5 Bonilla J V, Engel M H. Chemical and isotopic redistribution of hydrocarbons during migration: laboratory simulation experiments [J]. Org Geochem, 1986, 10: 181~190
 - 6 Stahl W J. Use of $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ analyses for the identification of the degradation of hydrocarbons by aerobic bacteria [J]. Geochim Cosmochim Acta, 1980, 44: 1903~1907
 - 7 Ritts B D, Hanson A D, Znniker D, et al. Lower-Middle Jurassic nonmarine source rocks and petroleum systems of the northern Qaidam basin, northwest China [J]. AAPG Bull, 1999, 83: 1980~2005
 - 8 Philp R P, Fan P, Lewis C A, et al. Geochemical characteristics of oils from the Chaidamu, Shanganning and Janghan basins, China [J]. J SE Asi Earth Sci, 1991, 5: 351~3583
 - 9 黄第藩, 张大江, 李晋超等. 柴达木盆地第三系油源对比 [J]. 沉积学报, 1989, 7: 1~13 [Huang D F, Zhang D J, Li J C, et al. The correlations between Tertiary crude oils and source rocks from the Qaidam basin [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 1989, 7: 1~3]
 - 10 Chung H M, Rooney M A, Toon M B, et al. Carbon isotope composition of marine crude oils [J]. AAPG Bull, 1992, (7): 1000~1007
 - 11 黄杏珍, 邵宏舜, 顾树松. 柴达木盆地的油气形成与寻找油气田方向 [M]. 兰州: 甘肃科学技术出版社, 1993. 363~370 [Huang X Z, Shao H S, Gu S S. Formation and exploration direction of petroleum and natural gas in the Qaidam Basin [M]. Lanzhou: Scientific and Technological Publishing House of Gansu, 1993. 363~370]
 - 12 段毅, 马兰花. 生物标志化合物碳同位素地球化学研究的几个相关问题 [J]. 地球科学进展, 1996, (4): 356~361 [Duan Y, Ma L H. Several problems concerned with stable carbon isotopic geochemistry of biomarker compounds [J]. Advance in Earth Sciences, 1996, 11(4): 356~361]
 - 13 Saurer M, Sigenthaler U. The climate-carbon isotope relationship in tree rings and the significance of site conditions [J]. Tellus, 1995, 46: 320~330
 - 14 Farquhar G D, Ehleringer J R, Hubick K T. Carbon isotope discrimination and photosynthesis [J]. Ann Rev Plant Physiol, 1989, 40: 503~537

Main Controlling Factors and Genetic Types of Carbon Isotopic Compositions for Crude Oils from the Qaidam Basin, China

DUAN Yi^{1,2} PENG De-hua³ ZHANG Xiao-bao¹ Zhou Shi-xin¹
WANG Zhi-ping⁴ ZHANG Hui¹

1 (Lanzhou Institute of Geology, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000)

2 (Lanzhou University, Lanzhou 730000)

3 (Research Institute of Exploration and Development of Qinghai Oil Field Company, Dunhang Gansu 738600)

4 (Plant Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100093)

Abstract A suite of 40 crude oil samples from 16 oil fields in the Qaidam basin were analyzed using IRM S,

and features, main controlling factors and genetic types of carbon isotopic compositions for these crude oils were studied. The results show that differences in carbon isotopic compositions between the western Qaidam crude oils and the northern Qaidam crude oils are evident. The western Qaidam crude oils are enriched in ^{13}C , while the northern Qaidam crude oils are enriched in ^{12}C . One finding is that carbon isotopic compositions of the western Qaidam crude oils from saline-hypersaline lacustrine environment are controlled mainly by oil-formed environments (e. g. salinity and humidity) and carbon isotopic compositions of the northern Qaidam crude oils from freshwater swampy-lacustrine environment rely mainly on their source natures. On the basis of their carbon isotopic compositions and Pr/Ph ratios, these oils could be divided into five genetic groups.

Key words Qaidam Basin, crude oils, carbon isotopic compositions, main factors, genesis

(Continued from page 354)

Analysis on Gas-Source Rock Correlation in Duqiaobai Area of Dongpu Depression

FENG Jian-hui^{1,3} REN Zhan-li² CUI Jun-ping² REN Lai-yi³
MA Wei-min³ SUN Ming-liang⁴

1 (Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640)

2 (The Key Laboratory of Continental Dynamics, Ministry of Education, Northwest University, Xi'an 710069)

3 (Zhongyuan Oilfield Branch of China Petroleum & Chemical Corporation, Puyang Henan 457001)

4 (Lanzhou Institute of Geology, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000)

Abstract On the basis of many methods, the main origin of deep layer natural gases in Duqiaobai area, Dongpu depression has been identified. The natural gases in Baimiao area mainly stemmed from the Tertiary Hydrocarbon source rock and Permo-Carboniferous coal-bearing strata in Qianliyuan depression. Shallow Es_2^T — Es_3^2 gas layer in structural high near to Lanliao fault zone possesses much high ratio $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$, which is coal formed gas and mixed gas. However, Es_1^1 — Es_4^4 gas layer in structural low far from Lanliao fault zone has low ratio $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$, which is petroligenic natural gas. Es_3^3 — Es_4^4 gas layer is mainly petroligenic natural gas in Qiaokou area. Es_3^3 gas layer in Duzhai area is petroligenic natural gas, which originated from the gas Es_3^3 source rock. And analysis on helium isotope of natural gas show that the deep-layer natural gases in Duzhai area and Qiaokou area is crust-derived gas and that it is mainly mixed gas of coal formed gas and petroligenic natural gas, with small portion of mantle-derived gas.

Key words Dongpu depression, Duqiaobai area, gas source rock, isotope, noble gases, Qianliyuan depression