

柴达木盆地外生硼矿床成矿特征与找矿方向探讨

——以雅沙图地区哈克盆地为例

齐路晶^{1,2}, 郑绵平^{1,2}, 武国朋^{1,2}, 张雪飞², 杜少荣^{1,2}

1. 中国矿业大学(北京)地球科学与测绘工程学院, 北京 100083
2. 中国地质科学院矿产资源研究所, 国土资源部盐湖资源与环境重点实验室, 北京 100037

摘要 中国硼矿资源形势不容乐观, 急需寻找可替代外生硼矿床。哈克盆地位于柴达木盆地北部边缘, 隶属于“溯源找矿”区域, 该区硼矿和硼矿化形成NW-NWW向山前逆冲断裂及NE向断层所控制。对盆地内岩石、沉积物、水系B含量分析结果表明, B含量具明显正异常, 水化学组分富B、Li而贫Br、I, $\sum Ce/\sum Y$ 比值接近地壳, 成矿来源主要为富硼地下水及富硼基岩。针对盆地内典型外生硼矿床——居红土硼矿研究发现如下规律: 硼矿体主要分布于晚更新世细粒沉积物之上, 反映了稳定条件沉积特征; 矿区碎屑沉积物纵向呈明显正粒序变化, 硼矿主体自下而上随碎屑粒度由粗变细, B_2O_3 含量由低到高, 而自洼地中心向边缘, 矿层呈中间厚向两侧变薄并逐渐尖灭的特点; 通过光释光测年数据表明, 矿床形成于晚更新世 ≥ 28 ka; 据硅华大部分变为低温石英和C蛋白石以及稀碱金属元素Li > Rb > Cs, 表明硅华业经长期“脱水老化”。综合矿区碳酸盐沉积物碳氧同位素和硅钙华底板XRD等研究, 将居红土硼矿形成过程划分为3个阶段: I 早期硅钙华沉积阶段, II 下部硼矿初始沉积阶段, III 主体硼矿沉积阶段。

关键词 硼矿; 矿床特征; 找矿方向; 哈克盆地; 居红土

中图分类号 P612

文献标志码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2014.35.006

Characteristics and Forming Process of Juhongtu Boron Deposit in Yashatu, Qinghai Province

QI Lujing^{1,2}, ZHENG Mianping^{1,2}, WU Guopeng^{1,2}, ZHANG Xuefei², DU Shaorong^{1,2}

1. College of Geosciences and Surveying Engineering, China University of Mining and Technology, Beijing 100083, China
2. MLR Key Laboratory of Saline Lake Resources and Environments; Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China

Abstract The situation of boron resources is not promising in our country, so it is urgent to find alternative exogenous boron deposits. The Huke basin is located in the northern edge of the Qaidam basin, belonging to a "resource prospecting" area. The NW-NWW Piedmont thrust and the NE fault control the formation and the distribution of the boron deposits and the mineralization points in Juhongtu and surrounding areas. The regional rock, the sedimentary and the water content have obvious positive anomalies of B, and the water is rich in B, Li and poor in Br, I, and the $\sum Ce/\sum Y$ ratio is close to that of the earth's crust, reflecting that the metallogenic source comes from the groundwater and the boron source rock. From the Juhongtu boron ore and the typical exogenous boron deposit, it is found that the boron ore is distributed in the upper Pleistocene series on fine grained sediments, reflecting stable

收稿日期: 2014-09-16; 修回日期: 2014-11-05

基金项目: 中国地质调查局地质调查项目(1212011120046)

作者简介: 齐路晶, 硕士研究生, 研究方向为沉积地质与沉积矿产, 电子信箱: fzzqlj456515@163.com; 郑绵平(通信作者), 中国工程院院士, 研究方向为盐湖学和盐类地质矿床学, 电子信箱: zhengmp2010@126.com

引用格式: 齐路晶, 郑绵平, 武国朋, 等. 柴达木盆地外生硼矿床成矿特征与找矿方向探讨——以雅沙图地区哈克盆地为例[J]. 科技导报, 2014, 32(35): 50-60.

sedimentary environments; the sediments show a positive change in the portrait with the granularity of clastic particle size from coarse to fine, the change of B_2O_3 containing grades from low to high and the change of the depression from the center to the edge. The strata thickness is gradually punched out from the middle to the sides. It is the first time to show that the deposit is formed in the late Pleistocene, 28 ka BP; the silicon is transformed into low temperature quartz and C opal and dilute alkali elements $Li > Rb > Cs$, which shows that the sinter has undergone a long-term "dehydration". Based on the carbonate sediment isotope and XRD analysis, the Juhongtu boron ore forming process is divided into three stages: I—early silicon tufa deposition stage; II—the lower boron ore initial sedimentary stage; and III—main boron ore deposition stage. The study of the formation mechanism of boron deposits in Qilian mountain area helps understanding of metallogenic processes.

Keywords Boron deposit; deposit features; prospecting direction; Hake Basin; juhongtu

硼矿是应用于工农业领域的重要矿产。目前,中国东北硼矿资源日趋枯竭,青海省新生代特种盐湖广布,但盐湖固体硼矿开采多年已基本采空,盐湖卤水伴生硼资源限于技术和成本,目前尚难大量开发,资源形势不容乐观。综观全国硼资源地质成矿条件,柴达木盆地隶属高原盆地北部成矿亚区,是中国外生硼矿床最有远景地区。40余年盐湖调查研究已对柴达木盆地内流区内柴北缘成矿亚区(包括马海和大、小柴旦湖区,以固液相硼矿并存为特征)、盆地中部成矿亚区(包括东、西台吉乃尔湖、一里坪及察尔汗盐湖,为液体硼矿)及盆地西部成矿亚区(第三纪含硼油田水沉积硼矿)进行过详细研究,并取得显著成果,但对柴达木盆地北侧的哈克盆地和南侧的可可西里盆地硼矿地质研究较少。

青海省哈克盆地地处柴达木盆地北缘,地处宗务隆山和蒙克山之间花岗岩带中部,隶属于郑绵平等^[1,2]提出的“溯源找矿”的北区,地理坐标为 $37^{\circ}40'N\sim 38^{\circ}5'N, 95^{\circ}40'E\sim 96^{\circ}50'E$ 。塔塔棱河横贯盆地东西,携大量硼元素经达肯大坂山汇入大、小柴旦。由于该地区是大、小柴旦湖硼元素来源的主要补给源区^[1-6],所以,研究盆地内岩石、沉积物、水系的B含量异常,总结居红土硼矿床成矿地质特征和矿化分布规律,对在哈克盆地内部寻找其他沉积型矿床具有重要意义。

本文在收集前人资料基础之上,通过实地调查,对哈克盆地内居红土矿区岩石、沉积物、矿坑水及矿坑剖面系统采样,还对乌兰保姆、乌保图泥火山、塔塔棱河水样、沉积物及南北岸剖面系统采样对比。通过对该地区地球化学异常分析,结合XRD粉晶衍射实验和碳氧同位素分析,总结居红土矿床成矿特征,建立成矿理想模式并对找矿方向进行了探讨。

1 区域地质背景

1.1 构造

哈克盆地位于祁连山南麓,NW-NWW向山前逆冲断裂为盆地内主要构造,系新生代复活逆冲断裂,属柴中断裂东段,北穿宗务隆山经塔塔棱河至哈克盆地,CEMP测线显示该断裂呈正花状构造特征,为一条具有走滑性质的断层(图1),至今仍有活动,至第四纪更新世晚期仍有含深部来源硼热水溢出^[1,7,8]。

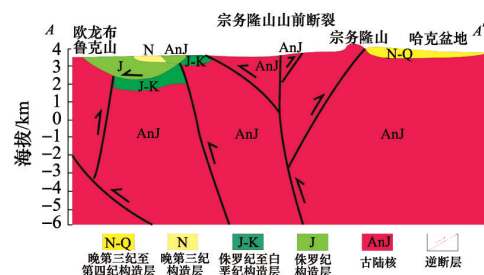


图1 宗务隆山山前断裂带(柴中断裂带东段)剖面特征
(据文献[8],略有修改)

Fig. 1 Sectional features of piedmont fault zone at Zongwulong Mountains (according to the reference[8])

受印度-欧亚板块碰撞影响,柴达木盆地内部发育多条NE向断裂,隐伏于深层,第四纪以来一直活动并伴有较强的水平运动,是造成柴达木盆地一系列阻隔式密闭山前断陷的主要构造^[7,9,10]。由基岩形态和表层构造可以看出NE向断裂受EW向构造线牵制而有扭动作用,使塔塔棱河自东向西呈反S型发育,且塔塔棱河北岸支流多形成近乎平行的NNE向刻蚀地貌并具同向弯曲,多处硼矿化点沿河谷两侧呈NE向分布,与断裂方向一致。如北部蒙克山发育NNE斜列背斜褶皱,乌兰保姆、乌保图等泥火山与居红土硼矿呈NW向分布,雅马图河上游硼矿化点及裂隙泉受构造影响呈NW向分布(图2)。

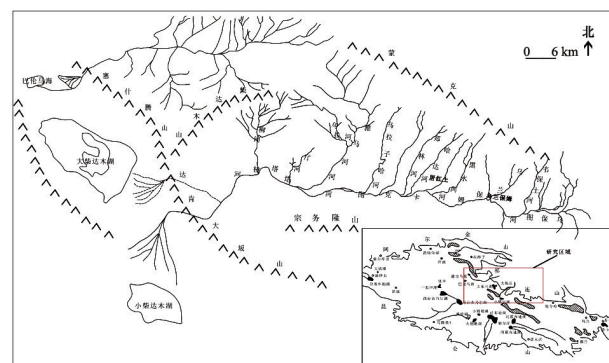


图2 哈克盆地水系分布

Fig. 2 The map of river distribution in Hake Basin

1.2 地层

哈克盆地出露地层以古生代志留纪和石炭二叠纪地层和新生代第四系分布为主^[11](图3)。

1) 志留系: 主要分布于盆地东、西部边缘。自下而上分为两部分, 下部志留系分布于盆地东部边缘, 为本区最古老地层, 以灰绿色石英砂岩和硅化砂岩互层为主, 夹硅质板岩和页岩, 层理和节理发育, 厚约 400 m, 上部志留系分布于盆地西南边缘, 带状分布, 以一套浅变质的硅质灰岩为主, 夹紫色页岩, 与下伏地层接触关系不明, 厚约 500 m。

2) 石炭-二叠系: 主要出露于盆地南部、西部, 与其下伏地层为不整合接触。灰绿色千枚岩和紫色薄层页岩互层, 沿其节理有石英贯入。中厚层硅质灰岩节理发育, 沿节理有石

英脉贯入, 接触处有大理石化现象。

3) 第四系: 在盆地内广泛分布, 第四系下更新统见于塔塔棱河南岸, 为一套灰绿色泥灰岩, 含斧足类化石, 其西部剥蚀阶地可见一套灰绿色砂质泥岩, 范围不大, 出露厚度约 225 m; 第四系中更新统零星出露于雅马图河口及靠条灶火西部较低阶地上, 为一套中粗粒砂砾石碎屑, 砾石由花岗岩、硅化灰岩及砂岩碎屑组成, 出露厚约 4~6m; 第四系上更新统主要见于河谷平原及河流两侧阶地, 以冲积物为主, 河流北侧小型凹地则以洪积、冲积及坡积黏土砂砾石混合相为主, 在居红土矿区, 可见钠硼解石、石灰华出露地表, 矿区北部还可见冰碛物堆积; 第四纪全新世堆积分布零散, 成因复杂, 厚度极小, 岩性涵盖风积、冲积、残坡积及化学沉积多种类型。

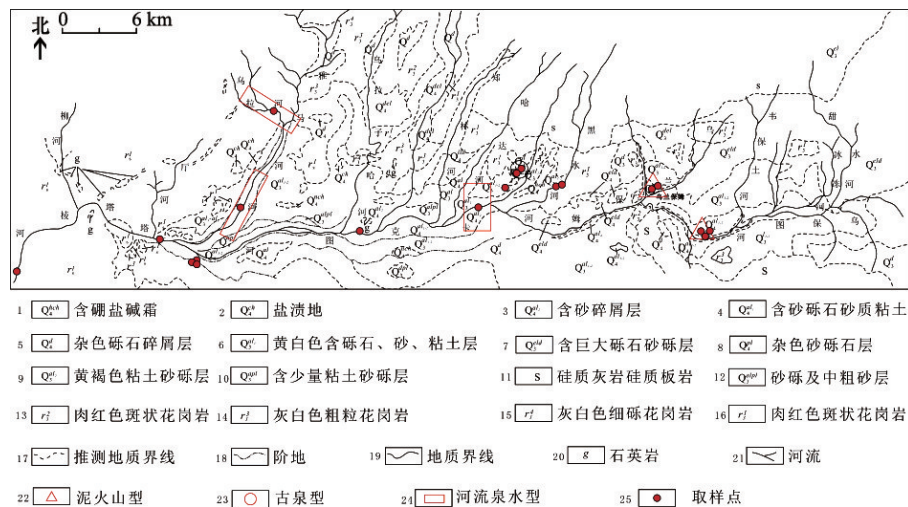


图3 塔塔棱河流域地质图(据文献[12])

Fig. 3 Geological map of Tataleng river basin (According to the reference[12])

1.3 侵入岩

盆地内侵入岩分布广泛, 主要出露于塔塔棱河北部, 以东西向长条状岩株侵入, 主要岩性为灰白色斑状花岗岩和肉红色斑状花岗岩。其中灰白色花岗岩位于本区中部, 矿物成分主要为白色斜长石, 次为黑云母, 含少量黑色电气石, 局部有文象结构; 肉红色花岗岩零星出露, 分布范围小, 矿物成分以正长石为主, 其次为石英、黑云母等, 与灰白色花岗岩呈过渡关系, 原生节理非常发育。

为研究富硼花岗岩基底与硼矿床形成关系, 本文对居红土矿区花岗岩采样, 进行锆石定年测试, 测试在北京离子探针中心进行, 实验仪器为 SHRIMP II 离子探针, 测得年龄均值为 (442.0 ± 4.6) Ma 和 (443.5 ± 3.8) Ma, 与古生代柴达木北缘地区加里东造山作用几乎同时, 该年龄值与申文环、卢新祥对塔塔楞环斑花岗岩研究年龄结果(分别为 (441.7 ± 6.4) Ma 和 440 Ma)一致^[13,14], 花岗岩为板块俯冲和陆陆碰撞产物(图4)。

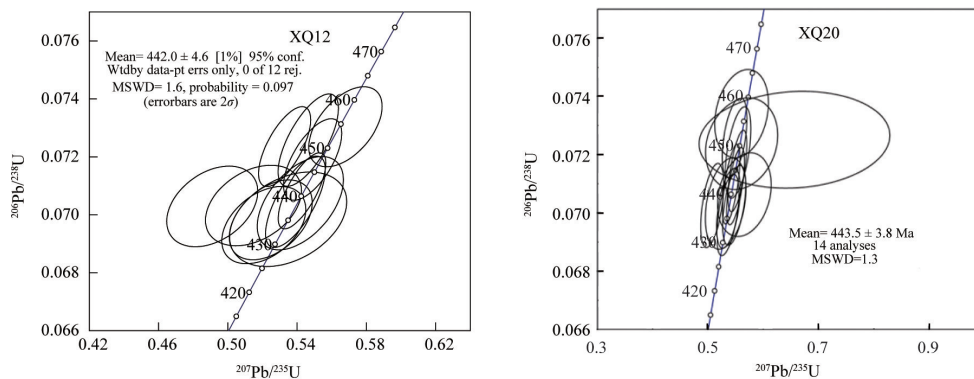


图4 锆石 CL 图像和锆石 U-Pb 年龄谐和图

Fig. 4 CL images and U-Pb concord diagram of zircon

2 矿床地质特征

2.1 矿区地质背景

居红土矿区为一山间洼地,面积小于0.3 km²,洼地基底及外围主要为灰白色斑状花岗岩,局部见肉红色花岗斑岩。花岗岩可见电气石脉和石英岩脉穿插,现多被第四纪碎屑物覆盖。硼矿即位于花岗岩丘陵间的构造洼地中。矿区北部一条小河由北向西南贯穿洼地,在洼地中堆积了近60 m厚的第四纪堆积物,其厚度由中心向边缘变薄。

据四极电测剖面资料^[15],该洼地有3个凹陷中心I~III

(图5),其中,凹陷I和凹陷II较小,仅发现少许较贫硼矿石,主要硼矿分布于东部最大的凹陷III内。凹地中地表现现代沉积受地形控制,厚度不大,全新世冲积砂砾和淤积黏土主要分布在小河与冲沟中,花岗岩丘陵顶部和阶地平台则为全新世残积砂砾和黏土,沿丘陵斜坡堆积当地岩石剥落碎屑物。上更新统为矿区主要沉积,据钻探和物探资料,凹地最底部为重力堆积岩块,其上为砾石,再上系冲、坡积砂砾,顶部除边缘坡积砂砾外,主要为砂-黏土沉积和化学沉积。

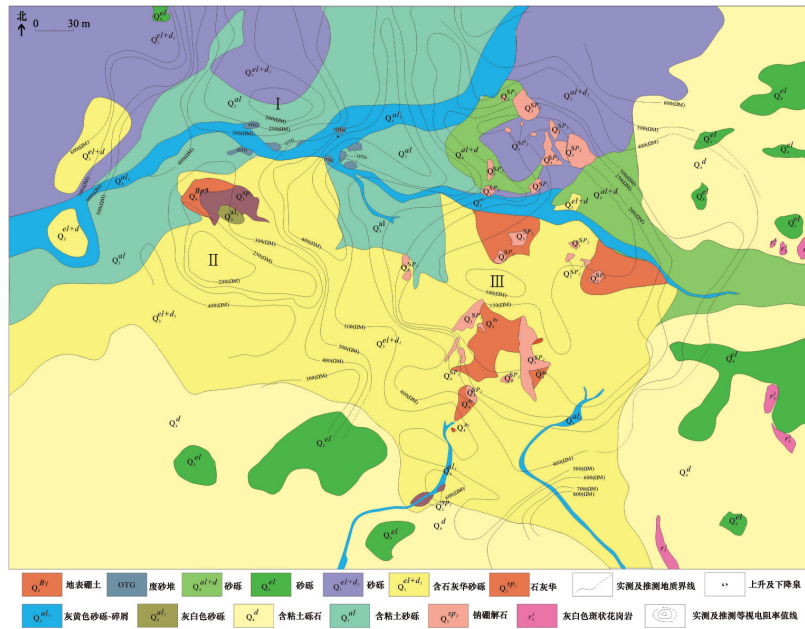


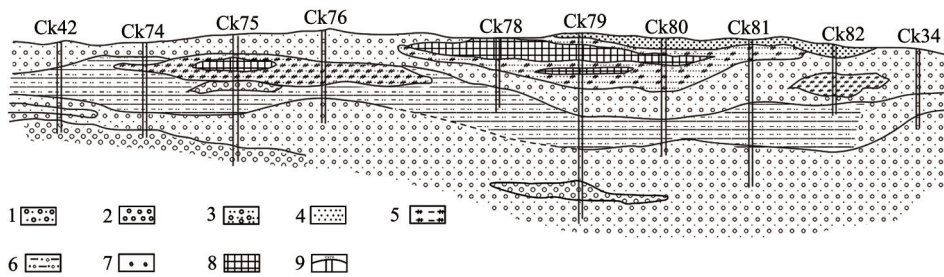
图5 居红土矿区地质图及四极电法平面图(据文献[15],略有修改)

Fig. 5 Geological map of Quadrupole electron panner graph of the Juhongtu boron deposit (according to the reference[15])

2.2 含矿地层特征及分布

居红土矿区硼矿产于上更新统和全新统砂砾石黏土和化学沉积物中,剖面钻孔见矿率高于50%^[12,15, 16],矿层主要位

于细粒沉积物上部,多与石灰华共生,按其分布层位组成物质和结构,自下而上可分为3层(图6)。



1—含砂砾石层;2—砾石碎屑层;3—含砾石砂层;4—中细粉砂;5—含硼黏土层;6—砂砾黏土碎屑层;7—石灰华;8—硼矿富集层;9—钻孔号

图6 雅沙图地区居红土硼矿横剖面图(据文献[17],略有修改)

Fig. 6 Cross section of Juhongtu boron deposit in Yashatu district (according to the reference[17])

1) 砂砾硼矿层。主要由砾石组成,含少量砂和微量硼矿物,产于砂砾石沉积的顶部,一般埋深于19 m以下,为本区最早沉积硼矿层,仅在矿区中部可见,面积小于0.001 km²。矿

体呈小扁豆体,产状水平,矿体平均品位介于0.84%~1.86%,厚度变化0.4~2.4 m。硼矿物多为隐晶质,在砂砾孔隙中可见零星分布的钠硼解石晶体。

2) 砂-黏土硼矿层。主要由黏土和细砂组成,含微量砾石和少许硼矿物,黏土中硼矿物均系隐晶质,在砂与黏土孔隙中形成柱状硼矿物晶簇,个别地段见钠硼解石呈羽毛状、星散状分布于细砂中,矿层赋存于砂-黏土层中,埋深8~19 m,常呈大小不等透镜体,矿体厚度变化2.4~4.2 m,品位介于1.15%~7.29%。

3) 含砂砾钠硼解石硼矿层。一般呈透镜体状,分布全区,产于8 m以上近地表部位,比较稳定,在矿区中部可见透镜状和筒状纯钠硼解石矿层,局部含块状硼砂和白色针、柱状天然碱晶体,普遍有冰块充填,钠硼解石一般为块状、结核状,有时为葡萄状,个别矿层由纯钠硼解石碎屑组成,并有零星石灰华和花岗岩砾石分布,围岩为含砾石中-细砂,为居红土矿床主要硼矿层,矿体长度变化为200~350 m,宽为75~375 m,品位介于8.4%~40%。

硼矿分布总体呈现以下规律:矿区内硼矿化受地层控制,矿体多分布于低洼潮湿的黏土层或砂质黏土层上部,反应稳定沉积环境;碎屑沉积物呈正粒序变化,由深部至地表,碎屑颗粒由粗变细,最终出现化学沉积;受凹地形控制,自边缘向中心,碎屑颗粒由粗变细。

2.3 盐类矿物组合

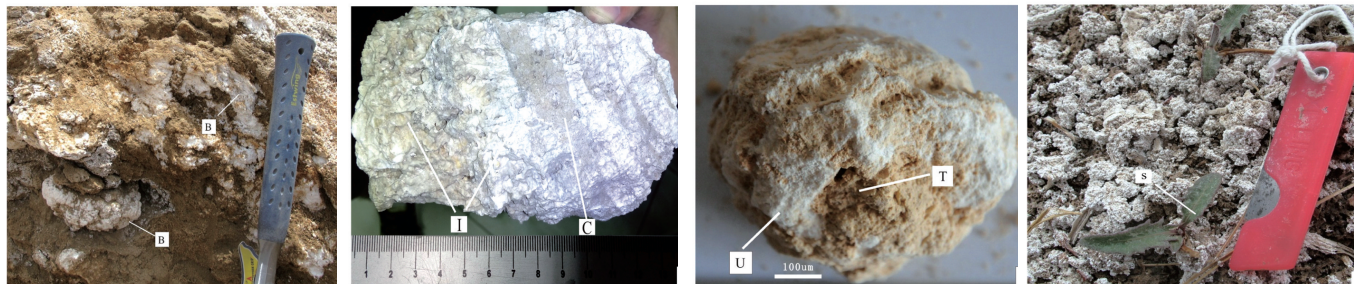
居红土硼矿地处青藏高原高海拔地区,高寒的独特地理

优势,使该矿床产出多种盐类矿物组合。其中钠硼解石是区内主要硼矿物,分布广泛,主要产于小型洼地 Q_{III} 化学沉积物中,大多呈星散状或透镜状产出,构成主要硼矿层(图7(a))。板硼石(图7(b))则产于钠硼解石矿层边缘和黏土砂砾层交界处,而库水硼镁石仅见于个别钻孔(如Ck28、Ck79)^[15,16],产于 Q_{III} 地层中上部的含黏土砂及碳酸质黏土硼矿层中,偶见与板硼石、硼砂共生。

区内诺硼钙石含量极少,本矿区为诺硼钙石第二产地,矿物常呈细鳞片状或细板状透明晶体聚合体与钠硼解石一起生于板硼石晶洞中,根据其伴生关系与产出状态,推测为板硼石次生变化产物。

祁连山石主要产于居红土硼矿床下部的瘤状钙华层中,与上部钠硼解石主矿层以黏土-碎屑沉积层相隔,矿物见于钻孔CK16(7.78~12.59 m)^[17]和ZK2-03孔(23.80~25.69 m)^[16]层位,风化后变成团块状三方硼砂粉末和天然碱集合体(图7(c))。

硼砂主要见于矿区洼地黏土、砂砾石及碳酸盐等堆积物中,与芒硝紧密共生,并与钠硼解石同为开采对象。此外,现代泉水出露及流经之处、泥火山四周的硼砂全部见于地表(图7(d)),为含硼较高的泉水或河水浓缩后形成。



(a) 含钙华砂质黏土中的钠硼解石 (b) 板硼石集合体夹薄层石灰华 (c) 祁连山石风化后的粉末团块 (d) 地表硼土和硼草

B—钠硼解石;U—天然碱;T—三方硼砂;S—硼草;I—板硼石;C—石灰华

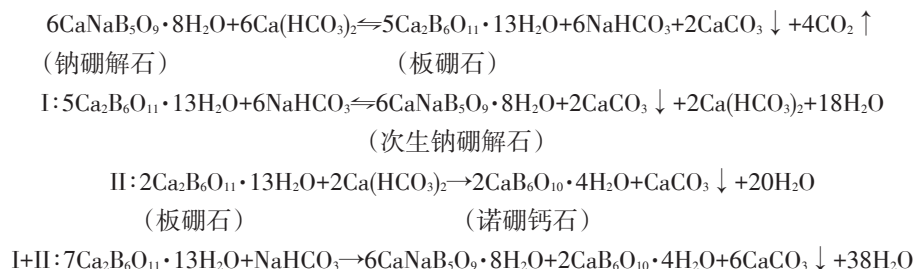
图7 居红土矿区矿石照片

Fig. 7 Photos of the B-bearing ores in the Juhongtu boron ore district

2.4 矿物生成顺序

本区发现钠硼解石、库水硼镁石、板硼石等多种硼矿物。据野外实地及室内资料综合分析结果,各矿物可能具有以下生成顺序。钠硼解石、结核状库水硼镁石较早形成,钠

硼解石次生变化形成板硼石及硼砂,板硼石次生变化结果形成诺硼钙石及次生钠硼解石。同时析出部分次生碳酸盐矿物。据实验资料表明,诺硼钙石在溶液含 B_2O_3 浓度较高条件下才形成。硼酸盐矿物次生变化过程为



3 样品采集与试验方法

3.1 样品采集

为保证样品采集质量,沉积物样品均取自于矿区及河流南北两岸新鲜剖面,按0.5 cm间隔取样,光释光测试样品用钢管采集,锡纸密封保存。

水化学样品除采自矿区矿坑和泥火山口外,塔塔棱河及其支流上、中、下游系统采样,采集容器为矿泉水瓶,采集前容器用河水清洗3次,每种样品采集500 mL 2瓶。

3.2 测试方法

沉积物及岩石主量元素测试在国家地质实验测试中心完成,其中B测试利用X射线荧光光谱仪(JY/T 015—1996标准)完成,Al₂O₃、CaO、K₂O、MgO、MnO、Na₂O、SiO₂等利用等离子光谱仪(GB/T 14506.28—2010标准)完成。Rb、Sr、Li、Cs等微量元素利用X射线荧光光谱仪(DZ/T 0223—2001标准)

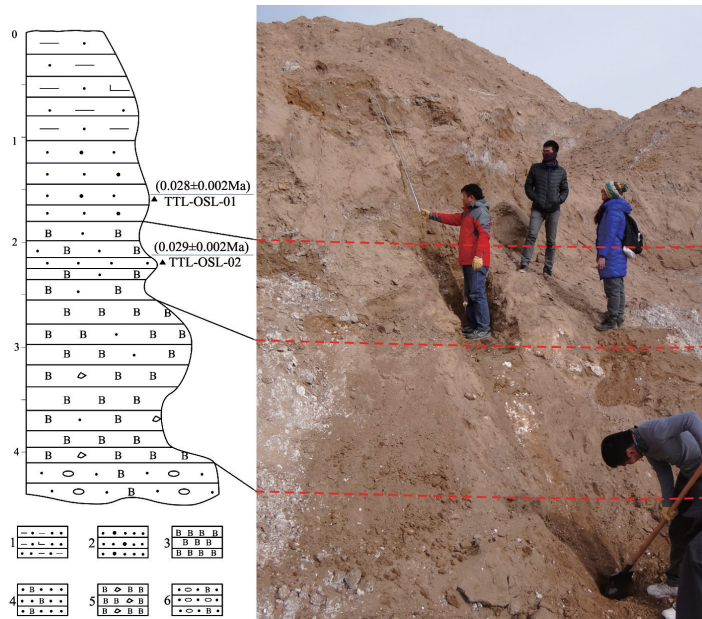
完成。

水化学分析在国家地质实验测试中心进行,其中Cl⁻、CO₃²⁻、HCO₃⁻、SO₄²⁻执行GB/T 8538—2008标准,Ca²⁺、K⁺、Mg²⁺、Na⁺、B执行JY/T 015—1996标准,Br、Cs、Li、Rb、Sr、I等采用等离子质谱仪进行,执行DZ/T 0223—2001标准。

4 结果与分析

4.1 光释光年代学

光释光样品在中科院青海盐湖所光释光测年实验室完成。用于测年的样品取自居红土新鲜剖面含硼矿层上下部位(图8),测试年龄分别为(0.028±0.002)Ma、(0.029±0.002)Ma,由于硼矿主体产自细粒砂砾石内部或上部,由富硼水稳定环境下结晶生成。因此,硼矿主矿体形成晚更新世晚期距今约28 ka或略早于该年龄。



1—钙质胶结泥质砂岩;2—含粗砾细砂岩;3—硼矿层;4—含硼细砂岩;5—含冰硼矿层;6—含硼粗砾石砂岩

图8 居红土实测剖面

Fig. 8 Measured stratigraphic section of Juhontu

4.2 岩石化学特征

居红土矿区基底出露灰白色粗粒斑状花岗岩和肉红色斑状花岗岩,节理发育,可见黑色电气石脉贯入,据邱盛南1979年资料,该区花岗岩B含量可到达2000~3000 μg/g^[18],本文对居红土矿区花岗岩样品进行含硼量分析(表1)。

表1中文献[17]光谱半定量数据换算所得,另外两个样品在国家地质实验测试中心用常规高温酸溶法测得。B在高温酸溶条件下极易挥发,因此实际B含量可能比表中数据高,可以看出,矿区内岩石B含量相对较高,比A·II·维诺格拉多夫1962年的地壳克拉克值(1~15 μg/g)要高几倍到数十倍。

由于B趋向于在岩浆晚期富集,哈克盆地含电气石花岗

岩中B含量很高,岩石节理发育,富B热液沿节理面贯入形成电气石细脉,含电气石花岗岩的形成及电气石脉的贯入,表明地下深处曾存在富B热液。

4.3 沉积物化学特征

对居红土矿区、周边矿化点及塔塔棱河南北岸湖相地层剖面系统采样,对不同类型沉积物中B₂O₃含量进行对比,结果见表2。从表2中数据可以看出,雅沙图地区B₂O₃含量比国内土壤平均含量64 μg/g^[19]高几倍到数百倍,具有明显正异常。由于B极易被地表碎屑沉积物吸附,地表水-岩相互作用携带溶滤B流经地表,随碎屑沉积物由钙质胶结物—砂砾石—硼土变化,B₂O₃含量由低变高。

表1 居红土地区花岗岩元素分析结果

Table 1 Chemical analysis results of granite in Juhongtu

样品	元素含量						
	B/10 ⁻⁶	SiO ₂ /10 ⁻²	Al ₂ O ₃ /10 ⁻²	CaO/10 ⁻²	MgO/10 ⁻²	K ₂ O/10 ⁻²	Na ₂ O/10 ⁻²
XQ-20	64.8	72.52	14.08	1.00	0.49	5.76	3.09
XQ-12	<2	70.16	16.84	0.80	0.27	0.11	10.15
文献[17]	50~100	—	—	1.80	0.83~1.6	>1.2	>1.35

表2 居红土及周围地区不同岩性含矿(B₂O₃)分析结果

Table 2 Lithology of ore containing sections in Juhongtu and surrounding area

地点	钙质胶结物	砂砾	细砂	地表黏土	含盐霜砂和砂砾	硼土
居红土	2.16	3.47	—	4.94	5.73	9.94~18.27
河南岸剖面	—	0.15	—	0.90~1.78	1.40~5.67	—
河北岸剖面	0.09	0.1~0.12	0.10~0.12	0.12~0.16	—	—
乌兰保姆	0.03~0.05	0.08~0.16	0.09~0.23	0.12~0.26	0.27~0.41	1.08~1.86
靠条灶火	—	0.01~0.02	0.02~0.05	0.05~0.09	0.01~0.05	—

4.4 水化学特征

塔塔棱河是大、小柴旦两个湖盆的重要补给源,由于B、Li等含量高低具有一定的相关性,本文通过对塔塔棱河流域硼矿坑积水、泥火山喷出水、河水、泉水(包括温泉水)以及大小柴旦湖水进行B、Li等含量进行测试,结果如表3所示。

由表3可以看出,塔塔棱河流域主干和支流河水中硼的质量浓度在2~4 mg/L,为世界平均河水的200~400倍;Li的质量浓度为0.07~0.2 mg/L,亦远大于世界河水的平均值;泥火山喷出水硼质量浓度分别为65.4、221 mg/L,质量浓度大者接近于大柴旦硼矿晶间卤水硼质量浓度。据钻孔资料记载^[6],在乌保图和乌兰保姆地区60~70 m第四纪砂砾黏土层下的承压水,B₂O₃质量浓度分别可达550.41、236.18 mg/L,而泥火山口泉水B₂O₃质量浓度分别为534、236 mg/L,火山口泉水和地下承压水硼含量十分接近。

通过对火山口泉水化学分析配盐结果(表4)可知,其矿物组合为石盐、钠硼解石、少量芒硝以及大量碳酸盐,与居红土硼矿盐类矿物组合相类似。由于居红土、乌兰保姆和乌保图泥火山沿NWW向串珠状分布,与区内主断裂构造方向一致,推测水中的B物质来自与深循环地下水接触的围岩,且该地下水可能与居红土硼矿床具有一定成因联系。

表3 塔塔棱河流域B、Li质量浓度

Table 3 Contents of B/Li for water samples in Tataleng

River basin		mg/L	
地点	B	Li	
小柴旦湖水	118	59.7	
大柴旦晶间卤水	298	6	
泉水	塔塔棱河南岸泉水	3.89	0.16
	大柴旦北温泉水	40	3.5
矿坑积水	居红土矿坑积水	144	0.9
泥火山水	乌兰保姆泥火山	221	6.54
	乌保图泥火山	65.4	3.47
河水	塔塔棱河出山口	3.14	0.2
	塔塔棱河下游	4.04	0.19
	居红土硼矿附近河水	2.41	0.08
	乌兰保姆附近河水	2.14	0.07
世界河水	0.01	0.0011	
世界海水	4.45	0.17	

表4 泥火山口泉水化学分析配盐结果

Table 4 Salt blending on the basis of the chemical composition of the water from mud volcano

采样地点	NaCl	NaCaB ₅ O ₉ ·5H ₂ O	Na ₂ SO ₄	CaCO ₃	MgCO ₃	NaHCO ₃
乌兰保姆火山口	1310.56	1656.81	1.45	142.64	998.87	588.26
泥火山口冰下	1084.71	490.30	92.41	745.45	2334.17	1098.31
乌保图火山口东侧水坑	3748.69	82.29	567.78	0.00	2070.58	1658.57

4.5 硅华成分

通过居红土矿区工作,在矿坑下部及人工堆积物中,发现层状硅钙华,薄层状集合体产出,发育小型揉皱和爆破角砾构造。层状缝隙中充填钠硼解石,滴酸起泡。挑选较纯样品进行化学分析表明,其中B为 7.479×10^{-3} ,Li为 1.22×10^{-4} ,Rb为 7.66×10^{-5} ,Cs为 5.6×10^{-6} ,SiO₂为0.3074,CaO为0.2574,CO₂为0.2146,H₂O为0.0335,主要成分为SiO₂和CaCO₃,其所含

稀碱金属Li > Rb > Cs,依照其在硅华中迁出能力Li⁺ < Rb⁺ < Cs^[2],证明其硅华已由原始蛋白石经过多年“老化”。

挑选较纯硅华样品进行X射线粉晶衍射实验,所用仪器为日本理学miniX射线衍射仪;测试条件为:扫描范围3°~70°,步长0.02(°)/s,所用Cu靶,40 kV,15 mA。主要谱线结果证实,硅质成分为低温石英和C蛋白石,钙质成分为方解石(图9)。

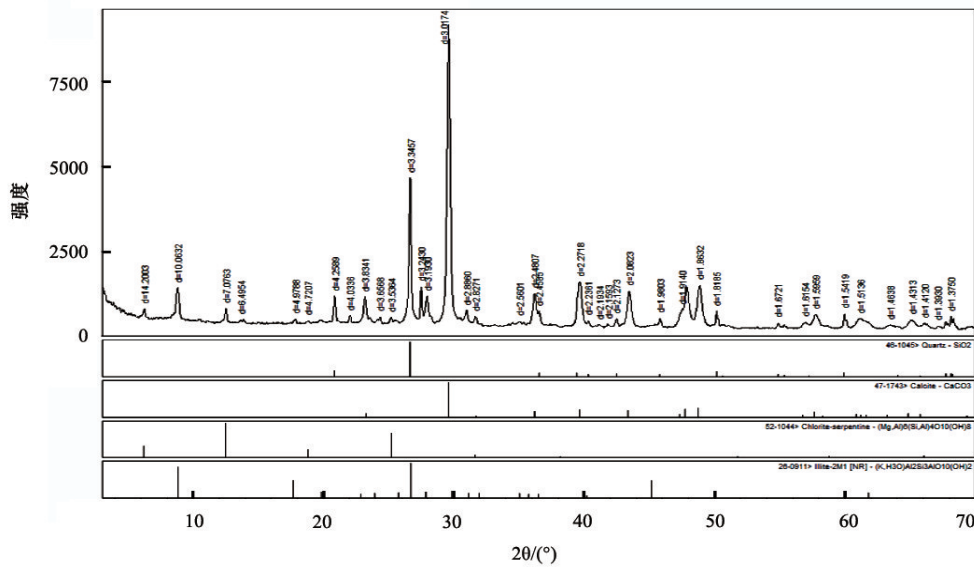


图9 居红土硅华X射线粉晶衍射图谱
Fig. 9 XRD results of geysierite

通常情况下,硅华是富SiO₂热水流体至地表后温度骤降,SiO₂溶解度降低后在热泉口沉积形成。如云南腾冲现代热泉、西藏塔格架铯硅华等^[20]。由于SiO₂溶解度与温度关系密切,相同温度下,SiO₂类质同象溶解度从小到大依次为石英、方石英和鳞石英、蛋白石(opal)^[4,21,22]。本文所研究硅华X射线粉晶衍射结果显示,SiO₂矿物是石英和方石英,是成熟化过程后期产物,据文献[1]研究结果,该种矿物应该是温度大于180℃的热水快速降温的产物,也就是说居红土地区热泉温度较高(>180℃)。

4.6 碳酸盐碳氧同位素

郑绵平等^[1]1989年曾经对居红土矿区碳酸盐沉积物进行δ¹³C PDB和δ¹⁸O PDB分析,并将结果与海水、西藏部分盐湖碳酸盐进行对比(表5)。

对矿区碳酸盐碳氧同位素分析结果显示,该区δ¹³C值明显高于海相碳酸盐和湖底钙镁碳酸盐的平均值,而δ¹³C随碳原子氧化程度增加而增大^[23,24],Keith等^[25,26]认为自寒武纪以来δ¹³C值没有显著变化,用δ¹³C数据确定古盐度是可行的。按Keith等提出的利用δ¹³C区分海相石灰岩和淡水石灰岩公式:Z=2.048(δ¹³C+50)+0.498(δ¹⁸O+50),计算结果为Z=151.647,其值大于120,远大于海相碳酸盐成岩盐度。可能是因为居

红土洼地为闭流洼地,浅水环境氧化程度较高,汇水后蒸发浓缩为高盐度咸水,所以计算Z值很高。

表5 居红土碳酸盐与其他类型沉积物的δ¹³C和δ¹⁸O对比
(据文献[1],略有修改)

Table 5 δ¹³C-δ¹⁸O comparison between Yashatu calc-sinter and other kinds of sediments (According to the reference[1])

类别	δ ¹³ C PDB/%	δ ¹⁸ O PDB/%	测定者
居红土碳酸盐	0.88(2)	1.27(2)	吴静淑等
海相碳酸盐	-0.32 ~ 0.52	-0.1 ~ -0.2	
淡水碳酸盐	-0.493±0.274	-1.0 ~ -0.4	
海相和非海相有机物	-0.500~-3.00	—	
西藏班戈湖现代温泉钙华	0.405(2)	-2.025(2)	吴静淑等
西藏盐湖湖底钙镁碳酸盐	0.49(8)	-0.15(8)	吴静淑等
西藏色林湖早全新世湖相腹足类化石(文石)	-0.41(1)	-1.29(1)	吴静淑等

注:表中括号内数字表示样品数。

该地区碳酸盐沉积物 $\delta^{18}\text{O}$ 值远高于海水和西藏现代温泉,由于碳酸盐沉积物中氧同位素分布取决于介质温度, $\delta^{18}\text{O}$ 每降低0.1%,温度升高 4°C ^[24],居红土地区钙华 $\delta^{18}\text{O}$ 不但大大高于西藏现代温泉(-2.025%),而且高于西藏现代盐湖湖底钙镁碳酸盐沉积(-0.15%),且钠硼解石在低温条件下的低硫酸盐、富NaCl溶液中更易生成^[27,28],加之矿区钙华多位于硼矿下部并与冰块共生,因此可判断硼矿沉积于低温、咸水环境。

5 讨论

5.1 主要物源分析

1) 岩石和地层风化淋滤。雅沙图地区花岗岩B含量具有极高正异常,且岩石裂隙发育,内部生长黑色富B矿物-电气石。由于硼元素本身具有高电离势和小离子半径^[1],在表生作用下可形成易溶物析出,经地表长期水-岩作用,必有一定量的B被淋滤、迁移到沉积洼地。

肖应凯等^[30]1999年对大柴旦湖水研究证明,湖水中 $\delta^{11}\text{B}$ 均值(0.96%)明显低于海水 $\delta^{11}\text{B}$ 均值(40%),证明了湖水补给非海相来源,而从围岩及沉积物中快速淋滤下来的硼具有低的 $\delta^{11}\text{B}$ 值和高的B/Cl比^[31]。该区花岗岩裂隙较为发育,裂隙泉及支流河水汇水于塔塔棱河,作为大、小柴旦的主要供水源,其B/Cl比与 $\delta^{11}\text{B}$ 值成负相关的水化学特点证明周围岩石和地层的淋滤作用对矿区B富集起到一定作用。

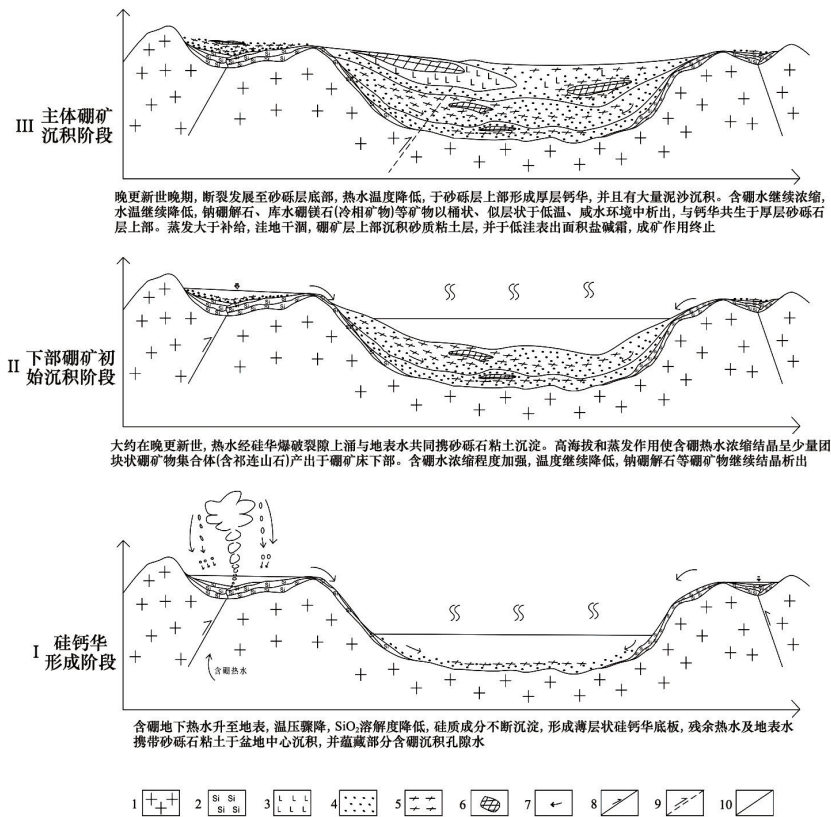
2) 富硼地下水。塔塔棱河各补给水中,以温泉和泥火山水含硼最高,由塔塔棱河上下游河水中含硼量对比可知,泥火山和活动地下水对周围B富集有重要作用。由于居红土与泥火山均循NWW断层带发育,火山水配矿结果证明火山水组分与居红土硼矿物组合具有相关性。据郑绵平早期研究^[3],该地区泥火山水型与国外及西藏雅鲁藏布江某些“岩浆型”地热水相似,且该区水化学以富B、Li而贫Br、I为特征,接近地壳 $\sum\text{Ce}/\sum\text{Y}$ 比值(2.78)^[7]。推测与深循环地下水浸滤围岩有关。

由于泥火山水及塔塔棱河南、北岸湖相地层硼含量较高,本着“溯源找矿”认识,有必要对周围地下水进行详细普查,进行蒸发实验分析,并对塔塔棱河流域周围岩层、沉积物等B含量异常调查分析,进一步揭露湖相地层分布,圈定湖盆范围,同时结合地质、物化探手段,探讨富硼地下水开采及有无原生湖相沉积固体硼矿床可能性。

5.2 成矿过程

居红土硼矿床形成经历含硅、钙质高温热水蒸发沉积至硼矿主体低温蒸发富集整个过程(图10),并按沉积规律将其形成过程划分3个阶段。

第I阶段,硅钙华形成阶段:含硼地下热水升至地表,由深部高温、高压环境骤变为较低温压和强蒸发的沉积环境,水温低于 SiO_2 可溶解温度,硅质成分不断凝结沉淀,形成薄层



1—花岗岩;2—硅华;3—钙华;4—砂砾石;5—砂质黏土;6—硼矿;7—水流方向;8—活动断裂;9—隐伏断裂;10—封闭断裂

图10 居红土硼矿床成矿阶段示意

Fig. 10 Metallogenetic period of boron ore in Juhongtu area

状硅华,构成硼矿床底板,残余热水及周围地表水携带砂砾石黏土于盆地中心沉积,形成薄层砂砾石黏土沉积层。

第II阶段,下部硼矿初始沉积阶段:大约在晚更新世,硅钙华阻隔部分热水通道,热水经爆破裂隙上涌与地表水共同携带砂砾石黏土继续沉淀。在高海拔和蒸发作用影响下,前期砂砾石黏土中含硼热水浓缩结晶而有少量团块状硼矿物(含祁连山石)产出于硼矿床下部。由于沉积环境相对稳定,在其上部形成薄层黏土层。随含硼水浓缩程度加强,温度继续降低,钠硼解石及板硼石等矿物随之结晶析出,与下伏硼矿层经砂质黏土层相隔。

第III阶段,主体硼矿沉积阶段:晚更新世晚期,水热活动减弱,断裂系统变化,于砂砾层上部形成厚层钙华,周围补给水源大量涌入,大量泥沙沉淀。在气候寒冷偏干条件下含硼水继续蒸发浓缩,水温继续降低,钠硼解石、库水硼镁石(冷相矿物)、板硼石等矿物以桶状、似层状于低温、咸水环境中析出,与钙华共生于厚层砂砾石层上部,构成主矿床。由于蒸发大于补给,洼地积水慢慢干涸,硼矿层上部沉积砂质黏土层,并于地势低洼地表出露大面积盐碱霜,成矿作用终止。

6 结论

1) 哈克盆地断裂构造发育,NW-NNW向逆冲断裂和NE向断裂控制硼矿化的形成和分布,各硼矿化点间具成因联系。

2) 居红土硼矿主体分布在最大的沉积洼地,硼矿层分布受地层控制:垂向上,富硼矿皆沉积于细粒沉积物之上,为稳定沉积产物,随赋矿地层碎屑粒度由粗变细, B_2O_3 品位由贫变富;横向上由洼地中心向边缘,矿层由中心透镜状向边缘变薄尖灭。

3) 盆地内岩石、沉积物及水系B含量较其他地区具明显正异常,湖水中硼来源为周围岩石、沉积物快速淋滤,B/Cl比与 $\delta^{11}B$ 值成负相关的非海相来源特征,另该区水型与西藏、青海等地某些“岩浆型”地热水相似,其水化学富B、Li而贫Br、I,接近地壳 $\sum Ce/\sum Y$ 比值,成矿元素主要来自深部热水及富硼基岩。

4) 居红土矿床底板硅钙华XRD分析证实,硅钙华底板为深部热水快速降温产物,碳酸盐沉积物碳氧同位素分析得出主矿体形成于温度较低、咸度较高环境,综合矿层分布特征,将矿床形成过程划分3个阶段:硅钙华底板沉积阶段;下部硼矿初始沉积阶段;主体硼矿沉积阶段。硼矿约形成于晚更新世 ≥ 28 ka。

5) 应加强盆地周围沉积物及岩石B含量异常调查分析,确定其与区域河流硼异常关系;查明哈克盆地湖盆范围,寻找有无原生沉积硼矿床存在,并对乌保图、乌兰保姆地区地下水进行B蒸发实验,探讨地下水找硼可能性。

致谢 野外工作得到中国地质科学院矿产资源研究所王海雷、中国地质大学(北京)林勇杰帮助;论文写作过程中,中国地质科学院矿产资源研究所叶传永对本文初稿提出诸多宝贵意见和建议。

参考文献(References)

- [1] 郑绵平, 向军. 青藏高原盐湖[M]. 北京: 科学出版社, 1989: 61-329.
Zheng Mianping, Xiangjun. Salt lakes of Tibet plateau[M]. Beijing: Science Press, 1989: 61-329
- [2] 郑绵平, 张雪飞, 侯献华, 等. 青藏高原晚新生代湖泊地质环境与成盐成藏作用[J]. 地球学报, 2013, 34(2): 129-138.
Zheng Mianping, Zhang Xuefei, Hou Xianhua, et al. Geological environments of the late cenozoic lakes and salt-forming and oil-gas pool-forming actions in the Tibetan Plateau[J]. Acta Geoscientica Sinica, 2013, 34(2): 129-138.
- [3] 郑绵平. 中国矿床-温泉喷气硼矿床: 青海雅沙图硼矿床[M]. 北京: 地质出版社, 1992: 76.
Zheng Mianping. China deposits-Spring boron deposit: boron of Yashatu, Qinghai[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1992: 76.
- [4] 郑绵平, 王秋霞, 多吉, 等. 水热成矿新类型—西藏铯硅华矿床[M]. 北京: 地质出版社, 1995: 14-26.
Zheng Mianping, Wang Qiuxia, Duo Ji, et al. A new hydrothermal mineralization type—Tibet cesium sinter ore deposit[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1995: 14-26.
- [5] 杨贵林, 张静娴. 柴达木盆地水文特征[J]. 干旱区研究, 1996, 13(1): 7-13.
Yang Guilin, Zhang Jingxian. Qaidam basin hydrological characteristics arid[J]. Land Research, 1996, 13(1): 7-13.
- [6] 杨谦. 柴达木盆地硼矿[J]. 沉积学报, 1989, 7(2): 117-122.
Yang Qian. Boron ore of Qaidam basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 1989, 7(2): 117-122.
- [7] 邵世宁, 熊先孝. 中国硼矿主要矿集区及其资源潜力探讨[J]. 化工矿产地质, 2010, 32(2): 70-72.
Shao Longning, Xiong Xianxiao. The main boron ore concentration area and its resource potential in China[J]. Geology of Chemical Minerals, 2010, 32(2): 70-72.
- [8] 徐凤银, 施俊, 张少云, 等. 柴达木盆地柴中断裂带演化及其对成盆作用的控制[J]. 石油学报, 2009, 30(6): 803-808.
Xu Fengyin, Shijun, Zhang Shaoyun, et al. Evolution of Qaizhong Fault and its effects on the basin formation in Qaidam Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2009, 30(6): 803-808.
- [9] 汪祖智. 柴达木盆地北东向构造线的分布及其在石油勘探上的意义[J]. 石油勘探与开发, 1984, 5: 9-15.
Wang Zuzhi. The distribution of the north east tectonic line of Qaidam basin and its significance in oil exploration[J]. Petroleum Exploration and Development, 1984, 5: 9-15.
- [10] 姜波, 徐凤银, 彭德华, 等. 柴达木盆地北缘断裂构造变形特征[J]. 中国矿业大学学报, 2004, 33(6): 687-692.
Jiang Bo, Xu Fengyin, Peng Dehua, et al. Deformation Characteristics of Fault Structure on the Northern Fringe of Qaidam Basin[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2004, 33(6): 687-692.
- [11] 青海省地质矿产局. 青海省区域地质志[M]. 北京: 地质出版社, 1991.
Bureau of Geology and Mineral Resources of Qinghai Province. Regional geology of Qinghai province[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1991.
- [12] 周澄伟. 雅沙图居红土硼矿矿区地质勘探总结报告[R]. 海西: 青海柴达木地质队, 1959.
Zhou Chengwei. The geological exploration and summary report of Juhongtu boron ore in Yashatu district[R]. Haixi: Qinghai chaidamu geological team, 1959.
- [13] 申文环. 柴北缘塔塔楞环斑花岗岩体的特征及成因探讨[D]. 西安:

- 长安大学, 2007.
- Shen Wenhuan. The characteristics and genesis of granite rock in the northern Qaidam basin[D]. Xi'an: Chang'an University, 2007.
- [14] 卢新祥, 孙廷贵, 张雪亭, 等. 柴达木盆地北缘塔塔楞环斑花岗岩的 SHRIMP 年龄[J]. 地质学报, 2007, 81(5): 626-632.
- Lu Xinxiang, Sun Tinggui, Zhang Xueting, et al. The SHRIMP age of granite in Tataleng river of Northern Qaidam basin[J]. Acta Geologica Sinica, 2007, 81(5): 626-632.
- [15] 马宇峰. 青海省德令哈县雅沙图 614 矿物探工作结果报告[R]. 北京: 中国地质科学院矿物原料研究所, 1961.
- Ma Yufeng. The geophysical work report of the 614 boron ore in Yashatu district of De Lingha, Qinghai province[R]. Beijing: Geological Institute of Mineral Rraw Materials, 1961.
- [16] 朱镜清. 青海省德令哈市居红土硼矿点及外围普查报告[R]. 西宁: 青海省地矿局第六地质队, 1991.
- Zhu Jingqing. The geological report in Juhongtu boron mines and peripheral census of De Lingha, Qinghai province[R]. Xining: The Sixth Geological Team Mine Bureau in Qinghai Province, 1991.
- [17] 马宇峰. 青海省雅沙图西部地区硼矿地质普查初步报告[R]. 西宁: 中国科学院柴达木盐湖科学调查队, 地质部矿物原料研究所, 1960.
- Ma Yufeng. The preliminary report on boron ore geology survey in the western region of Yashatu area, Qinghai province[R]. Xining: Qaidam Salt Lake Science, Chinese Academy of Sciences Survey Team, Institute of the Geological Mineral Materials Research, 1960.
- [18] 邱盛南, 李衍霖. 青海某地硼酸盐矿床的探讨[J]. 青海地质, 1979(1): 55-64.
- Qiu Shengnan, Li Yanlin. The discussion of the borate ore somewhere of Qinghai[J]. Qinghai Geology, 1979(1): 55-64.
- [19] 刘铮, 唐丽华, 朱其清, 等. 我国主要土壤中微量元素的含量与分布初步总结[J]. 土壤学报, 1978, 15(2): 138-141.
- Liu Zheng, Tang Lihua, Zhu Qiqing, et al. The preliminary summary of the distribution and content of trace elements in soil[J]. Acta Pedologica Sinica, 1978, 15(2): 138-141.
- [20] 张天乐, 王宗良, 胡云中. 腾冲现代热泉系统硅华的矿物学特征及其地质意义[J]. 岩石矿物学杂志, 1997, 16(2): 170-178.
- Zhang Tianle, Wang Zongliang, Hu Yunzhong. The mineralogical characteristics and geological significance of sinter in Tengchong hot springs modern system[J]. Acta Petrologica & Mineralogica, 1997, 16(2): 170-178.
- [21] Fournier R O. The behavior of silica in hydrothermal solutions[J]. Review of Economic Geology, 1985, 2: 45-59.
- [22] Williams L A, Crerar D A. Silica digenesis: II. General mechanisms [J]. Sediment Petrol, 1985, 55: 312-321.
- [23] 许清华, 何起祥, 吴应林, 等. 我国西南早中三叠时间“绿豆岩”等时面上下的碳、氧稳定同位素地球化学[J]. 中国地质科学院成都地质矿产研究所所刊, 1983, 4: 4.
- Xu Jinghua, He Qixiang, Wu Yinglin, et al. Carbon and oxygen stable isotopic geochemistry of the "mung bean rock" in the early Triassic time, southwest China[J]. Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, 1983, 4: 4.
- [24] 陈锦石, 陈文正. 碳同位素地质学概论[M]. 北京: 地质出版社, 1983: 79, 83.
- Chen Jinshi, Chen Wenzhong. The Carbon isotope geology introduction [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1983: 79, 83.
- [25] Keith M H, Weber J N. Isotopic composition and environment classification of selected limestone and fossils[J]. Geochimica Cosmochimica Acta, 1964, 28: 1787-1816
- [26] 邵龙义. 碳酸盐岩氧、碳同位素与古温度等的关系[J]. 中国矿业大学学报, 1994, 23(1): 39-42.
- Shao Longyi. The relationship between Carbonate oxygen, carbon isotopes, and paleotemperature[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 1994, 23(1): 39-42.
- [27] 高春亮, 余俊清, 展大鹏, 等. 柴达木盆地盐湖硼矿资源的形成和分布特征[J]. 盐湖研究, 2009, 17(4): 6-12.
- Gao Chunliang, Yu Junqing, Zhan Dapeng, et al. The formation and distribution characteristics of salt lake boron ore resources, Qaidam basin[J]. Salt Lake Research, 2009, 17(4): 6-12.
- [28] Sun D P. Origin of the Borate Deposits under the Condition of Hypergenesis [J]. Journal of Salt-lake Research, 2002, 10(1): 46-58.
- [29] Craig H. The measurement of oxygen isotope paleotemperatures[M]// Tongiorgi E. Stable Isotopes in Oceanographic Studies and Paleotemperature. Pisa: V. Lishi E F, 1965: 9-130.
- [30] 肖应凯, Shirodkar P V, 刘卫国, 等. 青海柴达木盆地盐湖硼同位素地球化学研究[J]. 自然科学进展, 1999, 9(7): 612-618.
- Xiao Yingkai, Shirodkar P V, Liu Weiguang, et al. The boron isotope geochemical study of salt lakes in Qaidam basin, Qinghai[J]. Progress in Natural Science, 1999, 9(7): 612-618.
- [31] Vengosh A, Kolodny Y, Starinsky A, et al. Coprecipitation and isotopic fractionation of boron in modern biogenic carbonates[J]. Geochemical Cosmochimica Acta, 1991, 55: 2591-2606.

(责任编辑 刘志远)

《科技导报》“综述文章”栏目征稿

“综述文章”栏目发表对当前自然科学有关学科领域的研究热点、前沿分支发展现状及动向的评述性文章。要求在所属学科领域从事比较深入研究的一线科研人员在研读相当数量文献资料的基础上, 全面、深入、系统地论述该领域的问题, 并对所综述的内容进行归纳、分析、评价, 以反映作者的观点和见解。在线投稿: www.kjdb.org。