

若尔盖铀矿田成矿地质条件及资源潜力分析

金有忠 田文浩

(四川省核工业地质局, 四川 成都 610021)

摘要:若尔盖铀矿田是中国重要的碳硅泥岩型铀矿产地,位于南秦岭铀成矿带西段。矿床群产于下志留统羊肠沟组、塔尔组和拉垅组一套浅变质硅-灰岩系中,并严格受岩性、构造和地球化学环境控制。本文在前人勘查和研究工作的基础上分析了矿田铀矿地质特征、成矿地质条件、成矿机理和铀资源前景,并重点对铀矿石的常量元素、微量元素、稀土元素、铀-钍配分和矿物硫、氢、氧同位素特征进行了研究。初步认为:与铀矿化密切相关的硅质岩生成于热水沉积环境,成矿早期的沉积、变质作用形成了相对广泛的初始铀富集,成矿中、晚期在特定的物理-化学环境下,以大气降水为主源的中低温成矿流体对围岩和初始铀富集体进行了强烈改造,最终形成了以热液改造型为主的工业铀矿化。成矿物质主要来自围岩和初始铀富集体,而部分壳幔含矿物质的介入和岩浆岩的热贡献对铀的后期富集成矿及加大成矿深度起到一定作用。矿田 U-Pb 同位素年龄测定结果具有多达近 10 组的铀成矿期,从而增加了矿田的铀成矿几率和铀矿的富集程度。资料分析显示,虽然该区资源/储量规模已达大型铀矿勘查基地条件,但其资源前景和发展潜力远未查明,建议应适时开展系统勘查,以最大限度地开发其资源潜力。

关键词:若尔盖;铀矿田;成矿地质条件;资源潜力;碳硅泥岩型铀矿

中图分类号:P619.14 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-3657(2011)03-0681-11

若尔盖铀矿田主要位于四川省若尔盖县境内,其东部延伸至甘肃省迭部县,呈近东西向带状展布,东西长近 50 km,南北宽 8~10 km,面积 450 km²,由多个大、中、小型铀矿床组成,是目前中国矿床数量最多、规模最大、工业意义和经济意义显著且发展前景明朗的碳硅泥岩型铀矿田。自 20 世纪 60 年代至 80 年代,前人曾对该矿田做了大量工作,取得了丰富的地质成果。但因矿田范围广、矿床数量多、铀成矿环境不尽相同,使其总体勘查和研究程度不足,铀资源状况亦未查清,特别是不同研究者对成矿物质来源、成矿机理、矿床成因以及资源潜力等认识不一,在一定程度上影响了勘查工作思路和地质勘查效果。本文在前人工作的基础上,结合近年来深部勘查取得的地质成果对上述问题进行探讨,以期为进一步部署深部勘查工作和扩大矿田资源提供依据。

1 矿田区域地质背景

若尔盖铀矿田大地构造上处于秦岭—祁连—昆仑活动带的南带、南秦岭华力西—印支褶皱带西段南缘。澄江运动中后期原始中国古陆裂解,该区形成了秦祁海,沉积了一套以震旦系白依沟群为代表的陆相火山岩建造。自早寒武世以后,该区接受了来自扬子古陆以火山岩为物源的海相沉积和海底热水沉积。志留纪时期,南秦岭成矿带地处扬子地块北部被动边缘的南缘^[1-11],其南、东南为若尔盖古陆和碧口古陆。在南北向引张力的作用下,形成了南秦岭裂陷槽。玛曲—郎木寺—略阳深大断裂在早志留世晚期发生继承性活动,导致生成温泉—白依一线近东西向的水下隆起,形成了较为封闭的潟湖。在这一古构造格局的控制下,沉积了一套潟湖—潮坪—滩礁相硅质岩—硅灰岩—碳酸盐岩为特征的热热水沉积含铀建

收稿日期:2010-07-16;改回日期:2010-12-27

基金项目:四川省铀矿资源大基地规划研究项目(2005—52)资助。

作者简介:金有忠,男,1953年生,高级工程师,从事铀矿地质技术和管理工作的管理工作;E-mail:jfy156@163.com。

造。至晚三叠世末,强烈的印支运动使海水退出南秦岭地区,从而结束了海洋沉积环境,该区褶皱隆升成陆。燕山早期,本区普遍上升的同时,在研究区西部内陆断陷盆地中接受了大量河流-湖泊-沼泽陆相红色碎屑岩沉积建造,燕山中—晚期有较大规模的中基性和中酸性岩浆岩活动,形成大面积火山碎屑岩建造。喜山运动中期,作为青藏高原组成部分的南秦岭地区,其大幅度的抬升与水平运动已经完成。进入第四纪后,本区的垂直差异运动和横向运动也明显由强变弱。在这一漫长而独特的地质—物化环境中,形成了沿东西向区域主构造线展布的铀矿集中产地。由于白龙江河谷的中—深度切割,区内地貌呈现出明显的垂直分带,由西向东剥蚀深度逐渐加大,高差可达 800 m,这一地形特征对铀矿化的空间展布造成一定影响。

2 矿田地质特征

2.1 地层

区内地层以白依背斜为轴线,呈近东西向展布(图 1)。下震旦统白依沟群为一套陆源碎屑火山岩沉积建造,含铀丰度为 25×10^{-6} ,是矿田内重要的铀源之一。下寒武统太阳顶组为浅海相灰—灰黑色厚层硅质岩夹炭质板岩,上部为粉砂质绢云母片岩、千枚岩,厚 1300 m,其硅质岩为本区赋矿层位之一。奥陶系总体为黑色粉砂质板岩与黑色含硅质岩条带的硅质板岩,常含铜、金和铀异常。志留系发育完整,总厚度超过 7000 m,为一套轻微变质的海湾—滩礁—浅水陆棚环境下复理石—硅质岩—碳酸盐岩建造,下统拉垅组(S_{1l})、塔尔组(S_{1t})和羊肠沟组(S_{1y})等铀丰度较高,为 $12 \times 10^{-6} \sim 20 \times 10^{-6}$,是本区重要的含矿层位,厚约 2100 m。泥盆系—三叠系均为海相碳酸盐岩—碎屑岩建造。侏罗系河流—沼泽相建造和火山岩建造主要分布于矿田西南端。白垩系为一套河湖相碎屑岩建造,其下统财宝山组为中酸性的安山质角砾岩、英安岩,厚近千米,偶见铀矿化。新近系为河湖相碎屑岩建造,仅出露于矿田西南端,未见铀矿化。

2.2 岩浆岩

区内岩浆岩不甚发育,仅见有各类规模不大的岩株、脉岩零星分布,具有分散、活动频繁和多期性的特点,受区域东西向构造控制,侵位于白依背斜北翼震旦系—志留系中,大致可划分为晚加里东—华力西期和印支—燕山期。晚加里东期辉绿岩为区内

最老的侵入岩,出露面积 5 km^2 ,全岩 K-Ar 法年龄值为 $(389.47 \pm 10.9) \text{ Ma}$;印支期侵入岩主要有英安斑岩、石英二长岩、云煌岩、闪长玢岩等,均呈脉状,侵位下志留统,全岩 K-Ar 法年龄值为 242~214 Ma^[1];区内最年轻的侵入岩为次英安岩、英安斑岩等,规模很小,多呈脉状或层状,侵入西部寒武系和奥陶系,全岩 K-Ar 法年龄值为 183~127 Ma,应属燕山早中期产物。火山岩主要分布于川、甘交界郎木寺—财宝山一带,岩性为中基性安山质火山角砾岩和中酸性流纹质英安岩,其同位素年龄值为(183~112)Ma。

2.3 构造

区内褶皱构造不发育。南秦岭褶皱带划分为白龙江复背斜、洮河复向斜和汉水复背斜。研究区地处白龙江复背斜西段,中心部位为白依背斜,呈北西—南东东向延伸,长 50 km,宽 20 km,背斜轴部为震旦系白依沟群,两翼不对称,北陡南缓,北翼倾角 $60^\circ \sim 80^\circ$,局部直立乃至倒转,南翼较缓,地层倾角 $50^\circ \sim 70^\circ$ 。

矿田内有北西西、北东和近南北向 3 组压扭性断裂构造,其中以北西西向断裂最为发育,断裂结构面北倾,沿走向和倾向呈舒缓波状,破碎带由糜棱岩、碎裂岩组成。北东向断裂多斜切近东西向断裂,其相交部位往往对矿化富集和矿床定位起着控制作用。

3 铀矿化特征

区内已查明的矿床分别产于白依背斜北翼下志留统 6 个硅灰岩透镜体中。区内规模较大的硅灰岩透镜体有 16 个,单个透镜体长度 1000~7000 m,最长可达 20000 m,出露宽度 150~500 m 不等。铀矿化多生成于透镜体形态和产状变异部位,严格受岩性、构造和地球化学环境控制。矿床沿含矿层位自西而东呈线形排列。背斜南翼由于勘查程序低,至今未发现工业矿床,仅在下寒武统太阳顶组硅岩中发现一批有意义的放射性水化和放射性物化探异常,并有明显金矿化显示。

3.1 赋矿岩石组合特征

上述含矿硅灰岩透镜体由板岩、硅岩和灰岩组成,其岩序组合自下而上大体为:炭质板岩—下硅岩—中部灰岩(硅灰岩)—上硅岩—炭质板岩。硅灰岩为纯硅岩和纯灰岩间的过渡性岩石,包括过渡性灰岩(硅质灰岩)和过渡性硅岩(钙质硅岩),岩石呈深灰色至灰黑色,具重结晶和脱碳褪色现象,主要由石

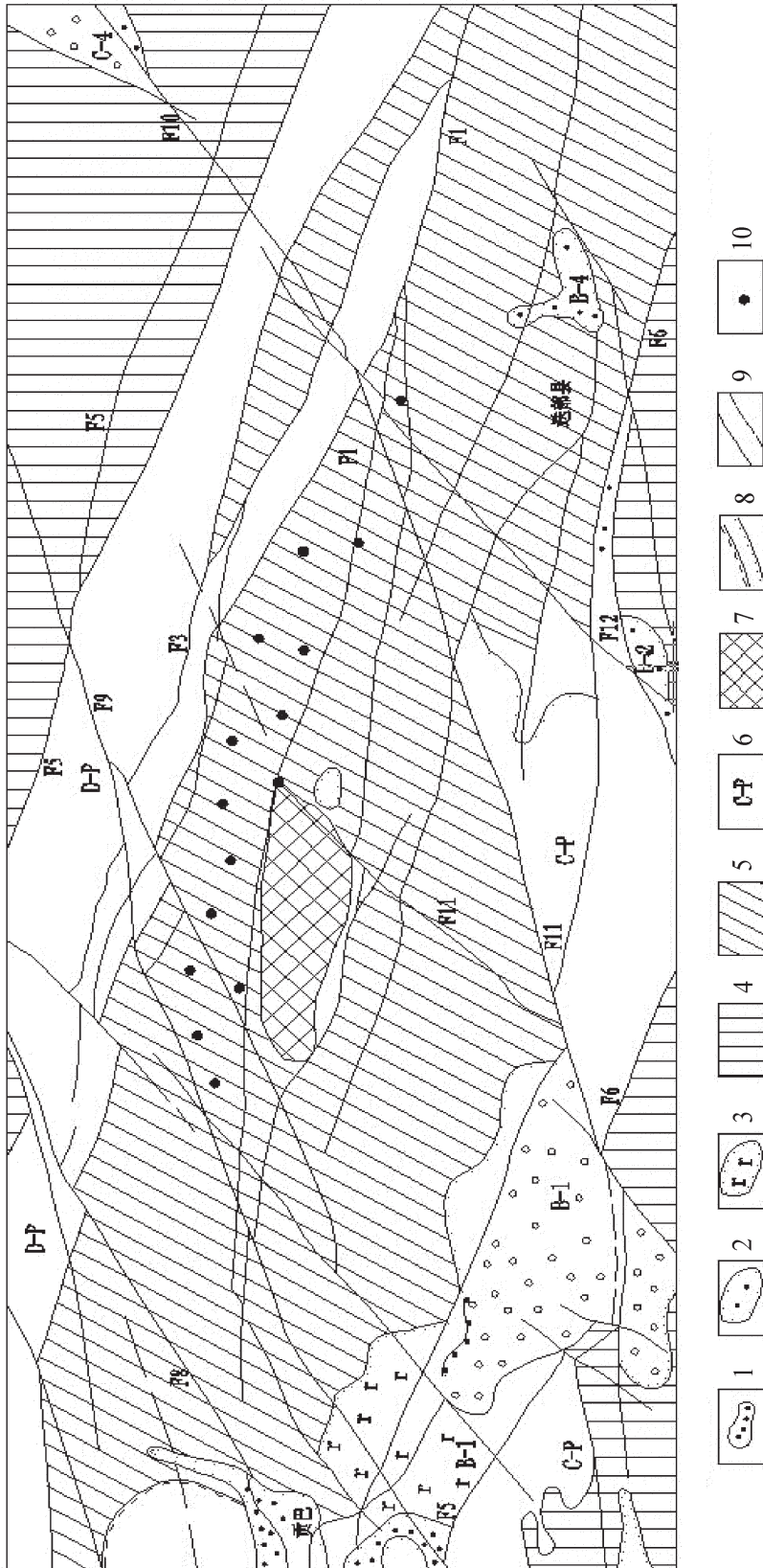


图 1 若尔盖轴矿田地质略图

1—第四系;2—白垩系;3—侏罗系;4—三叠系;5—石炭系;6—二叠系;7—震旦系白垩沟群;8—不整合界线及平行不整合界线;9—实、推测断层及编号;10—矿床(点)

Fig.1 Geological sketch map of the Zoige uranium deposit

1—Quaternary;2—Cretaceous;3—Jurassic;4—Triassic;5—Carboniferous—Permian;6—Lower Silurian;7—Sinian Baiyigou Group;8—Unconformity and parallel unconformity;9—Measured/inferred fault;10—Ore deposit (ore spot)

英、方解石、白云石、黄铁矿、重晶石及部分生物碎屑等有机质组成。上下板岩、硅岩结构致密,为良好的隔水层,而中部灰岩、过渡岩则呈多孔破碎,透水性相对较好,从而构成一个完整的导水系统,为含铀溶液的渗滤和循环提供了良好的通道和容矿空间。

3.2 矿体特征

工业铀矿体多赋存于硅灰岩透镜体形态变异部位及有利层位内近东西走向断层的层间破碎带、低序次缓倾斜断裂带、构造裂隙和溶蚀空隙中。铀矿化对岩性选择较为严格,主要产于该岩系组合的中部灰岩和硅灰岩中。矿体形态和规模受赋矿岩石的破碎程度和破碎带的规模所制约,在空间上多以盲矿体产出,占矿体总量的 80%~90%,有的矿床则全部由盲矿体组成。矿体往往成群展布,沿倾向呈侧行斜列,并具沿控构造显现膨胀收缩、分支复合的特点。

矿体形态多呈层状、似层状、透镜状、囊状。每一个矿床多由数十个矿体组成,但其主矿体储量往往可占矿床储量的 70%以上。区内矿体规模多属中—小型,走向长数十米至数百米,最长约 400 m;厚度约数十厘米至数米,最厚近 20 m;延深百余米至数百米,最大矿化垂幅可达 800 m 以深,矿体明显具有延深大于长度的特征。

3.3 矿石特征

矿石自然类型主要分为灰岩型矿石、硅岩型矿石和硅灰岩型矿石 3 个大类,每个大类又可依据矿石结构、构造的不同划分为多个亚类。如硅岩角砾岩型矿石、碎裂硅岩型矿石等。矿石多具有变晶结构、碎裂结构和角砾状结构。矿石构造常见角砾状构造、网脉状构造或条带状构造。矿石中的角砾为原岩破碎后形成,砾径 2~5 mm,胶结物为硅质、方解石、石英、炭泥质等。主要金属矿物为闪锌矿、黄铁矿、硫铜矿、黄铜矿、辉镍矿等。主要脉石矿物有方解石、石英等。

铀在矿石中主要以吸附状态存在于含炭方解石、含炭石英、水铝英石、粘土矿物、炭泥物质、褐铁矿及胶结物中,占铀量的 60%~80%。其次为铀的独立矿物,主要有沥青铀矿、残余铀黑。沥青铀矿呈微粒状或细网脉状充填于矿石破碎带、角砾岩裂隙或其胶结物中。铀的次生矿物多存在于矿床氧化带中。根据矿石外形的不同,可按其完整程度分为致密块状矿石(原生)和碎裂砂状矿石,前者铀品位较低(0.1%±),而后者多为富矿,单样品位高者可达 3%,经统计矿石铀含量与有机炭含量呈微弱近似正相

关,矿石与围岩、夹石界线不清,呈渐变过渡关系,近矿围岩无明显蚀变现象,仅偶见褪色化。

矿石有益伴生元素主要有 Ni、Mo、Cu、Zn、V 等,其含量与矿石铀含量呈近似正相关,部分元素品位达综合利用或独立开采指标。

有害组分仅为硫和有机炭,主要存在于板岩型矿石中,含量为 1%~3%,其他类型矿石中则含量较低,均不影响其工业利用。

3.4 围岩与矿石化学特征

区内各类硅灰岩型及炭板岩型矿石和其赋存围岩普遍富硅,但矿石中 SiO₂ 含量比同类岩石略低(表 1)。

由表 1 可以看出,各类铀矿石及其赋存围岩的主量元素和成矿元素组分完全相同,仅在元素含量上有较小差异;矿石中元素组分含量减少的有 CaO 和 MgO,含量增加的有 Al₂O₃、P₂O₅ 和 U、Cu、Zn、Ni、V、Mo 以及有机炭等,其中 U 和 Mo、Zn、Ni 等有益元素含量可以富集数倍至数十倍,即使在含铀矿物和沥青铀矿中亦不同程度地含有上述金属元素。

区内各类岩浆岩包括辉绿岩、花岗闪长岩、煌斑岩、正长岩、霏细斑岩和流纹斑岩等化学组分的测试结果^[4]显示,与含矿硅灰岩相比,主量元素中的 TiO₂、Al₂O₃、K₂O、Na₂O 含量有所增高,而 U 却明显降低,不具产铀岩浆岩特征,如分布面积最大的辉绿岩 U 丰度 3.5×10⁻⁶、煌斑岩 U 丰度 9.0×10⁻⁶。其他岩浆岩虽铀丰度略高,但多呈脉状,对铀成矿过程中所提供的铀量不大,且脉岩的铀矿化仅存在于矿体之中,而当延伸至矿体之外,则脉岩铀矿化消失,表明此类岩浆岩并非是矿床铀源的提供者。

4 稀土元素特征

矿田硅质岩稀土元素含量列于表 2。从中可见硅质岩稀土元素总量∑REE 含量较低,为 (25.40~82.85)×10⁻⁶,但含矿硅岩的∑REE 值却高达 247.39×10⁻⁶,两者配分曲线呈现右倾,具有明显的 LREE 富集和 HREE 亏损特征(图 2)。 δ Eu 平均 0.96,具微弱 Eu 异常, δ Ce 平均值为 0.54,Ce 显示为负异常。

5 稳定同位素特征

5.1 氢、氧同位素特征

含铀方解石脉和含铀石英脉包裹体氢、氧同位素组成列于表 3,从中可以看出: δ Dv-smow 值为-

表 1 岩石及矿石主要化学成分平均含量(%)对比
Table 1 Chemical composition of rocks and ores

	硅岩类	硅岩型 矿石	硅灰 岩类	硅灰岩 型矿石	灰岩类	灰岩型矿石	炭板岩类	炭板岩型 矿石
SiO ₂	91.57	88.46	78.38	70.89	18.91	15.47	53.15	51.81
Fe ₂ O ₃	0.59	0.65	1.48	4.66	0.33	8.40	4.70	5.99
FeO	3.44	2.91	1.86	1.51	0.30	4.98	0.94	1.59
Al ₂ O ₃	0.85	1.06	1.02	5.00	1.05	1.46	5.17	6.50
CaO	0.50	0.23	5.38	1.68	41.02	34.61	7.09	2.72
MgO	0.13	0.09	1.48	0.74	0.72	0.45	1.07	1.31
P ₂ O ₅	0.15	0.75	0.24	0.73	0.10	0.216	0.820	1.05
Cu	0.022	0.433	0.012	0.164	0.006	0.008	0.070	0.448
Zn	0.035	0.094	0.057	0.144	0.022	1.033	0.125	0.188
Ni	0.032	0.093	0.026	0.194	0.006	0.462	0.078	0.090
V ₂ O ₅	0.093	0.085	0.095	0.242	0.032	0.117	0.820	0.713
Mo	0.020	0.074	0.025	0.166	0.008	0.376	0.041	0.138
Hg	0.002	0.004	0.002	0.007				0.007
C _有	0.841	1.484	1.072	2.896	0.569	1.400	10.22	9.542
U	0.010	0.717	0.010	0.279	0.055	0.477	0.077	0.241

注:资料引自:四川地矿局川西北地质队.若尔盖矿床总结报告,1982.

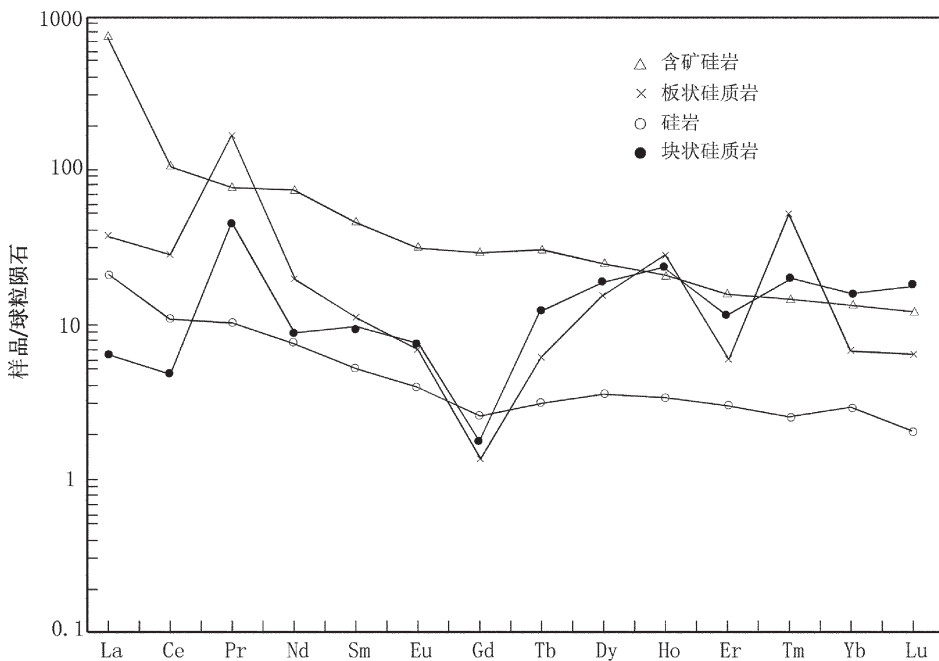


图 2 若尔盖矿田硅质岩稀土元素标准化分布图

Fig.2 Standardized diagram of rare earth elements of siliceous rocks in the Zoige orefield

表 2 若尔盖矿田硅岩稀土元素含量 (10^{-6})

Table 2 Content of rare earth elements in the Zoige orefield

样号	Si-2-D	Si-5-D	M631-2	OP ₁ -8	南秦岭热水
岩石名称	板状硅质岩	块状硅质岩	硅 岩	含矿硅岩	硅岩
La	12.4	2.05	6.8	52	8.29
Ce	27.3	4.5	12	100	13.27
Pr	20.6	4.9	1.4	9.4	2.38
Nd	13.9	5.3	5	46	8.1
Sm	2.02	1.85	1.1	9.2	1.63
Eu	0.61	0.53	0.3	2.4	0.05
Gd	0.52	1.85	0.92	9.3	1.25
Tb	0.42	0.55	0.17	1.5	0.23
Dy	2.15	1.15	1.2	8.2	1.15
Ho	0.5	0.42	0.27	1.6	0.26
Er	1.12	1.11	0.74	3.8	0.63
Tm	0.22	0.2	0.11	0.55	0.13
Yb	0.8	0.6	0.7	3	0.17
Lu	0.29	0.22	0.1	0.44	0.13
ΣREE	82.85	25.4	30.8	247.39	37.61
δ_{Eu}	0.71	1.32	0.97	0.87	0.1
δ_{Ce}	0.28	0.2	0.78	0.88	0.72

注:引自文献[3]。

表 3 若尔盖铀矿田氢氧同位素分析结果

Table 3 Hydrogen and oxygen isotope analyses in the Zoige orefield

样品号	矿物名称	均一温度(°C)	$\delta^{18}O_{v-smow}/\text{‰}$	$\delta D_{v-smow}/\text{‰}$	$\delta^{18}O_{H_2O}/\text{‰}$
A ₃₀₄	石英	290	16.89	-26.64	9.90
A ₃₆₀	(早期)方解石	320	14.27	-26.50	8.44
C ₃₂₀	方解石	187	13.12	-9.00	2.20
C ₃₄₇	方解石	184	15.44	-7.00	4.31
C ₁₂₅	方解石	175	15.25	-7.00	3.61
C ₃₇₉	方解石	146	14.60	-8.99	2.08
C ₃₇₅	方解石	132	14.44	-8.00	-0.18

资料引自:四川省地矿局川西北地质队.若尔盖铀矿床总结,1986。

26.64‰~-7.00‰,变化范围较大,而多数方解石的 δD_{v-smow} 值为 -9.00‰~-7.00‰, $\delta^{18}O_{v-smow}$ 为 13.12‰~16.89‰,与典型岩浆水 δD 值 -40‰~-85‰、 $\delta^{18}O$ 值 5.5‰~9.5‰ 相差较大,说明这些样品均偏离岩浆水范围; $\delta^{18}O$ 的变化范围很小,则表明在漫长成矿过程中氧同位素组成变化不大,也说明成矿环境及成矿条件相对稳定。

5.2 硫同位素特征

综合前人对区内主要矿床矿石和赋矿围岩中72

件黄铁矿硫同位素样品的分析结果(图3),可以看出:矿石中的黄铁矿 $\delta^{34}S$ 值变化范围较大,为 -42.58‰~+12.50‰,极差 55.08‰,平均值为 -28.36‰。呈现跨度大、不连续、多峰值、均一化程度低、以负值为主体等特点;而围岩的 $\delta^{34}S$ 为 -41.50‰~+8.48‰,均值为 -17.76‰,也具有较大负值特征,显示了两者的-一致性。而区内以围岩和初始铀矿化为物源的岩溶堆积型铀矿的 $\delta^{34}S$ 均值为 -24.00‰,说明矿田中各矿床的矿石黄铁矿 $\delta^{34}S$ 值极为相近,表明它们具

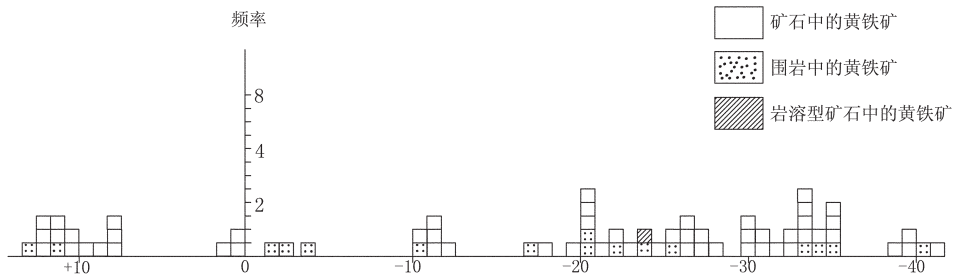


图 3 若尔盖矿田硫同位素 $\delta^{34}\text{S}$ 频数直方图(根据矿田有关资料整理)
Fig.3 Frequency histogram of sulfur isotope $\delta^{34}\text{S}$ in the Zoige orefield

有相近的矿化和成矿特征。

6 讨论

6.1 硅质岩成因

自晚加里东期之后,该区所处祁连山裂谷火山岛弧后盆地边缘裂陷带,在早古生代强烈火山活动中形成区内大量铀丰度很高的硅质岩。研究资料^[3,5,6]表明:弧后盆地型的热液沉积物一般表现较高的 $\sum\text{REE}$ 、LREE 富集、HREE 亏损、Ce 负异常和微弱 Eu 负异常特征。正如前所述,若尔盖地区硅质岩的稀土元素配分型式明显具备上述特征,与南秦岭已知热水硅岩的稀土元素配分进行比对,两者具有良好的相似性(表 2)。非热水沉积硅岩或以陆源物质为物源的沉积硅岩,其 Th 含量比 U 含量高 3~7 倍,即 $\text{U}/\text{Th}<1$;而热水沉积硅岩由于是海底热水喷流形成,其 Th 含量在通常情况小于 U 含量,即 $\text{U}/\text{Th}>1$ ^[6,7],区内硅岩、硅质岩的钍含量大致介于 $(2.3\sim 4.0)\times 10^{-6}$,铀含量介于 $(14\sim 20)\times 10^{-6}$, $\text{U}/\text{Th}\approx 5$,显示了热水沉积特征。笔者将区内硅质岩与国内外典型热水沉积硅岩的常量元素进行了对比(表 4),结果两者亦具有明显的相似性^[9]。综上所述,可以认为区内硅质岩应属热水沉积或热水与部分海水混合沉

积成因。根据热水沉积硅岩是 Cu、Ni、Mo、Co、V、U 等多金属矿产的重要赋矿岩性这一成矿标志^[6],就可以阐释区内硅质岩不仅在区域上普遍富含 Ni、Mo、Cu、V、U、Au 等多金属元素,而且多数铀矿床均不同程度伴有工业意义的 Ni、Mo、Cu 等金属矿产,这一特征也与秦岭造山带寒武系、奥陶系和志留系黑色岩系中富集形成了一批沉积-改造-叠加型和热水沉积改造型多金属矿产的研究结论相一致^[11,12]。同时也从铀成矿条件角度说明了区内热水硅岩含铀性较高、初始富集条件良好和铀成矿潜力较大的内在原因。

6.2 成矿流体来源

在含铀石英脉和方解石脉样品氢、氧同位素组成图上,有 2 件样品数据投影点落在变质水范围内(图 4),且接近岩浆水;而多数样品落在大气降水线的右侧,远离变质水和岩浆水分布区,显示为典型大气降水特征,而数据点呈水平直线排列,表明在后期成矿过程中,水岩交换逐渐加强,投影点不断向大气降水线靠近,暗示大气降水在铀成矿中的作用不断加强。根据区内各矿床所呈现的铀成矿阶段和铀矿化特征分析,认为在区内的铀成矿早期,成矿流体主要来自区域变质作用所形成的变质水,包括下志留

表 4 若尔盖矿田与国内外典型热水沉积硅岩常量元素平均含量(%)

Table 4 Average content of siliceous rocks of the typical hot water deposits in the Zoige orefield and other typical deposits both in China and abroad

地区	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O ₃	P ₂ O ₅
丹池	93.10	0.10	1.80	0.40	0.90	0.10	0.10	0.20	0.10	0.50	
古水	96.04	0.06	0.85	0.73	0.71	0.07	0.20	0.07	0.01	0.14	0.06
DSDP Leg ³²	91.92	0.07	0.82	TFe	2.15	0.45	0.43	0.29	0.52	0.37	0.16
若尔盖	89.00	0.04	0.73	0.26	0.45	0.045	0.61	3.35	0.02	0.15	0.19

注:丹池、古水、Leg32 分别为桂西北、粤北和深海钻探计划成果的典型热水沉积硅岩。

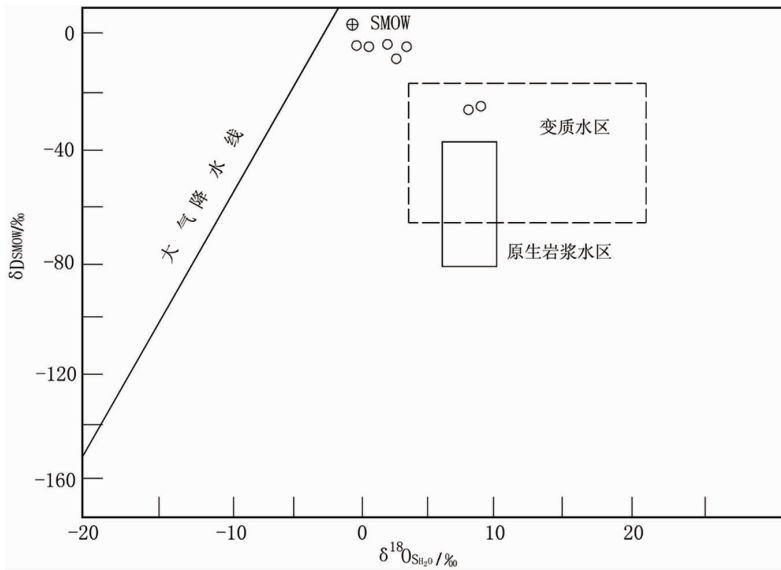


图 4 若尔盖矿田成矿流体氢氧同位素组成图

Fig.4 Hydrogen and oxygen isotope composition of ore-forming fluids in the Zoige orefield

统在成岩过程中产生的建造水,并可能有部分岩浆水的参与;而在成矿中晚期,即主要铀富集期,成矿流体转为大气降水。

6.3 成矿物质来源

多年来,一些学者认为矿田的铀源来自幔源深部,但佐证不足。运用与铀矿化密切相关的硫化物同位素组成,就可以判断出成矿物质来源^[2,4]。从硫同位素组成分布直方图(图3)可以看出:硫同位素 $\delta^{34}\text{S}$ 值表现为不集中、不连续、跨度大的特征,其分布大体由 $-42\%\sim-10\%$ 、 $+6\%\sim+13\%$ 和 $-4\%\sim+2\%$ 3个峰组成,表明区内硫同位素不是单源,而是多类硫源在矿田中的汇集,充分反映了矿田含矿物质的多源性和铀成矿条件、环境的多样性。按照 Rye^[10]、Hohmoto^[8]对不同硫源的划分原则,研究区 $\delta^{34}\text{S}$ 值介于 $-42\%\sim-10\%$ 的矿石中的硫可以认为来源于围岩沉积条件下有机(生物)还原成因硫(占样品总数的72%); $\delta^{34}\text{S}$ 值介于 $+7\%\sim+14\%$ 样品中的硫,则应来源于围岩无机还原成因硫化物或更老(改造前)的矿床;仅有6件样品的 $\delta^{34}\text{S}$ 值介于 $-5\%\sim+2\%$,其平均值接近于 $\delta^{34}\text{S}\approx 0$,其硫源可能是来自深部的幔源物质,这可能反映了区内多次岩浆活动对局部铀矿化也产生了一些影响。按照这一推论,可以认为矿田成矿物质的主体源于围岩和改造前的铀富集体,少量成矿物质来自幔源或与幔源物质有关的流体。

野外实地观察表明,区内铀矿体边界与围岩无

明显界线,矿石与围岩化学组分一致(表1),这充分说明矿石与赋矿围岩的同一性。从图3还可看出矿石与围岩 $\delta^{34}\text{S}$ 值的分布区间极为一致,这也暗示了两者成矿物质存在继承关系。区内还有一类以地下水和岩溶作用为主因形成的岩溶堆积型铀矿,其 $\delta^{34}\text{S}$ 值为 -24.00% ,这与区内多数矿床硫化物的平均 28.36% $\delta^{34}\text{S}$ 值相近,这从另一方面佐证了区内具有 $\delta^{34}\text{S}$ 为较大负值特征的矿床其成矿物质应与围岩和壳源物质密切相关。

6.4 成矿机理与成矿条件

志留纪早期,本区所处的秦岭裂陷槽进一步扩张,在不均衡拉张力的作用下,构成了近东西向的弧后盆地,沉积了一套具有热水沉积属性的富铀硅质岩沉积建造和局部初始铀矿化。华力西—印支构造运动使区内地层经历了普遍的区域变质和动力变质,富铀岩系在深埋成岩阶段的建造水(可能含部分岩浆水)对岩系中的可溶性含矿物质进行浸取溶蚀、迁移、重新沉淀,局部地段形成富集铀矿化。三叠纪末本区受到印支变质造山运动影响,造成区内地层强烈褶皱抬升,使得富铀层(体)和深部地层暴露,浅部开放,温压骤变,深部含矿溶液上升并进行选择性沉淀;而地表和浅部氧化带中的铀以铀酰络离子的形式为大气降水和地表水所淋解,沿陡倾角构造向深部迁移,并被陆续吸附、沉淀,使铀富集体更加富集,最终形成工业矿石(体)。这种以化学风化作用或

淋积作用为主导的营造力延续至中新世,根据矿石 U-Pb 年龄测定,该区的铀成矿富集期主要为 80 Ma(晚白垩世)、54 Ma(始新世)、23 Ma(渐新世)和 14 Ma(中新世)等 4 组。而区内岩浆岩活动始于加里东期((399.5±13)Ma)的辉绿岩侵入^[1],止于燕山晚期(127 Ma)的次英安岩脉。它们与铀矿化不仅在空间上相距甚远,而且主要铀矿富集期与各期次岩浆活动也存在较大时差,因此,可以认为区内铀矿化与岩浆活动无明显直接时空联系证据^[10]。

研究表明若尔盖铀矿田各矿床的成矿环境虽然不尽相同,但均具备下述有利条件:

(1)铀源丰富。区内铀矿床多产于白依背斜北翼下志留统规模巨大的硅灰岩透镜体中,铀丰度普遍较高,一般为(15~20)×10⁻⁶。深部常见厚达数十米、铀含量达(100~250)×10⁻⁶的硅灰岩层。经测试铀浸出率可达 26.9%~51.9%。由于硅-灰岩透镜体规模较大,所提供的含矿物质充沛。

(2)容矿围岩断裂构造发育。受区域性北西西向构造活动影响,硅灰岩透镜体内部不同岩性间形成大量层间走向断裂,大致平行展布、波状延伸、长度数百米至数千米,表现为岩石破碎、孔隙度增大,开启性明显、倾角陡斜、透水性强,成为含矿溶液的渗滤迁移通道,也为工业矿体的形成提供了足够空间。

(3)具有良好的成矿地球化学环境。侏罗-白垩纪干热的古气候为铀的后生富集提供了强烈氧化和含矿溶液浓集的外部条件,而下志留统含矿硅灰岩以独特的透镜体形态和良好的隔-透水性能,构成一个独立的、屏蔽性能良好的、具有完整补给和排泄条件的水文-地球化学系统。方解石和石英的均一法测温结果为 130~208℃,反映了区内成矿温度大体为中低温热液环境。钻孔测温结果表明,地温梯度可达 6~7℃/100 m,比正常地温梯度高出一倍,并有多处温泉出露,据此推断深部地热可能是成矿溶液增温和提高含矿物质萃取率的重要因素之一。在环境压力、温度、pH 值、ΔEh 值以及溶液流速、流向变异地段,铀从溶液中析出,水-岩体系达到新的平衡。

(4)充分的吸附剂和还原剂为铀的改造富集提供了物理-化学物质基础。区内所有矿床的矿石中普遍含有机炭,板岩型矿石含炭量为 3.82%~16.75%,平均值 10.47%;灰岩型矿石平均含炭量为 2.08%;硅岩型矿石平均含炭量为 1.11%^[1]。同时,各类矿石中还有含量不等的粘土矿物(高岭石)、胶状

表 5 含铀矿物中分散吸附状铀量测试结果
Table 5 Uranium content of dispersed adsorbed materials in uranium-bearing minerals

吸附剂	U/10 ⁶
凝胶状有机质	7280
胶状褐铁矿	1600
微石英炭质集合体	1270
水铝英石	1430
闪锌矿	27100
泥炭质	2160
黄铁矿	24100
铝水方解石	8150
褐铁矿	1570
石膏	270
菱铁矿	1010
多水高岭石	950

注:资料引自“若尔盖内部研究报告”。

褐铁矿、闪锌矿、黄铁矿、水铝英石及泥铁质,这些物质具有较强的吸附能力(静电吸附和分子引力吸附等)(表 5),从而将溶液中的铀酰络离子 UO_2OH^{+2} 和 $[UO_2(CO_3)_2 \cdot H_2O]^{-2}$ 吸附在其表面及裂隙中,形成以分散吸附状的铀^[9],其含量约占矿石中铀量的 60%~80%。

含铀地下水在岩层深部运移并被大量各种吸附剂吸附的同时还可以产生铀的还原反应,溶液中的氧被耗尽后,围岩中黄铁矿在酸性环境产生 Fe^{2+} 和 S^{2-} ,将六价铀还原为四价铀,生成沥青铀矿^[9]。

根据以上分析,可以认为本区铀矿化是在早期初始富集的基础上,以大气降水源的地下循环热水在合适的地质-水文和物理-化学环境下,对围岩和初始矿体改造后所形成的。笔者认为将其厘定为热液改造型或沉积-热液改造型铀矿更符合该区铀矿生成的动态演化状况。

6.5 资源潜力分析

综上所述,区内产铀硅灰岩透镜体数量多、铀源丰富、构造发育、有利成矿层位和区段分布广泛,岩性组合有利、铀的还原剂和吸附剂充足,加之区域上存在多期岩浆岩活动及良好而多样的铀成矿物理-化学环境,使得这些硅灰岩透镜体形成铀矿的可能性增加,特别是在勘查程度低、至今尚未发现矿床的透镜体及有利地段探获更多铀矿床成为可能。目前已探获的铀矿床群,仅分布于 6 个硅灰岩透镜体中,

尚有十余个硅灰岩透镜体有待进一步勘查,可以预期今后随着铀矿勘查工作的不断深入,新的铀矿成果将会被陆续扩大。

(1)区内铀矿富集的长期性和成矿的多期性为不同地段、不同地球化学环境、不同岩性-构造带提供了多次成矿和叠加富集机遇,从而提高了区内形成矿床的可能性和富集程度;近期补充勘查和新区探查工作均取得了突破性进展,已证实矿化延深可达 800 m 以深,矿体不仅富厚且铀镭平衡系数仅为 ± 0.8 ,表明铀元素在深部含矿构造和有利岩性组合中仍存在新的铀的迁移富集和成矿的明显迹象。特别是深部工程证实:深部铀矿化远比地表和浅部更富、更厚、盲矿体更多,可以推断:矿田在面上和深部的发展前景,比预想的要好。

(2)经过 20 余年的铀资源勘查和科研工作,取得了多学科的重大认识和研究成果,不仅将该矿田资源/储量提到了大型铀资源勘查基地的规模,而且在此基础上不同科研单位开展的铀资源总量预测的结论均认为:目前区内已探获各类资源/储量总量不足预测值的 1/2,从而说明该区铀资源潜力仍有很大的扩展余地,找矿空间还非常之大。

已有资料表明,区内多数已知矿床的勘探工作尚不够完整、系统,特别是一些富厚矿体未能探底封边,致使矿床深部和外围均未查清。近几年对其中一个矿床进行了深部探查,结果将前人工程控制的主矿体的深度向下延伸了约 400 m,矿化仍具有明显向下延伸趋势,使原资源量扩大了将近一倍,矿床规模由中型提升为近于大型。区内类似这种控制不完整的矿床还有多个,这就为矿田资源前景的扩大增添了更多有利因素。此外,区内尚产有近 20 处成矿条件良好的矿(化)点和成矿有利区段,由于历史原因,地质勘查作业亦不充分,这就给今后铀资源的生长提供了更大空间;同时,区内还有为数众多的矿致物-化探异常和 200 余处放射性水化异常,有待进一步查证。上述有利因素都可能成为今后扩大矿田铀资源前景的重要依据和途径。需要指出的是:区内数十年的铀矿勘查工作和勘获资源/储量全部集中在白依背斜北翼,其南翼以及矿田西南部的侏罗-白垩系火山岩至今尚未系统开展勘查工作。随着对区域铀成矿条件认识的不断深化和勘查工作的推进,若尔盖铀矿田的资源规模必将得到极大的提升。

7 结 论

(1) 矿床(体)赋存于具有热水成因的下志留

统硅灰岩透镜体中,严格受地层、岩性、构造和地球化学环境控制。铀矿化总体分为两期:加里东晚期—印支早期的初始铀沉积(变质富集期)和燕山早期—喜山期的改造富集期。成矿早期包裹体氢、氧同位素组成特征表明早期成矿流体源自变质水和部分岩浆混合水,成矿温度 290~320℃;成矿晚期(改造富集期)的成矿流体主要为大气降水,成矿温度 130~208℃,属于中低温热液铀矿化。

(2) 矿石黄铁矿硫同位素 $\delta^{34}\text{S}$ 值分布特征显示后期改造的含矿物质主要来自围岩和初始铀富集体;样品测试结果表明,矿石与围岩化学组分相同,两者无明显界线,仅存在成矿元素含量的差别,可以认为硅灰岩透镜体既是充实的铀源体又是良好的储矿层。尽管区内各类岩浆侵入时代与铀矿化的主要成矿富集期相差甚远,但仍不能排除有部分与深部壳幔相联系的含矿物质介入铀成矿过程。

(3) 矿田范围广,产铀硅灰岩透镜体数量多,铀源丰富,铀成矿条件有利,铀矿体向深部具明显增厚变富趋势,已证实最大矿体垂幅可达 800 m 以深,因而矿田的资源潜力主要在深部。尽管若尔盖铀矿田资源/储量已达大型铀资源基地标准,但其资源前景远未查明。今后勘查部署的重点应放在已知矿床、矿点的外围和深部以及有利地段和新区的系统勘查上,应按照“统一规划、整装勘查”的原则,有序开展,以期进一步扩大矿田规模。

致谢: 本文编写过程中,得到四川省核工业地质调查院若尔盖项目组各位专家的帮助并提供了大量综合资料,特别是提供了原四川省地矿局 405 队的大量数据,同时,杨利容博士也给予了大力协助,在此一并表示感谢。

参考文献(References):

- [1] 四川省地矿局川西北地质大队. 1:50000 区域地质调查报告,贡巴、降扎等八幅[R]. 1992:21-45.
North and Western Geological Party, Sichuan Bureau of Exploration Geological and Exploration Mineral Resources. 1:50000 Regional Geological Survey Report, Gongba, Jiangza etc. 1992: 21-45(in Chinese).
- [2] 曾志刚, 蒋富清, 秦蕴珊, 等. 现代海底热液沉积物的硫同位素组成及其地质意义[J]. 海洋学报, 2001(3):51-53.
Zeng Zhigang, Jiang Fuqing, Qin Yunshan, et al. Sulfur isotopic composition of modern seafloor hydrothermal sediment and its geological significance[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2001(3):51-53 (in Chinese with English abstract).

- [3] 薛春纪, 马国良, 隗合明, 等. 南秦岭主要类型热水沉积岩的 REE 地球化学[J]. 西安:西安地质学院学报, 1996(3):21-28.
Xue Chunji, Ma Guoliang, Wei Heming, et al. REE geochemistry of main types of hydrothermal sedimentary rocks in south Qinling [J]. Journal of Xi'an College of Geology, 1996 (3):21-28 (in Chinese with English abstract).
- [4] 徐勇航, 赵太平, 胡俊良, 等. 华北陆块南部古元古代熊耳群硅质岩地球化学特征及其沉积环境[J]. 沉积学报, 2008, (4):602-608.
Xu Yonghang, Zhao Taiping, Hu Junliang, et al. Geochemical characteristics and sedimentary environments of cherts from the Paleoproterozoic Xiong'er Group in the southern part of the North China Block [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2008,(4):602-608 (in Chinese with English abstract).
- [5] 冯胜斌, 周洪瑞, 燕长海, 等. 东秦岭二郎坪群硅质岩热水沉积地球化学特征及其地质意义[J]. 沉积学报, 2007, 25, (4):564-570.
Feng Shengbin, Zhou Hongrui, Yan Changhai, et al. Geochemical characteristics of hydrothermal cherts of Erlangping Group in East Qinling and their geologic significance [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2007, 25, (4):564-570 (in Chinese with English abstract).
- [6] 周永章, 涂光炽, Edward H, 等. 粤西古水剖面震旦系顶部层状硅岩的热水成因属性: 岩石学和地球化学证据[J]. 沉积学报, 1994, 12(3):4-9.
Zhou Yongzhang, Tu Guangzhi, Edward H, et al. Hydrothermal origin of top Sinian chert formation at Gusui, Western Guangdong, China: Petrologic and geochemical evidence. [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 1994, 12(3):4-9 (in Chinese with English abstract).
- [7] 丁振举, 刘丛强, 姚书振, 等. 海底热液沉积物稀土元素组成及其意义 [J]. 地质科技情报, 2000, (1):28-29.
Ding Zhenju, Liu Congqiang, Yao Shuzhen, et al. REE composition and implication of hydrothermal sedimentation of sea-floor [J]. Geological Science and Technology Information, 2000, (1):28-29 (in Chinese with English abstract).
- [8] Rye R O, OHMOTO H. Sulfur and carbon isotopes and ore genesis: A review [J]. Econ. Geol. 1974, 69:826-842.
- [9] 史维浚. 铀水文地球化学原理 [M]. 北京: 原子能出版社, 1990: 52-65.
Shi Weijun. Uranous Hydrogeochemistry Principle [M]. Beijing: Atomic Energy Press, 1990:52-65 (in Chinese with English abstract).
- [10] 曾庆丰. 论热液成矿条件 [M]. 北京: 科学出版社, 1986:22-30.
Zeng Qingfeng. Conditions for Hydrothermal Mineralization [M]. Beijing: Science Press, 1986:22-30 (in Chinese with English abstract).
- [11] 唐永忠, 齐文, 刘淑文, 等. 南秦岭古生代热水沉积盆地与热水沉积成矿 [J]. 中国地质, 2007, 34(6):1091-1094.
Tang Yongzhong, Qi Wen, Liu Shuwen, et al. Paleozoic hydrothermal sedimentary basin and hydrothermal sedimentary mineralization in the southern Qinling [J]. Geology in China, 2007, 34(6):1091-1094 (in Chinese with English abstract).
- [12] 张复新, 王立社, 侯俊富, 等. 南秦岭造山带黑色岩系小金属矿床类型及成矿系列 [J]. 中国地质, 2009, 36(3):694-697.
Zhang Fuxin, Wang Lishu, Hou Junfu, et al. Black rock series, types of ore deposits and ore-forming systems in Qinling orogenic belt [J]. Geology in China, 2009, 36 (3):694-697 (in Chinese with English abstract).

An analysis of metallogenic conditions and resource of the Zoige uranium deposit

JIN You-zhong TIAN Wen-hao

(Sichuan Bureau of Nuclear Geology, Chengdu 610021, Sichuan, China)

Abstract: The Zoige uranium deposit is located in the west sector of southern Qinling ore belt. The ore deposit occurs in a set of epimetamorphic siliceous limestones in Lower Silurian Yangchanggou Formation (S1y), Ta'er Formation (S1t) and Laqlong Formation (S1l), and the ore deposit is strictly controlled by lithologic character, structure, deep hot water and geochemical environment. On the basis of previous research results, the authors studied characteristics of major elements, trace elements, rare-earth elements, sulfur isotope and hydrogen, oxygen, carbon isotopes of siliceous limestone in the ore field, and reached the conclusion that siliceous rock closely related to uranium mineralization was formed in a hot water sedimentation environment, extensive ore-forming source was formed during early sedimentation and metamorphism, and the low temperature mineralization fluid was a very important factor for uranium concentration and mineralization extension towards the depth. U-Pb isotopic ages demonstrate that this area has over ten uranium metallogenic periods, thus increasing the field uranium mineralization probability in the ore district. It is held that the uranium resources are so rich that there exists a good developmental prospect in this area.

Key words: Zoige; uranium deposit; metallogenic geological condition; resources potential

About the first author: JIN You-zhang, male, born in 1953, senior engineer, engages in geological technology and management of uranium deposit geology; E-mail: jfy156@163.com.