

冀西石湖金矿成矿物质来源及成矿作用探讨

陈 超¹ 牛树银¹ 王宝德¹ 孙爱群¹ 马宝军¹ 王文学² 高银仓²

(1. 石家庄经济学院资源学院, 河北 石家庄 050031; 2. 石家庄综合地质大队, 河北 石家庄 050081)

摘要:石湖金矿 101、116 矿脉深部延伸稳定, 品位有所提高, 产状变化不大, 由于深部探矿进展较好, 而使其成为太行山中段大型金矿。石湖金矿的矿脉明显受断裂构造控制, 总体属岩浆期后热液石英脉—断裂构造蚀变岩型矿床。本文采用幔枝构造新视角开展研究, 通过对地质背景研究及铅、硫、硅、碳、氢、氧同位素的分析表明: 石湖金矿成矿物质主要来源于地球深部, 成矿溶液主要为岩浆水, 混有部分大气水。进而探讨了其成矿作用, 建立了成矿模式, 提出了具体找矿建议。

关键词:幔枝构造; 成矿作用; 物质来源; 同位素; 麻棚岩体; 石湖金矿

中图分类号: P618.51; P611 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3657(2009)06-1340-10

近年来, 冀西太行山中段金银矿地质找矿工作进展很快, 迄今已发现金银矿床 7 处。石湖金矿是该区大型金矿, 且深部、外围找矿潜力较大, 许多单位在此做过大量工作, 众多学者^[1-10]对本区矿田构造、成矿规律、矿床成因、金的赋存状态等方面也做过大量的研究工作。

虽然本区积累了大量的地质资料, 但对典型矿床的解剖不够系统, 也尚未建立系统的成矿模式, 特别是成矿物质来源的专题研究尚不够深入, 本文拟采用幔枝构造新视角, 通过深部流体研究, 探讨成矿物质来源及其成矿作用。

1 成矿地质背景

区域上出露地层主要为中太古宇阜平群的中—高级变质岩系, 主要岩石类型为黑云斜长片麻岩、角闪黑云斜长片麻岩、浅粒岩、斜长角闪岩和大理岩。原岩主要为陆源碎屑岩夹镁质碳酸盐, 变质程度主要为高角闪岩相。

岩浆活动以燕山期侵入岩为主, 区内较大的侵入岩体为麻棚岩体。其产出受 NNE 向紫荆关—灵山深大断裂和 NW 向断裂控制^[11], 与围岩阜平群呈

侵入接触关系, 出露形态呈鞋底状, 面积约 65.0 km²。岩体形成 5 个脉动单元, 从外到内侵位时代由早到晚(151~119 Ma), 一起构成从中基性向酸性过渡的同源岩浆演化序列^[12]。此外, 在麻棚岩体的外围发育有大量燕山晚期的 NW、SN、NE 向延伸的岩脉, 其岩性主要为花岗斑岩、闪长玢岩、辉绿岩等。

区域构造运动以阜平运动和燕山运动表现比较强烈, 褶皱、断裂构造均较为发育。褶皱构造可划分为 5 个期次; 断裂构造以燕山期断裂构造表现最为明显, 它们利用和改造了原有构造, 以 NE 向、NW 向及近 SN 向断裂为主。同时, 它们又是重要的导矿和储矿构造。

区域上矿点众多, 有金矿、银矿、铅锌矿等, 从幔枝构造理论的角度, 它们位于阜平幔枝构造的不同部位。阜平幔枝构造成矿区是华北地幔亚热柱成矿域的组成部分, 位于太行山中—北段涿源—阜平—平山一带, 主体为阜平隆起, 可划分为核部岩浆—变质杂岩金(铜)矿成矿亚区, 已知金(铜)矿床(点)100 多处。矿床类型主要为剪切带型、断裂蚀变岩型和石英脉型, 如石湖、土岭、西石门、李家庄、栗树槽、秋树林、北营西沟、秋卜洞等金银多金属矿床; 外围拆离

收稿日期: 2009-03-23; 改回日期: 2009-06-22

基金项目: 国家自然科学基金(40872137、40272088)、河北省自然科学基金(D2007000751、D2008000534)项目资助。

作者简介: 陈超, 男, 1981 年生, 硕士, 主要从事深部成矿机理与勘查研究; E-mail: goldcc@163.com。

通讯作者简介: 牛树银, 男, 1952 年生, 教授, 主要从事构造地质学与构造成矿的教学与科研工作; E-mail: niusy@sjzue.edu.cn。

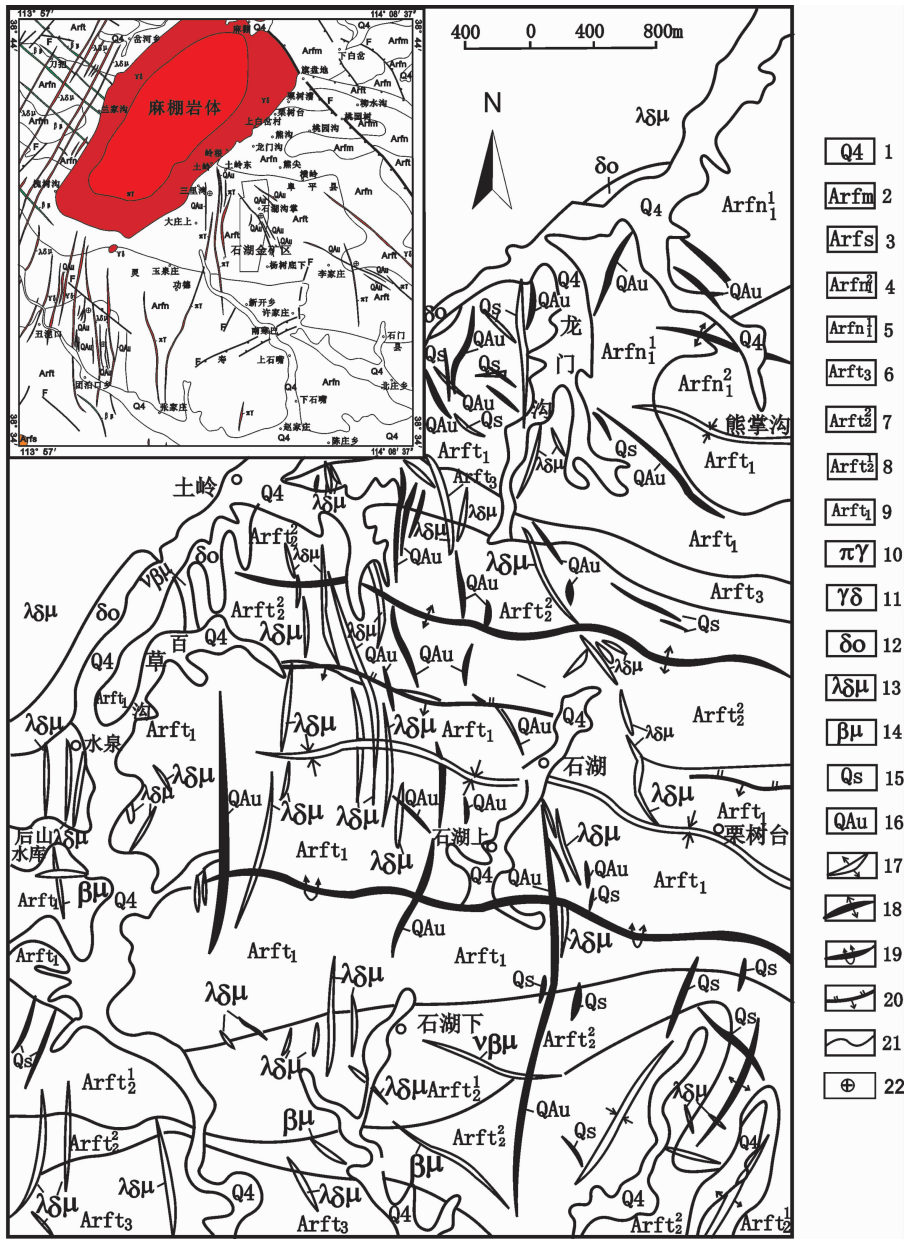


图 1 石湖金矿地质简图

- 1—第四系;2—漫山组;3—索家庄组;4—南营组下段(上亚段):黑云斜长片麻岩;5—南营组下段(下亚段):黑云斜长片麻岩夹斜长角闪岩;
- 6—团泊口组上段:黑云斜长片岩,顶部为大理岩;7—团泊口组中段(上亚段):黑云斜长片麻岩夹斜长角闪岩;
- 8—团泊口组中段(下亚段):黑云斜长片麻岩夹钾长浅粒岩;9—团泊口组下段:黑云斜长片麻岩;10—斑状花岗岩;
- 11—花岗闪长岩;12—石英闪长岩;13—石英闪长玢岩;14—辉长辉绿岩;15—石英脉蚀变破碎带;16—含金石英脉;17—向斜;
- 18—背斜;19—倒转背斜;20—逆冲推覆断层;21—地质界线;22—矿点

Fig.1 Geological sketch map of the Shihu gold deposit

- 1-Quaternary; 2-Manshan Formation; 3-Suojiazhuang Formation; 4-Lower Member (Upper Submember) of Nanying Formation: biotite plagioclase gneiss; 5-Lower Member (Lower Submember) of Nanying Formation: biotite plagioclase gneiss intercalated with amphibolite; 6-Upper Member of Tuanbokou Formation: biotite plagioclase gneiss with marble at the top; 7-Middle Member (Upper Submember) of Tuanbokou Formation: biotite plagioclase gneiss intercalated with amphibolite; 8-Middle Member (Lower Submember) of Tuanbokou Formation: biotite plagioclase gneiss intercalated with K-feldspar leucogranulite; 9-Lower member of Tuanbokou Formation: biotite plagioclase gneiss; 10-Porphyritic granite; 11-Granodiorite; 12-Quartz diorite; 13-Quartz diorite porphyrite 14-Dolerites; 15- Quartz vein-bearing altered shatter zone; 16-Auriferous quartz vein; 17-Syncline;18-Anticline; 19-Reverse anticline; 20-Thrust nappe fault; 21-Geological boundary; 22-Ore spot

滑脱层与上叠断陷盆地银铅锌矿成矿亚区, 已知银铅锌矿床(点)50 多处。矿床类型主要为拆离带型和断陷盆地次火山岩裂隙型, 如涞源县镰巴岭、浮图峪等及灵丘县支家地、刁泉、碛沟等大、中型银(铅锌)、铜多金属矿床(点)。阜平幔枝构造成矿区, 金、银铅锌矿床成矿作用表现出明显的时空分布与演化规律。

2 矿床地质特征

石湖金矿区域上位于太行山隆起中北段阜平幔枝构造轴部, 燕山期麻棚岩体东侧, 行政属河北灵寿县, 矿床规模达到大型, 是太行山中段重要的金矿资源基地(图 1)。1992 年建立国有矿山, 2008 年矿山进行机构重组, 改制为中国黄金集团石湖矿业有限公司。

区内变质作用及混合岩化作用强烈, 出露的地层主要为太古宇阜平群团泊口组、南营组片麻岩系。总体而言, 岩性从下部往上, 依次为斜长角闪岩、黑云斜长片麻岩、钾长浅粒岩夹含砂线石石英球集合体的钾长浅粒岩-斜长角闪岩、大理岩; 燕山期的构造-岩浆活动强烈, 在区内西北部主要形成了麻棚岩体及一系列与岩体有关的近 SN 向不同岩性岩脉; 区内构造主要以太古宇 NWW 轴向的石湖背斜及韧性剪切变形带和燕山期的 NW、近 SN、NNE 向断裂为格架。

2.1 矿体的特征及产状

石湖金矿目前已发现 50 余条矿化断裂蚀变带中, 已有工程控制和已经开采的为 101、102、115、116 等矿脉。矿脉走向多为 $340^{\circ}\sim 20^{\circ}$, 倾向西或东, 倾角 $65^{\circ}\sim 90^{\circ}$, 受 SN、NW 断裂严格控制。矿体长度一般几百米至上千米, 最长 3200 m, 目前开采最大延深可达 420 m。矿体平均厚度 $0.452\sim 2.04$ m, Au 的品位为 $3.52\times 10^{-6}\sim 27.9\times 10^{-6}$ 。矿体呈脉状、薄板状、透镜状, 具分支复合、尖灭再现的特点。

2.2 矿石特征

矿石矿物成分比较复杂, 以黄铁矿、方铅矿等金属硫化物为主; 脉石矿物主要为石英、绿泥石、斜长石、绢云母、方解石、钾长石。矿石的主要结构有自形晶粒结构、半自形-他形晶粒结构、侵蚀结构、交代残余结构等。矿石构造以角砾状、细脉状、浸染状构造为主。金主要以银金矿或自然金嵌布于金属硫化物及石英中, 粒度多在 $0.022\sim 0.3$ mm, 嵌布方式有粒间金、裂隙金和少量包裹金, 金成色一般为 360~

807, 平均 654。

2.3 围岩与矿化

与成矿关系密切的围岩蚀变有硅化、绢云母化、黄铁绢英岩化和绿泥石化。它们在空间上形成明显分带, 从矿脉向围岩依次为硅化带-绢英岩化带-碳酸盐化带-绿泥石化带。但分带不对称, 有的分带也不完全。围岩蚀变的规模、产状及其分带无一例外地受控矿构造控制。矿化强度与硅化、黄铁绢英岩化关系最密切, 它们的蚀变带宽度及强度与金矿化强度成正比。

2.4 地球化学特征

矿区与金矿成矿有关的元素主要有 Hg、Ag、As、Sb、Bi、Cu、Pb、Zn、Co、Ni 等, 各类岩石其他微量元素含量与其矿物组成有关。通过对石湖金矿区 3 条勘探线深部(纵向)构造带(钻孔中)地球化学样品的相关性统计分析^[13]表明, Au 与 Bi、Pb、Ag 显正相关, Au 与 Bi 相关系数竟达 0.941, 说明它们在深部成矿过程中为同生富集。Pb、Ag 与 Au 相关系数稍低, 为伴生富集, 反映了矿脉多呈黄铁矿多金属硫化物-含金石英脉矿石的特点。

3 成矿物质来源探讨

成矿物质来源一直是困扰成矿理论和找矿靶区优选的关键问题, 也一直是地质学家关注并努力探索的重要地学命题之一。弄清楚成矿物质来源的问题, 对于分析成矿作用和建立成矿模式具有举足轻重的意义, 目前研究成矿物质来源比较有效的方法仍是同位素地球化学特征。

3.1 硫同位素特征

通过对石湖金矿矿石(黄铁矿、黄铜矿、方铅矿、闪锌矿)样品的硫同位素分析, 同时兼顾收集到其他学者的相关资料, 可以发现本矿区硫同位素有如下特征(表 1):

(1)本矿区 $\delta^{34}\text{S}_{\text{V-CDT}}(\%)$ 的范围为 $-1.2\sim 3.0$, 位于地球深部岩浆硫($-5\sim 5$)范围之内, 尤其 Fsh-17 样品 $\delta^{34}\text{S}_{\text{V-CDT}}(\%)$ 的范围为 $-1.2\sim 0.6$, 平均值 -0.43 , 极差 1.8, 均一化程度较高, 说明成矿物质来源于地球深部的特征。

(2)本矿区硫化物硫同位素值具有 $\delta^{34}\text{S}_{\text{黄铁矿}}(\%) > \delta^{34}\text{S}_{\text{黄铜矿}}(\%) > \delta^{34}\text{S}_{\text{方铅矿}}(\%)$ 的演化趋势, 表明硫同位素反应基本达到了平衡。

(3)从矿区硫同位素的示踪, 可以说明本矿区成

表 1 石湖金矿硫同位素特征

Table 1 Sulfur isotope features of the Shihu gold deposit

原样号	矿区	样品名称	$\delta^{34}\text{S}_{\text{v-CDT}}/\text{‰}$	资料来源
Fsh-17	石湖金矿	黄铁矿	0.6	本课题组
Fsh-17	石湖金矿	方铅矿	-1.2	
Fsh-17	石湖金矿	黄铜矿	-0.7	
Fsh-1	石湖金矿	黄铁矿	3.0	
R1	石湖金矿	黄铁矿	2.21	中南大学 ^①
R2	石湖金矿	黄铁矿	2.20	
R3	石湖金矿	黄铁矿	2.36	
R4	石湖金矿	黄铁矿	2.36	
R5	石湖金矿	黄铁矿	-2.15	
ZK50-7	石湖金矿	黄铁矿	1.668	
ZK50-6	石湖金矿	黄铜矿	0.947	冶金一局 520 队 ^②
YD2Q-3	石湖金矿	闪锌矿	2.759	
YD1-F	石湖金矿	黄铁矿	2.751	
YD3Q-3	石湖金矿	闪锌矿	4.014	
YD1-D	石湖金矿	黄铁矿	2.400	
ZK33-3	石湖金矿	方铅矿	1.581	
ZK49	石湖金矿	黄铁矿	5.037	

注:由中国地质科学院矿产资源研究所测试,2007。

矿溶液硫同位素组成具有相当均一性,来源于地壳深部或者上地幔,这一结论也得到许多学者数据的支持和论证(表 1)。

3.2 铅同位素特征

通过对本矿区矿石硫化物样品(4 件)进行铅同位素测试(表 2),结合太行山科研队对本矿区的科研成果,经统计分析,可以发现本矿区铅同位素有如下特征:

本次测试的铅同位素数据,可以发现本矿区的铅同位素值大体非常接近,极差极小,其中 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 值范围为 15.981~16.208,极差仅为 0.327; $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 值范围为 15.164~15.204,极差仅为 0.04; $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 值范围为 36.847~37.176,极差为 0.329。

根据铅同位素组成在演化曲线上(Doe 和 Zartman^[14])的投点位置可以看出(图 2):矿石中铅主要落在地幔附近和地幔与下地壳之间,均表明成矿物质为深部来源。需要说明的是,5 号样品的铅落在上地壳以上,由于本矿区成矿为多期次,推测该期成矿流体在自深部上升途中,其混入壳源物质较多造成。

3.3 硅、氧同位素特征

本矿区硅质岩中石英的 $\delta^{30}\text{Si}(\text{‰})$ 变化范围仅仅在 0.1~0.5 很窄的区间内,平均值为 0.23(表 3)。位于热液来源(-1.5~0.8)和生物成因硅质岩(-1.1~1.7)范围内,接近火山喷发-化学沉积硅质岩(-0.4~-0.5),而与交代成因硅质岩(2.4~3.4)相差甚远(根据 Clayton 等^[15]、Douthitt^[16]、丁悌平等^[17])。目前为止,太行山地区硅质岩中至今尚未发现硅藻

表 2 石湖金矿铅同位素特征

Table 2 Lead isotope features of the Shihu gold deposit

原样号	取样地点	样品名称	铅同位素组成			资料来源
			$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	
Fsh-17	石湖金矿	闪锌矿	16.006	15.168	36.892	本课题组
Fsh-17	石湖金矿	方铅矿	16.049	15.179	36.900	
Fsh-17	石湖金矿	黄铜矿	16.208	15.204	37.176	
Fsh-1	石湖金矿	黄铁矿	15.981	15.164	36.847	
ST430	石湖 101 脉 560 中段	硅化岩中黄铁矿	16.559	15.667	38.496	太行山科研队 ^③
ST380	石湖 108 脉东侧	石英闪长玢岩	16.469	15.115	37.202	
TL447	土岭东沟	硅化岩中方铅矿	16.374	15.294	37.251	
XcT392	麻棚岩体	斑状二长花岗岩	16.365	15.223	37.033	
TZ8415	阜平上白盆	方铅矿	16.121	15.274	37.010	

注:由中国地质科学院矿产资源研究所测试,2007。

①中南大学.河北石湖金矿成矿规律及深边部找矿预测研究,2006.

②冶金局 520 队.河北省灵寿县新开乡土石金矿区矿段中间勘探地质报告,1990.

③太行山科研队.太行山构造岩浆带对金属矿的控制研究,1993.

表3 石湖金矿硅氧同位素特征

Table 3 Silicon and oxygen isotope features of the Shihu gold deposit

样品号	矿区名称	样品名称	$\delta^{18}O_{VSMOW}/\text{‰}$	$\delta D_{VSMOW}/\text{‰}$	$\delta^{30}Si_{NBS-28}/\text{‰}$	$\delta^{13}C_{PDB}/\text{‰}$
Fsh-17	石湖	石英	13.8	-87	0.1	-4.9
Fsh-17-1	石湖	石英	13.3	-89	0.1	-5.0
Fsh-18	石湖	石英	11.5	-105	0.5	

注:由中国地质科学院矿产资源研究所测试,2007。

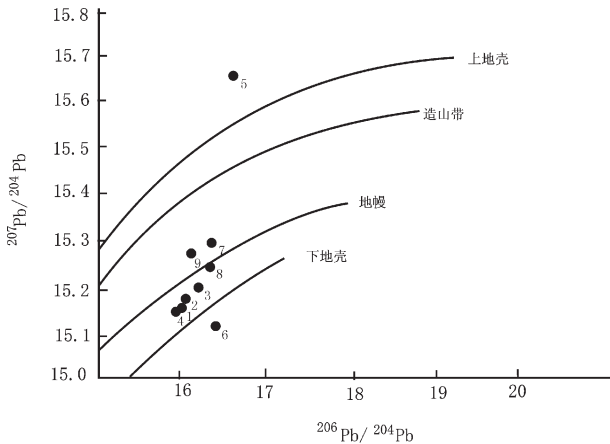


图2 铅同位素演化图

1~4—本课题组;5~9—太行山科研队

Fig.2 The structural evolution mode of lead isotope

1~4—This paper; 5~9—Scientific Research Party of Taihangshan

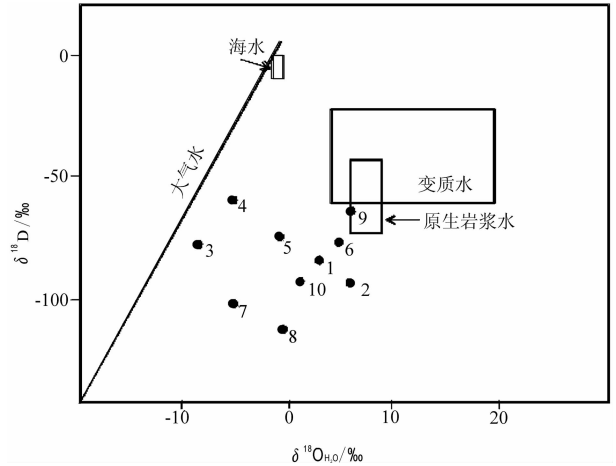


图3 太行山中北段金矿 $\delta^{18}O-\delta D$ 坐标图

1—石湖(燕郊队);2—石湖(太行山科研队);3—栾木厂;4—小岭根;5—大石峪;6—栗树槽;7—大湾;8—浮图峪;9—桃园;10—镰巴岭

Fig.3 $\delta^{18}O-\delta D$ coordinate chart of gold deposits in northern and middle Taihang Mountains

1—Shihu (Geological Party of Yanjiao);2—Shihu (Scientific Research Party of Taihangshan);3—Luanmunchang; 4—Xiaolinggen;5—Dashiyu; 6—Lishucao;7—Dawan;8—Futuyu;9—Taoyuan;10—Lianbaling

等生物结构,可以排除生物成因的可能,它们应主要由岩浆热液来源 SiO_2 经化学作用形成。

本区含矿层硅质岩石英的 $\delta^{18}O$ (‰) 值为 11.5~13.8,平均值为 12.87(表 2),其值范围位于变质石英范围(11.2~16.4)一侧边部,与火成石英范围(8.3~11.2)接近(据 Clayton 等 [15]、Savin [18]),其特征与南秦岭中生代造山期岩浆活动形成的脉石英(如山阳小河口矽卡岩型铜矿床中脉石英 $\delta^{18}O$ (SMOW)=14.52‰,祁思敬等,1993)[19]较为相似,说明氧同位素组成反映研究区硅质岩具有热液来源特征。

3.4 碳氢氧同位素特征

从表 3 可以看出,本矿区的 $\delta^{13}C$ (‰) 值变化范围在 -4.9~-5.0,平均值 -4.95,接近于地幔来源,落入泰勒(1976)初生碳(-5~8)范围。与自然界某些已知地质体中的 $\delta^{13}C$ (‰) 值相比,本区的 $\delta^{13}C$ (‰) 值落入岩浆氧化态碳和岩浆成因的碳酸盐的碳同位素组成范围之内,综合分析表明矿区的碳酸盐岩为岩浆热液成因。此外,冶金一局 520 队对矿化蚀变破碎带中的碳酸盐矿物作过碳同位素的测试,研究结果

表明 $\delta^{13}C$ (‰) 值变化范围在 -4.29~-5.90,平均值 -4.91,也接近于初生碳(-5~8,泰勒,1976),从而也表明矿区的碳酸盐岩为岩浆热液成因。

将本矿区收集的氢、氧同位素平均值投点于 $\delta^{18}O-\delta D$ 坐标图(图 3,据 Taylor [20])上,可见本矿床氢、氧同位素均在原生岩浆水附近,而远离大气水和变质水,说明成矿热液中的氢、氧同位素都来自岩浆热液源。为了对比研究,笔者还收集了太行山中北段其他一些金矿氢、氧同位素资料,数据表明太行山中北段区域上大部分矿区成矿热液都来自岩浆热液源,只有栾木厂、小岭根两矿区氢、氧同位素平均值落点靠近大气水线,说明太行山中北段区域成矿热液主要来自岩浆热液源,有部分大气水的加入。

综上所述:通过对矿区铅、硫、硅、碳、氢、氧同位素的分析表明,成矿溶液主要来自岩浆水,可能有大

气水的加入,成矿物质主要来源于地球深部的特征。

4 成矿作用

成矿作用是矿床学研究的重点^[21-27]。地壳上绝大部分地区无矿化或矿化较弱是正常的,而某些区段成矿则是异常现象,说明有成矿物质的大规模聚集。很显然,成矿作用发生的必要条件首先是成矿物质来源,而成矿物质的来源有两种基本认识:一种认为主要萃取自围岩;一种认为主要来自深源。过去曾一度下大力气寻找矿源层,但结果并不理想。而更多的证据表明成矿物质主要来自深源,甚至可能来自核-幔边界,通过地幔柱多级演化向上迁移^[28-31]。幔枝构造则是地幔柱多级演化的第三级构造单元,即地幔柱多级演化在地表(壳)的表现形式^[30-32]。

4.1 金的反重力迁移

成矿元素本身的特性对其的赋存状态和迁移形式具有非常重要意义^[33-35]。以金为例,依据金的非专属性、金的特性及新构造出的金的原子结构模型,推测 95% 以上的金都集中在地核之中,并以紫色气体状态混合于铁镍之间。在强烈的外核对流及核幔差异旋转过程中,大量的金蒸气聚集在核幔界面附近。一旦由于天文因素激发或地内因素扰动,地核物质便可穿越核幔界面,并以地幔热柱的形式向地表喷溢,金蒸气亦必然作为地幔热柱的组成成分呈反重力作用一起向上运移。当金蒸气到达地幔软流圈时,一部分金蒸气变成液态,形成气-液混合相,与地幔中的甲烷类物质(CH_4)一起,随地幔热柱多级演化继续向上运移。

这种气-液混合相金在遇到幔源深断裂、与岩浆一起上涌时,部分气-液混合相金与岩浆一起进行分异作用。在分异过程中,液态金在地表淡水作用下,可直接变成固态金;而在地表咸水(海水)作用下,往往以络合物的形式迁移,直到当有淡水或细菌(生物)等因素作用时,才开始聚集成固态金。

4.2 成矿模式

很显然,有充足的深部矿质供给、有很好的上升迁移通道和具有利的成矿储矿空间是形成大矿甚至超大型矿的充分条件。前已论述,深部成矿物质主要搭载岩浆活动,随地幔热柱多级演化向上运移。到了岩石圈浅部,金、银等矿质除了受岩浆活动影响,还会受到地壳构造应力场的控制,最终在幔枝构造的不同构造扩容带中沉淀成矿。

在幔枝构造体系中,具体的成矿控矿构造则是脆-韧性剪切带,主、次级拆离带,铲状断裂,岩体内、外接触带,次火山岩构造,不同方向、不同性质的断裂,甚至裂隙,它们分别控制着矿带、矿田、矿床、矿体、矿脉等的就位及储集,是主要的成矿控矿构造。

在太行山中段,绝大多数金、银矿床集中分布于阜平幔枝构造的轴部,以石湖金矿为例,矿体明显受断裂构造控制,总体属岩浆期后热液石英脉-断裂构造蚀变岩型矿床^[8],实际上就是幔枝构造成矿控矿的典型实例。

石湖金矿的形成与区内构造-岩浆活动密切相关。进入中生代燕山期,构造活动频繁,由于区域变质核杂岩的隆升而形成阜平幔枝,同时发育 NNE、NW 向两组断裂,这两组断裂的交叉部位便很好地控制着岩体的侵位和演化。本区多阶段成矿与麻棚岩体多期次脉动演化关系十分密切,石湖金矿主成矿年龄为 (120.74 ± 0.78) Ma,略晚于麻棚岩体的主侵入时代 $(151 \sim 119)$ Ma,说明成矿流体很可能是岩浆期后热液。区域构造多阶段活动导致麻棚岩体的多期次侵入,这不仅打通了深部成矿物质迁移通道,而且在岩体外围形成了一系列构造裂隙(如近 SN 及 NW 向断裂等),构造裂隙往往被晚期岩脉充填,岩脉与围岩间的岩性强度差异形成构造薄弱地带,加之晚期构造活动出现的构造扩容作用,为深部流体的贯入与沉淀成矿提供了条件,也为本区岩浆期后的含矿流体活动提供了储集场所(图 4)。

5 找矿方向

从以上成矿作用分析,地幔热柱多级演化是金迁移、沉淀的主要外在因素,幔枝构造则是主要具体控矿构造。深部矿源的巨量供给和有利的迁移、沉淀构造空间是形成大型金矿,乃至巨型金矿带必不可少的先决条件,这对于具体的找矿方向有着重要意义。

石湖金矿区,目前已经发现 50 余条硅化石英-断裂蚀变岩型矿化带,而仅 101、116 号矿脉勘探提交黄金储量 22.28 t,加上储量正变及深部增储,两条矿脉金储量已达 30.0 t,深部和外围的找矿潜力仍然很大。根据国内外大型金矿的开采规律,从目前石湖开采中段的趋势,矿脉深部品位有变富趋势^[36],深部至少还有 400 m 的纵向延伸,这与成矿物质的深部来源不无关系。而外围注意寻找其他近 SN、NW 向矿脉,特别是与其具有相同的演化特征和构

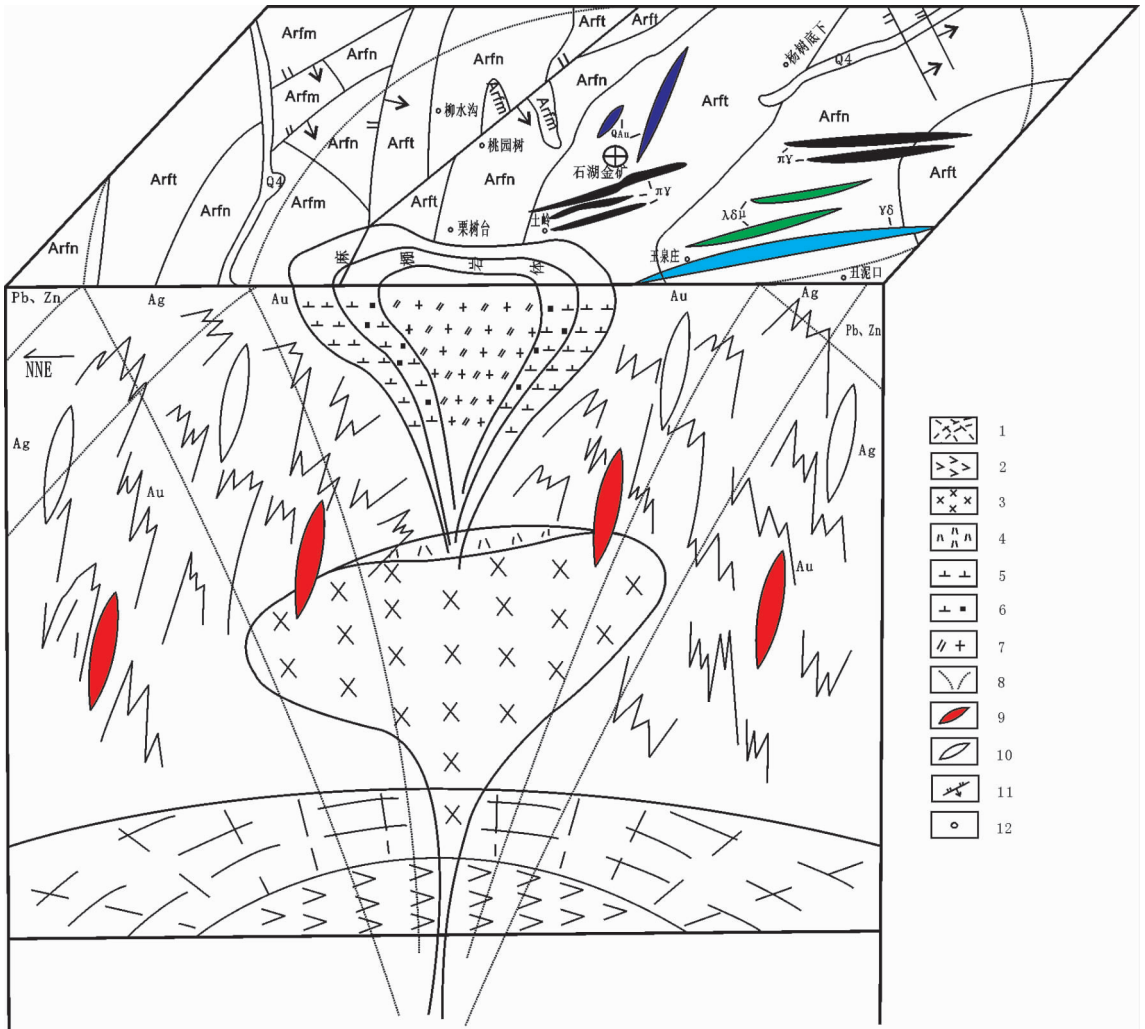


图4 麻棚地区成矿作用与找矿方向模式(部分图例见图1)

1—中地壳低速高导层;2—辉石岩;3—辉石闪长岩;4—辉石闪长岩上部同化混染带;5—闪长岩;
6—石英闪长岩;7—斑状二长花岗岩;8—矿种分界趋势线;9—基性岩脉;10—酸性岩脉;11—断层;12—地点

Fig.4 Metallogenic and ore-prospecting model of Mapeng area (some symbols as for Fig. 1)

1—Medium crust low-velocity high-conductivity layer; 2—Pyroxenite; 3—Pyroxene diorite; 4— Assimilation and hybridization zone in the upper part of pyroxene diorite; 5—Diorite; 6—Quartz diorite; 7—Porphyritic monzogranite; 8—Trend line of mineral species boundaries; 9—Mafic dike; 10—Intermediate-acidic dyke; 11—Fault; 12—Location

造性质,在成矿控矿特征上亦应有一定的可比性。同时,应加大研究力度,特别是加强矿田构造解剖,指导深部和外围找矿。

区域上,麻棚地区位于阜平幔枝构造轴部,从理论上讲,金、银、铅锌等成矿元素一起随地幔热柱多级演化,搭载于岩体往上迁移,而轴部主拆离带或断裂蚀变岩型矿床往往以成矿温度较高的铜金矿为主,向外逐渐过渡到成矿温度稍低的银铅锌矿为主;在剖面上,银、铅锌矿往往下面有出现金矿的可能,

这与金、银、铅锌自身元素的不同地球化学“活性”有关。本区金的成矿作用明显受着构造裂隙的控制,而这种成因的构造裂隙不会孤立存在,应该多是成组出现。因此,在麻棚岩体的南侧和北西侧外围,特别是麻棚岩体侵位期后的脉岩分布区应该注意找寻相同或相近类型的金、银矿产。据已掌握情况看,麻棚岩体北西侧相对剥蚀较浅,应该注意在北营西沟、丑泥口、杨家庄、秋卜洞等构造发育,且区域地球化学组合异常明显的地区找寻银金矿,特别应注意深

部地质找矿。

参考文献(References):

- [1] 牛树银, 孙爱群, 邵振国, 等. 地幔热柱多级演化及其成矿作用 [M]. 北京:地震出版社, 2001:41-175.
Niu Shuyin, Sun Aiqun, Shao Zhenguo, et al. The Multiple Evolution of Mantle Plume and its Mineralization [M]. Beijing: Seismological Press, 2001:41-175 (in Chinese with English Summary).
- [2] 张亚雄, 陈松岭, 彭省临, 等. 河北灵寿县土岭—石湖金矿田控矿构造研究[J]. 大地构造与成学, 1996, 20(1):71-80.
Zhang Yaxiong, Chen Songling, Peng Shenglin, et al. Study on the gold ore structural controlling over TS ore-field, Lingshou, Hebei Province [J]. Geotectonics et Metallogenia, 1996, 20 (1):71-80(in Chinese with English abstract).
- [3] 张亚雄, 朱惠超, 陈松岭, 等. 石湖金矿成矿规律与找矿预测[J]. 中南工业大学学报, 1995, 26(5):570-574.
Zhang Yaxiong, Zhu Huichao, Chen Songling, et al. Researches on the metallogenic regularities of the Shihu gold ore deposit and its exploration prospect [J]. Journal of Central South University of Technology (Natural Science), 1995, 26 (5):570-574 (in Chinese with English abstract).
- [4] 杨殿范, 李高山, 贾克实. 河北石湖金矿区控矿构造特征与成矿预测[J]. 河北地质学院学报, 1992, 15(5):516-520.
Yang Dianfan, Li Gaoshan, Jia Keshi. The analysis of constraint character to ore deposit and forecasting of ore-forming in Shihu gold mine, Hebei Province [J]. Journal of Hebei College of Geology, 1992, 15(5):516-520(in Chinese with English abstract).
- [5] 刘伟, 戴塔根, 傅文杰, 等. 冀西石湖金矿成矿流体特征 [J]. 中国地质, 2007, 34(2):335-341.
Liu Wei, Dai Tagen, Fu Wenjie, et al. Characteristics of ore-forming fluids of the Shihu gold deposit, western Hebei [J]. Geology in China, 2007, 34(2):335-341 (in Chinese with English abstract).
- [6] 陈锦荣. 太行山北段土岭—石湖金矿床地质特征及成因 [J]. 黄金地质科技, 1993(4):10-16.
Chen Jinrong. Geological characteristics and genesis of the TS gold deposit in the north of Taihangshan area[J]. Gold Geological Science and Technology, 1993, (4):10-16(in Chinese with English abstract).
- [7] 韩进朝. 石湖金矿 116 号脉找矿前景分析 [J]. 黄金, 2002, 23(1):9-11.
Han Jinchao. Analysis of the ore-finding prospects of vein No. 116 of Shihu Gold Deposit[J]. Gold, 2002, 23(1):9-11(in Chinese with English abstract).
- [8] 牛树银, 陈超, 孙爱群, 等. 冀西石湖金矿成矿地质特征 [J]. 黄金科学技术, 2008, 16(6):1-5.
Niu Shuyin, Chen Chao, Sun Aiqun, et al. Metallogenic geological characteristics of Shihu Gold Deposit in the western Hebei Province [J]. Gold Science and Technology, 2008, 16 (6):1-5 (in Chinese with English abstract).
- [9] 杨殿范, 李高山, 贾克实, 等. 太行山区土岭、石湖金矿床成矿条件及成因探讨[J]. 长春地质学院学报, 1991, 21(1):47-53.
Yang Dianfan, Li Gaoshan, Jia Keshi, et al. Study on the ore-forming conditions and genesis of Tuling and Shihu gold deposit in the Taihang mountain region[J]. Journal of Changchun University of Earth Science, 1991, 21(1):47-53(in Chinese with English abstract).
- [10] 张步升, 王守一, 李金海. 石湖金矿床特征及金的赋存机理研究[J]. 贵金属地质, 1997, 6(3):183-187.
Zhang Busheng, Wang Shouyi, Li Jinhai. Characteristics of deposit and occurrence of gold in Shihu gold deposit[J]. Journal of Precious Metallic Geology, 1997, 6 (3):183-187 (in Chinese with English abstract).
- [11] 喻学惠, 任建业, 张俊霞. 太行山中段铜—金成矿条件及找矿方向[M]. 北京:地质出版社, 1996:61-84.
Yu Xuehu, Ren Jianye, Zhang Junxia. The metallogenic Condition and Prospecting Direction of the Copper-Gold in the Middle of Taihangshan Mountains [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1996:61-84 (in Chinese with English Summary).
- [12] 王自力, 陈超, 牛树银, 等. 太行山中段麻棚岩体的成因探讨[J]. 河北地质, 2007, (4):6-9.
Wang Zili, Chen Chao, Niu Shuyin, et al. Discussion on the genesis of Mapeng granitic intrusion in the middle of Taihangshan mountains[J]. Hebei Geology, 2007, (4):6-9(in Chinese).
- [13] 刘荣访. 河北省灵寿县石湖金矿的构造地球化学特征[J]. 北京地质, 2001, 13(4):13-19.
Liu Rongfang. The structural geochemical characteristics of Shihu gold mines in Hebei Province [J]. Beijing Geology, 2001, 13(4):13-19(in Chinese with English abstract).
- [14] Zartman R E, Doe B R. Plumbtectonics—The mode [J]. Tectonophysis, 1981, 75:135-162.
- [15] Clayton R N, Steiner A. Oxygen isotope studies of the geothermal system at Wairakei, New Zealand [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1975, 39(5):1179-1186.
- [16] Douthitt C B. The geochemistry of the stable isotopes of silicon[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1982, 46(8):1449-1458.
- [17] 丁梯平, 蒋少涌, 万德芳, 等. 硅同位素地球化学[M]. 北京:地质出版社, 1994:9-88.
Ding Tiping, Jiang Shaoyong, Wan Defang, et al. Silicon Isotope Geochemistry [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1994:9-88(in Chinese).
- [18] Savin S M, Epstein S. The oxygen isotopic compositions of coarse grained sedimentary rock sand minerals [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1970, 34(3):323-329.
- [19] 祁思敬, 李英, 隗合明, 等. 秦岭热水沉积型铅锌(铜)矿床[M]. 北京:地质出版社, 1993.
Qi Sijing, Li Ying, Wei Heming, et al. Lead-zinc Metallogenic Belt of Devonian System in Qinling Mountains [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1993(in Chinese).
- [20] Taylor H P. The application of oxygen and hydrogen isotope studies to problems of hydrothermal alteration and ore deposition[J].

- Econ.Geol, 1974, 69:843-883.
- [21] 陈毓川, 毛景文, 骆耀南, 等. 四川大水沟碛(金)矿床地质和地球化学[M]. 北京:原子能出版社, 1996:1-146.
Chen Yuchuan, Mao Jingwen, Luo Yaonan, et al. Geology and Geochemistry of Dashuigou Te(Au) Ore Deposit, Sichuan Province [M]. Beijing: Atomic Energy Press, 1996:1-146.
- [22] 杜乐天. 地壳流体与地幔流体间的关系[J]. 地学前缘, 1996, 3(3/4):341-346.
Du Letian. The relationship between crust fluids and mantle fluids[J]. Earth Science Frontiers, 1996, 3 (3/4):341-346 (in Chinese with English abstract).
- [23] 侯增谦, 李红阳. 试论幔柱构造与成矿系统——以三江特提斯成矿域为例[J]. 矿床地质, 1998, 17(2):97-113.
Hou Zengqian, Li Hongyang. A tentative discussion on the mantle plume tectonics and metallogenic system as exemplified by the Sanjiang Tethyan metallogenic domain [J]. Mineral deposits, 1998, 17(2):97-113(in Chinese with English abstract).
- [24] 毛景文, 王志良. 中国东部大规模成矿时限及其动力学背景的初步探讨[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2000, 19(4):403-405.
Mao Jingwen, Wang Zhiliang. Time limit of large -scale mineralization in eastern China and its metallengic dynamic setting[J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2000, 19(4): 403-405(in Chinese).
- [25] 聂凤军, 江思宏. 地球演化过程中金属矿产的形成[J]. 中国地质, 2001, 28(4):24-31.
Nie Fengjun, Jiang Sihong. The forming of metallic deposits in the evolution of the Earth[J]. Geology in China, 2001, 28(4):24-31(in Chinese).
- [26] 江思宏, 聂凤军, 白大明, 等. 北山北带岩浆活动与金矿成矿作用[J]. 中国地质, 2001, 28(3):24-28.
Jiang Sihong, Nie Fengjun, Bai Daming, et al. Magmatism in the northern Beishan area and mineralization of the gold deposit [J]. Geology in China, 2001, 28(3):24-28(in Chinese).
- [27] 侯增谦, 莫宣学, 杨志明, 等. 青藏高原碰撞造山带成矿作用:构造背景、时空分布和主要类型[J]. 中国地质, 2006, 33(2):340-351.
Hou Zengqian, Mo Xuanxue, Yang Zhiming, et al. Metallogenesis in the collisional orogen of the Qinghai-Tibet Plateau: Tectonic setting, tempo-spatial distribution and ore deposit types[J]. Geology in China, 2006, 33(2):340-351(in Chinese with English abstract).
- [28] Fukao Y, Maruyama S, Inoue H. Geological implication of the whole mantle P-wave tomography[J]. J Geol Soc Japan, 1994, 100 (1):4-23.
- [29] Maruyama S. Plume tectonics[J]. Jour. Geol. Soc. Japan, 1994, 100 (1):24-49.
- [30] 牛树银, 罗殿文, 叶东虎, 等. 幔枝构造及其成矿规律[M]. 北京:地质出版社, 1996:1-124.
Niu Shuyin, Luo Dianwen, Ye Donghu, et al. Mantle Branch Structure and Its Mineralization [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1996:1-124(in Chinese with English Summary).
- [31] 牛树银, 李红阳, 孙爱群, 等. 幔枝构造理论与找矿实践 [M]. 北京:地震出版社, 2002:1-243.
Niu Shuyin, Li Hongyang, Sun Aiqun, et al. Mantle Branch Structure Theory and Exploration Practice[M]. Beijing: Seismological Press, 2002:1-243(in Chinese with English Summary).
- [32] 牛树银, 孙爱群, 王宝德. 地幔热柱与资源环境[M]. 北京:地质出版社, 2007:1-183.
Niu Shuyin, Sun Aiqun, Wang Baode. Mantle Plume and Natural Resources Environment[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2007:1-183(in Chinese with English Summary).
- [33] 邓晋福, 莫宣学, 赵海玲, 等. 中国东部岩石圈根/去根作用与大陆“活化”[J]. 现代地质, 1995, 8(3):349-356.
Deng Jinfu, Mo Xuanxue, Zhao Hailing, et al. Lithosphere root/ de -rooting and activation of the east China continent [J]. Geoscience, 1995, 8(3):349-356(in Chinese with English abstract).
- [34] Niu Shuyin, Hou Quanlin, Hou Zengqian, et al. Cascaded evolution of mantle plumes and metallogensis of core and mantle-derived elements[J]. Acta Geologica Sinica, 2003, 77(4):522-536.
- [35] 霍明远. 金的结构模型与地质找矿[C]//涂光炽, 霍明远. 金的经济地质学. 北京:科学出版社, 1991:1-7.
Huo Mingyuan. Atomic structure model of gold and its mineralization mode[C]//Tu Guangchi, Huo Mingyuan(eds). Gold Economics. Beijing: Science Press, 1991:1-7(in Chinese).
- [36] 陈超, 王自力, 牛树银, 等. 石湖金矿深部找矿潜力分析[J]. 河北地质, 2007, (2):12-15.
Chen Chao, Wang Zili, Niu Shuyin, et al. Analysis on prospecting potentiality in the deep of the Shihu gold deposit [J]. Hebei Geology, 2007, (2):12-15(in Chinese).

A tentative discussion on ore-forming material sources and mineralization of the Shihu gold deposit in western Hebei Province

CHEN Chao¹, NIU Shu-yin¹, WANG Bao-de¹, SUN Ai-qun¹,
MA Bao-jun¹, WANG Wen-xue², GAO Yin-cang²

(1. Shijiazhuang University of Economics, Shijiazhuang 050031, Hebei, China;

2. Geological Research Party of Shijiazhuang, Shijiazhuang 050081, Hebei, China)

Abstract: With the stable extension of No. 101 and No. 116 ore veins revealed by the prospecting work at depth, the grade of Au has been steadily increased and the Shihu gold deposit has gradually become a large-size gold deposit in the middle of Taihang Mountains. In general, the deposit belongs to a post-magmatic hydrothermal deposit of quartz vein-fault altered rock type, with its ore veins strictly controlled by the fault structure. On the basis of studying the geological setting and analyzing ore-forming lead, sulfur, silicon, carbon, hydrogen and oxygen isotopes and from the new angle of view of the mantle branch structure ore-forming theory, the authors revealed that the ore-forming materials mainly came from the deep part of the earth and the metallogenic solutions were derived mainly from the magmatic water and partly from the atmosphere water. This paper has also discussed the ore-forming process of the Shihu gold deposit, established a metallogenic model for this area, and put forward some suggestions for further prospecting.

Key words: mantle branch structure; mineralization; material sources; isotope; Mapeng granitic intrusion; Shihu gold deposit

About the first author: CHEN Chao, male, born in 1981, master, mainly engages in the study of deep ore-forming mechanism and exploration; E-mail: goldcc@163.com.

About the corresponding author: NIU Shu-yin, male, born in 1952, professor, engages in teaching and scientific research on tectonics and its related mineralization; E-mail: niusy@sjzue.edu.cn.

海拉尔盆地呼和湖凹陷煤成气资源潜力评价

李 松 毛小平 汤达祯 陶 树 杨伟红

(中国地质大学(北京)海相储层演化与油气富集机理教育部重点实验室,能源学院,北京 100083)

摘要:呼和湖凹陷是海拉尔盆地中一个重要的二级凹陷,其中存在 2 套主力烃源岩系(大磨拐河组和南屯组),均含有煤层,且煤层生烃条件优越,可以作为煤成气的有效源岩。基于对该凹陷中煤系源岩综合评价,笔者采用三维建模与构造模拟系统(TSM)对该凹陷进行盆地模拟,计算出了该区煤系源岩的生气潜量。研究表明,呼和湖凹陷中部和南部的煤层分布比较广泛,平均厚度为 120 m 左右;煤系源岩干酪根类型主要为Ⅲ型,属于倾气型烃源岩;该凹陷以未成熟-低成熟阶段的煤系源岩为主, R_o 大部分在 0.3%~0.9%;凹陷煤成气总量为 $1.6897 \times 10^{12} \text{ m}^3$,具有很好的勘探开发前景。

关键词:煤成气;煤系源岩;盆地模拟

中图分类号: P618.11

文献标志码: A

文章编号: 1000-3657(2009)06-1350-09

煤成气理论创立于 20 世纪 40 年代,煤作为重要的天然气源岩,已为理论和勘探的实践所证明,戴金星等^[1-3]研究认为煤系烃源岩可以生成大量的天然气,聚集形成大气田,煤成气在中国天然气工业中起着重大作用,已探明天然气储量中煤成气占三分之二,大气田总储量中煤成气占五分之四。海拉尔盆地是中国典型的富煤盆地^[4],而呼和湖凹陷是该盆地中较大的聚煤凹陷之一,含煤预测储量位居海拉尔盆地各凹陷的第二位,具有良好的煤成气勘探开发前景^[5-9]。但目前对该凹陷的勘探程度还很低,尤其在煤系源岩生烃方面的研究更少,研究方法上也受到了限制,无法准确地反映煤系源岩的生气潜量。

本次研究首先对呼和湖凹陷的煤系源岩做出综合评价;确定该区横向上煤层厚度、有机质丰度、类型及其演化程度等各种参数的展布特征;最后利用三维建模与构造模拟系统(TSM)对该凹陷进行盆地模拟,反演该区煤系源岩的生烃演化过程,统计出整个凹陷煤系源岩的生气潜量,确定煤成气的有利层位。计算方法上,采用 TSM 对凹陷进行构造模拟、热模拟、生烃模拟,形象地展示该区煤系源岩整体的演化及生烃过程,能够准确把握各个层系的煤层在各个生烃阶段的生气量,这种分层位分阶段计算煤

系源岩的生气量的方法可靠性强,准确率高。通过本次对呼和湖凹陷煤系源岩生气潜力的研究,可以提高对海拉尔盆地煤成气资源的认识,丰富该区天然气的多元结构,为该区进一步勘探与开发提供参考依据。

1 研究区地质概况

海拉尔盆地是大庆探区除松辽盆地外最大的含油气盆地(图 1),地处在大兴安岭山脉西部的呼伦贝尔草原上,与蒙古塔木查格盆地为统一的盆地。海拉尔盆地总面积为 70480 km^2 ,沉积厚度超过 6000 m,盆地内部平坦,大部分被第四系覆盖,海拔在 600~700 m,大体上东高西低。

呼和湖凹陷是海拉尔盆地呼和湖拗陷内的一个二级构造单元,位于海拉尔盆地的东部。凹陷西部为巴彦山隆起,北部与伊敏凹陷毗邻,东部为锡林贝尔凸起,向南延伸到蒙古塔木察格的巴音戈壁凹陷。呼和湖凹陷为一北东向展布且两头窄、中段宽的断陷型凹陷,长 90~100 km,宽 20~40 km,面积约为 2500 km^2 。

盆地基底在海西期褶皱基础上,受燕山期构造运动的影响,形成北东向的断裂,呼和湖凹陷锡尼河庙断裂、锡尼河庙南断裂和辉索木东断裂在该时期已形成,

收稿日期:2009-03-09;改回日期:2009-10-19

基金项目:海拉尔-塔木察格盆地资源潜力研究项目(40772126)资助。

作者简介:李松,男,1985年生,硕士生,能源地质专业,主要从事能源地质方面的科研工作;E-mail:lisong85@126.com。

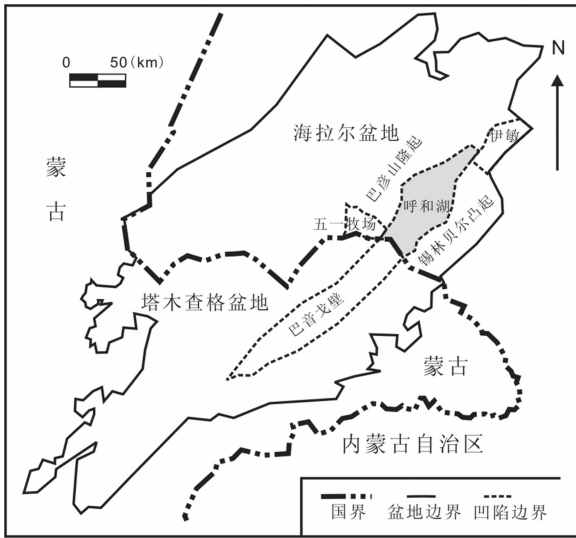


图 1 研究区位置

Fig.1 Location of the study area

构成了凹陷的基本雏型。呼和湖凹陷构造演化大致经历了早期断陷-快速充填时期、中期大幅度沉降-稳定沉积时期、晚期回升-湖盆萎缩时期 3 个阶段^[7]。

呼和湖凹陷的地层由上到下分别为第四系, 新近系, 古近系, 上白垩统青元岗组、下白垩统伊敏组、大磨拐河组、南屯组、铜钵庙组, 侏罗系兴安岭群, 三叠系布达特群, 基底主要由前古生界和古生界地层组成。主要含煤层系为下白垩统南屯组和大磨拐河组, 凹陷基底最大埋深达 3000 m。

2 呼和湖凹陷煤系源岩综合评价

煤系源岩不同于一般的泥质烃源岩, 它的有机碳含量非常高, 平均值能达到 60%, 而一般的泥质源岩

的有机碳含量较小, 仅为 0.3%~5%, 在油气生聚规律等方面煤也与一般的泥质源岩有很多不同, 所以对煤系源岩的评价不能简单的搬用泥质源岩评价标准。

鉴于这种情况, 许多研究人员针对不同的研究区提出了各自对煤系源岩的评价标准^[11-14]。煤系源岩的生烃潜力主要取决于母质类型和演化程度, 而演化程度的影响更为重要, 结合对呼和湖凹陷研究区的分析, 本次研究最终选用了刘德汉先生的评价标准^[11], 即利用氯仿沥青“A”、热解分析指标 S_1+S_2 和 H/C 原子比三项指标按不同的演化阶段综合评价煤系源岩的生气潜力(表 1)。此方案充分考虑了演化程度的影响, 首先根据镜质体反射率的实测数据确定煤的变质阶段, 然后根据测定的氯仿沥青“A”、 S_1+S_2 和 H/C 原子比划分煤样的原始生烃类别。

比较氯仿沥青“A”、 S_1+S_2 和 H/C 原子比三项指标, 得出大磨拐河组二段和大磨拐河组一段的 R_o 以小于 0.6% 为主, 煤系源岩为差-中等烃源岩; 南屯组二段和南屯组一段的 R_o 主要分布在 0.6%~1.3%, 南屯组的煤系源岩为中等烃源岩(表 2)。

3 呼和湖凹陷煤成气资源量计算

盆地模拟是油气资源评价中最重要的一种方法, 对于勘探程度较高的盆地或凹陷应用效果较好。通过此方法能够得到单层烃源岩在各演化阶段的生烃强度, 从而得到该凹陷各区带的生烃潜力, 统计出各个区带的生烃资源量。

呼和湖凹陷煤系源岩生气量的计算是基于三维建模与构造模拟系统(TSM)^[8]完成的, 该系统是一种盆地模拟的新技术, 存在以下几点优势:

表 1 不同演化阶段煤成烃源岩划分标准^[11]

Table 1 Revised division standard of coal measure source rocks at different evolution stages^[11]

演化阶段(R_o)	评价	氯仿沥青“A”	热解分析指标	H/C 原子比
<0.6	好	>30	>200	>1
	中等	20~30	120~200	0.8~1
	差	<20	<120	<0.8
0.6~1.3	好	>25	>150	>1
	中等	15~25	100~150	0.8~1
	差	<15	<100	<0.8
1.3~2.5	好	>20	>100	>0.7
	中等	10~20	60~100	0.5~0.7
	差	<10	<60	<0.5
>2.5	好	>10	>50	>0.6
	中等	5~10	30~50	0.4~0.6
	差	<5	<30	<0.4

TSM 系统利用将矢量化的图件(烃源岩厚度平面图、残余有机碳含量平面图、有机质类型平面图)进行运算,减小了前人用一个区域上几个点的数据求平均值所带来的误差。

TSM 系统中存在的各种图版,包括有机碳恢复系数、生烃率等图版,可以根据应用区域进行适当的调整,使之与研究区的情况相匹配。

TSM 系统可以形象的展示研究区烃源岩整体的演化及生烃过程,能够准确把握各个层系的烃源岩在各个生烃阶段的生烃量,这种分层位分阶段计算生烃量的方法可靠性强,准确率高。

3.1 方法原理

TSM 系统可以实现三维构造模拟、热模拟、生烃模拟等多个模块,下面分别从这几个模块介绍其方法原理。

构造演化史决定了成熟演化史,同时也决定了沉积物所处的空间体积。首先,将凹陷的地层构造图及各地层的年代等基本数据资料输入该系统,进行三维构造模拟,得到凹陷的构造演化史。模拟采用了回剥反演法的原理^[8-9],其主要思想是在保持地层骨架厚度不变的条件下,从盆地内的地层现状出发,按地质年龄从新到老把地层逐层地剥去,以恢复每个沉积阶段结束时各个地层的古厚度及埋深。三维构造模拟是油气生、排、运、聚规律模拟的第一个环节,同时也是最为关键的一个环节,是模拟是否成功的关键,为后期的资源量计算提供演化的空间。

凹陷热模拟中,TSM 采用了将地球热力学与镜质体反射率(R_o)结合的方法。在构造模拟的基础上,为不同时期假定不同的古热流,由此计算演化程度,将结果与现今的地温、成熟度进行对比,若不匹配,

则调整古热流,直至匹配为止,此时所计算得到的古热流、古地温场及成熟度史就作为该凹陷的热模拟结果。热模拟是从一口井的地层底界开始,求出该井各地层底界的热史,就可获得全井的古热流史和古地温史。通过取多口井进行模拟,然后推及凹陷其他各点,就可以获得各地层在其所经历的各地质年代的古热流和古地温的平面等值线图。在 TSM 系统中,影响热史模拟精度较大的是各井的实测成熟度与现今地温。

生烃史模拟用于重建凹陷的烃类成熟度史和生烃强度史,在计算烃类成熟度史中采用了 $TTI-R_o$ 方法。利用构造模拟所得的埋藏史以及热模型所得的古地温史,计算出时间温度指数- TTI 史。根据实测的各井点的 R_o 以及在对应井模拟出来的 TTI 值,制作多条 R_o-TTI 回归曲线,将 TTI 转化成 R_o ,计算出 R_o 史。最后将煤系烃源岩的评价图(煤层厚度平面图、残余有机碳含量平面图、有机质类型平面图)输入系统,进行生烃史模拟。在计算过程中,输入系统的是残余有机碳含量,而用这个参数评价凹陷的资源量是不准确的,恢复原始有机碳含量需要乘以有机碳恢复系数,该系数与干酪根类型有关。TSM 将凹陷划分成无数的微小单元,根据每个微小单元中有机质成熟度及类型确定该单元煤系源岩的生气率,计算出单元煤成气的资源量,再进行积分,确定整个凹陷煤系源岩的累积生气量。

3.2 生烃史模拟参数选取

煤系源岩的评价图(煤层厚度平面图、残余有机碳含量平面图、有机质类型平面图)是盆地资源评价中的敏感性参数,是影响生气量计算精度的主要因素,其次是凹陷煤系源岩的成熟度。为了更精确地计

表 2 呼和湖凹陷煤系源岩评价结果

Table 2 Evaluation results of coal measure source rocks in the Huhehu Depression

层位	R_o (%)	氯仿沥青"A" (%)	S_1S_2 (mg/g)	H/C 原子比	评价结果
大磨拐河组二段	<0.6	<u>0.2022-0.6048</u>	<u>0.66-123.09</u>	<u>0.7-1.01</u>	差-中等
		0.4035	78.35	0.91	
大磨拐河组一段	<0.6	<u>0.7152-0.915</u>	<u>31.67-258.24</u>	<u>0.84-0.93</u>	差-中等
		0.8102	105.72	0.89	
南屯组二段	0.6-1.3	<u>0.0042-1.312</u>	<u>56.74-282.54</u>	<u>0.68-0.96</u>	中 等
		0.6206	147.41	0.88	
南屯组一段	0.6-1.3	<u>0.1351-1.8274</u>	<u>55.73-160.16</u>	<u>0.73-1.12</u>	中 等
		1.1155	109.54	0.9	

注:横线之上为范围值,之下为平均值。

算该凹陷煤成气资源量, 对这四参数分别进行分析选取。

3.2.1 煤层厚度横向展布特征

煤层厚度是煤系源岩生气量的主要控制因素, 是计算煤成气资源量的一个非常重要的参数。呼和湖凹陷的煤层整体分布范围比较广, 但厚度不大, 在一定程度上影响了煤成气的资源量。

根据录井数据资料, 统计不同层段煤层在区域内的发育厚度, 结合构造图和沉积相推测呼和湖凹陷大磨拐河组和南屯组煤层厚度横向展布特征 (图 2~3)。

大磨拐河组煤层中部和南部的煤层厚度较大, 最大厚度在中部和 5 井一带, 达 70 m, 煤层厚度在

北部逐渐尖灭。总体上, 厚度自中心向边部逐渐减薄。南屯组煤层总体厚度分布形状与大磨拐河组相似, 但厚度有非常明显的增加, 最大厚度在凹陷的南部和 8 井一带, 可达 150 m, 沉积中心整体向东偏移。总体上厚度也是自中心向边部逐渐减薄。

3.2.2 煤系源岩有机碳含量横向展布特征

呼和湖凹陷有机碳含量平均值达到 53.8% (表 3)。煤层 TOC 平面分布图 (图 4~5) 显示: 大磨拐河组煤层的有机碳含量较高, 主要分布于凹陷的南部和中部, 且凹陷中部明显高于凹陷其他区域, 最大值在和 5 井附近, 可以达到 65%; 南屯组煤层有机碳含量亦较高, 最大值出现在凹陷中部区域, 也分布在和 5 井附近, 最大值为 70%。

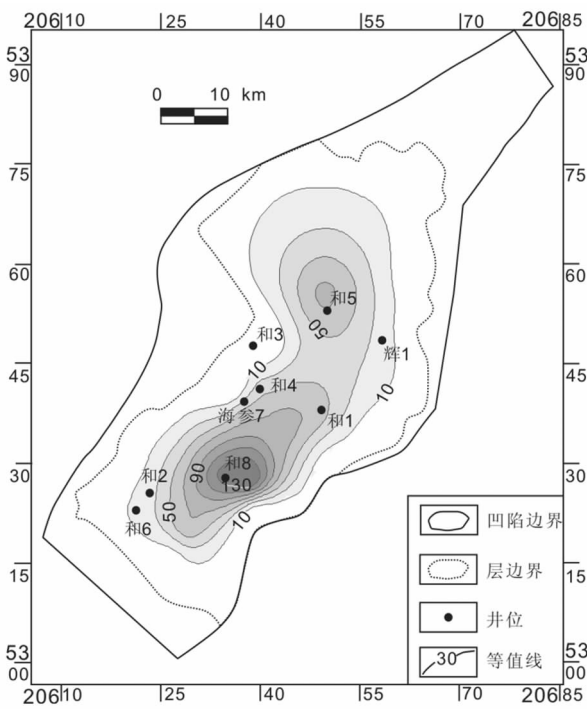


图 2 呼和湖凹陷大磨拐河组煤层厚度图
Fig.2 Thickness of the coal seam of Damoguaihe Formation in Huhehu depression

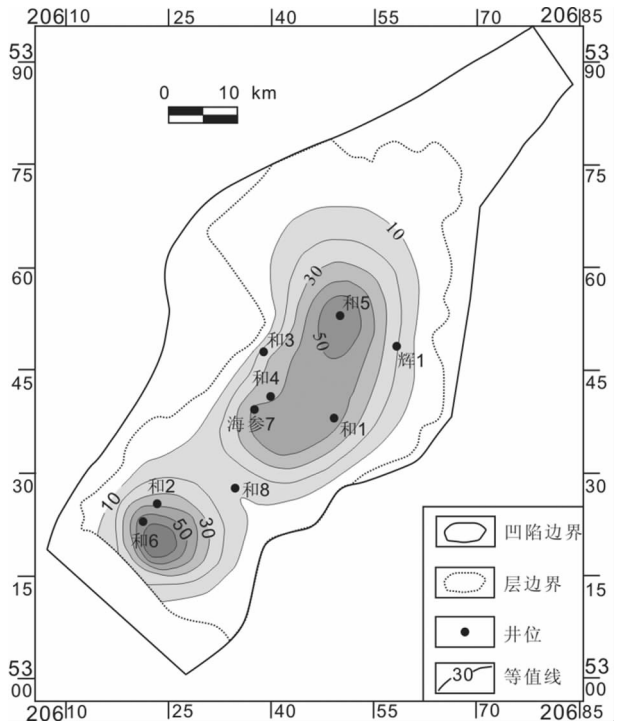


图 3 呼和湖凹陷南屯组煤层厚度图
Fig.3 Thickness of the coal seam of Nantun Formation in Huhehu depression

表 3 呼和湖凹陷有机碳数据

Table 3 Data of organic carbon in Huhehu depression

层位	最小值	最大值	平均值	样品数
大磨拐河组二段	6.139	63.58	50	27
大磨拐河组一段	27.21	65.18	54.78	6
南屯组二段	21.44	77.13	58.42	35
南屯组一段	26.77	71.97	50.1	11

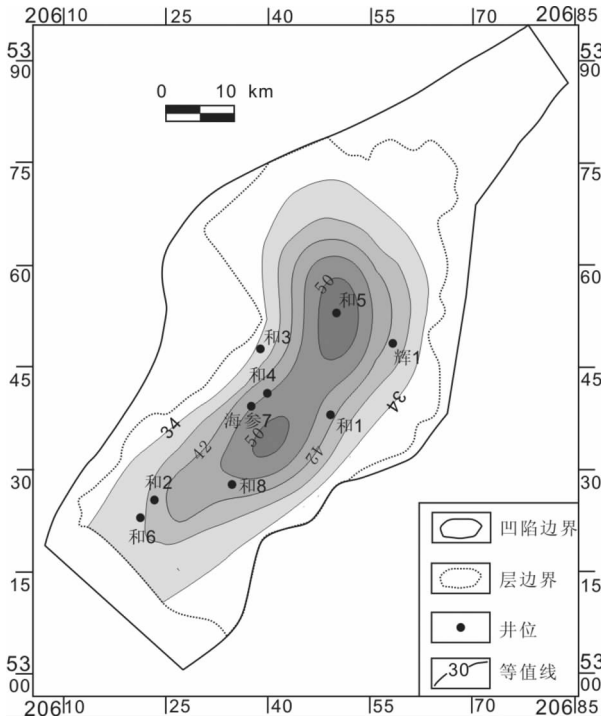


图4 大磨拐河组煤层 TOC 等值线图

Fig.4 Contour map of organic carbon of the coal seam in Damoguaihe Formation

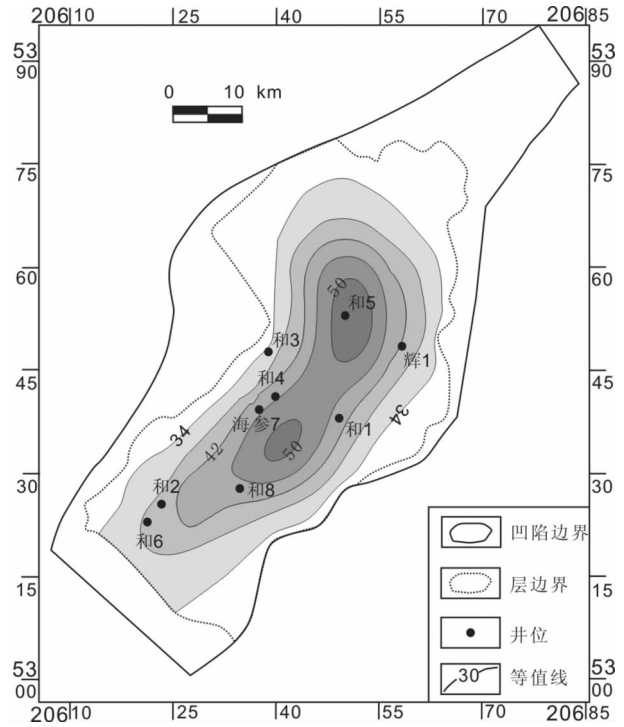


图5 南屯组煤层 TOC 等值线图

Fig.5 Contour map of organic carbon of the coal seam in Nantun Formation

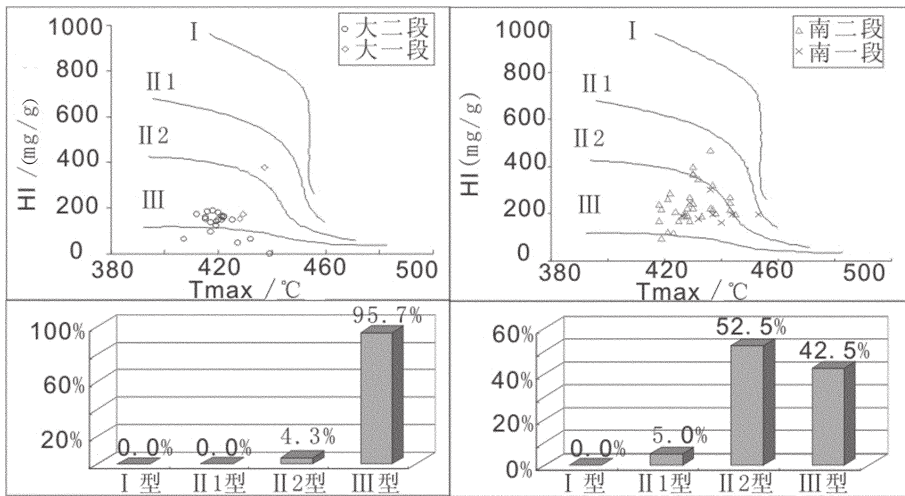


图6 呼和湖煤系源岩干酪根类型图

Fig.6 Kerogen type of coal measure source rocks in Huhuhu depression

3.2.3 煤系源岩有机质类型横向展布特征

呼和湖凹陷煤系源岩有机质类型主要以 III 型为主(图 6),属于倾气型烃源岩。其中,大磨拐河组煤系源岩干酪根类型主要以 III 型为主,占 95.7%,南屯组以 II2 和 III 型为主,分别占 52.5%和 42.5%。

利用干酪根类型指数(KTI)确定了该凹陷干酪根类型的平面图(图 7~8),显示凹陷煤系源岩干酪根类型以 III 型和 II2 型为主,II1 型极少。

3.2.4 煤系源岩成熟度横向展布特征

通过对该凹陷的构造演化史和热史的模拟,得

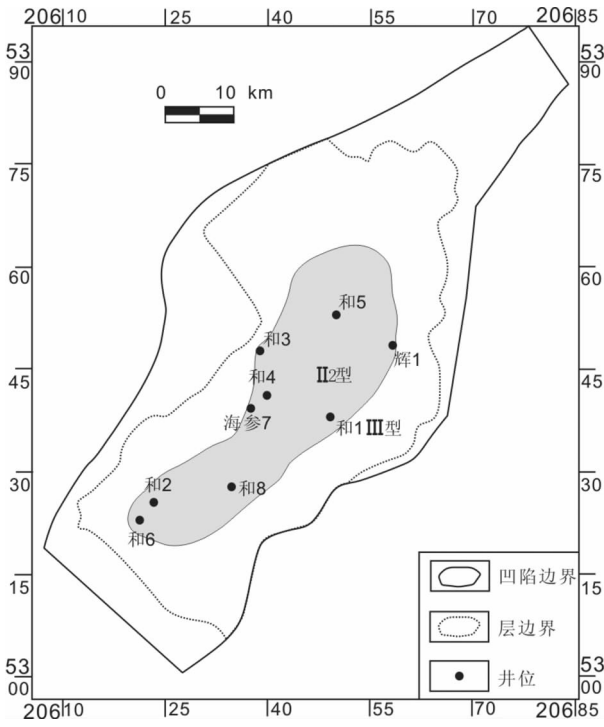


图 7 大磨拐河组煤系源岩有机质类型平面图
 Fig.7 Kerogen type of coal measure source rocks of Damoguaihe Formation in Huhuhu depression

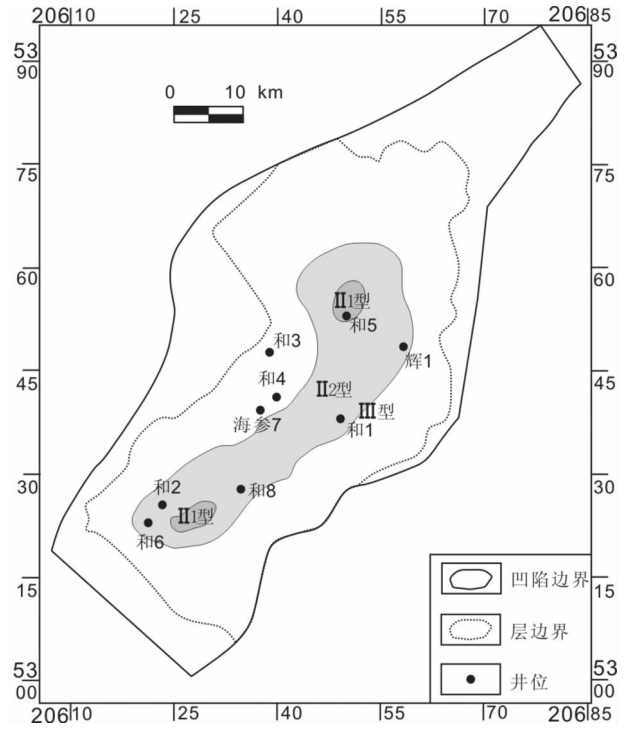


图 8 南屯组煤系源岩有机质类型平面图
 Fig.8 Kerogen type of coal measure source rocks of Nantun Formation in Huhuhu depression

到了整个凹陷的煤系源岩有机质成熟度的平面分布等值线图(图 9~10)。

呼和湖凹陷大磨拐河组煤层顶界 R_o 很低, 绝大部分在 0.5% 以下, 都未进入成熟阶段, 其中中部稍高于南部, 以凹陷中部和 5 井一带的成熟度最高, 但也只能达到 0.4%。南屯组煤层顶界 R_o 以未成熟-低成熟阶段的煤系源岩为主, 其成熟度明显高于大磨拐河组, 特别是在凹陷的南部以低成熟为主, 部分已经能达到成熟, R_o 最高可达 1.2%。中部和北部大部分区域处于未成熟和低成熟阶段, 在和 5 井一带小范围内达到成熟阶段。

4 呼和湖凹陷煤成气资源量结果

将上述所选参数输入 TSM, 对呼和湖凹陷进行构造史、热史、生烃史模拟, 得到呼和湖凹陷煤系源岩的累积生气强度平面图和各层段各阶段累积生气量(图 11~12, 表 4)。

由模拟结果得出呼和湖凹陷煤系源岩总生气量为 $1.6897 \times 10^{12} \text{ m}^3$ 。其中南屯组生气量达 $1.6575 \times 10^{12} \text{ m}^3$,

为主要生气层, 占该凹陷煤系源岩总生气量的 98%; 大磨拐河组生气量为 $0.0322 \times 10^{12} \text{ m}^3$ 。分阶段来看, 两套煤系源岩在伊敏组沉积时期生气量最大, 达 $0.8054 \times 10^{12} \text{ m}^3$; 大磨拐河组沉积时期生气量为 $0.5793 \times 10^{12} \text{ m}^3$; N+Q 沉积时期生气量为 $0.305 \times 10^{12} \text{ m}^3$ 。

5 结论与讨论

呼和湖凹陷大磨拐河组和南屯组两个层段均含有煤, 煤层在整个凹陷的中、南部分布比较广泛, 整体厚度不大; 煤的有机质含量较高, 凹陷中部的有机碳含量高于其他区域; 煤系源岩有机质类型主要为 III 型, 倾向于生气; 有机质演化程度整体以未成熟-低成熟为主; 总体评价该凹陷的煤系源岩属于中等生气源岩。

凹陷的煤系源岩的生气量比较高, 有效煤系烃源岩总生气量为 $1.6897 \times 10^{12} \text{ m}^3$ 。其中南屯组为主要生气的层段, 生气量为 $1.6575 \times 10^{12} \text{ m}^3$, 而大磨拐河组生气量仅为 $0.0322 \times 10^{12} \text{ m}^3$ 。从阶段来看, 伊敏组沉积时期生气量最大, 大磨拐河组末累积生气量为

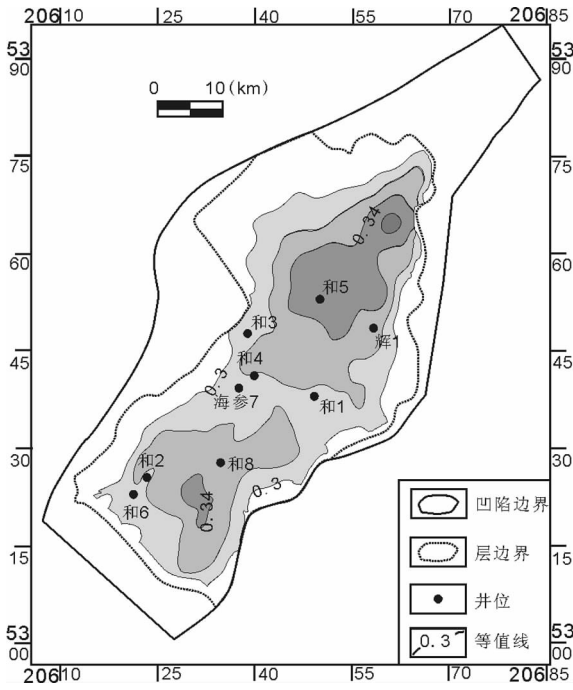


图9 大磨拐河组煤层顶界 R_o 等值线图

Fig.9 R_o contour map of coal measure source rocks of the top Damoguaihe Formation in Huhehu depression

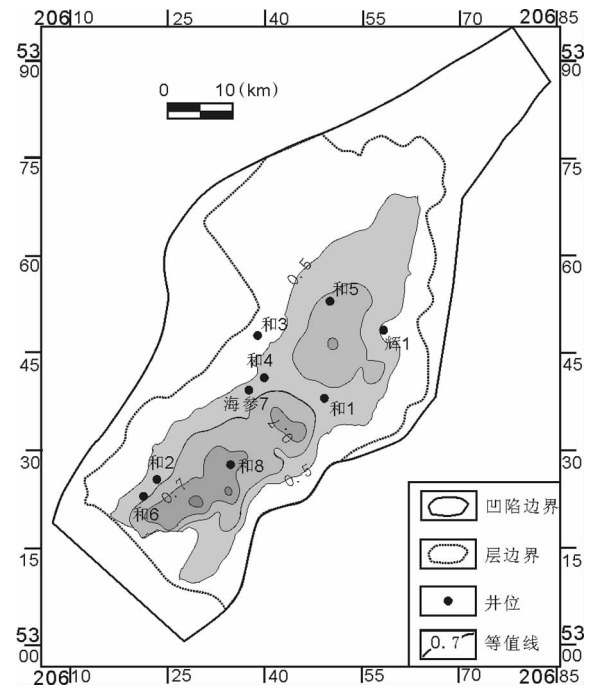


图10 南屯组煤层顶界 R_o 等值线图

Fig.10 R_o contour map of coal measure source rocks of the top Nantun Formation in Huhehu depression

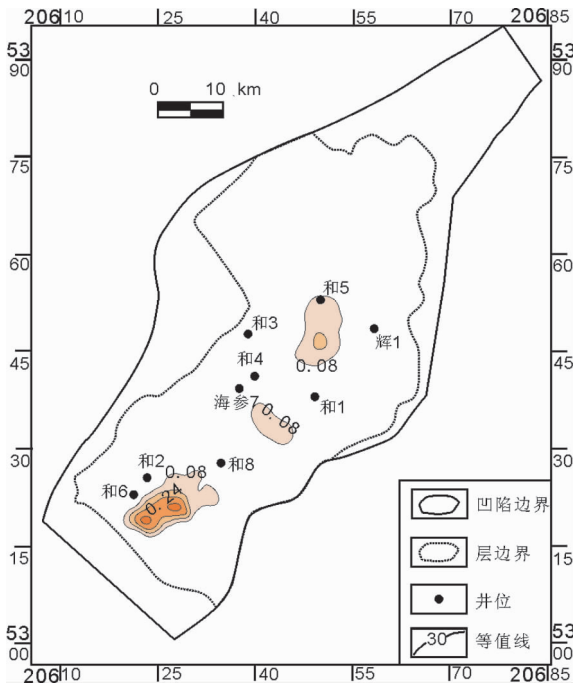


图11 大磨拐河组煤系源岩累积生气平面图

Fig.11 Cumulative gas-production map of coal measure source rocks of Damoguaihe Formation in Huhehu depression

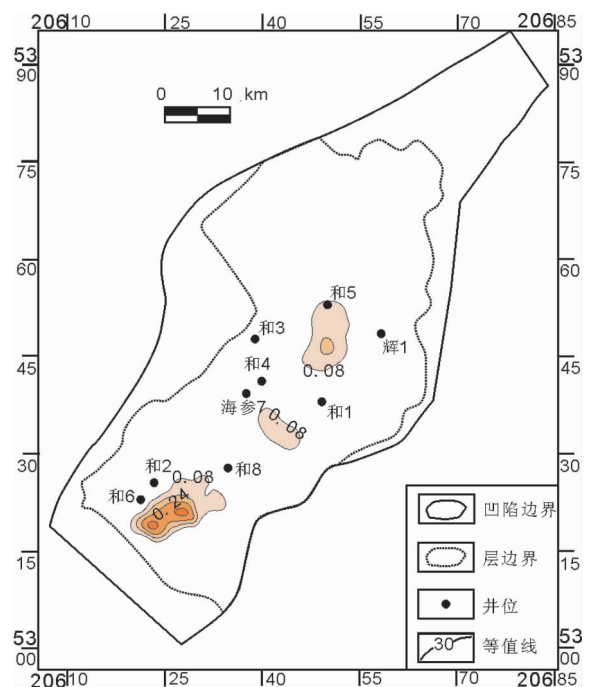


图12 南屯组煤系源岩累积生气平面图

Fig.12 Cumulative gas-production map of coal measure source rocks of Nantun Formation in Huhehu depression

表4 呼和湖凹陷各层段各阶段累积生气统计
Table 4 Cumulative gas-production at each stage

层位	大磨拐河组末	伊敏组末	N+Q 末
大磨拐河	0	0.0062	0.0322
南屯组	0.5793	1.3785	1.6575
合计	0.5793	1.3847	1.6897

注:单位为 10^{12} m^3 。

$0.5793 \times 10^{12} \text{ m}^3$, 伊敏组末生气量为 $0.8054 \times 10^{12} \text{ m}^3$, N+Q 末生气量为 $0.305 \times 10^{12} \text{ m}^3$ 。

本次研究将三维建模与构造模拟系统(TSM)应用于海拉尔盆地呼和湖凹陷煤成气资源潜力的评价,取得了一些成果,为研究区的勘探开发起到一定的指导作用。

参考文献(References):

- [1] 戴金星. 中国煤成气潜在区[J]. 石油勘探与开发, 2007, 34(6):641-645.
Dai Jinxing. Potential areas for coal-formed gas exploration in China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2007, 34(6): 641-645(in Chinese with English abstract).
- [2] 戴金星. 中国煤成气研究二十年的重大进展[J]. 石油勘探与开发, 1999, 26(3):1-10.
Dai Jinxing. Significant advancement in research on coal-formed gas in China[J]. Petroleum Exploration and Development, 1999, 26(3):1-10(in Chinese with English abstract).
- [3] 戴金星, 秦胜飞, 夏新宇. 中国西部煤成气资源及大气田[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2001, 21(1):12-20.
Dai Jinxing, Qin Shengfei, Xia Xinyu. Coal-formed natural gas resource and large gas fields in the west part of China[J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2001, 21(1):12-20(in Chinese with English abstract).
- [4] 刘晓艳, 卢双舫, 衣英杰. 海拉尔盆地煤及煤系泥岩生排烃定量评价[J]. 煤田地质与勘探, 2000, 28(6):17-19.
Liu Xiaoyan, Lu Shuangfang, Yi Yingjie. Quantitative evaluation of hydrocarbon generation and expulsion in coal bearing measures in Hailar basin[J]. Coal Geology and Exploration, 2000, 28(6):17-19(in Chinese with English abstract).
- [5] 曲国娜. 海拉尔盆地呼和湖凹陷煤层气有利目标评价研究[R]. 辽宁: 辽宁工程技术大学, 2005.
Qu Guona. Study on the best object appreciation of Coal-bed Methane in the Huhehu depression of Hailar Basin [R]. Liaoning: Liaoning Technical University, 2005 (in Chinese with English abstract).
- [6] 崔军平, 任战利, 肖晖. 海拉尔盆地呼和湖凹陷热演化史与油气关系[J]. 中国地质, 2007, 34(3):522-527.
Cui Junping, Ren Zhanli, Xiao Hui. Relations between the thermal history and petroleum generation in the Huh Lake depression, Hailar basin [J]. Geology in China, 2007, 34(3):522-527(in Chinese with English abstract).
- [7] 张艳飞, 杨子荣, 姚远. 呼和湖凹陷煤层气资源评价[J]. 中国煤炭, 2007, (9):42-44.
Zhang Yanfei, Yang Zirong, Yao Yuan. Evaluation of Huhe Lake Basin coalbed methane resources [J]. China Coal, 2007, (9):42-44(in Chinese with English abstract).
- [8] 毛小平, 吴冲龙, 袁艳斌. 地质构造的物理平衡剖面法[J]. 地球科学—中国地质大学学报, 1998, 23(2):167-170.
Mao Xiaoping, Wu Chonglong, Yuan Yanbin. Physical balanced cross sections for geological structure [J]. Earth Science—Journal of China University of Geosciences, 1998, 23(2):167-170(in Chinese with English abstract).
- [9] 毛小平, 李绍虎, 刘刚, 等. 复杂条件下的回剥反演方法—最大深度法[J]. 地球科学—中国地质大学学报, 1998, 23(3):277-279.
Mao Xiaoping, Li Shaohu, Liu Gang, et al. A backstripping inversion method in complex condition: maximum depth method[J]. Earth Science—Journal of China University of Geosciences, 1998, 23(3):277-279(in Chinese with English abstract).
- [10] 吴冲龙, 汪新庆, 周江羽, 等. 大陆构造系统动力学及构造应力叠加场探讨[J]. 地球科学—中国地质大学学报, 1995, 20(1):1-8.
Wu Chonglong, Wang Xinqing, Zhou Jiangyu, et al. System-dynamics and superposed stress field of continental tectonics [J]. Earth Science—Journal of China University of Geosciences, 1995, 20(1):1-8(in Chinese with English abstract).
- [11] 傅家谟, 刘德汉, 盛国英. 煤成烃地球化学[M]. 北京: 科学出版社, 1990:326-356.
Fu Jiamo, Liu Dehan, Sheng Guoying. Coal Measure-derived Hydrocarbon Geochemistry[M]. Beijing: Science Press, 1990:326-356(in Chinese).
- [12] 戴金星, 王庭斌, 宋岩, 等. 中国大中型气田形成条件与分布规律[M]. 北京: 地质出版社, 1997:124-170.
Dai Jinxing, Wang Tingbin, Song Yan, et al. Formation and Distribution of Large and Middle Gas Fields in China[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1997:124-170 (in Chinese with English abstract).
- [13] 李增学, 张善文, 刘华, 等. 煤成气储层沉积、层序及其空间展布研究——以济阳孤北区块为例[J]. 中国地质, 2007, 34(4):612-621.
Li Zengxue, Zhang Shanwen, Liu Hua, et al. Deposition, stratigraphic sequences and spatial distribution of coal gas reservoirs—a case study of the Gubei block in Jiyang[J]. Geology in China, 2007, 34(4):612-621(in Chinese with English abstract).
- [14] 刘德汉, 傅家谟, 肖贤明, 等. 煤成烃成因与评价[J]. 石油勘探与开发, 2005, 32(4):137-141.
Liu Dehan, Fu Jiamo, Xiao Xianming, et al. Origin and appraisal of coal derived gas and oil [J]. Petroleum Exploration and Development, 2005, 32(4):137-141 (in Chinese with English abstract).

Resource assessment of coal-derived gas in Huhehu depression, Hailar Basin

LI Song, MAO Xiao-ping, TANG Da-zhen, TAO Shu, YANG Wei-hong

*(Key Laboratory of Marine Reservoir Evolution and Hydrocarbon Accumulation Mechanism, Ministry of Education;
School of Energy Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China)*

Abstract: Huhehu depression is one of the important secondary sags in Hailar Basin, and there exist in this depression two sets of coal-bearing source rocks, namely Damoguaihe Formation and Nantun Formation, which have excellent hydrocarbon-generating conditions and can be regarded as effective coal measure source rocks. Based on a comprehensive evaluation of coal measure source rocks in this depression, the authors calculated the amount of gas generated by the coal measure source rocks by using the approach of basin modeling with the three-dimensional modeling and simulation system. The results show that the coal in the middle and south parts of this depression covers a large area, and the thickness of the coal seam is around 120 meters on average; the kerogen of coal measure source rocks is mainly of type III, belonging to gas inclining source rocks; the maturity of the source rocks is mainly at the immature-low mature stage, with R_o mostly between 0.3% and 0.9%. The total amount of coal-formed gas generated is $1.6897 \times 10^{12} \text{ m}^3$ in this depression, which is very favorable for exploration and development.

Key words: coal-formed gas; coal measure source rocks; basin modeling

About the first author: LI Song, male, born in 1985, master candidate, majors in energy geology; E-mail: lisong85@126.com.