

文章编号: 0258-7106(2008)01-0088-13

# 铅同位素在矿产资源评价中的应用\*

## ——以甘肃省鹰嘴山金矿区为例

崔学军<sup>1</sup> 李中兰<sup>1,2,3</sup> 朱炳泉<sup>2</sup> 姜晓玮<sup>1</sup> 王冉<sup>2</sup> 徐力峰<sup>2,3</sup>

(1 深圳中广核工程设计有限公司, 广东 深圳 518029; 2 中国科学院广州地球化学研究所, 广东 广州 510640;  
3 中国科学院研究生院, 北京 100049)

**摘要** 文章在铅同位素示踪的有关理论和隐伏矿预测方法的基础上,以甘肃省鹰嘴山金矿区为例,提出了利用铅同位素进行隐伏矿深度、形态与资源量预测的方法。在鹰嘴山金矿区共采样122个,分析结果显示:①地表铅同位素勘探线剖面的 $V_1$ 与 $V_2$ 值在矿体及其相邻蚀变带均出现了明显的负异常,并接近区域地壳平均值,且显示出一个明显的变化规律,即自东至西,矿体的 $V_1$ 与 $V_2$ 值存在着从高到低的规律变化。② $V_2$ 平均值从122线的43.57(蚀变带上)到46线下降至35.67,标志着矿体的揭示深度从东到西存在着由浅至深的变化规律。从116线到90线,矿体 $V_2$ 平均值从40呈线性下降至36.62,表明116线以东进入隐伏区,90~116线达到矿体出露的中上部,而80线以西出露的矿脉已代表了矿体的下部,并趋向于尾部。③从46线向东到116线,地表可见矿体向下的延深变大,从200 m增大到1 049 m,说明矿体整体西高东低,向东侧伏(隐伏)。④矿区总平均隐伏系数 $R_S$ 为3.68,46线至116线,矿体的预测资源量为42.5 t,表明鹰嘴山金矿床应为大型-特大型金矿床。

**关键词** 地球化学; 铅同位素示踪; 隐伏矿定量预测; 鹰嘴山金矿; 甘肃

中图分类号: P618.51; P597

文献标识码: A

## Application of Pb isotopes to evaluation of mineral resources: A case study of Yingzuishan gold deposit, Gansu Province

CUI XueJun<sup>1</sup>, LI ZhongLan<sup>1,2,3</sup>, ZHU BingQuan<sup>2</sup>, JIANG XiaoWei<sup>1</sup>, WANG Ran<sup>2</sup> and XU LiFeng<sup>2,3</sup>

(1 China Nuclear Power Design Company Ltd., Shenzhen 518029, Guangdong, China; 2 Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, Guangdong, China; 3 Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

### Abstract

A new method is proposed to predicate the depths, shapes and mineral resources of blind ore deposits based on previous studies of the Pb isotopes tracing and a case study of the Yingzuishan gold deposit in Gansu Province. According to the requirements for prognosis of blind deposits by using Pb isotopes and detailed field geological work on the ground surface, the authors collected representative samples in the peripheral areas of the Yingzuishan gold deposit so as to determine regional background values of Pb isotopes and construct the target indices for ore exploration in these peripheral areas. Meanwhile, based on the requirements for establishment of a profile for chemical prospecting in the ore district by using Pb isotopes, the authors collected representative samples of both rocks and ores for prediction of the depths and reserves of blind ores in this deposit. The major

\* 本文得到中国地质大学地质过程与矿产资源国家重点实验室项目(课题编号:GPMR200607)、甘肃省科技厅科技攻关项目(2GS052-A52-003-11)和甘肃省地质矿产勘查开发局项目(GSDKJ-001-05-02)的联合资助

第一作者简介 崔学军,男,1966年生,博士,高级工程师,主要从事构造地质学与地球化学找矿研究工作。E-mail: xjcuigig@163.com

收稿日期: 2006-10-31; 改回日期: 2007-10-08。许德焕编辑。

conclusions and working progresses are summarized as follows:

(1) Distinct negative anomalies of both  $V_1$  and  $V_2$  values for the Pb isotope-based chemical prospecting profile at the ground surface were found in both the ore district and its adjacent alteration zones, and the anomaly values are close to the average levels of the earth's crust in the study area. From the 7 profiles for chemical prospecting in the ore district, the  $V_1$  and  $V_2$  values for the ore deposits show regular decrease from the east to the west.

(2)  $V_2$  average values decrease from 43.57 at line 122 (above the alteration zone) to 35.67 at line 46, which suggests that the revelation depth of the ore deposit increases regularly from the east to the west. The  $V_2$  average values for the ore deposit decrease linearly from 40 at line 116 to 36.62 at line 90, demonstrating that the area to the east of line 116 is the target area for blind ores, the area between lines 90~116 is the middle to upper part of the ore deposit, while the area to the west of line 80 represents the lower part, which is close to the bottom of the ore deposit.

(3) From line 46 extending eastward to line 116, the ore bodies exposed at the ground surface show a increasing trend in the extension depth, i. e., from 200 m to 1 049 m. This indicates that the depth of the entire ore body is lower in the east than in the west, symbolizing its eastward inclining trend (in a hidden way).

(4)  $R_S$ , the average hidden coefficient, of the ore district averages 3.68 in general, and the predicted reserves for the ore bodies between line 46 and line 116 are 42.5 tons. Therefore, the Yingzuishan gold deposit is likely to be a large to superlarge gold deposit, implying the existence of huge mineralization potentials and the great value for further exploration and development. Drill holes arranged by Gansu Bureau of Exploration and Development of Geology and Mineral Resources all intersect economic gold ore bodies, showing that the method discussed in this paper is effective in the prognosis of blind deposits.

**Key words:** geochemistry, Pb isotopic tracing, quantificational prediction of blind deposit, Yingzuishan gold deposit, Gansu

铅同位素化探虽已有近 40 年的发展历史,但上世纪 90 年代以前,国内外主要依据于打靶法,即通过确定成矿靶标的 Pb 同位素组成范围,来进行化探找矿(Foley et al., 1994; Carr et al., 1995; Gulson et al., 1988; Harris, 1990; Sanford, 1992; 夏毓亮, 1982; 黄斌, 1989; 芮宗瑶等, 1991; 朱炳泉等, 1993; 何厚强, 1994)。由于隐伏矿深度与规模的预测对于在勘查区“攻深找盲”、现已开发矿山的可持续发展评估以及危机矿山的深部潜力评价等,具有重要意义,因而,近 10 年来一些学者提出了应用铅同位素矢量  $V$  值(由铅同位素 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 、 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 、 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  三对比值构成的三维空间综合矢量值)进行隐伏矿深度与规模预测的方法<sup>①</sup>(朱炳泉, 1998; 常向阳等, 2000; 崔学军等, 2005)。鹰嘴山金矿位于北祁连加里东褶皱带西段与阿尔金深断裂交汇部位,即“中国西北地区的金三角”区域内,成矿条件十分优越,出

露矿体形态相对简单,但经过多轮地质找矿工作,目前所发现的金矿资源量仅有 11.55 t。为了解该金矿深部的成矿前景和隐伏深度等情况,笔者应用铅同位素方法首次对该矿开展了较详细的多勘探线深部预测研究,进一步发展和完善了深部预测理论和工作方法,并为该区开展深部勘探提供了依据。

## 1 矿区与矿床地质概况

鹰嘴山金矿在大地构造位置上隶属于秦祁昆巨型造山带—北祁连加里东褶皱带最西端,呈楔形出露于敦煌地块与中祁连微板块之间,定位于阿尔金区域超壳断裂南侧的次级断裂中,距阿尔金断裂仅 5 km。该构造区带内已发现 5 个大、中、小型金矿床。鹰嘴山矿区范围内广泛发育寒武系—奥陶系以及加里东期—华力西期斜长花岗岩、辉长岩、花岗斑岩、

① 朱炳泉,常向阳. 1999. 华南—扬子边界 Pb 同位素急变带 Cu、Au 隐伏大矿同位素化探研究. “八五”国家攀登项目 B 类第 342 项专题研究报告(内部资料).

花岗闪长岩和角闪岩。寒武系从北向南分布为黑茨沟组一段、二段、三段。矿体主要产于向南倾的黑茨沟组二段内,呈 NWW 走向,延伸达 5 km 左右,矿体厚度为 0.5 m 至 20 m 不等。矿体上盘岩石主要为砂岩、板岩,下盘岩石主要为中酸性火山碎屑岩,并有辉长岩和超镁铁质岩平行矿体走向出露(图 1)。区内含矿蚀变破碎带、金矿体及断层的走向也均与地层一致。矿化岩石主要为碳酸盐化隐晶质热液硅化岩。围岩蚀变以硅化、蛇纹石化、滑石化和碳酸盐化为主。矿物组合主要为黄铁矿,含少量黄铜矿、方铅矿和毒砂。成矿具中低温成矿作用特点。

## 2 样品的采集与同位素分析

为了建立矿区所在祁连块体的地壳、地幔铅同位素演化基准值,对矿区外围跨祁连(扬子)—塔里木—华北 3 块体的加里东期—华力西期火成岩类进

行了随机取样,包括分布于祁连山北段、敦煌至照壁山和嘉峪关西北的加里东期斜长花岗岩、辉长岩和花岗斑岩,以及华力西期花岗闪长岩和角闪岩,共采得样品 13 个(表 1)。为了对鹰嘴山金矿利用铅同位素进行隐伏矿预测,在延伸达 5 km 的金矿化带的 46、90、95、100、104、110、116 和 122 勘探线上采得地表与探槽样 77 个(表 2),其海拔高度为 2 756~2 773 m。在勘探线上取样时,兼顾了距离与岩性的变化,在矿体、蚀变带以及上、下盘 10 m 以内的围岩中,每隔 5 m 左右取一个样,在外围,则控制在间隔 20~50 m 左右取一个样(岩性无变化时,控制在 50 m 左右)。为了解矿体深部铅同位素特征,在 7 个钻孔中对切过矿体的岩芯进行了取样,共采样 45 个(表 2),其海拔高度为 2 606~2 707 m。通过地表和钻孔样品来确定该矿床铅同位素在三维空间的变化,为深部预测提供基础资料。所取样品均力求新鲜,玄武岩、安山岩、页岩、板岩、泥岩类样品,单个样重控制在 200~500 g。

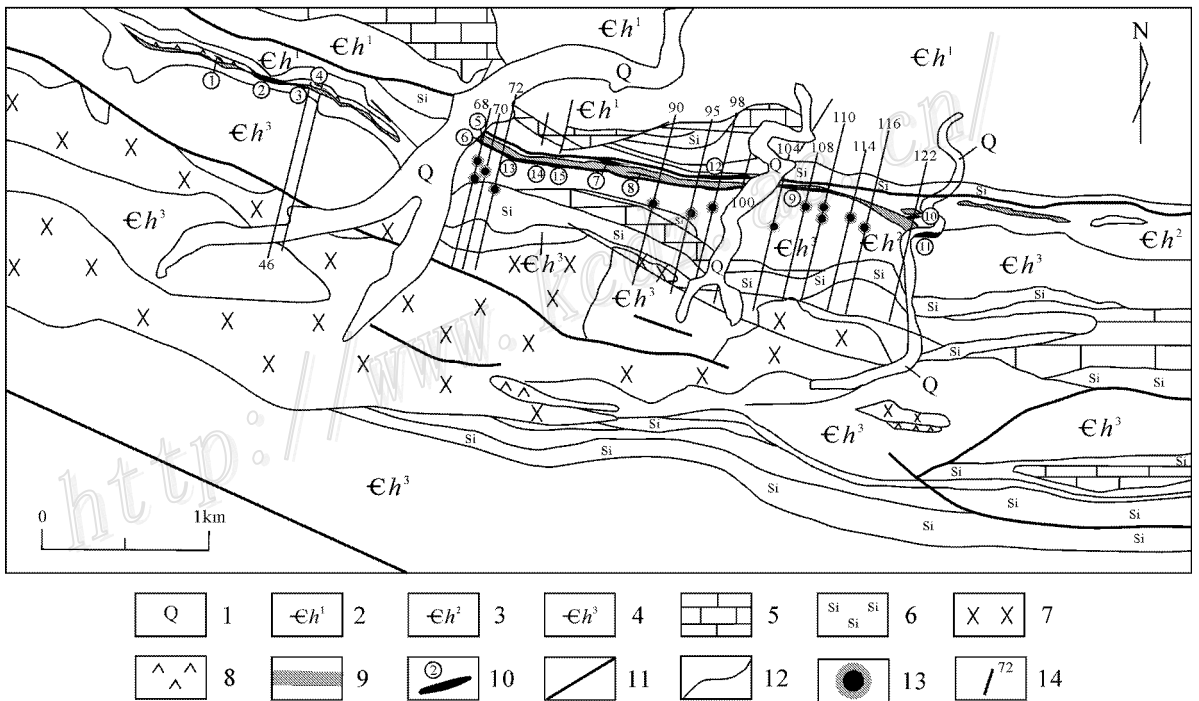


图 1 鹰嘴山矿区地质图

1—第四系 2—寒武系黑茨沟组一段 3—寒武系黑茨沟组二段 4—寒武系黑茨沟组三段 5—寒武纪灰岩 6—寒武纪硅质岩；  
7—加里东期、华力西期辉长岩 8—寒武纪超镁铁质岩 9—含矿蚀变破碎带；10—金矿体及编号；11—断层；12—地质界线；  
13—钻孔位置；14—勘探线位置及编号

Fig. 1 Geological map of Yingzuishan gold deposit

1—Quaternary; 2—1st Member of Cambrian Heicigou Formation; 3—2nd Member of Cambrian Heicigou Formation; 4—3rd Member of Cambrian Heicigou Formation; 5—Cambrian Limestone; 6—Cambrian siliceous rock; 7—Caledonian-Varisian gabbro; 8—Cambrian ultramafic rock; 9—Ore-bearing alteration fracture zone; 10—Gold ore body; 11—Fault; 12—Geological boundary; 13—Drill hole; 14—Exploration line and its serial number

表 1 鹰嘴山金矿区周边各类火成岩铅同位素组成

Table 1 Pb isotopic compositions of samples for different kinds of igneous rock in Yingzuishan gold deposit

样品号	地点	岩性	$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}_m$	$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}_i$	$^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}_m$	$^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}_i$	$^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}_m$	$^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}_i$
QW1-1	榆林坝	花岗闪长岩	18.666 ± 0.086	18.030	15.667 ± 0.080	15.632	39.082 ± 0.057	38.282
QW2-1	玉门赤峡村	花岗片麻岩	18.604 ± 0.053	17.968	15.651 ± 0.036	15.616	38.291 ± 0.028	37.491
QW2-2	赤金河刘家湾	钾长花岗岩	18.556 ± 0.098	17.920	15.725 ± 0.09	15.690	38.741 ± 0.101	37.941
QW3-1	玉门-昌马公路山口	二长花岗岩	19.106 ± 0.044	18.470	15.577 ± 0.059	15.542	38.495 ± 0.056	37.695
QW4-1	巴个峡	花岗闪长岩	19.160 ± 0.012	18.524	15.583 ± 0.019	15.548	38.352 ± 0.013	37.552
QW4-2	青石峡	斜长花岗岩	18.806 ± 0.033	18.170	15.554 ± 0.042	15.519	38.021 ± 0.050	37.221
QW4-3	鹰嘴山	辉长岩	18.711 ± 0.026	18.075	15.533 ± 0.040	15.498	37.816 ± 0.035	37.016
QW4-4	青山西	斜长花岗岩	19.548 ± 0.042	18.912	15.619 ± 0.053	15.584	38.794 ± 0.050	37.994
QW4-5	寒山	石英闪长岩	18.958 ± 0.031	18.322	15.591 ± 0.037	15.556	38.424 ± 0.03	37.624
QW5-1	去安西的公路边	角闪花岗岩	18.275 ± 0.038	17.639	15.543 ± 0.032	15.508	38.569 ± 0.038	37.769
QW5-2	安西农场南	二长花岗岩	19.196 ± 0.039	18.560	15.561 ± 0.053	15.526	38.197 ± 0.061	37.397
QW6-1	白墩子南	斜长花岗岩	18.429 ± 0.047	17.793	15.511 ± 0.042	15.476	38.020 ± 0.038	37.220
QW6-2	兰新公路柳圆山口	玄武岩	18.191 ± 0.048	17.879	15.465 ± 0.046	15.449	38.633 ± 0.041	38.236

Pb 同位素下标 m 为测量值 i 为初始值。

矿区外围岩石样品的铅同位素分析在中国科学院广州地球化学研究所同位素地质年代学与地球化学重点实验室完成。其铅同位素标样 SRM-981 的分析值为  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 16.934 \pm 0.007$ 、 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 15.486 \pm 0.012$ 、 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 36.673 \pm 0.033$ ，与国际公布值 [分别为 16.9322、15.4855、36.6856 (Todt et al., 1993)] 十分接近，因此无需作标样修正。矿区样品的铅同位素分析在北京核工业地质研究所 ISOPROBE-T 固体质谱仪上完成， $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 、 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  及  $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  的测量精度优于 0.09% ( $2\sigma$ )。其标样 SRM-981 的多次测量平均值为  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 16.901 \pm 0.010$ 、 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 15.445 \pm 0.007$ 、 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 36.553 \pm 0.027$ ，比国际上公布的双稀释测定值相对偏低 0.2%~0.3%。由于不同实验室对数据校正方法无统一认识，因此，对测量值目前未用标样校正。样品的 Pb 同位素比值及计算所得之  $V_1$  和  $V_2$  值列于表 2。

### 3 铅同位素值及化探靶标的确定

由矿区及其周边火成岩和矿体的铅同位素组成 (表 1、2) 可见，鹰嘴山矿区属于扬子铅同位素地球化学省的祁连块体，扬子省的  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  为 17.7~18.4， $V_2$  值为 14~40， $V_1$  值为 10~53 (朱炳泉，2001)。根据本文数据以及前人所获祁连块体上代表壳幔背景的一些铅同位素数据 (侯青叶等，2005a；2005b；陈源，1994；王兴安，1999；周涛发等，1999；周廷贵等，2000；江思宏等，2002；2006；王焰等，2001；

刘堆富等，2002；聂凤军等，2003；2004；宋忠宝等，2003；李厚民等，2003；任康绪等，2005；安国堡，2006；鄯介人等，2001)，以壳源岩同位素初始值作为地壳值，以幔源岩石 (矿石) 同位素初始值 (矿石同位素组成直接代表了初始值) 作为该地区地幔值，并考虑到由于初始值修正存在的不确定因素 (年龄和岩石  $\mu$  值及 Th/U 比的不确定性，年龄根据发表的资料或地质上确定的时代，壳源岩  $\mu = 9$ ，Th/U = 4.04，幔源岩  $\mu = 7.9$ ，Th/U = 3.8) 以及参考其他壳幔混合的岩石，该地区地壳与地幔的  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 、 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 、 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  可分别制约在 17.8~18.2、15.55~15.65、37.7~37.9，以及 17.65~17.8、15.46~15.54、37.2~37.7，相应的地壳  $V_1$  值为 19.48~31.8 (平均为 25.69)， $V_2$  值为 29.13~43.74 (平均为 36.44) 相应的地幔  $V_1$  值为 2.4~19.48 (平均为 10.94)， $V_2$  值为 22.9~28.9 (平均为 25.9)，明显有别于华北、塔里木及华南省。与扬子省的东部地区相比，祁连块体具有明显的贫钍-铅特征 ( $V_2 > V_1$ )，可与古亚洲域相比较，而不同于古特提斯域 (朱炳泉，2001)。在阿尔金断裂以及到安西的东巴山、三危山一带也表现出祁连块体的铅同位素特征，因此，阿尔金断裂不能作为塔里木与扬子的边界。鹰嘴山矿区以东至照壁山、金佛寺一带仍然具有祁连块体的铅同位素特征，因此，成矿区岩石不会受到华北、塔里木省地幔源与地壳源的影响。

根据祁连块体地壳、地幔的  $V_1$  和  $V_2$  平均值，并考虑到该矿区安山质岩石的下限值，以及由北京核工业地质研究所测定的该矿区样品的铅同位素比

表2 鹰嘴山金矿区各勘探线矿石与岩石铅同位素组成及  $V_1$ 、 $V_2$  值Table 2 Pb isotopic compositions and  $V_1$  and  $V_2$  values of samples for ores and rocks from various exploration lines in Yingzuishan gold deposit

样品编号	岩性	$^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$V_1$	$V_2$
QY46-B-1	粉砂质板岩	38.717 ± 0.005	15.515 ± 0.002	18.824 ± 0.002	67.31	61.96
QY46-B-2	粉砂质板岩	39.287 ± 0.010	15.565 ± 0.004	18.817 ± 0.005	80.79	56.46
QY46-B-3	蚀变砂板岩	37.775 ± 0.002	15.527 ± 0.001	18.104 ± 0.001	26.46	37.68
QY46-B-4	蚀变凝灰岩	37.722 ± 0.002	15.528 ± 0.001	18.050 ± 0.001	23.82	35.67
QY46-B-5	矿体(20)	37.736 ± 0.006	15.520 ± 0.003	18.057 ± 0.003	24.33	35.67
QY46-B-6	蚀变破碎带	37.942 ± 0.005	15.535 ± 0.002	18.189 ± 0.002	32.62	40.14
QY46-B-7	蛇纹岩	38.298 ± 0.054	15.684 ± 0.022	18.346 ± 0.026	45.13	47.20
QY46-B-8	蛇纹岩	37.943 ± 0.014	15.546 ± 0.006	18.144 ± 0.007	31.50	38.20
QY46-B-9	凝灰熔岩	37.904 ± 0.004	15.526 ± 0.002	18.261 ± 0.002	43.69	39.17
QY46-B-10	凝灰熔岩	38.328 ± 0.013	15.550 ± 0.005	18.546 ± 0.006	50.93	53.55
QY90-B-1	灰岩	38.582 ± 0.010	15.869 ± 0.004	23.131 ± 0.006	56.87	62.26
QY90-B-2	灰岩	38.862 ± 0.043	16.027 ± 0.018	24.536 ± 0.027	56.87	62.26
QY90-B-3	含碳硅质岩	37.841 ± 0.004	15.716 ± 0.002	21.375 ± 0.002	56.87	62.26
QY90-B-4	含碳硅质岩	37.816 ± 0.004	15.713 ± 0.001	21.364 ± 0.002	56.87	62.26
QY90-B-5	结晶灰岩	38.215 ± 0.007	15.913 ± 0.003	24.378 ± 0.005	56.87	62.26
QY90-B-6	结晶灰岩	38.217 ± 0.008	17.895 ± 0.003	57.396 ± 0.009	56.87	62.26
QY90-B-7	屑砂岩	38.579 ± 0.003	15.582 ± 0.001	19.024 ± 0.001	73.40	72.71
QY90-B-8	砂质板岩	38.508 ± 0.002	15.585 ± 0.001	18.658 ± 0.001	58.09	57.79
QY90-B-9	矿体	37.756 ± 0.001	15.529 ± 0.000	18.077 ± 0.000	25.32	36.62
QY90-B-10	泥质角砾岩	38.731 ± 0.003	15.616 ± 0.001	19.201 ± 0.002	77.22	82.38
QY90-B-11	砂质板岩	39.020 ± 0.003	15.585 ± 0.001	18.949 ± 0.002	77.75	66.26
QY90-B-12	砂岩	39.238 ± 0.027	15.510 ± 0.010	19.276 ± 0.014	91.27	78.03
QY90-B-13	硅质岩	38.530 ± 0.002	15.575 ± 0.001	18.585 ± 0.001	56.76	53.78
QY90-B-14	变安山岩	39.115 ± 0.002	15.599 ± 0.001	19.174 ± 0.001	85.74	76.45
QY90-B-15	硅质板岩	38.697 ± 0.002	15.583 ± 0.001	18.428 ± 0.001	56.77	44.5
QY90-B-16	硅质岩	38.226 ± 0.004	15.553 ± 0.002	18.235 ± 0.002	40.59	39.65
H钻-9011	砂质板岩	37.874 ± 0.003	15.549 ± 0.001	18.175 ± 0.001	30.63	40.53
H钻-9012	砂质板岩	37.821 ± 0.002	15.539 ± 0.001	18.118 ± 0.001	27.92	38.12
H钻-9013	矿化带	7.747 ± 0.001	15.526 ± 0.001	18.082 ± 0.001	25.23	36.90
H钻-9014	泥质角砾岩	38.053 ± 0.003	15.544 ± 0.001	18.284 ± 0.002	37.69	43.73
H钻-9015	泥质角砾岩	38.012 ± 0.002	15.541 ± 0.001	18.259 ± 0.001	36.07	42.90
QY95-B-1	砂质板岩	39.166 ± 0.001	15.617 ± 0.000	19.069 ± 0.001	84.29	71.20
QY95-B-2	矿体	37.986 ± 0.002	15.530 ± 0.001	18.163 ± 0.001	33.01	38.24
QY95-B-3	矿体	37.738 ± 0.002	15.523 ± 0.001	18.080 ± 0.001	24.96	36.83
QY95-B-4	角砾岩	38.242 ± 0.001	15.571 ± 0.000	18.318 ± 0.000	43.08	43.91
QY95-B-5	凝灰熔岩	38.393 ± 0.001	15.550 ± 0.000	18.368 ± 0.001	47.97	44.19
VK1001H570	角砾岩	38.538 ± 0.002	15.625 ± 0.001	18.491 ± 0.001	54.57	50.26
VK1001H575	矿体	37.759 ± 0.002	15.531 ± 0.001	18.081 ± 0.001	25.49	36.83
VK1001H580	矿体	37.749 ± 0.002	15.528 ± 0.001	18.081 ± 0.001	25.25	36.87
VK1001H585	角砾岩	37.767 ± 0.001	15.531 ± 0.001	18.089 ± 0.001	25.89	37.13
VK1001H588	矿体	37.825 ± 0.005	15.546 ± 0.001	18.118 ± 0.001	28.01	38.24
VK1001H593	矿体	37.729 ± 0.001	15.522 ± 0.001	18.075 ± 0.001	24.62	36.67
VK1001H600	角砾岩	37.792 ± 0.002	15.541 ± 0.001	18.096 ± 0.001	26.66	37.42
VH10055	矿体	37.767 ± 0.002	15.533 ± 0.001	18.088 ± 0.001	25.86	37.13
V <sub>1</sub> 00510	矿体	37.774 ± 0.001	15.535 ± 0.000	18.041 ± 0.001	24.83	34.81
V <sub>1</sub> 00515	矿体	37.869 ± 0.004	15.564 ± 0.001	18.108 ± 0.001	28.82	37.67
V <sub>1</sub> 00520	矿体	37.770 ± 0.001	15.532 ± 0.000	18.089 ± 0.001	25.96	37.12
V <sub>1</sub> 00525	矿体	37.899 ± 0.002	15.574 ± 0.001	18.114 ± 0.001	29.68	37.86
V <sub>1</sub> 00530	矿体	37.752 ± 0.001	15.522 ± 0.000	18.088 ± 0.001	25.5	37.04
V <sub>1</sub> 00540	矿化带	37.827 ± 0.004	15.529 ± 0.001	18.146 ± 0.002	28.77	39.19
V <sub>1</sub> 00542	角砾岩	37.879 ± 0.002	15.543 ± 0.001	18.169 ± 0.001	30.6	40.05
QY100-B-1	硅质岩	38.859 ± 0.001	15.609 ± 0.001	18.829 ± 0.001	70.84	62.76
QY100-B-2	砂质板岩	39.145 ± 0.002	15.622 ± 0.001	18.992 ± 0.001	81.83	67.81
QY100-B-3	砂质板岩	39.125 ± 0.002	15.645 ± 0.001	18.964 ± 0.001	80.64	67.19
QY100-B-4	砂质板岩	39.011 ± 0.002	15.623 ± 0.001	18.982 ± 0.001	78.37	68.82
QY100-B-5	砂质板岩	38.848 ± 0.002	15.611 ± 0.001	18.774 ± 0.001	69.18	60.25
QY100-B-6	凝灰熔岩	39.112 ± 0.002	15.651 ± 0.001	18.924 ± 0.001	79.31	65.53
QY100-B-7	凝灰熔岩	38.851 ± 0.003	15.626 ± 0.001	18.710 ± 0.001	67.63	57.45

续表 2-1  
Continued Table 2-1

样品编号	岩性	$^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$V_1$	$V_2$
QY100-B-8	砂质板岩	38.536 ± 0.002	15.608 ± 0.001	18.537 ± 0.001	55.69	52.13
QY100-B-9	砂质板岩	38.720 ± 0.003	15.610 ± 0.001	18.682 ± 0.002	63.78	57.18
QY100-B-10	矿体	37.752 ± 0.001	15.528 ± 0.001	18.088 ± 0.001	25.5	37.18
QY100-B-11	矿体	37.724 ± 0.001	15.517 ± 0.000	18.077 ± 0.000	24.55	36.71
QY100-B-12	硅质岩	37.769 ± 0.002	15.533 ± 0.001	18.085 ± 0.001	25.83	36.96
QY100-B-13	矿体	37.790 ± 0.002	15.540 ± 0.001	18.096 ± 0.001	26.61	37.42
QY100-B-14	矿体	38.045 ± 0.006	15.624 ± 0.002	18.148 ± 0.002	34.04	39.02
QY100-B-15	滑石片岩	37.831 ± 0.008	15.543 ± 0.003	18.126 ± 0.004	28.36	38.49
QY100-B-16	凝灰熔岩	38.624 ± 0.007	15.536 ± 0.003	18.334 ± 0.003	52.64	39.67
QY100-B-17	玄武岩	40.631 ± 0.006	15.576 ± 0.002	18.866 ± 0.003	114.2	44.26
QY100-B-18	凝灰熔岩	38.395 ± 0.008	15.735 ± 0.004	20.167 ± 0.004	93.71	135.7
QY100-B-19	结晶灰岩	38.553 ± 0.029	16.047 ± 0.012	25.429 ± 0.016	231.2	396.3
QY100-B-20	安山岩	38.241 ± 0.002	15.610 ± 0.001	18.698 ± 0.001	52.71	63.24
QY100-B-21	安山岩	38.986 ± 0.001	15.610 ± 0.000	19.096 ± 0.001	80.66	74.34
V-10415	矿体	37.752 ± 0.001	15.525 ± 0.001	18.081 ± 0.000	25.32	36.77
V-10416	矿体	37.843 ± 0.001	15.551 ± 0.001	18.107 ± 0.000	28.16	37.62
V-104116	矿体	37.776 ± 0.002	15.535 ± 0.001	18.095 ± 0.001	26.25	37.41
V-104121	硅质岩	37.831 ± 0.001	15.533 ± 0.001	18.121 ± 0.001	28.23	38.02
K1101H563	砂质板岩	38.498 ± 0.017	15.626 ± 0.007	18.469 ± 0.008	53.05	49.65
K1101H465	矿体	37.867 ± 0.001	15.555 ± 0.001	18.143 ± 0.001	29.65	39.19
ZK1101H470	硅质岩	38.003 ± 0.003	15.540 ± 0.001	18.267 ± 0.001	36.06	43.37
ZK1101H475	硅质岩	37.738 ± 0.002	15.530 ± 0.001	18.057 ± 0.001	24.38	35.87
ZK1101H480	凝灰熔岩	37.839 ± 0.002	15.537 ± 0.001	18.177 ± 0.001	29.84	40.74
ZK1101H568	凝灰熔岩	37.781 ± 0.002	15.533 ± 0.001	18.138 ± 0.001	27.47	49.40
VK1102H540	砂质板岩	38.373 ± 0.001	15.572 ± 0.001	18.475 ± 0.001	50.21	50.10
VK1102H543	矿体	37.823 ± 0.001	15.549 ± 0.001	18.094 ± 0.001	27.35	37.16
VK1102H548	角砾岩	37.970 ± 0.025	15.555 ± 0.010	18.260 ± 0.012	35.09	43.73
VK1102H549	凝灰熔岩	38.592 ± 0.005	15.564 ± 0.002	18.547 ± 0.003	57.28	51.00
VK1102H555	凝灰熔岩	37.837 ± 0.006	15.510 ± 0.002	18.107 ± 0.003	28.02	36.76
VK1102H562	凝灰熔岩	37.975 ± 0.004	15.539 ± 0.001	18.135 ± 0.002	32.04	37.25
QY110-B-1	安山岩	38.372 ± 0.001	15.589 ± 0.001	18.659 ± 0.001	54.86	59.43
QY110-B-2	安山岩	38.898 ± 0.002	15.584 ± 0.001	18.912 ± 0.001	73.88	65.79
QY110-B-3	砂质板岩	38.908 ± 0.002	15.616 ± 0.001	18.937 ± 0.001	74.76	67.62
QY110-B-4	砂质板岩	38.899 ± 0.001	15.607 ± 0.000	18.812 ± 0.001	71.37	61.45
QY110-B-5	砂质板岩	38.630 ± 0.002	15.601 ± 0.001	18.735 ± 0.001	62.97	60.54
QY110-B-6	岩屑砂岩	39.003 ± 0.003	15.631 ± 0.001	19.008 ± 0.001	78.84	70.35
QY110-B-7	岩屑砂岩	38.852 ± 0.001	15.622 ± 0.001	18.938 ± 0.001	73.44	68.42
QY110-B-8	砂质板岩	39.468 ± 0.002	15.643 ± 0.001	19.305 ± 0.001	97.95	79.71
QY110-B-9	砂质板岩	39.400 ± 0.002	15.608 ± 0.001	19.170 ± 0.001	92.46	73.31
QY110-B-10	砂质板岩	39.143 ± 0.037	15.590 ± 0.014	18.910 ± 0.017	79.70	63.13
QY110-B-11	砂质板岩	39.677 ± 0.005	15.605 ± 0.002	19.053 ± 0.003	96.13	64.51
QY110-B-12	矿体	37.871 ± 0.001	15.567 ± 0.000	18.104 ± 0.000	28.76	37.52
QY110-B-13	矿体	37.703 ± 0.002	15.516 ± 0.001	18.057 ± 0.001	23.54	35.94
QY110-B-14	过渡带	38.039 ± 0.003	15.569 ± 0.001	18.291 ± 0.001	37.53	44.79
QY110-B-15	凝灰熔岩	38.930 ± 0.003	15.548 ± 0.001	18.355 ± 0.001	60.50	37.59
QY110-B-16	砂质板岩	39.279 ± 0.004	15.631 ± 0.002	19.095 ± 0.002	87.66	71.53
QY110-B-17	硅质岩	38.174 ± 0.002	15.561 ± 0.001	18.248 ± 0.001	39.67	41.03
QY110-B-18	硅质岩	39.242 ± 0.002	15.616 ± 0.001	19.211 ± 0.001	89.69	77.24
QY110-B-19	硅质岩	38.859 ± 0.002	15.601 ± 0.001	18.635 ± 0.001	65.91	53.16
QY110-B-20	硅质岩	38.163 ± 0.003	15.574 ± 0.001	18.280 ± 0.001	40.22	43.00
VH11611	砂质板岩	38.219 ± 0.002	15.556 ± 0.001	18.393 ± 0.001	44.40	47.46
VH11613	矿体	37.774 ± 0.001	15.534 ± 0.000	18.094 ± 0.000	26.18	37.36
VH11617	矿体	37.973 ± 0.001	15.545 ± 0.001	18.223 ± 0.001	34.22	41.68
VH116110	矿体	37.791 ± 0.002	15.532 ± 0.001	18.107 ± 0.001	26.92	37.76
V <sub>1</sub> 16113	凝灰熔岩	38.038 ± 0.002	15.533 ± 0.001	18.252 ± 0.001	36.52	42.10
V <sub>1</sub> 16114	凝灰熔岩	38.104 ± 0.004	15.582 ± 0.001	18.322 ± 0.001	39.88	45.87
V <sub>1</sub> 16125	凝灰熔岩	38.196 ± 0.004	15.536 ± 0.002	18.428 ± 0.002	44.77	48.96
V <sub>1</sub> 16135	凝灰熔岩	38.563 ± 0.004	15.559 ± 0.002	18.569 ± 0.002	57.15	52.73
V <sub>1</sub> 16144	凝灰熔岩	39.228 ± 0.017	15.634 ± 0.007	18.867 ± 0.009	80.65	61.10

续表 2-2  
Continued Table 2-2

样品编号	岩性	$^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$V_1$	$V_2$
QY122-B-1	熔岩	$40.524 \pm 0.006$	$15.570 \pm 0.002$	$19.205 \pm 0.003$	120.3	61.75
QY122-B-2	熔岩	$38.412 \pm 0.003$	$15.502 \pm 0.001$	$18.419 \pm 0.002$	49.72	45.37
QY122-B-3	熔岩	$38.520 \pm 0.003$	$15.500 \pm 0.001$	$18.464 \pm 0.001$	53.45	46.32
QY122-B-4	蚀变带	$38.327 \pm 0.005$	$15.493 \pm 0.002$	$18.367 \pm 0.002$	46.36	43.58
QY122-B-5	熔岩	$39.409 \pm 0.004$	$15.537 \pm 0.002$	$18.997 \pm 0.002$	88.28	63.21

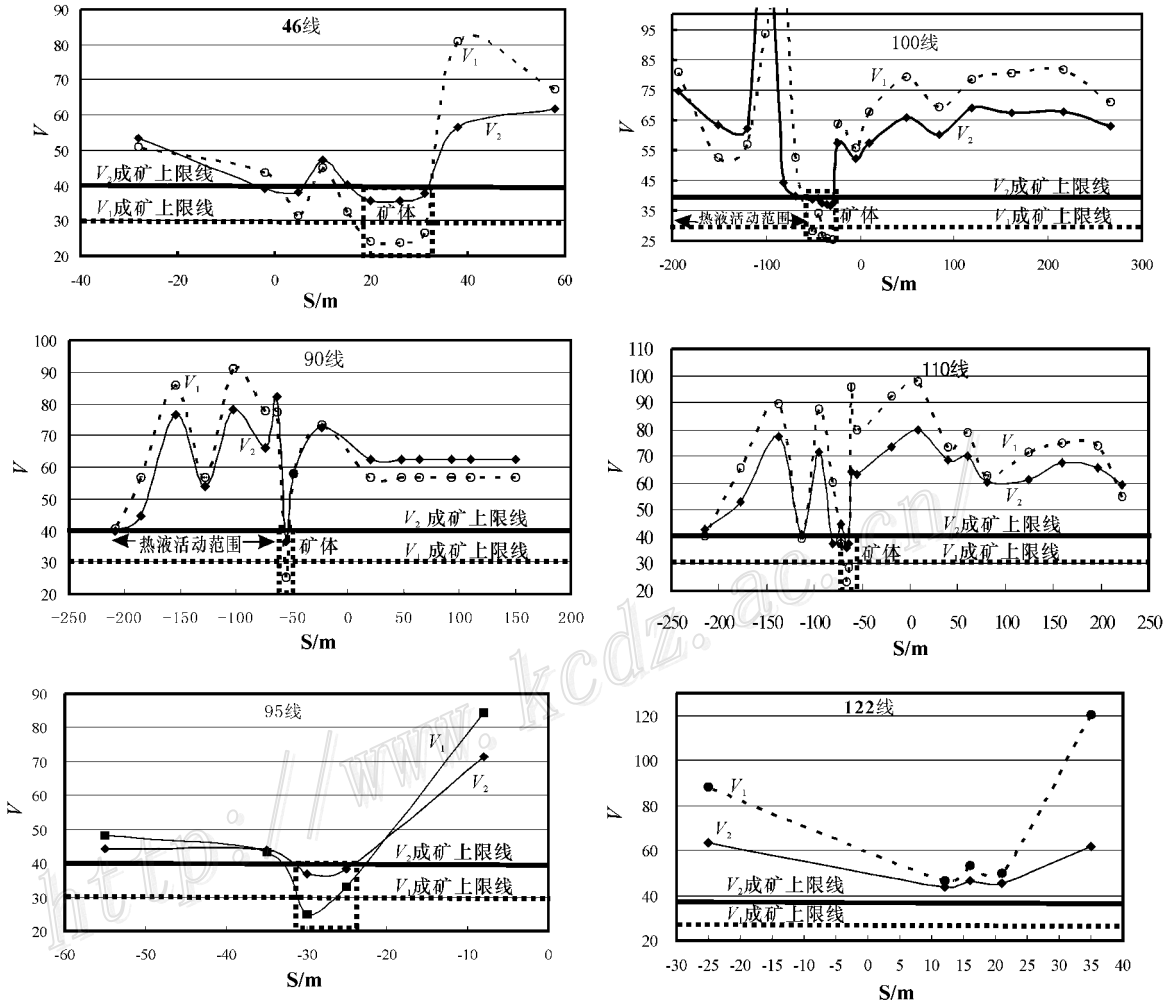


图2 鹰嘴山矿区46线至122线地表铅同位素  $V_2$  与  $V_1$  值对水平距  $S$  的图解  
 $S$  正值为基线以南的距离(走向  $177^\circ$ ), 负值为基线以北的距离(走向  $4^\circ$ )

Fig. 2  $V_2$  and  $V_1$  values versus  $S$  diagram of ground surface from No.46 line to No.122 line in Yingzuishan deposit  
Positive and negative values of parameter  $S$  indicate distance of baseline to the south (striking  $177^\circ$ ) and to the north (striking  $4^\circ$ ) respectively

值要比由中国科学院同位素地质年代学与地球化学重点实验室测定的外围样品的值低  $0.2\% \sim 0.3\%$ , 笔者在相关模式的计算中, 取地壳  $V_2$  平均值为  $35 (36.44 \pm 1.4)$ , 取地幔  $V_2$  平均值为  $25$  (区域地壳与地幔  $V_2$  值之差一般为  $10$  左右 (朱炳泉, 2001))。由于  $V_1$  值稳定性较差, 因此只作为剖面参考数据, 而不用作隐伏矿预测参数。

该矿区地表及钻孔中金达到工业品位的矿石, 其铅同位素具有很小的变化范围,  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 、 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 、 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  分别为  $18.057 \sim 18.16$ 、 $15.52 \sim 15.56$ 、 $37.736 \sim 37.986$ , 相应的  $V_1$  值变化范围为  $24.33 \sim 33.01$ ,  $V_2$  值变化范围为  $35.67 \sim 38.24$ 。蚀变带的铅同位素组成变化范围稍大于矿石。这一同位素组成变化范围比围岩中各类沉积岩

和大部分火山凝灰岩明显要小,与火山岩和硅质岩的下限值相接近,因此,成矿与火山岩和深部流体作用有关。上述同位素组成范围可以作为鹰嘴山金矿外围找矿的靶标。碳酸盐岩地层中也普遍出现很高的放射性成因铅( $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  最高值达到 57)。同时, $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ - $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  之间存在良好的等时线关系( $r=0.999$ ),给出的 Pb-Pb 等时年龄为( $543 \pm 10$ )Ma,反映了寒武纪地层的时代(另文阐述)。因

此,这种异常不是金矿化热液作用引起的。

## 4 矿区铅同位素变化规律

### 4.1 勘探线剖面的地表横向变化规律

各个地表铅同位素勘探线剖面的  $V_1$  与  $V_2$  值在矿体及其相邻蚀变带均出现了明显的负异常(图 2、图 3),并接近前述的区域地壳平均值,因此,该

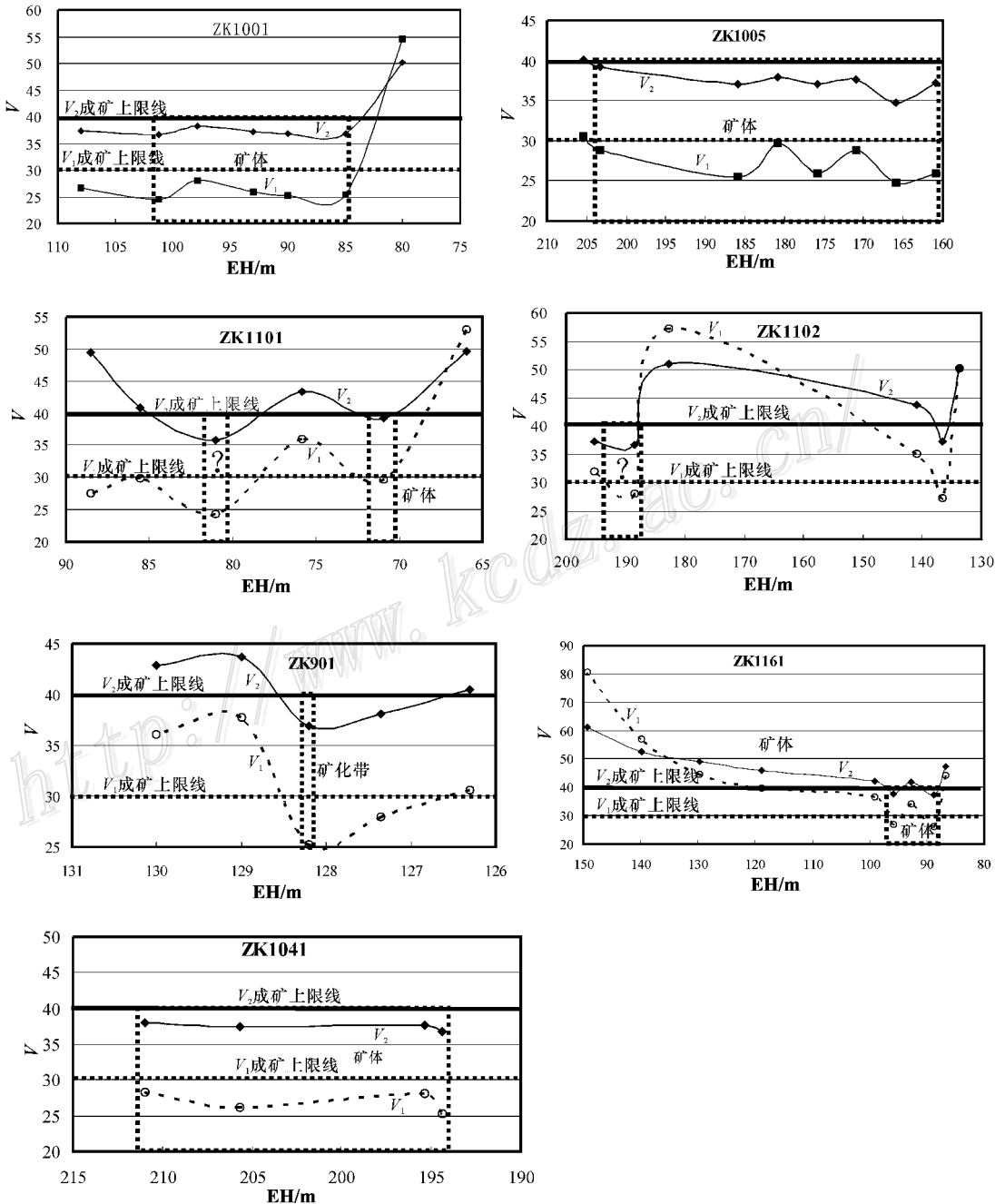


图 3 鹰嘴山矿区 46 线至 122 线钻孔铅同位素  $V_2$  与  $V_1$  值对高程 EH 的图解

Fig. 3  $V_2$  and  $V_1$  values versus EH diagrams of holes from No. 46 line to No. 122 line in Yingzuishan deposit



矿床的中段矿体已暴露到主矿体部位。从该矿床的7条勘探线剖面上可看出一个明显的变化规律,即自东至西,矿体的 $V_1$ 与 $V_2$ 值存在着从高到低的规律变化。矿体的 $V_2$ 平均值从122线的43.57(蚀变带上)到46线下降至35.67,标志着矿体的揭示深度从东到西存在着由浅至深的变化规律;从116线到90线,矿体的 $V_2$ 平均值从40呈线性下降至36.62,表明116线以东进入隐伏区,90~116线达到矿体出露的中上部,而80线以西出露的矿脉已代表了矿体的下部,并趋向于尾部(图4)。矿体南侧(上盘)的砂板岩具有较稳定的铅同位素组成,未受到热液作用的影响,表明砂板岩对成矿起到了屏蔽作用。其 $V_1$ 与 $V_2$ 平均值分别为79.05和66.1,可代表区域上地壳的铅同位素组成。而矿体北侧(下盘)的凝灰质、硅质岩石的铅同位素组成普遍存在波动变化,其峰位可出现很高的正异常,其低谷可接近成矿靶标。可见,下盘在较宽的范围内(可达到100 m以上)均受到热液作用的影响,因此,深部的成矿有可能向下盘发展,形成雁行式排列的透镜状矿体。

#### 4.2 矿体铅同位素垂向变化规律

各勘探线从地表(海拔为2 755~2 773 m)至不同深度的矿体钻孔岩心,铅同位素组成 $V_2$ 与 $V_1$ 值明显呈现出线性下降(90线ZK901孔除外,可能是其样品未达到工业品位)。100线地表(2 773 m)ZK100(2 673 m)至ZK100S(2 585 m),矿体的 $V_2$ 平均值从37.46呈线性下降至36.94。

根据常向阳等(2000)提出的 $V$ 值与高度的指数相关关系式:

$$V = A \exp(k_1 EH) + B(t) \exp(k_2 EH)$$

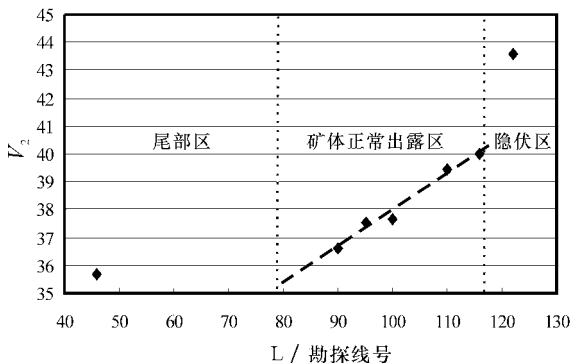


图4 鹰嘴山矿区铅同位素 $V_2$ 值沿不同勘探线号(L)的变化

Fig. 4 Variation of  $V_2$  value for Pb isotopes along different exploration lines in Yingzuishan deposit

可知海拔高度(EH)与 $V_2$ 之间在变化较小的高程范围内可以呈对数相关或线性相关。数据回归分析结果表明存在以下线性关系:

$$V_2 = 0.00277 EH + 29.76 \quad (\text{相关系数 } r = 0.996) \quad (1)$$

$$\text{或 } \ln(V_2) = 0.0000746 EH + 3.41 \quad (\text{相关系数 } r = 0.997) \quad (2)$$

根据铅同位素深部预测理论的半经验公式(常向阳等 2000),EH与 $\ln(V_2)$ 之间存在着两个线性段的线性关系。由于 $V_2$ 值变化范围很小,关系式(2)可简化为一阶导数关系,即EH与 $V_2$ 的线性关系(关系式1)(图5)。

100线两侧的95线、104线和110线,其EH与 $V_2$ 之间构成了两个斜率更大的线性关系。ZK1101、ZK1102与95线地表构成的线性关系为:

$$V_2 = 0.00772 EH + 16.935 \quad (\text{相关系数 } r = 0.996) \quad (3)$$

而110线地表与ZK1041、ZK1161钻孔矿体 $V_2$ 值构成的线性关系为:

$$V_2 = 0.0147 EH - 1.048 \quad (\text{相关系数 } r = 0.997) \quad (4)$$

这3组线性关系均交于一点,相当于所取样品最深点的位置(EH=2 585 m,  $V_2$ =36.94)。关系式(1)应代表放射性成因铅影响最小的初始Pb的壳幔混合线性关系趋向,而关系式(3)和(4)可能代表了具有不同程度放射性成因铅影响的线性关系。我们正好观察到了理论模型中2个线性段的转折点(在EH=2 585 m,  $V_2$ =36.94附近)。各勘探线上矿体隐伏深度的计算结果见表3。

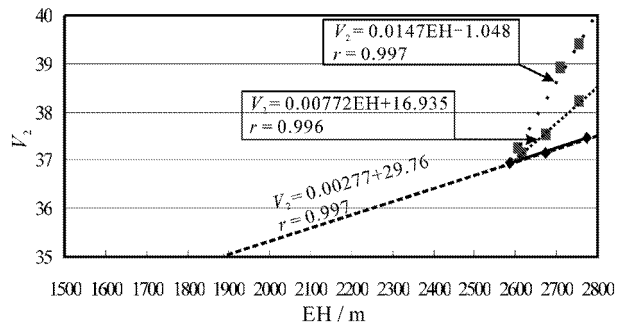


图5 鹰嘴山矿区铅同位素 $V_2$ 值随海拔高度EH变化图解

Fig. 5  $V_2$ -EH diagrams showing  $V_2$  value variation of Pb isotopes with change of EH in Yingzuishan deposit

表 3 鹰嘴山金矿区各勘探线矿体隐伏深度与隐伏系数计算结果

Table 3 Calculations of concealed depths and concealment coefficient ( $R_S$ ) for various exploration lines in Yingzuishan gold deposit

勘探线	位置	平均海拔高度/m	$V_2$ 平均值	矿体隐伏深度/m	隐伏系数**	矿体垂向延伸/m
46	地表	2 758	35.67	2 558	1.62	200
90	地表	2 767	36.62	2 176	7.89	591
	ZK901	2 680	36.9			
95	地表	2 756	37.54	1 844	2.72	912
100	地表	2 773	37.46	802	5.65	971
	ZK1001	2 674	37.15			
	ZK1005	2 585	36.94			
104	ZK1041	2 606	37.27	1 767	-	978
110	地表	2 755	39.42	1 737	2.39	1 018
	ZK1101	2 674	37.53			
	ZK1102	2 615	37.16			
116	ZK1160	2 710	38.93	1 661	2.17	1 049
122	地表	2 726(2 624*)	43.58(40*)	1 636	-	988

\* 为 122 线隐伏矿出现的上限深度和  $V_2$  值；\*\* 隐伏系数按本文中的公式(6)计算；- 表示未计算结果。

## 5 定量预测模型与资源量预测

定量预测模型包括各勘探线的矿体隐伏深度下限、隐伏系数与储量,以及矿体的厚度与品位估计。根据这些量的变化,可进一步确定矿体的三维空间形态。根据 46 线地表和钻孔中蚀变带未能成矿的  $V_2$  最低值,初步确定  $V_2$  成矿的下限值为 35 左右(也接近于地壳平均值)。根据(1)~(4)关系式确定的  $EH-V_2$  斜率关系( $V_2 > 36.94$ ,按关系式(3); $V_2 < 36.94$ ,按关系式(1)),矿体深度下限  $EH_L$  可从下式计算出:

$$EH_L = EH_0 - (V_{20} - 36.94) \times 0.00772 - (36.94 - 35) \times 0.00277 \quad (5)$$

式中  $EH_0$  与  $V_{20}$  为观察点的海拔高度与  $V_2$  值。

根据朱炳泉等(1999)和崔学军等(2005)提出的隐伏系数  $R$ (矿体总预测储量与探明储量之比)表达式:

$$R = [(V_{2max} - V_{2c})(V_{2min} - V_{2m})] / [(V_{2max} - V_{2min})(V_{2c} - V_{2m})]$$

各勘探线的隐伏系数  $R$  根据该勘探线地表与钻孔

矿体  $V_2$  变化的最大值  $V_{2max}$  与最小值  $V_{2min}$  以及前面确定的区域地壳与地幔平均值( $V_{2c}$ 与  $V_{2m}$ )计算出。

矿体的总权重平均隐伏系数  $R_S$ 由下式计算出:

$$R_S = \sum Ri * EH_{Li} / \sum EH_{Li} \quad (6)$$

式中  $R_i$  与  $EH_{Li}$  为各勘探线计算的  $R$  与  $EH_L$  值。计算得的总权重平均隐伏系数  $R_S$  为 3.68。相关计算结果已列于表 3 内。

根据本文所采样品的深度水平,鹰嘴山金矿的勘探 C+D 级储量为 11.55 t。因此,矿体的预测储量为:  $11.55 \text{ t} \times 3.68 = 42.5 \text{ t}$  (46 线至 116 线)。根据各勘探线预测的隐伏矿延伸厚度可以估算出 46 线至 116 线的垂向延伸面积为  $1\,720\,000 \text{ m}^2$ ,取矿石的密度为  $2.5 \text{ t/m}^3$ ,则可估算出矿体的厚度  $\times$  品位,计算结果为  $9.9 \text{ m} \cdot \text{g/t}$ 。如矿体的平均厚度为 3 m,则平均品位为  $3.3 \text{ g/t}$  (图 6)。

整个矿体垂向延伸从西向东由浅至深,逐渐成为隐伏矿体。鹰嘴山金矿向东 7 km 左右的寒山金矿,其西段的铅同位素  $V_2$  负异常明显减弱,而向东南方向金矿脉上出现了明显的  $V_2$  正异常,表明寒山金矿向深部延伸更大,矿床规模也更大。这 2 个矿化区可能是一个矿床,其中心部位可能位于寒山金

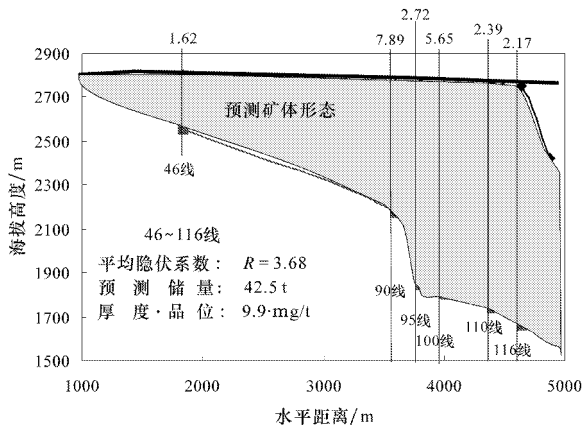


图6 鹰嘴山矿区矿体形态、隐伏系数与储量的铅同位素定量预测模型图解

(图中数字为勘探线编号及其所对应的隐伏系数)

Fig. 6 Model graph of Pb isotopic quantificational prognosis for shape of ore bodies, hidden coefficient ( $R_S$ ) and storage of Yingzuishan deposit

(The number indicates the number of exploration line and its corresponding  $R_S$ )

矿的东部。

## 6 结论

(1) 通过鹰嘴山金矿区的铅同位素深部预测研究,进一步完善和发展了铅同位素隐伏矿资源量定量预测方法。同时,首次开展了多勘探线的定量综合预测,为建立矿体三维形态预测提供了新的思路与途径。

(2) 首次建立了鹰嘴山金矿区铅同位素外围找矿的靶标( $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 、 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 、 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 分别为18.057~18.16、15.52~15.56、37.736~37.986,相应的 $V_1$ 的变化范围为24.33~33.01, $V_2$ 的变化范围为35.67~38.24)。为今后在鹰嘴山外围进行铅同位素找矿提供了重要参考数据。

(3) 发现鹰嘴山金矿区地表铅同位素勘探线剖面的 $V_1$ 与 $V_2$ 值在矿体及其相邻蚀变带均出现了明显的负异常,并接近区域地壳平均值,发现该矿床的中段矿体已暴露到主矿体部位。由该矿床的7条勘探线剖面显示出一个明显的变化规律,即自东至西矿体的 $V_1$ 与 $V_2$ 值存在着从高到低的规律变化,表明116线以东进入隐伏区,90~116线达到矿体出露的中上部,而80线以西出露的矿脉代表了矿体的下部,并趋向于尾部。这说明矿体整体西高东

低,向东侧伏(隐伏)。

(4) 鹰嘴山矿区总权重平均隐伏系数 $R_S$ 为3.68,46线至116线矿体的预测资源量为42.5 t。因此,鹰嘴山金矿床经过进一步勘探可成为大型、特大型金矿床。

致谢 甘肃省地质勘查局以及所属地矿处、水工环处、第一勘查院、第二勘查院、第三勘查院、第四勘查院、地调院、环境监测院等单位的领导和专家对本次工作给予了大力支持和帮助,在此致以衷心感谢!

## References

- An G B. 2006. Geological characteristics and genetic analysis of Shijinpogold deposit in Beishan Mountain, Gansu Province[J]. *Mineral Deposits*, 25(4): 483~490 (in Chinese with English abstract).
- Carr G R, Dean J A and Suppel D W. 1995. Precise lead isotope fingerprinting of hydrothermal activity associated with Ordovician to Carboniferous metallogenic events in the Lachlan fold belt of New South Wales[J]. *Econ. Geol.*, 90: 1467~1505.
- Chang X Y, Zhu B Q and Zou R. 2000. Lead isotopic exploration intersecting mineralization zones for the depth forecast of concealed deposits: A case from Longbohe Cu deposit, Jinping, Yunnan Province, China[J]. *Science in China (Series D)*, 30(1): 33~39 (in Chinese).
- Chen Y. 1994. The discussion for the ore material origin of Liba gold deposit, western Qinling[J]. *Northwestern Geology*, 15(2): 5~9 (in Chinese).
- Cui X J and Zhu B Q. 2005. The research actuality and progression of lead isotope prospecting[J]. *Acta Geologica Gansu*, 14(2): 11~17 (in Chinese with English abstract).
- Foley N K and Ayuso R A. 1994. Lead isotope compositions as guides to early gold mineralization: The north Amethyst vein system, Creede District, Colorado[J]. *Econ. Geol.*, 89: 1842~1859.
- Gulson B L, Large R R and Porritt P M. 1988. Gold exploration using lead isotopes at Tennant Creek, Australia[J]. *Applied Geochemistry*, 3: 243~254.
- Harris D P. 1990. *Mineral exploration decisions: A guide to economic analysis and modeling*[M]. John Wiley and Sons. 436p.
- He H Q. 1994. Lead isotope: Used to assess the geochemical anomaly[J]. *Geological Exploration for Non-Ferrous Metals*, 3(6): 249~254 (in Chinese with English abstract).
- Hou Q Y, Zhang H F, Zhang B R, Zhao Z D and Zhu Y H. 2005a. Characteristics and tectonic affinity of Lajishan paleo-mantle in Qilian orogenic belt: A geochemical study of basalt[J]. *Earth Science (Journal of China University of Geosciences)*, 30(1): 61~70 (in Chinese with English abstract).
- Hou Q Y, Zhao Z D, Zhang H F, Zhang B R and Chen Y L. 2005b.

- Indian Ocean-MORB-type isotopic signature of Yushigou ophiolite in North Qilian Mountains and its implications[ J ]. *Sciences of China( Series D)*, 35( 8 ): 710 ~ 719( in Chinese ).
- Huang B. 1989. The study of gold target determination for Tonglin area using lead isotopes[ A ]. In : Paper( abstracts ) compilation for the forth national conference of isotopic geochronology and isotopic geochemistry[ C ]. 179 ~ 180( in Chinese ).
- Jiang S H, Nie F J, Liu Y, Wang X L and Zhao Y M. 2002. Geochemical features of the Gongpoquan porphyry copper deposit in Beishan area[ J ]. *Geology-Geochemistry*, 30( 2 ): 25 ~ 33( in Chinese with English abstract ).
- Jiang S H and Nie F J. 2006.  $^{40}\text{Ar}$ - $^{39}\text{Ar}$  geochronology of Hongjianbingshan tungsten deposit in Beishan Mountain, Gansu Province, China[ J ]. *Mineral Deposits*, 25( 1 ): 92 ~ 97( in Chinese with English abstract ).
- Li H M, Wang C L, Liu Z W and Liu J Q. 2003. Two different kinds of gold deposits on northern slope of Danghenanshan area in South Qilian Mountains[ J ]. *Mineral Deposits*, 22( 2 ): 191 ~ 198( in Chinese with English abstract ).
- Liu D F and Zhao L C. 2002. Geological features and origin of Donghai gold deposit in Gansu[ J ]. *Contributions to Geology and Mineral Resources Research*, 17( 2 ): 97 ~ 102( in Chinese with English abstract ).
- Nie F J, Jiang S H, Liu Y, Zhang Y and Zhao Y M. 2003. Ore-fluid evolution of the Xiaoxigong gold deposit hosted in Proterozoic metamorphic rocks, Gansu Province: As deduced from sulfur, oxygen, hydrogen and lead isotopic evidence[ J ]. *Geology-Geochemistry*, 31( 4 ): 1 ~ 10( in Chinese with English abstract ).
- Nie F J, Jiang S H, Hu P and Zhang Y. 2004. Geological features and ore-forming material sources of Hongjianbingshan tungsten deposit in Beishan Mountain, Gansu Province[ J ]. *Mineral Deposits*, 23( 1 ): 13 ~ 21( in Chinese with English abstract ).
- Ren K X, Yan G H, Mu B L, Cai J H, Tong Y, Li F T, Zhao F S, Gu L B, Yang B and Chu Z Y. 2005. Geochemistry and Nd, Sr, Pb isotopic characteristics of the alkali-rich intrusive rocks in Alxa fault block, Western Inner Mongolia and their implications[ J ]. *Earth Science Frontiers*, 12( 2 ): 292 ~ 302( in Chinese with English abstract ).
- Rui Z Y, Li N and Wang L S. 1991. Mineralization and Pb isotopic targeting for Guanmenshan Mountain Pb-Zn deposits and basin hot brine[ M ]. Beijing: Geol. Pub. House. 129 ~ 162( in Chinese ).
- Sanford R F. 1992. Lead isotopic compositions and paleohydrology of caldera-related epithermal veins, Lake City, Colorado[ J ]. *Geological Society of America Bulletin*, 104: 1236 ~ 1245.
- Song Z B, Yang H Q and Wu J R. 2003. Silicon-lead-sulfur isotopic constitution of Shijuli copper deposits of North Qilian Mountains [ J ]. *Northwestern Geology*, 36( 2 ): 83 ~ 86( in Chinese with English abstract ).
- Todt W, Cliff R A, Hanser A and Hofmann A W. 1993. Re-calibration of NBS lead standards using a  $^{202}\text{Pb}$  +  $^{205}\text{Pb}$  double spike[ J ]. *Terra Abstract*, 5( Supp. 1 ): 396.
- Wang X A. 1999. Sulfur and lead isotopic geochemistry study for Baiyinchang copper mineral field, Gansu province[ J ]. *Northwestern Geology*, 32( 1 ): 18 ~ 23( in Chinese ).
- Wang Y, Zhang Q, Xu R H and Qian Q. 2001. A discussion on the metal source of Baiyin volcanic hosted massive deposit from the North Qilian Mountains[ J ]. *Geological Science and Technology Information*, 20( 4 ): 46 ~ 50( in Chinese with English abstract ).
- Wu J R, Yu P S and Ren B C. 2001. Geological characteristics and comprehensive metallogenic model of copper and/or zinc sulfide deposits in Shijuli area, North Qilian Mountains[ J ]. *Mineral Deposits*, 20( 4 ): 339 ~ 346( in Chinese with English abstract ).
- Xia Y L. 1982. Uranium deposits prospecting using lead isotopes[ M ]. Beijing: Atomic Energy Press( in Chinese ).
- Zhou T F and Yue S C. 1999. Geochemistry and metallogenesis of the Huashugou copper deposit[ J ]. *Geology and Prospecting*, 35( 3 ): 24 ~ 29( in Chinese with English abstract ).
- Zhou T G and Zhou J Q. 2000. Geological-geochemical characteristics and mineral resources of Xiaoliugou Cu-W polymetallic deposit in Gansu[ J ]. *Journal of Guilin Institute of Technology*, 20( 2 ): 132 ~ 136( in Chinese with English abstract ).
- Zhu B Q. 1993. Metallogeny and geochemical prospecting evaluation for some stratabound ore deposits and lead isotopic province in northern xinjiang province[ A ]. In : Tu G C ed. *New progress in solid earth sciences of northern Xinjiang Province* [ C ]. Beijing: Science Press. 39 ~ 52( in Chinese ).
- Zhu B Q. 1998. Isotopic systematic theory and application in earth sciences: Concurrently discussing crust-mantle evolution of Chinese continent[ M ]. Beijing: Science Press. 1 ~ 330( in Chinese with English abstract ).
- Zhu B Q. 2001. Geochemical provinces and geochemical steep zones [ M ]. Beijing: Science Press( in Chinese ).

### 附中文参考文献

- 安国堡. 2006. 甘肃北山拾金坡金矿床地质特征及成因分析[ J ]. *矿床地质*, 42( 4 ): 483 ~ 490.
- 常向阳, 朱炳泉, 邹日. 2000. 铅同位素系统剖面化探与隐伏矿床预测——以云南金平老藤河铜矿为例[ J ]. *中国科学(D辑)*, 30( 1 ): 33 ~ 39.
- 陈源. 1994. 西秦岭李坝金矿床成矿物质来源探讨[ J ]. *西北地质*, 15( 2 ): 5 ~ 9.
- 崔学军, 朱炳泉. 2005. 铅同位素找矿方法研究现状与进展综述[ J ]. *甘肃地质学报*, 14( 2 ): 11 ~ 17.
- 何厚强. 1994. 铅同位素特征在化探异常评价中的应用[ J ]. *有色金属矿产与勘查*, 3( 6 ): 249 ~ 254.
- 侯青叶, 张宏飞, 张本仁, 赵志丹, 朱云海. 2005a. 祁连造山带中部拉脊山古地幔特征及其归属: 来自基性火山岩的地球化学证据[ J ]. *地球科学(中国地质大学学报)*, 30( 1 ): 61 ~ 70.
- 侯青叶, 赵志丹, 张宏飞, 张本仁, 陈岳龙. 2005b. 北祁连玉石沟蛇绿岩印度洋 MORB 型同位素组成特征及其地质意义[ J ]. *中国科学(D辑)*, 35( 8 ): 710 ~ 719.

- 黄斌. 1989. 用铅同位素方法在铜陵地区确定金矿靶区的研究 [A]. 见: 第四届全国同位素地质年代学和同位素地球化学学术讨论会论文(摘要)汇编 [C]. 179~180.
- 江思宏, 聂凤军, 刘妍, 王新亮, 赵月明. 2002. 北山公婆泉斑岩型铜矿床地球化学特征研究 [J]. 地质地球化学, 30(2): 25~33.
- 江思宏, 聂凤军. 2006. 甘肃北山红尖兵山钨矿床的 $^{40}\text{Ar}$ - $^{39}\text{Ar}$ 同位素年代学研究 [J]. 矿床地质, 25(1): 92~97.
- 李厚民, 王崇礼, 刘志武, 刘继庆. 2003. 南祁连党河南山北坡两个不同特征的金矿床 [J]. 矿床地质, 22(2): 191~198.
- 刘堆富, 赵立春. 2002. 甘肃东海金矿地质特征及成因探讨 [J]. 地质找矿论丛, 17(2): 97~102.
- 聂凤军, 江思宏, 刘妍, 张义, 赵月明. 2003. 甘肃小西弓金矿床成矿物质来源和含矿流体运移轨迹同位素示踪 [J]. 地质地球化学, 31(4): 1~10.
- 聂凤军, 江思宏, 胡朋, 张义. 2004. 甘肃北山红尖兵山钨矿床地质特征及成矿物质来源 [J]. 矿床地质, 23(1): 13~21.
- 任康绪, 阎国翰, 牟保磊, 蔡剑辉, 童英, 李凤棠, 赵凤三, 古丽冰, 杨斌, 储著银. 2005. 阿拉善断块富碱侵入岩岩石地球化学和Nd、Sr、Pb同位素特征及其意义 [J]. 地学前缘, 12(2): 292~302.
- 芮宗瑶, 李宁, 王龙生. 1991. 关门山铅锌矿床-盆地热卤水成矿及铅同位素打靶 [M]. 北京: 地质出版社. 129~162.
- 宋忠宝, 杨合群, 郭介人. 2003. 北祁连山石居里铜矿硅、铅、硫同位素组成特征 [J]. 西北地质, 36(2): 83~86.
- 王兴安. 1999. 甘肃白银厂铜矿田硫铅同位素地球化学研究 [J]. 西北地质, 32(1): 18~23.
- 王焰, 张旗, 许荣华, 钱青. 2001. 北祁连白银矿田火山成因块状硫化物矿床成矿金属来源讨论 [J]. 地质科技情报, 20(4): 46~50.
- 郭介人, 于浦生, 任秉琛. 2001. 北祁连石居里地区Cu(Zn)S矿床地质特征及综合成矿模式 [J]. 矿床地质, 20(4): 339~346.
- 夏毓亮. 1982. 铅同位素方法寻找铀矿 [M]. 北京: 原子能出版社.
- 周涛发, 岳书仓. 1999. 北祁连桦树沟(铁)铜矿床地球化学特征及成因 [J]. 地质与勘探, 35(3): 24~29.
- 周廷贵, 周继强. 2000. 甘肃小柳沟钨多金属矿床地质地球化学特征 [J]. 桂林工学院学报, 20(2): 132~136.
- 朱炳泉, 等. 1993. 新疆北部铅同位素省及部分层控矿床成因与化探评价 [A]. 见: 涂光炽主编. 新疆北部固体地球科学新进展 [C]. 北京: 科学出版社. 39~52.
- 朱炳泉. 1998. 地球科学中同位素体系理论与应用——兼论中国大陆壳幔演化 [M]. 北京: 科学出版社. 1~330.
- 朱炳泉. 2001. 地球化学省与地球化学急变带 [M]. 北京: 科学出版社.

<http://www.kcdz.ac.cn/>