

# 中安第斯地区蒸发岩矿床成矿作用特征及构造背景

周洁, 姚仲友, 赵晓丹

ZHOU Jie, YAO Zhongyou, ZHAO Xiaodan

中国地质调查局南京地质调查中心, 江苏 南京 210016

Nanjing Center, China Geological Survey, Nanjing 210016, Jiangsu, China

**摘要:**在中安第斯高原,包括玻利维亚西部、智利东部、阿根廷北部分布众多的盐湖,湖中含丰富的B、K、Li、Mg和其他蒸发盐类物质,封闭的盆地因蒸发作用使残留盐水中的成矿元素聚集并沉淀。这些矿床的形成与安第斯山的隆起和气候变化关系密切。通过对该区蒸发岩型矿床的分布特征及成矿特征进行研究,讨论其形成的构造背景,分析成矿要素和找矿方向。

**关键词:**构造背景;成矿特征;蒸发岩;中安第斯

**中图分类号:**611 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-2552(2017)12-2208-05

**Zhou J, Yao Z Y, Zhao X D. Metallogenic characteristics and tectonic setting of evaporite deposits in Central Andes. *Geological Bulletin of China*, 2017, 36(12):2208-2212**

**Abstract:** Several salt lakes are distributed in central Andean plateau which includes western Bolivian, eastern Chile, and northern Argentina. These lakes are rich in B, K, Li, Mg and other evaporites. Ore-forming elements experienced accumulation and precipitation after evaporation in the closed basin. The formation of these deposits was closely related to the uplift of Andean and climate change. In this paper, through the research on the distribution characteristics and metallogenic characteristics of the evaporate deposits, the authors discussed the tectonic background, analyzed metallogenic elements and proposed the prospecting direction.

**Key words:** tectonic setting; metallogenic characteristics; evaporite deposits; Central Andes

蒸发岩矿床指水盆地中溶解度较大的无机盐类,通过蒸发浓缩产生各种盐类矿物沉淀形成的矿床,主要是钾、钠、镁、钙的氯化物,硫酸盐、重碳酸盐、碳酸盐、硼酸盐、硝酸盐等,因此又称盐类矿床。盐类矿床包括固体蒸发盐矿床和液态卤水矿床。卤水矿床可以是地下深部含盐岩系中的埋藏卤水,也可以以盐泉形式出露地表,在现代盐湖中有湖表卤水(盐湖)、盐层内的晶间卤水和孔隙卤水<sup>[1]</sup>。盐湖是特定自然地理和地质环境下的产物,通常发生在水体演化的后期阶段,由淡水湖-咸水湖演变而来,是在干旱和强烈蒸发的气候及封闭或半封闭的水文条件下形成的含盐量较高的水体(含

盐度NaCl>3.5%,大于海水平均盐度)。另外,与淡水湖泊不同,盐湖矿化度高,蕴含大量的锂、钾、硼、锶、镁、钙等可利用的盐矿资源,具有重要的经济价值<sup>[2]</sup>。根据全球知名矿业咨询机构SNL Metals Economics Group的统计,盐湖卤水型锂矿约占全球锂矿总储量的78%,而就经济可采储量而言,其占比高达91%,是全球最重要的锂矿床类型。南美地区是全球卤水锂资源最丰富的地区,约占世界卤水锂资源的85%,主要分布在普纳高原,包括玻利维亚(900×10<sup>4</sup>t)、阿根廷(650×10<sup>4</sup>t)和智利(750×10<sup>4</sup>t),被称为世界锂三角地区。在中安第斯高原,包括玻利维亚西部、智利东部、阿根廷北部分布有众多的

收稿日期:2017-03-20;修订日期:2017-09-1

资助项目:中国地质调查局项目《海上丝绸之路大洋洲和南美洲矿产资源潜力评价》(编号:DD20160110)

作者简介:周洁(1979-),女,博士,高级工程师,岩石学、矿物学、矿床学专业。E-mail:zhoujie0517@sina.com

盐湖资源,这些盐矿床的形成与安第斯山的隆起和气候变化关系密切。本文对该区蒸发岩型矿床的分布特征及成矿特征进行研究,讨论其构造背景,分析成矿要素和找矿方向。

## 1 中安第斯高原代表性盐湖特征

中安第斯地区位于环太平洋成矿域东南部,在全球构造-岩浆作用与成矿关系研究中具有重要地位。中安第斯造山带中发育一系列南北走向的山脉和盆地,主要地貌构造从西到东为(图1):海岸山脉→中部洼陷→多梅科山→前安第斯盆地→西科迪勒拉→东科迪勒拉<sup>[3]</sup>。阿尔蒂普拉诺-普拉高原是分隔东西科迪勒拉的主要山间盆地。在新生代阿尔蒂普拉诺-普拉高原抬升和安第斯火山弧发育过程中,在中安第斯地区聚集了大量的蒸发岩。石盐和石膏为主要盐类矿物,一些地区还分布有重要经济价值的硼酸盐。

### 1.1 玻利维亚乌尤尼盐湖

玻利维亚位于南美洲中偏西部,属于内陆国家,地形以高原为主,海拔多在3000m以上。安第斯成矿带纵贯玻利维亚南北,矿藏十分丰富,其锂资源储量 $1\times 10^8$ t,居世界首位,已发现的锂矿资源多为现代盐湖中含锂卤水,在当前拉美地区锂资源中占有十分重要的地位。主要地层为海相沉积的奥陶系和志留系,陆海交互相的白垩系红色砂岩和粘土沉积,以及第四系河流冲积及残坡积物。

玻利维亚的盐湖主要分布在安第斯高原上,海拔3000~5000m,由于火山岩、玄武安山岩沉积等大陆成因的陆源,经风雨侵蚀形成湖区的同时,湖区卤水中也富含Li、B、K等元素,属南美洲安第斯高原形成的全球罕见的硫酸镁型硼锂盐湖群,众盐湖锂资源总储量约 $1\times 10^8$ t,居世界首位,极具研究和开发价值。其中,乌尤尼(Salar de Uyuni)与科伊巴萨(Salar de Coipasa)盐湖属目前发现的世界罕见的特大型多元素液态矿资源宝藏,盐湖富锂且具有锂浓度高、共生元素多、综合利用价值高等特点<sup>[4]</sup>。

乌尤尼盐湖是玻利维亚最大的盐沼。在波托西省西部高原内,海拔3656m,东西长约250km,南北宽约100km,面积达 $10582\text{km}^2$ 。与北面的科伊巴萨盐湖隔山相望,与安第斯科迪勒拉其他盐湖群同属于后弧挤压盆地大陆型盐湖。湖内日光蒸发强烈,年均蒸发量在1700mm左右,降雨量仅为

100mm左右,卤水Li平均浓度约0.053%,杂质含量较低,是全球资源量最大的盐湖卤水型锂矿床,资源量(以 $\text{Li}_2\text{O}$ 计)约为 $1800\times 10^4$ t,探明储量为 $550\times 10^4$ t,卤水浓度 $80\times 10^{-6}\sim 1150\times 10^{-6}$ 。

对乌尤尼盐湖的锂钾等经济元素资源进行了新的预测,盐湖中最主要的资源是盐,约含 $710\times 10^8$ t,锂储量 $1400\times 10^4$ t,钾 $2.26\times 10^8$ t,镁 $2.29\times 10^8$ t,硼 $590\times 10^4$ t,其中盐湖卤水表层矿产储量为钾 $1.1\times 10^8$ t,锂 $550\times 10^4$ t,镁 $729\times 10^4$ t,硼 $320\times 10^4$ t,该盐湖是目前地球上最大的锂、钾、硼、镁卤水溶液库<sup>[6]</sup>。

### 1.2 智利阿塔卡玛盐湖

智利位于南美洲西南部、安第斯山脉西麓,东面与阿根廷接壤且边境线很长,南面与南极洲隔海相望,西边是太平洋海岸线,北部与秘鲁、玻利维亚接壤,是世界上地形最狭长的国家。南北长约4333km,东西平均宽180km,其中最宽处486km、最窄处15km。智利北部显著的地质特点是在一系列南北走向的山脉和盆地中分布众多的咸水湖和盐壳,其中最著名的阿塔卡玛盐湖是智利最大的盐湖。根据世界范围内大多数盐湖卤水演化模型可知,由蒸发和化学分异作用大体可以分为3类卤水:碱性卤水、富硫酸盐卤水和富钙卤水。在智利北部,几乎没有碱性盐湖<sup>[5]</sup>。

阿塔卡玛盐湖位于安第斯前缘挤压盆地中(图1),海拔2300m,面积 $2900\text{km}^2$ ,年平均降水量20~50mm,年平均蒸发量3300mm以上,是全球第二大盐湖卤水型(富含硼、锂的硫酸盐型卤水)锂矿床。资源量(以 $\text{Li}_2\text{O}$ 计)约 $530\times 10^4$ t,卤水锂浓度为 $100\times 10^{-6}\sim 400\times 10^{-6}$ 。盆地中沉积了古新世—全新世陆相碎屑岩和蒸发沉积岩。阿塔卡玛盐湖中岩盐核心内既包含了富钙卤水,也包含了富硫酸盐卤水,靠近科迪勒拉前缘多梅科山的地方主要是沉积岩,充填富钙卤水,东侧靠近科迪勒拉火山的地区充填的是富硫酸盐卤水。富钙盐湖优先位于靠近沉积岩区的前科迪勒拉,它们的补给水受热力学影响很少。富硫酸盐盐湖倾向分子在西科迪勒拉火山岩区,主要由热水补给。

### 1.3 阿根廷翁布雷穆埃尔托盐湖

阿根廷共和国位于南美洲东南部,国土面积 $278\times 10^4\text{km}^2$ ,西以安第斯山脉与智利为邻,北邻玻利维亚、巴拉圭和巴西,东与乌拉圭接壤,大地构造位置属于安第斯造山带的中南部。阿根廷是世界上卤

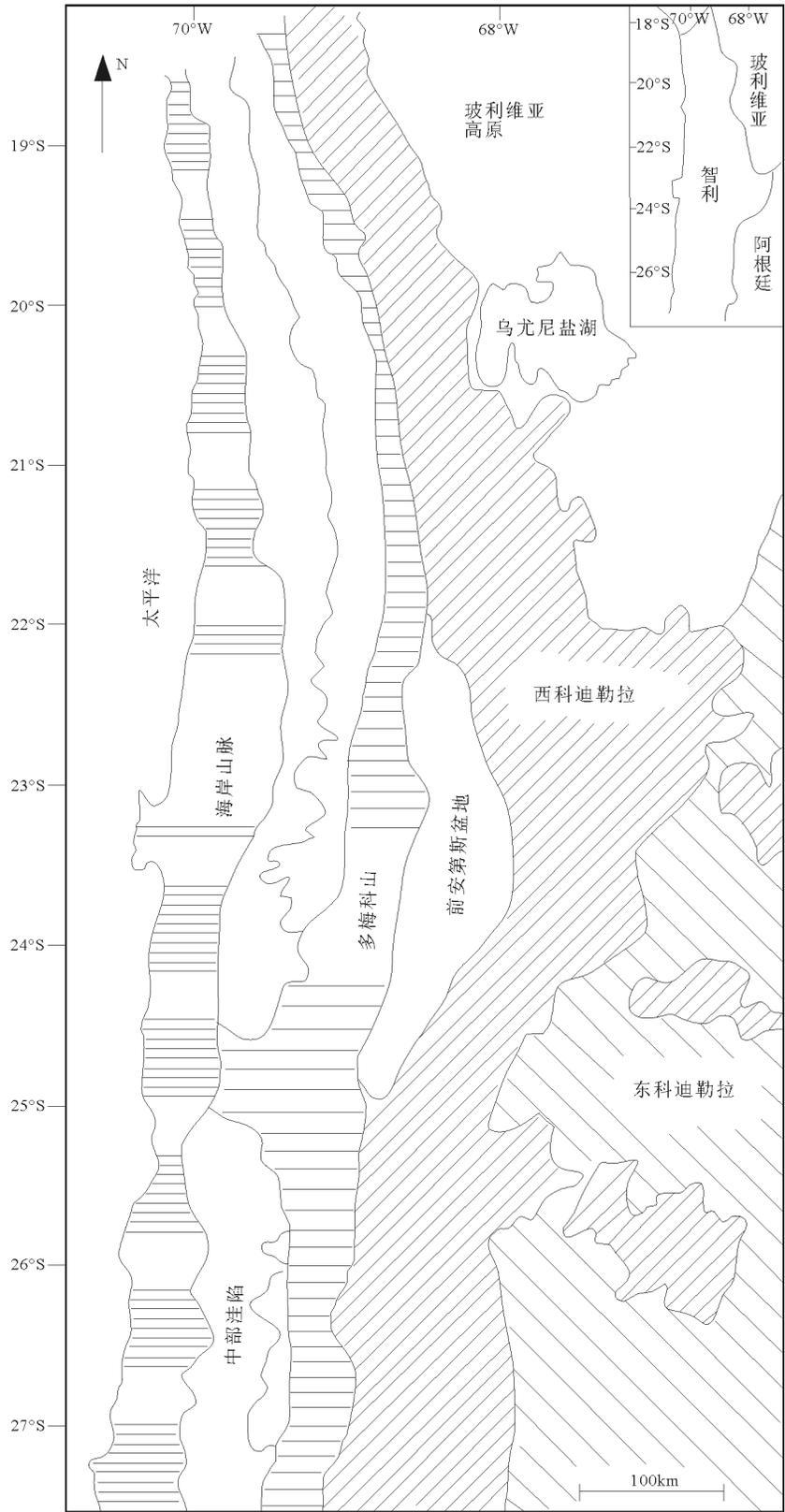


图1 中安第斯造山带地貌构造分布

Fig. 1 Geomorphological structure distribution in the central Andes orogenic belt

水锂资源丰富的国家,伴生的固体矿体中最具经济价值的是硼酸盐,20多个盐湖主要分布在阿根廷西北部的普纳(Puna)高原区。由古生代变质岩和沉积岩组成基底,其上是志留纪—泥盆纪海相沉积岩和晚古生代陆相沉积岩。中生代—古近纪沉积岩位于断陷盆地内,以陆相为主。

阿根廷翁布雷穆埃尔托盐湖位于阿根廷西北部(图2)<sup>[7]</sup>,海拔3750m,盐盆直径40km,日光蒸发强烈,年平均蒸发量约2300mm,降雨量约70mm。周边已知最早的新生代地层以碎屑岩为主,根据地层中的火山灰测得地层年龄在15~7Ma之间。盐湖绝大部分由过饱和卤水及很薄(厚度40~50cm)的盐壳构成。卤水以石盐为主,含锂0.01%~0.09%,伴生有0.34%~0.91%的钾和0.01%~0.90%的 $B_2O_3$ ,是世界第四大盐湖卤水型锂矿床,估计含锂卤水 $8000 \times 10^8 t$ ,资源量(以 $Li_2O$ 计)约 $85 \times 10^4 t$ ,浓度为 $190 \times 10^{-6} \sim 900 \times 10^{-6}$ 。卤水层位于盐壳之下,赋存在以石盐为主的盐类矿物晶体间的孔隙中。盐体中的原始晶

间孔隙在8%~10%之间,并出现含卤水的非常大的空洞,有效孔隙率平均增加到30%以上。在翁布雷穆埃尔托盐沼中,硼钠钙石是主要的硼酸盐矿物,主要以结核状出现,呈层或零散分布,以条带状出现的很少。硼钠钙石的沉积可能与浅盐湖有关,该浅盐湖接收来自地面水和地下水中的溶解物<sup>[8]</sup>。

翁布雷穆埃尔托盐湖处于内陆型封闭盆地。该盐湖水流补给主要来自盆地东南部和南部的河流,最大的一条为巴都斯河。巴都斯河流域范围主要为古生代侵入岩和新生代火山岩,这是K、Li和B元素的主要来源。盆地东北部和西部边缘的地下水也不断补充丰富的K、Li和B离子。盐湖卤水化学成分在平面上和剖面上都很均匀,在地表50m以内,卤水的K、Li含量虽有递减,但幅度很小。

## 2 成因分析

根据全球矿床分布特征可以发现,盐湖卤水型矿床形成于封闭汇水盆地内,周围新生代火山活动频繁,断层发育,围岩、岩浆热液活动、火山喷出物等提供了丰富的物质来源。在长期的地质作用和气候条件的影响下,汇聚、蒸发形成矿床。古气候证据表明,在更新世和全新世期间普纳高原的气候条件多变。更新世气候特征是湿度适当、降雨量中等,晚更新世存在一次冰期,进入全新世,气候转为持续干旱,湖泊水体逐渐萎缩咸化,至全新世逐渐干涸直至完全枯竭。

中安第斯地区构造演化特征如下。

(1)中生代,纳斯卡板块持续向南南美大陆俯冲造山,该区火山—岩浆作用最强烈,自晚三叠世至今持续不断活动,在中安第斯造山带海岸科迪勒拉、西科迪勒拉、安第斯高原和东科迪勒拉发育大范围火山—岩浆岩带,是形成该区铜、铁、金多金属成矿带的关键因素(世界上最著名的南美安第斯铜金和多金属成矿带)。

(2)从中新世开始,在安第斯中部发育了一个宽广的大陆高原和火山弧。西部以火山弧,东部为构造高地围绕形成了高原上的闭流汇水盆地。新

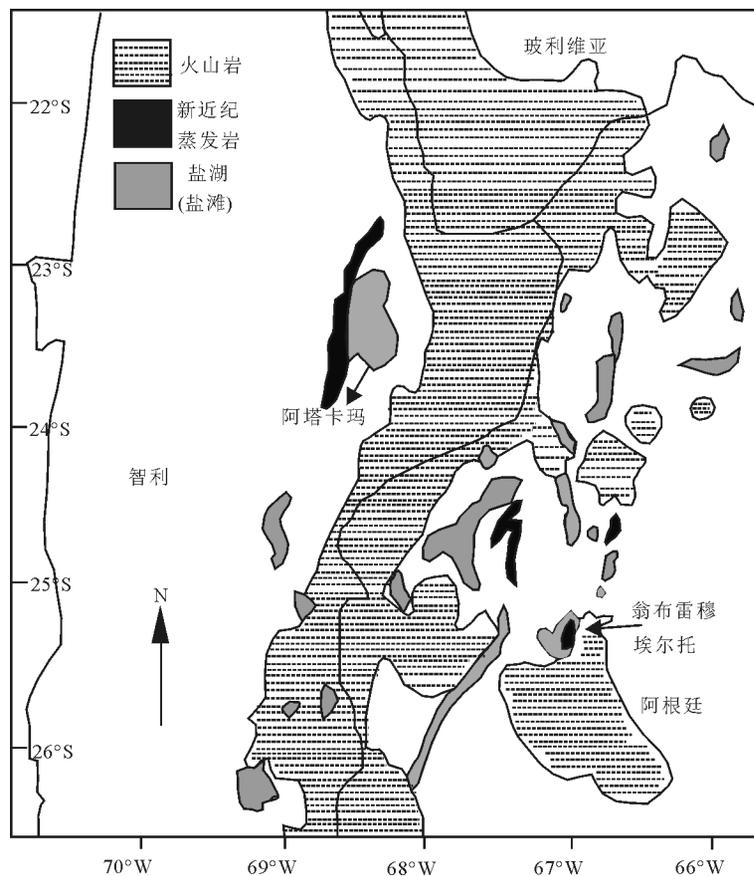


图2 中安第斯盐湖分布

Fig. 2 Distribution of Central Andes Saline Lake

近纪盆地演化、弧构造与高原抬升紧密相关。阿尔蒂普拉诺-普拉高原(基底海拔约3500m)控制着安第斯中部的自然地理。从中新世至今,沿阿尔蒂普拉诺-普拉高原的西部边缘,火山弧一直在活动。

中新世以褶皱和逆断层为特点,沉积序列显示东西向到西北西—东南东向的挤压缩短,伴随南北向到北北东向的走滑逆断层和褶皱。早中新世(2.5~1.8Ma以前)形成了岛弧岩浆,并在阿根廷生成有限的安山岩、英安岩和流纹岩,主要出现在萨尔塔、卡塔马卡、拉里奥哈、圣胡安省,在门多萨也有少量产出。相关的矿化是多金属矿。南纬30°以北被称为中央火山区(CVZ)的地方,在那里贝尼奥夫带下中新世倾斜角度逐渐变缓。因此西北方向分布的岛弧岩浆向东迁移,并控制了火山与次火山的位置。

(3)上新世的事件以较小的缩短量为特征。先是逆断层,其最大主应力方向为北西—南东向( $\sigma_1$ )及垂向的最小主应力( $\sigma_3$ ),随后是广泛的走滑断层,同样具有北西—南东向的 $\sigma_1$ 及水平方向北东—南西向的 $\sigma_3$ 。在普纳地区生成了火山喷发和相关的重要的熔结凝灰岩流体。在普纳高原形成了金矿、锡矿,有些矿床与未出露的次火山体有关。此外,还有多金属矿,斑岩型铜—金矿和金矿。常见的是与这些多金属矿化中心相关的、外围的低温热液锰矿,以及与热源相关的层控矿化。在火山岩层上部地区,常有喷气硫磺的聚集及珍珠岩体的存在。远端和温泉附近有铜矿和银矿,以及与熔结凝灰岩相关的铀矿。在普纳地区,岩浆喷发活动形成了火山口,对含蓝宝石的碱性岩石造成破坏,并部分地形成了冲积矿。锡矿的剥蚀作用也形成了冲积矿。弧后盆地,在普纳地区生成了向心盆地,并有盐类的富集,生成了硼酸盐、石膏等具有经济价值的矿床(萨尔塔的亭卡拉宇和帕斯托斯格兰德斯盆地)。

(4)晚上新世—第四纪期间,以发育正断层为特征。该区晚新生代火山作用和正断层活动使东科迪勒拉带的向东弧形迁移,在东、西科迪勒拉带之间形成一个典型的大陆边缘后弧挤压盆地系统,夷平作用产生的碎屑物质被水流搬运至山间盆地低洼处沉积下来,淡水湖泊沉积一直延续至更新世

晚期,形成了该区盐湖群的雏形。

### 3 结论

(1)在地质时代早期,盆地是物质沉降的中心,已有盐类沉积,后期该区域开始隆起,使古湖水定向迁移,而迁移方向由于构造的隆升,使得湖水受到阻隔,形成了封闭盆地。

(2)山区与盆地之间数千米的高程差形成的雨影效应使盆地内的气候条件极度干燥,来自山区的季节性河流汇流入湖后,蒸发浓缩,这是形成盐湖的重要气候条件。

(3)火山作用造成密集且持续的赋含成盐离子的热液大规模转移至盆地,加之周边老地层成盐离子的迁入和热液中盐类组分的注入,以及新生代蒸发作用形成的岩盐和石膏的直接溶解,使该地区具有丰富的盐湖卤水型矿床的成矿物质来源。

(4)中安第斯高原新近纪沉积盆地提供了寻找蒸发岩的方向,火山弧的研究不仅有构造意义,而且其内的沉积矿床具有经济潜力。

**致谢:**成文过程中得到中国地质科学院矿产资源研究所宋学信研究员的指导,在此致以谢意。

### 参考文献

- [1]翟裕生等. 矿床学[M]. 北京:地质出版社, 2011.
- [2]吕苑苑, 郑绵平. 盐湖硼、锂、锶、氯同位素地球化学研究进展[J]. 矿床地质, 2014, 33(5): 930-944.
- [3]Risacher F, Alonso H, Salazar C. The origin of brines and salts in Chilean salars: hydrochemical review[J]. Earth Science Reviews, 2003, 63: 249-293.
- [4]Chepstow-Lusty A, Bush M B, Frogley M R, et al. Vegetation and climate change on the Bolivian Altiplano between 108000 and 18000yr ago[J]. Quaternary Research, 2005, 63(1): 90-98.
- [5]Argollo J, Mourguiart P. Late quaternary climate history of the Bolivian Altiplano[J]. Quaternary International, 2000, 72(1): 37-51.
- [6]Fornari M, Risacher F, Féraud G. Dating of paleolakes in the central Altiplano of Bolivia[J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2001, 172(3/4): 269-282.
- [7]Alonso R N, Jordan T E, Tabbutt K T, et al. Giant evaporate belts of the Neogene central Andes[J]. Geology, 1991, 19(4): 401-404.
- [8]Risacher F, Fritz B. Bromine geochemistry of salar de Uyuni and deeper salts crusts, Central Altiplano, Bolivia[J]. Chemical geology, 2000, 167(3/4): 373-392.