

胶东焦家金矿床烃类气体地球化学特征研究

张惠评

桂林理工大学地球科学学院, 广西 桂林

收稿日期: 2025年2月27日; 录用日期: 2025年4月2日; 发布日期: 2025年4月14日

摘要

通过对焦家金矿床烃类气体地球化学特征的研究, 分析烃类组分与微量元素之间的关系, 从而总结其地球化学特征。根据焦家金矿床不同地质体之间的烃类组分的微观特征及配分规律, 反映成矿过程中各类地质体之间的微观演化规律的差异性, 体现出焦家金矿床成矿过程中烃类组分参与成矿的含量比较高, 反映了焦家金矿有较大的成矿潜力, 为今后找矿勘查提供地球化学依据。

关键词

金矿, 烃类组分, 成矿潜力

Study on the Geochemical Characteristics of Hydrocarbon Gas in Jiaoja Gold Deposit in Jiaodong

Huiping Zhang

School of Earth Science, Guilin University of Technology, Guilin Guangxi

Received: Feb. 27th, 2025; accepted: Apr. 2nd, 2025; published: Apr. 14th, 2025

Abstract

Through the study of the geochemical characteristics of hydrocarbon gases in Jiaoja gold deposit, the relationship between hydrocarbon components and trace elements was analyzed, so as to summarize its geochemical characteristics. According to the microscopic characteristics and distribution rules of hydrocarbon components between different geological bodies in Jiaoja gold deposit, it reflects the difference in microscopic evolution laws between various geological bodies in the metallogenetic process, and reflects that the content of hydrocarbon components involved in mineralization in the metallogenetic process of Jiaoja gold deposit is relatively high, which reflects that Jiaoja gold deposit has great metallogenetic potential and provides a geochemical basis for future prospecting

and exploration.

Keywords

Gold Mine, Mercury Components, Mining Potential

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

胶东地区是我国重要的金矿集中区，密切分布着胶西北、栖蓬福、牟乳三个次级矿集区[1]。在近三十年的地质演化过程中，该区经历了频繁而复杂的地质作用。其中，该区大规模的成矿作用发生在燕山期，从而形成了为人熟知的胶东区域性成矿带，成为全国金、银矿产的最重要产区。胶东成矿带位于华北地台东部胶东隆起区，成矿过程与华北地台的形成有着密切的联系。

随着矿床理论的不断发展，国内部分学者对大型 - 超大型金属矿床、中低温金属矿床与生物成矿作用的研究日益加深，一些学者发现在部分金属矿床的成矿历程中有机质起着关键作用。陈远荣等[2][3]认为金属成矿过程中有机质扮演着重要角色，尤其在 Au 元素的活化迁移和富集成矿中表现显著；Qing hong XU *et al.* [4]通过对夏甸金矿不同地质体的烃类组分之间的研究发现夏甸金矿床不同地质体具有同源性且成矿物质来源为幔壳混合源；韦龙明等[5][6]通过对八卦庙金矿等一系列矿床的研究，指出有机烃含量与金矿化强度成正相关关系并提出矿化规模的有机烃判别指标以及深部矿体预测的理论依据与有机烃等找矿方法组合；孔令兵[7]通过对贵州三 - 丹汞金多金属矿带成矿规律的分析发现成矿金属的富集与有机质的演化成正相关关系；刘寅[8]指出在卡林型金矿中有机质对金的作用体现在 Au 离子的还原、Au 的预富集、容矿空间等方面；此外，在国际上许多矿床的形成过程中均有发现有机质的身影，例如：卡林型金矿、MVT 型铅锌矿、黑色岩系中的 Au、Ag、Mo、Cu 矿床。在矿产勘探领域，有机质与金属矿床形成之间的关系研究已取得一定成果，尽管如此，现有研究仍显分散和局限。前人对烃类气体组分的变化、异常强度及其空间分布进行了广泛研究，但尚未针对焦家金矿进行基于烃类组分的地球化学研究。

本文从烃类组分的角度出发，根据矿床的烃气组分含量和组成结构的角度对胶东焦家金矿进行分析，系统的解释烃类气体寻找隐伏矿床的基本理论和方法，研究该矿床的成矿潜力，为今后找矿勘查提供地球化学依据。

2. 地质概况

2.1. 区域地质概况

胶东地区位于华北克拉通东段，是中国著名的金矿产区，拥有胶西北、栖蓬福和牟乳等三个主要的金矿次区域[1]。胶东地区经历了多次构造运动和岩浆活动，区内岩浆岩的类型多样，从超基性到酸性均有分布，但以酸性和中酸性岩浆岩的分布最为广泛[9]，这种岩石类型的多样性为金矿的形成和富集提供了多种可能的地质背景。

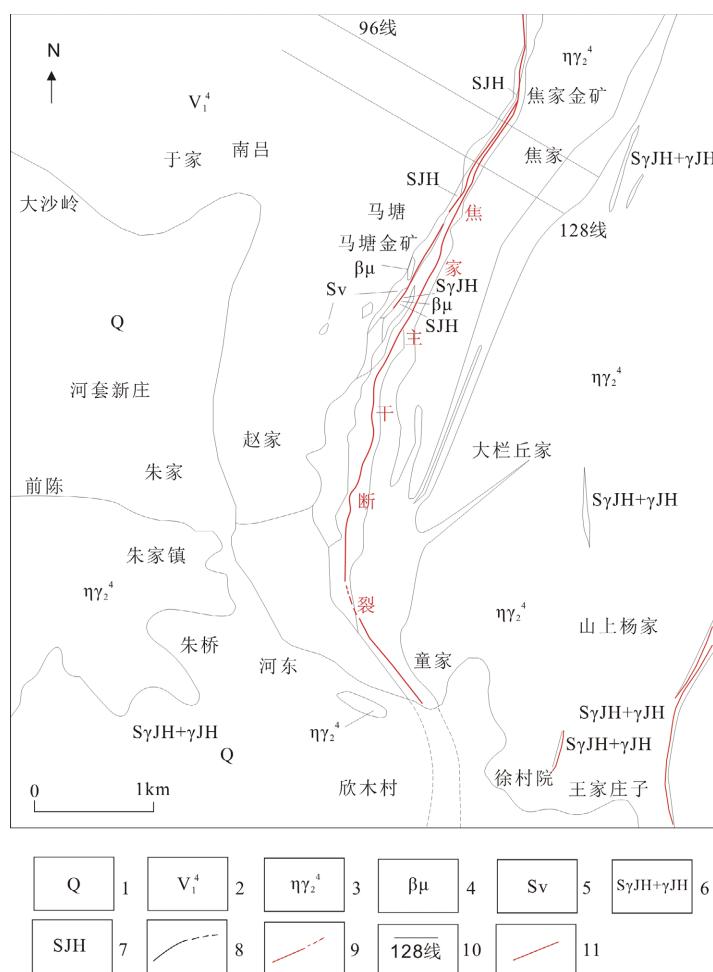
区域内主要由前寒武纪时期的地层构成，同时中生代和新生代的地层也相当丰富。区内主要出露地层有第四系、第三系、白垩系、侏罗系、三叠系、古远古界荆山群、太古宇胶东群[10]。

区域内断裂发育丰富，胶西北矿集区主要断裂有招平断裂、焦家断裂、三山岛断裂[11]；栖蓬福成矿小区主要断裂西林陡崖断裂[12]；牟乳成矿小区主要断裂有金牛山断裂[13]。

招平断裂带全长约 120 km, 宽在 160 m~210 m, 倾向北东, 倾角 28°~72°之间, 金矿资源主要位于该主断层面下方的黄铁矿化和绢英岩化区域。焦家断裂带, 断层长度约 60 km, 宽在 55 m~490 m 之间, 倾向西北, 倾角 25°~45°之间, 次级断层极为显著, 断层区域的岩石结构松散, 常伴随有较厚层的断层泥土形成。三山岛断裂长度约 12 km, 宽在 20 m~400 m 之间, 倾向东北, 倾角 30°~40°之间, 分带内出现黄铁矿与绢英岩碎屑岩、黄铁矿与绢英岩化花岗岩质碎裂岩、黄铁矿与绢英岩化花岗岩。西林陡崖断裂呈南北走向, 断裂表现为多期次活动, 主要由断层泥、碎屑岩和角砾岩构成, 伴有丰富的中基性岩脉。金牛山断裂带宽 5 m~20 m 之间, 倾向东南, 倾角 10°~25°之间, 部分区域倾向西北, 倾角 74°~85°之间, 断裂带被石英和煌斑岩脉所充填, 岩石结构松散, 并伴有断层泥及挤压片理现象。

胶东地区因其独特的地质构造而显著, 其岩浆活动频繁且强烈, 岩浆岩多为岩基。岩株状产出, 主要分布酸性和超基性岩石, 规模大, 范围广[9]。胶东地区花岗岩分布主要有伟德山型花岗岩、郭家岭型花岗岩、崂山型花岗岩以及换花岗质片麻岩。

2.2. 矿床地质特征



1-第四系; 2-中细粒变辉长岩; 3-中粒二长花岗岩; 4-灰绿玢岩; 5-变辉长岩质碎裂岩; 6-黄铁绢英岩化花岗岩; 7-黄铁绢英岩化碎裂岩; 8-实、推测地质界线; 9-实、推测压扭性断层; 10-勘探线及编号; 11-矿体。

Figure 1. Gold mining reservoir geological summary (According to Shandong geological sixth survey Institute data, slightly modified)

图 1. 金矿床地质简图(据山东地质第六勘察院资料, 略有修改)

本次研究对象为焦家金矿的I号主矿体(图1所示),其形状和产出状况与焦家断裂的走向紧密相关,受焦家主断裂的显著影响,在断裂倾角较小的区域,矿体往往较为厚重,而在倾角较陡的区域则相对薄小[14]。焦家断裂向西北方向倾斜,倾角大约为40°,矿体产出形态不规则[15]。

矿区内主要出露地层为新生代古近纪五图群朱壁店组[16][17],该地区同时还出露地层有第四纪,该地层主要分布着松散的堆积物,主要分布在河床、河滩及少量坡地[18]。河漫滩相及河床相冲击物底部的砂砾层是砂金矿富集的主要场所[16]。

矿区断裂构造的走向,一组走向接近南北向的断裂构造,另一组是走向北东向的断裂构造,这类断裂在矿区内广泛分布,对焦家金矿的矿化控制作用最为显著。区内主要断裂有焦家断裂、望儿山断裂和灵山沟-北截断裂[19]。

矿区内岩浆活动较频繁,且岩浆活动分布的范围比较广,在经历了多次强烈的变质作用后,该地区形成了不同种类的岩体,主要岩性有片麻岩、混合岩,以及局部地区形成的榴辉岩,同时在岩浆作用下,已经形成的岩浆岩发生了大规模的重熔,为成矿过程提供了大量成矿所需要的物质,因此形成重要的矿源层[16][20][21]。

矿区内主要断裂面的围岩经历了明显的蚀变,主要表现有钾长石化,在整个破碎蚀变带内存在硅化及碳酸盐化,黄铁绢英岩化主要出现在蚀变带的中心,并沿主断裂面两侧分布[22]。

3. 矿区地球化学特征

3.1. 地球化学参数特征

通过对焦家金矿所采样品的原始数据进行统计分析,求出焦家金矿的烃类组分和微量元素相关地球化学参数,求出各烃类组分和微量元素的背景值和烃类组分异常下限,进而求出各烃类组分和微量元素的变异系数,见表1、表2所示。

(1) 通过各烃类组分背景值可以看出,从甲烷至丙烯,随着分子量的增加,各烃类组分的背景值总体上表现出含量逐步降低的变化趋势。

(2) 烃类组分的含量表现出明显的差异,甲烷保持在较高水平上,其背景值含量达到7481 $\mu\text{l/kg}$,而其它烃类组分背景值含量都是相对较低的,其中异戊烷含量最低。

Table 1. Geochemical parameters related to the composition

表 1. 烃类组分相关地球化学参数

组分	背景值(Mo)	异常下限	方差(σ)	变异系数(V)
甲烷	7481	10437	2956	0.395
乙烷	1507	1899	392	0.260
丙烷	573	747	174	0.304
异丁烷	31	42	11	0.355
正丁烷	182	239	57	0.313
异戊烷	32	44	12	0.375
正戊烷	51	69	18	0.353
乙烯	1025	1331	306	0.299
丙烯	682	877	195	0.286

注: a. 单位 $\mu\text{l/kg}$; b. 异常下限 = $\text{Mo} + \sigma$; c. V = σ/Mo 。

Table 2. Geochemical parameters of microelements**表 2. 微量元素地球化学参数表**

元素	背景值(Mo)	方差(σ)	浓度克拉克值(K)	变异系数(V)	克拉克值(泰勒, 1964)	中国花岗岩类元素丰度 (史长义, 2005)
Au	5.53	1.57	1.383	0.284	4	0.38
As	0.91	0.32	0.506	0.352	1.8	0.9
Sb	0.12	0.03	0.6	0.25	0.2	0.13
Ag	0.07	0.02	1	0.286	0.07	0.05
Cu	5.27	1.92	0.096	0.364	55	5
Mo	0.31	0.12	0.207	0.387	1.5	0.49
W	17.52	4.78	11.68	0.273	1.5	0.7
Pb	19.01	7.99	1.521	0.42	12.5	26
Bi	0.07	0.04	0.412	0.571	0.17	0.14
Hg	1.43	0.32	0.018	0.224	80	5

(3) 从变异系数方面来看, 总体上各烃类组分的变异系数之间变化波动不大, 较为稳定, 这表明区内烃类组分背景变化较均匀。

(4) 从微量元素的浓度克拉克值可以看出, 该地区 Au 元素的浓度克拉克值比较高, 说明该地区明显有 Au 的富集, Sb、Ag、Pb 等微量元素浓度克拉克值小于 1; 浓度克拉克值小于 0.5 的微量元素有 Cu、Zn、Mo、Bi、Hg、。

(5) 从微量元素的变异系数方面来看, 各微量元素的变异系数均低于 1, 则可以说明微量元素在该地区分布比较均匀, 且其背景变化比较小。

根据分析结果, 可以得到该地区各烃类组分的分布是比较稳定的, 虽然各烃类组分的背景值含量相对来说是较高的, 但是由于其分布的稳定性对成矿过程中可能存在的烃类组分异常没有较大的影响, 因此就不会干扰到烃类组分的异常分布, 这一发现预示着烃类组分可以作为预测深部盲矿体的有利条件。通过分析微量元素地球化学参数表, 发现区内金(Au)元素经历了显著的富集过程; 而锌(Zn)、钼(Mo)、铅(Pb)和铋(Bi)的元素含量低于正常丰度, 这可能是由于成矿活动导致这些元素在局部区域集中, 从而在背景含量中表现出贫化现象。总体而言, 微量元素在该区域的分布较为均匀, 分异关系保持正常。

3.2. 相关性分析

对焦家金矿烃类组分之间、烃类组分与 Au 元素之间、微量元素之间进行相关性分析。见附录表 1、附录表 2, 分析结果如下:

(1) 通过观察焦家金矿床微量元素的相关系数, 可以看出主成矿元素 Au 与 Mo、Pb 元素之间呈较弱的负相关, 与 As、Sb、Ag、Zn、Mo、W 等元素之间呈弱正相关。这是由于在成矿过程中, 由于叠加作用, 使得 Au 元素与元素 Mo、Pb 在空间上会在不同的适宜位置进行富集, 出现明显的分异性, 从而导致其相关性较差, 呈现弱的负相关。同理 Au 元素与元素 As、Sb、Ag、Zn、Mo、W 等在空间上会在不同的适宜位置进行富集, 出现明显的分异性, 从而导致其相关性较差出现弱的正相关, 说明在成矿过程中, 具有相似的迁移形式和沉淀条件, 可能生成于同一期成矿作用。

(2) 该地区 Au 元素与所有元素均表现为弱的正相关, 这一现象的出现说明, 在整个矿化过程中, 这些元素具有相似的性质, 这些微量元素的迁移方式相似, 可能有相同的沉淀条件, 因此可以推断具有相似性质的微量元素可能产生与同一时期的成矿过程。

(3) 各烃类组分与 Au 元素之间存在着显著的负相关性, 所有的烃类组分之间呈极为显著的正相关, 其相关系数均在 0.9 左右, 因为烃类组分彼此之间相关性明显, 这说明在金矿成矿过程中, 烃类组分可能源自于相同的母体, 且经历了相似的地质历程, 并具有相似的演化特征, 而烃类组分的富集区段与 Au 的富集区域明显不同。

(4) 烃类组分与 Hg 元素之间呈现出弱的负相关, 这表明该元素在空间分布上具有独特的分布特点。

3.3. 不同地质体烃类组分平均含量变化特征

以焦家矿区 128 勘探线为研究对象, 统计出各类地质体中烃类组分含量值和总烃含量值, 如表 3 所示。

Table 3. 128 Average content of different geospheric clusters in exploration lines

表 3. 128 勘探线不同类型地质体烃类组分平均含量表

	甲烷	乙烷	丙烷	异丁烷	正丁烷	乙烯	丙烯	总烃
矿体(8)	14,317	2430	706	40	205	1535	963	20,196
黄铁绢英岩化带(50)	15,969	2846	997	61	296	1894	1163	23,226
绢英岩化带(85)	18,063	3261	1213	76	364	2177	1360	26,514
二长花岗岩(3)	16,207	2870	1097	65	334	2016	1253	23,842
变辉长岩(29)	8765	1736	635	41	197	1292	845	13,511
钾化花岗岩(10)	20,605	3843	1423	86	421	2544	1552	30,474
煌斑岩(1)	563	155	123	12	48	175	163	1239

注: 桂林矿产地质研究院测试中心测定, ()内为统计样品个数。

通过表 3 可以得到: 矿体中烃类组分含量相对来说是处在一个较高的水平, 总烃含量为 20,196 $\mu\text{l/kg}$, 128 号勘探线中黄铁绢英岩化带与绢英岩化带以及二长花岗岩中总烃含量是比较高的, 煌斑岩总烃含量较低。并且在各类地质体中, 很明显甲烷的含量是高于其他烃类组分的含量, 且不同地质体中烃类组分含量变化较为明显。

在不同类型地质体中各烃类组分的含量变化明显, 对矿体和蚀变围岩中烃类组分变化进行含量统计, 如表 4 所示。

Table 4. Mineral and eroded peripheral compound concentration averages

表 4. 金矿矿体与蚀变围岩中烃类组分含量平均值

元素	矿体(21)	强蚀变围岩(174)	弱蚀变围岩(143)	未蚀变围岩(52)	峨眉山玄武岩烃类含量(标准化值)
甲烷	12,395	14,153	17,715	8924	171.5
乙烷	2001	2473	3220	1662	15.4
丙烷	657	955	1242	655	9.65
异丁烷	38	60	78	42	1.00
正丁烷	197	292	377	206	3.92
异戊烷	33	54	69	36	
正戊烷	58	89	114	63	
乙烯	1379	1732	2196	1265	33.66
丙烯	886	1095	1363	831	24.54

注: 烃类含量单位为 $\mu\text{l/kg}$ 。()内为统计样品个数。

根据表 4, 分析结果如下:

(1) 烃类组分含量呈现出一定的分布规律: 在弱蚀变围岩中含量相对较低, 随着蚀变作用的加强, 强蚀变围岩和矿体中的烃类含量呈上升趋势, 但在未蚀变围岩中含量则急剧减少, 低于矿体水平。烃类组分主要由成矿热液中的有机物提供, 在焦家矿区金矿床的形成过程中起到了重要作用, 影响着成矿元素的运动、沉积和富集。在成矿流体定位、沉积、矿化和冷却的过程中, 烃类组分会以一种重要的气态伴随物存在其中, 通过一定的温度、动力和压强等作用, 烃类组分会走向矿体上方或者是向周围岩石部分扩散, 从而包裹矿体, 进而形成了以矿体为中心的烃类高值异常区, 以矿体为中心由里而外烃类组分呈降低的变化趋势[23] [24]。

(2) 烃类组分表现出一定的差异性, 即不同地质体中烃类组分含量是明显不同的, 但是其在矿体周围分布趋势和烃类组分变化的规律性是相似的, 这暗示了它们可能有类似的形成过程和来源。

(3) 数据显示, 未蚀变围岩中的烃类组分含量为最低, 这表明该地区的烃类异常主要受控于成矿热液的上升和分散作用, 而非围岩本身的直接影响。

(4) 与峨眉山玄武岩标准样本相比较, 该地区的烃类组分显示出显著的富集现象, 说明该地区的烃类, 无论是烷烃还是烯烃, 在空间上的分布均能有效指示矿化富集区域。

3.4. 矿床烃类组分结构特征

利用烃类气体标准化的方法[25], 可直观地发掘不同类型地质体烃类组分间微观特征和配分规律。通过对焦家金矿 128 勘探线上不同地质体中的烃类组分进行标准化处理, 如图 2 所示。

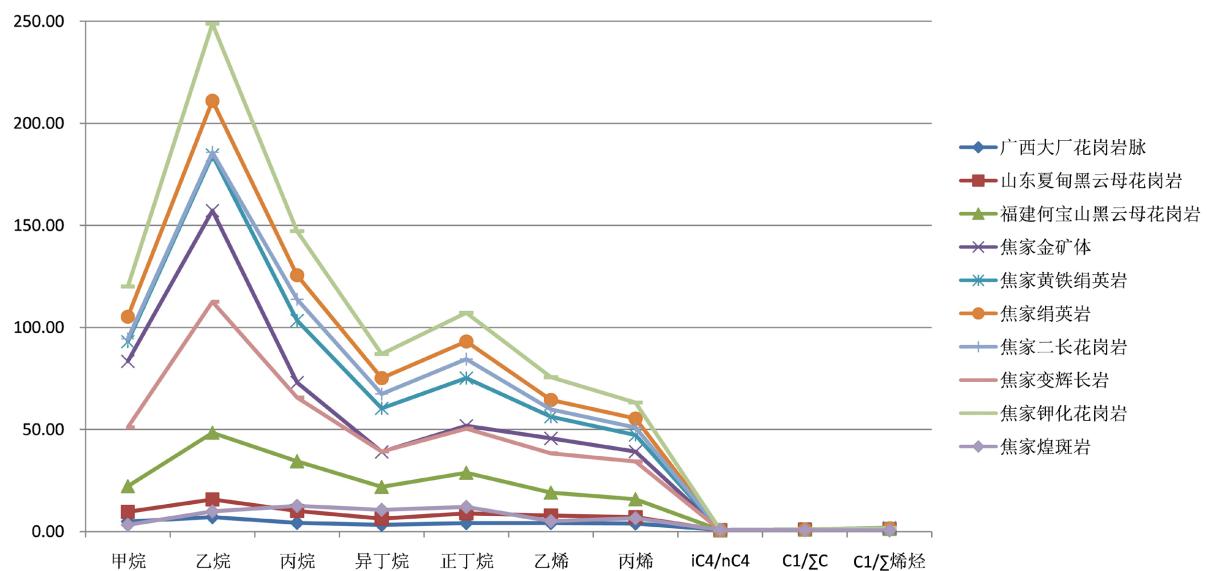


Figure 2. 128 Line standardized brass component comparison graph

图 2. 128 线标准化烃类组分对比图

从图中可以明显看出, 该地区各类地质体的烃类组分标准化值普遍高于其他地区花岗岩的相应值。在焦家金矿区, 除了中基性岩脉(包括变辉长岩和煌斑岩)之外, 我们发现区内不同蚀变岩类中烃类组分的变化趋势具有一致性, 这一现象表明这些地质体中的烃类组分具有相似性, 即各类蚀变地质体演化路径可能相同或者是具有相似的演化, 同时可以看出来烃类组分在成矿过程中分布不均, 不同地质体烃类组分参与量不同, 这一现象可以表明烃类组分异常可能会和金矿体在空间形成套和关系[26] [27]。我们可以看出焦家金矿区各类地质体的烃类组分标准化值是非常高的, 这表明该地区在整个成矿过程中不仅存在

着极为丰富的成矿溶液，一定程度上还可以说明可能有更多的烃类组分参与整个成矿过程中。

为了便于研究烃类组分的内部结构，就要对标准化值再进行归一化处理，然后利用这些归一化的值重新绘制图表，见图3。通过这一处理，我们能够更准确地分析和比较各类地质体中烃类组分的相对丰度和变化趋势。

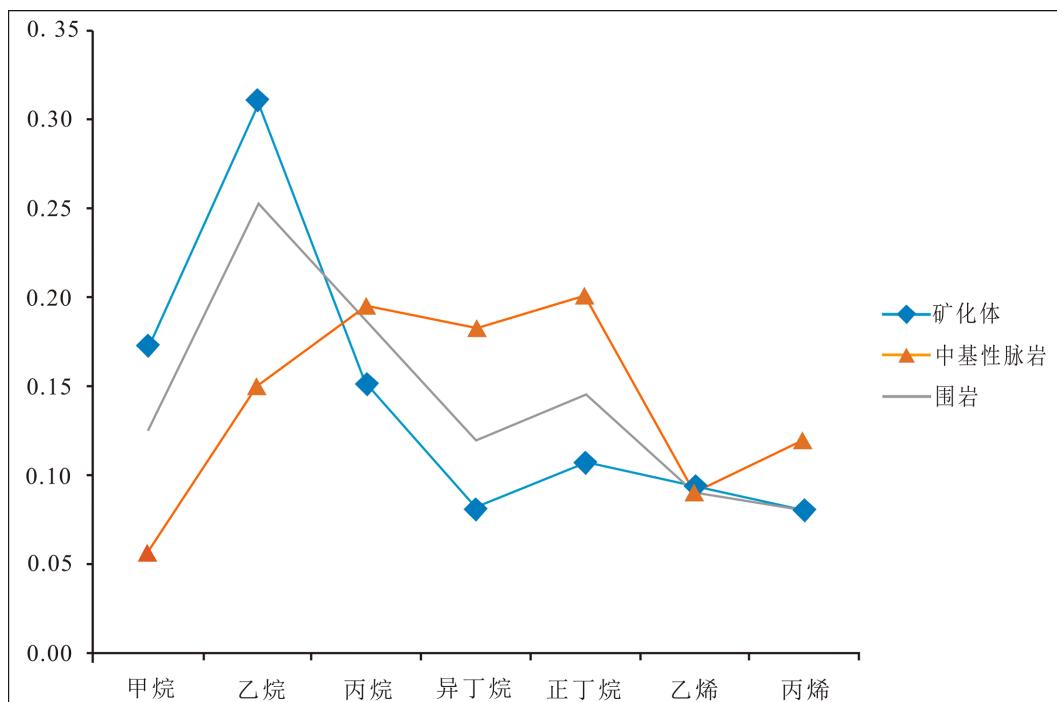


Figure 3. Classification of clusters
图3. 烃类组分归一化图

从图3可以看出不同地质体中烃类组分所占比重的具有很大的差异，这些差异可能反映了各类地质体在成矿过程中所经历的独特地质环境和过程。

在矿化体、中基性脉岩和围岩这三类地质体的烃类组分归一化图表中，可以观察到显著的变化趋势。这表明在焦家金矿的成矿过程中存在烃类气体参与，这些烃类气体是重要的半生气体组分。在矿体的空间分布上，烃类组分异常与金矿体呈密切对应关系。特别是中基性脉岩，其烃类组分的分布与其他两类地质体存在明显差异，甲烷和乙烷的相对丰度较低，而异丁烷和正丁烷的相对丰度则相对较高。这一现象可能指示了中基性脉岩在成矿过程中的特殊作用和烃类组分的特定来源，可能与岩浆不断上侵过程中包裹、同化了部分中基性及其中的矿源层有关，热液萃取了其中的金属成矿物质，使成矿元素逐步增加、富集并形成含矿热液，包括烃类组分在内的气液组分特征产生变化，因而中基性岩脉区别于矿化体和围岩。

对于矿化体和围岩这两类地质体，它们的烃类组分归一化曲线虽然在整体上呈现出相似的变化趋势，但在细节上仍然存在一些差异。在矿化体中，甲烷和乙烷的相对丰度较高，而在围岩中，丙烷、异丁烷和正丁烷的相对丰度更为显著。说明成矿热液在其运输、沉积和富集过程中发生气-液相分离。这种分离过程中，富含烃类气体的成矿流体通过地质结构中的断裂、裂隙和微裂隙系统向外逸出，并不断的积累且经历化学转化，形成了独特的地球化学标志。这种差异可能揭示了矿化体和围岩在成矿过程中烃类组分来源和迁移路径的不同，为进一步的地质解释和矿床勘探提供了重要线索。

4. 结论

通过对胶东焦家金矿的地球化学参数特性、烃类组分含量及结构特征进行深入分析结果得出：首先结合烃类组分和 Au 元素的背景值，说明焦家金矿成矿过程中烃类组分参与成矿的含量比较高。其次焦家金矿的烃类组分含量较高，这一结果表明焦家金矿在成矿过程中可能有更多的有机质参与，这不仅有助于成矿物质的聚积，还可能促进围岩中成矿元素的活化和富集，从而有利于金矿床的形成。最后焦家金矿床的标准化烃类组分均高于标准化背景值，这表明成矿溶液丰富，有大规模的烃类组分参与，因此焦家金矿具有较大的成矿潜力。

参考文献

- [1] 翟明国, 杨进辉, 刘文军. 胶东大型黄金矿集区及大规模成矿作用[J]. 中国科学(D 辑: 地球科学), 2001, 31(7): 545-552.
- [2] 陈远荣. 有机烃气新方法寻找有色、贵金属矿床的研究[D]: [博士学位论文]. 长沙: 中南大学, 2001.
- [3] 陈远荣, 贾国相, 徐庆鸿. 气体集成快速定位预测隐伏矿的新技术研究[M]. 北京: 地质出版社, 2003: 9.
- [4] 徐庆鸿, 陈远荣, 贾国相, 等. 山东夏甸金矿烃类组分特征与幔源流体成矿作用探讨[J]. 岩石学报, 2007(10): 2639-2646.
- [5] 韦龙明. 重要类型金矿床(体)快速定位预测的综合示范研究[EB/OL]. https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=LzEBRIJt2Q3pzT1Xd2rtepTeChDNHbDQjR94cGziFkXcdaZiG-TADwrY-oHexmVc1uLOMwTqsim_tTrxSUVTGOE64gF0P2K -X2_Q4ytFyaoZh-knbPsrfP5ve7z07ohES38JgaLRoYtseqb69_Qu3QoUU21XTpX10th-Rs-VDqU=&uniplatform=NZKPT, 2005-01-01.
- [6] 韦龙明. 陕西八卦庙超大型金矿成矿机理与成矿方法研究[EB/OL]. https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=LzEBRIJt2Q2292Tfu8h8OPh8As3DFD88Mf9ZdDybE-qkZVEZ1Bu20HVwhRyu29R3ZmGCLE0zzU_O8LtPQxdIDl9Nh_0SZi_HN05XZ3IE34ydAvC7gYR30HbocUK-MeSgMqloPZBO_6PPeXcqgUqhpA37D1KfXxP2w9yrsxPyPQeo=&uniplatform=NZKPT, 2009-03-12.
- [7] 孔令兵. 贵州三-丹汞金多金属矿带成矿规律分析[J]. 中国西部科技, 2014, 13(9): 21-23, 26.
- [8] 刘寅, 胡凯, 韩善楚, 等. 黔西南卡林型金矿床有机质特征及其与矿床形成关系[J]. 地球化学, 2016, 45(3): 281-302.
- [9] 吕承训. 胶东金矿区域构造蚀变带地质特征与流体成矿规律研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 中国地质大学, 2012.
- [10] 马伟东. 胶西北招平断裂带金矿化作用对比研究[D]: [硕士学位论文]. 长沙: 中南大学, 2014.
- [11] 王偲瑞. 胶西北金矿床构造-流体成矿动力学[D]: [博士学位论文]. 北京: 中国地质大学, 2020.
- [12] 田杰鹏. 胶东栖蓬福矿集区中生代金多金属矿区域成矿作用[D]: [博士学位论文]. 北京: 中国地质大学, 2020.
- [13] 赛盛勋. 胶东牟乳金矿带构造-流体-成矿及动力学[D]: [博士学位论文]. 北京: 中国地质大学, 2020.
- [14] 陈远荣, 贾国相, 徐庆鸿, 等. 气体集成快速定位预测隐伏矿的新技术研究[Z]. 桂林矿产地质研究院, 2005.
- [15] 赵鹏云, 顾雪祥, 邓小华. 山东焦家金矿矿床成因及成矿模式[J]. 地质与勘探, 2007, 43(4): 29-35.
- [16] 庞绪成. 山东焦家金矿矿床地球化学特征及深部矿体预测研究[D]: [博士学位论文]. 成都: 成都理工大学, 2005.
- [17] 宋明春, 宋英昕, 沈昆, 姜洪利, 李世勇. 胶东焦家深部金矿矿床地球化学特征及有关问题讨论[J]. 地球化学, 2013, 42(3): 274-289.
- [18] 于洪军. 胶东蚕庄金矿上庄矿区成因矿物学研究与深部远景评价[D]: [硕士学位论文]. 北京: 中国地质大学, 2011.
- [19] 宋明春, 崔书学, 周明岭, 姜洪利, 袁文花, 魏绪峰, 吕古贤. 山东省焦家矿区深部超大型金矿床及其对“焦家式”金矿的启示[J]. 地质学报, 2010, 84(9): 1349-1358.
- [20] 鲍中义, 钮涛, 高书剑, 孙瑞刚, 李树统. 焦家金矿床深部矿体地质特征及深部成矿预测[J]. 山东国土资源, 2010, 26(1): 6-10.
- [21] 崔书学, 袁文花, 杨之利. 莱州寺庄金矿床深部地质特征[J]. 西北地质, 2008, 41(4): 82-92.
- [22] 徐建东. 山东焦家地质地球化学找矿模型[D]: [硕士学位论文]. 桂林: 桂林理工大学, 2016.
- [23] 徐庆鸿. 流体中烃类组分与金属成矿关系研究及其在找矿勘查中的应用[D]: [博士学位论文]. 北京: 中国地质大学, 2007.

- [24] 李昌明, 陈晓雁, 李伟, 等. 大厂铜坑锡矿成矿地球化学模型及找矿预测[J]. 现代矿业, 2011, 27(4): 61-64.
- [25] 徐庆鸿, 秦来勇, 张雪亮, 迟占东, 刘耀辉, 张学良, 杨英, 孙广沅, 赵俊宏. 建立烃类组分标准化背景的意义及在金属矿床成矿理论研究及矿产勘查方面的应用[J]. 矿床地质, 2010, 29(S1): 1141-1142.
- [26] 刘草. 山东招远大尹格庄金矿烃类组分特征与异常模型研究[D]: [硕士学位论文]. 桂林: 桂林理工大学, 2016.
- [27] 潘能海. 基于烃类组分结构的胶西北地区三大成矿带演化特征研究[D]: [硕士学位论文]. 桂林: 桂林理工大学, 2017.

附录

Table A1. Related coefficients of mineral elements in gold mines of Jiao-jia

附录表 1. 焦家金矿床微量元素之间的相关系数

元素	Au	As	Sb	Ag	Cu	Zn	Mo	W	Pb	Bi	Hg
Au	1.000										
As	0.476	1.000									
Sb	0.001	0.065	1.000								
Ag	0.274	0.378	0.735	1.000							
Cu	0.437	0.565	0.197	0.496	1.000						
Zn	0.053	0.056	0.091	0.309	0.174	1.000					
Mo	-0.050	0.012	-0.027	-0.032	0.017	-0.023	1.000				
W	0.108	0.075	-0.053	0.066	0.02	-0.007	-0.049	1.000			
Pb	-0.003	0.064	0.997	0.747	0.196	0.137	-0.033	-0.046	1.000		
Bi	0.327	0.371	0.096	0.431	0.358	0.023	-0.021	0.092	0.098	1.000	
Hg	0.013	-0.059	-0.055	-0.062	-0.012	-0.032	0.041	-0.138	-0.065	-0.036	1.000

Table A2. Related coefficients between gold-mining mesh Au and mercury components of Jiao-jia

附录表 2. 焦家金矿床 Au、烃类组分之间的相关系数

元素	Au	Hg	甲烷	乙烷	丙烷	异丁烷	正丁烷	异戊烷	正戊烷	乙烯	丙烯
Au	1.000										
Hg	0.012	1.000									
甲烷	-0.052	-0.021	1.000								
乙烷	-0.081	-0.003	0.979	1.000							
丙烷	-0.148	-0.029	0.904	0.943	1.000						
异丁烷	-0.167	-0.037	0.845	0.889	0.988	1.000					
正丁烷	-0.163	-0.043	0.875	0.915	0.994	0.995	1.000				
异戊烷	-0.172	-0.049	0.807	0.856	0.970	0.991	0.987	1.000			
正戊烷	-0.168	-0.048	0.844	0.882	0.979	0.992	0.995	0.992	1.000		
乙烯	-0.109	-0.012	0.9578	0.981	0.972	0.935	0.954	0.912	0.933	1.000	
丙烯	-0.118	-0.026	0.951	0.966	0.962	0.930	0.957	0.914	0.937	0.991	1.000