

地球化学研究方法在钾盐找矿中的应用

时 林^{1,2} 高东林¹ 张从伟^{1,2} 张玉淑^{1,2}

(1. 中国科学院青海盐湖研究所, 青海 西宁 810008; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘 要: 钾盐是我国的紧缺矿产资源之一, 寻找钾盐资源尤其是古钾盐矿床对于我国具有重要的意义。但是由于钾盐易溶, 在地表很少有成矿标志, 所以加大了找矿的难度。通过论述地球化学方法在蒸发岩研究中的应用情况, 指出地球化学方法在寻找钾盐的过程中有着重要的应用, 其应用可以概括为: 可以判断成盐古卤水的蒸发浓缩阶段和矿床的成矿阶段、揭示盐类矿床的物质来源及其沉积环境、划分蒸发岩的沉积旋回和重现古盐湖的演化过程以及分析成盐盆地的封闭蒸发条件和氧化还原性等。云南兰坪—思茅盆地是我国最具有找钾希望的区域, 研究盆地内蒸发岩的地球化学特征对于在盆地内寻找钾盐矿床具有重要的指示意义。

关键词: 地球化学; 钾盐矿床; 找矿

中图分类号: P619.211

文献标识码: A

文章编号: 1008-858X(2012)01-0057-07

前 言

钾盐广泛应用于农肥、化工、医药、纺织、印染、制革、玻璃、陶瓷、炸药等领域, 尤其是化肥领域, 每年世界钾盐产量的90%以上用于生产钾肥^[1-2]。我国是世界钾肥消费大国之一, 而且主要依赖进口, 资料显示^[3], 2006年我国进口钾肥 6.0×10^6 t以上, 对外依存度高达85%, 2010年我国的钾肥需求量为 6.86×10^6 t, 2020年需求量将达到 9.6×10^6 t。近年来, 国际上钾肥价格飙升, 严重影响了我国农业的可持续发展, 为减少我国对进口钾肥的依赖, 保障我国的农业安全和国家安全, 急需我国地质工作者加强国内钾盐资源的勘探力度和地质资料的研究工作, 为寻找钾盐提供服务。

世界钾盐资源极为丰富, 而且国外的钾盐矿床大部分产于古代海相地层中, 储量大又便于开采, 储量折合 K_2O 为 8.3×10^9 t, 储量基础为 1.8×10^{10} t, 而且绝大部分为地下固体钾盐,

少部分为含钾卤水, 按目前的生产水平, 已探明的储量可供开采300年以上^[4-6]。目前, 我国已探明的钾资源(KCl)总地质储量为 9.9×10^8 t, 95%以上为内陆湖相沉积的液体矿, 主要分布在青海柴达木盆地和新疆罗布泊的11个现代盐湖中, 由于液体矿资源有限等原因, 在某种程度上制约着我国的钾盐生产。固体钾盐矿仅有云南勐野井钾盐矿床, 保有储量仅为 1.199×10^7 t(KCl), 对于我国这样的农业大国来说, 这点钾资源实在太有限了^[2-3, 7]。

据统计^[3], 世界上大型的钾盐矿床中, 38%的矿床是石油勘探中发现的, 19%是在研究基础上发现的, 15%是在岩盐勘探中发现的, 其他占28%, 通过基础研究发现的大型钾盐矿床不到1/4, 因此很有必要深入研究钾盐的成矿机制。盐类矿床是含有成盐元素的古卤水经过蒸发浓缩而逐渐形成的沉积型矿床, 成盐元素在特定的物理化学平衡体系下, 在蒸发浓缩过程中按照一定的析盐顺序结晶形成各种矿物, 因此, 蒸发岩矿物的化学物质组分及其含量

收稿日期: 2010-06-20

基金项目: 国家重点基础研究发展计划项目(2011CB403004); 中国科学院知识创新工程重要方向项目(KZCXZ-YW-344)。

作者简介: 时 林(1986-), 男, 硕士研究生。主要研究方向为地球化学。

与分布在一定程度上反映了这种成盐演化过程和成盐卤水蒸发浓缩时的物理化学条件。另外,不同来源的水体一般都具有特定的水化学组成,成盐过程中虽然有不同水体之间的混合或掺杂作用,但其中的一些组分(元素)仍可能保持其原始特征,研究蒸发岩矿物中这些特殊组分的含量及其变化特征,可以揭示钾盐矿床的形成规律,有利于矿床的成因研究,可以用来指导寻找钾盐矿床^[8]。蒸发岩矿物中的常量元素(K、Mg)、微量元素(Br、B、Sr、Li、Rb)和同位素($\delta^{11}\text{B}$ 、 $\delta^{34}\text{S}$ 、 $\delta^{37}\text{Cl}$)的地球化学行为常常应用于钾盐矿床的实际研究中,这些元素和同位素地球化学特征具有很好的指示成盐卤水演化和钾盐沉积演化的作用。

1 蒸发岩常量元素地球化学研究方法及其应用

K和Mg是蒸发成因盐类矿物中的常见元素,这些元素的含量及其变化直接反映了钾盐矿化程度和卤水演化过程,是找钾的重要和直接指标。

1.1 钾(K)

作为成盐元素,K的含量及其变化直接反映了卤水的成盐阶段和成盐作用的演化过程^[9],分析和研究不同岩盐中K的含量及其变化特征,对研究古卤水的蒸发浓缩过程和成盐作用的演化具有十分重要的理论意义;同时,提取岩盐中K的含量特征值,分析不同的特征值与岩盐类型的对应关系,可以建立用于指示钾盐层出现的地球化学指标,对指导钾盐找矿具有重大的现实意义。研究发现^[10-11],K可以通过3种方式进入石盐矿物中:1)类质同像;2)流质包裹体;3)石盐矿物析出过程中带进的高浓度母液成分被蒸干之后,一部分钾盐类矿物随石盐一起析出。不管是哪种形式,石盐矿物中K含量的高低总可以相对判断成钾条件的好坏。当石盐中钾含量大于0.09%时,成卤母液中开始有钾石盐析出,继续蒸发就进入钾盐沉积阶段,有大量的钾石盐及光卤石析出^[12]。姚远等^[13]在塔里木盆地找钾的研究中测出了

盆地中石盐样品中的K含量,莎车石盐样品中K含量0.000 0%~0.095 0%,库车石盐样品K含量0.000 1%~0.018 6%,并结合 $\text{Br} \times 10^3 / \text{Cl}$ 系数的变化规律,指出库车盆地的拜城—轮台地区和莎车盆地的喀什—和田、乌恰—阿克陶地区为找矿重点区域。

1.2 镁(Mg)

成盐卤水中的Mg含量也能够间接反映卤水浓度的变化^[14]。Mg离子主要以混入物的形式进入石盐中,石盐中的Mg含量主要取决于其母卤中这种离子浓度的大小^[15]。瓦利亚什科在总结水化学成分形成的一般规律时指出,在石盐析出阶段之前,盐水中的Mg含量几乎保持不变,但是随着卤水浓度的不断增大和盐类矿物的大量析出,尤其是进入石盐析出阶段之后,卤水中的Mg含量明显增加^[8]。沙空那空盆地东缘钾盐沉积中的石盐中Mg含量的变化特征为^[16],下石盐层中Mg的含量很低,小于0.000 1%~0.03%;钾石盐层中的石盐中Mg的含量为0.03%~0.09%;光卤石层的石盐中Mg含量为0.02%~0.22%;上石盐层中Mg含量为0.015%~0.038%。随着卤水蒸发浓缩的进行,石盐矿物中的Mg含量逐渐升高,所以石盐中的Mg含量对于成盐古卤水的浓缩蒸发阶段和成矿阶段具有良好的指示效果。

2 蒸发岩微量元素地球化学研究方法及其应用

Br、B、Sr、Li、Rb等微量元素在成盐过程中以各种方式进入到盐类沉积物中,研究盐类矿物中这些微量元素的含量及其变化规律,对阐明矿床成因、成矿环境及盐类矿床的物质来源等具有重要意义,对寻找钾盐矿床也具有很好的指示意义。

2.1 溴(Br)

自然界中,Br主要以离子的形式聚集在海水中,但是含量很低,海水中Br的平均含量为 $65 \times 10^{-6} \sim 65.5 \times 10^{-6}$,河水仅 0.006×10^{-6} ^[17]。Br以类质同象的形式进入固

相盐类沉积物中的数量不多,大部分保存在卤水溶液中。当成盐卤水不断蒸发浓缩时,卤水溶液中的 Br 离子浓度随之增加,同时进入固相中的 Br 也越来越多,早期结晶的盐类矿物 Br 含量一般低于晚期结晶的盐类矿物^[18]。

古岩盐中的 Br 含量在早期研究中被用作区分海相和非海相蒸发岩母卤来源的指标^[19]。一般认为海相成因的石岩盐中 Br 含量通常高于 60×10^{-6} ^[20]。后来的研究发现了利用盐岩中的 Br 含量作为区分海相/非海相沉积指标存在一些局限性^[21]。对于重结晶形成的盐类矿物,由于 Br 在溶解和重结晶过程中进行了二次分配,大部分的 Br 进入溶液而形成富 Br 卤水,盐类矿物中的 Br 含量则明显降低。因此,只有原生盐类矿物中的 Br 含量才能用来指示物源,反映原始成盐卤水的蒸发浓缩程度和成盐作用的演化过程。根据 Braitsch 的研究,现代贫硫酸镁海水钾石盐的 Br 含量范围为 0.289% ~ 0.354%,原生光卤石为 0.252% ~ 0.382%,钾盐相区中原生石盐的 Br 含量范围为 0.028% ~ 0.053%^[22]。通过研究加拿大 Salt Springs 矿床石盐段与钾盐段 Br 的含量及其变化规律, Roulston 等指出利用蒸发岩中 Br 含量及其变化特征对于划分蒸发岩旋回和解释被褶皱复杂化了的地层层序具有重要意义^[23]。另外, Br 在沉积物中类质同象替代 Cl,研究 Br 和 Cl 的比值(溴氯系数值)也越来越广泛地应用于钾盐成矿机制研究中。目前,一般用 $\text{Br} \times 10^3 / \text{Cl}$ 系数来表示。在实际研究中,岩盐中的 Br 含量常常结合 $\text{Br} \times 10^3 / \text{Cl}$ 系数共同探讨成盐卤水的蒸发浓缩程度和成盐作用的演化过程^[11, 17-18, 24-26]。云南勐野井钾盐矿床石盐岩的 Br 平均含量为 128×10^{-6} , $\text{Br} \times 10^3 / \text{Cl}$ 系数值平均为 0.22; 钾石盐矿物样的 Br 含量平均值为 $1\,735 \times 10^{-6}$, $\text{Br} \times 10^3 / \text{Cl}$ 系数值平均为 3.57,与硫酸镁亚型海水各成化阶段石盐和钾石盐中 Br 含量极为相似。许效松等认为矿床中的盐类物质不是古盐再溶而成,应与海水和深层水有某种方式的补给^[24]。李善平等^[25]在研究老挝万象盆地钾盐矿床的微量元素地球化学特征时指出,通芒钾镁盐矿床塔贡组底部石盐中 Br 平均含量为 0.026%, $\text{Br} \times 10^3 / \text{Cl}$ 系数

值平均 0.399,与云南勐野井石盐中 Br 含量(平均 0.012 8%)相比稍高,比呵叻盆地石盐中 Br 含量(0.038 0% ~ 0.004 0%)相对较低,表明了兰坪—思茅盆地、万象盆地与呵叻盆地由北西至南东 Br 含量逐渐升高,符合海水蒸发浓缩退却时 Br 含量逐步升高的趋势^[27]。

2.2 硼(B)和锶(Sr)

现代海水中 B 的含量为 4.7×10^{-6} ,淡水中一般不含 B,海相沉积物中的 B 含量为 100×10^{-6} ^[6]。B 随着卤水浓度增高而富集,各岩段中 B 的含量变化还可以作为盐层对比和划分的辅助依据,也可以间接反映钾盐成矿的层位^[25]。许建新^[28]研究勐野井钾盐矿床的地球化学特征时指出,其石盐岩中 B 含量为 0.3×10^{-6} ~ 80.4×10^{-6} ,平均为 16.9×10^{-6} ; 钾盐岩中 B 含量 0.3×10^{-6} ~ 73.9×10^{-6} ,平均值 17.2×10^{-6} ,由此认为勐野井钾盐矿床的成盐卤水与海水有关,但其形成环境并不完全是海相环境。

Sr 赋存于海水中,含量为 8×10^{-6} ,并且随着蒸发作用而富集^[6]。许效松等^[24]在研究勐野井钾盐矿床中的微量元素地球化学特征时指出 Sr 在各岩盐中的标志作用。青色硬石膏岩中和泥砾岩中 Sr 平均含量为 319×10^{-6} ,是岩石中 Sr 平均含量的 8 倍(40×10^{-6}),反映了 Sr 与 Ca 的类质同缘替换主要发生在硫酸盐阶段,代表淡化特征;在岩矿石中以混合沉积钾石盐及含光卤石钾盐中含量最高,平均值为 53×10^{-6} 。因此在盐层中当 Sr 含量高时可以间接表明有成钾的可能性,指出 Sr 元素有代表咸化的一面,也有反映受淡化稀释作用的一面,具有双重性的标志作用。李善平等^[25]在研究老挝万象盆地钾盐矿床的微量元素地球化学特征时指出,万象盆地基底普遍较少硫酸盐或缺失硫酸盐, Sr 可能混入到盐类沉积的各个阶段,并指出含溢晶石光卤石中含 Sr 较高,在 0.012% ~ 0.026% 之间,光卤石或含石盐光卤石中含 Sr 较低,在 0.000 3% ~ 0.000 73% 之间,同样也认为 Sr 含量较高时可间接指示有成钾的可能性。

2.3 锂(Li)和铷(Rb)

Li和Rb具有相似的地球化学性质,它们主要以类质同象和吸附的形式存在于碳酸盐和粘土矿物晶格中;同时,随着卤水的蒸发浓缩,Rb在高浓度卤水中逐渐富集并以类质同象的形式替换K而进入盐类矿物晶格中形成固溶体^[14]。根据高浓度卤水中Li和Rb与K的代替关系,卤水矿化度越高,则这两种离子的富集程度也越高,形成的盐类沉积物中Li和Rb的含量也相应越高。一般情况下,石盐中的Li和Rb含量甚微,指示意义不大,但是当发现海相层内有钾盐矿物或镁盐矿物时,则其含量变化可以指导评价钾盐沉积规模及预测成钾前景;原因是含量的增加一方面表明这时石盐是卤水蒸发浓缩到晚期阶段的沉积,另一方面也意味着卤水中K、Mg含量的增加^[29]。

3 蒸发岩同位素地球化学研究方法及其应用

近年来随着高精度、微量测试分析技术的提高,同位素作为一种有效的示踪手段,在地学的研究中得到了广泛的应用^[30-34]。同样,在盐类沉积方面利用稳定同位素及其变化规律来探讨钾盐矿床的物质来源、沉积环境以及判断矿床的成矿阶段、划分蒸发岩的沉积旋回和重现古盐湖的演化过程都具有明确的指示作用^[8]。

3.1 硼同位素

硼具有两种稳定同位素¹⁰B和¹¹B,相对丰度分别是19.90%和80.10%^[35]。由于硼在自然界中分布比较集中、平均丰度低,而且¹⁰B和¹¹B之间质量差大,所以硼同位素分馏效应显著(自然界中 $\delta^{11}\text{B}$ 值的变化范围为 $-37\text{‰} \sim +58\text{‰}$ ^[36])。不同地质体中 $\delta^{11}\text{B}$ 值明显不同,而且与生成环境密切相关,因此 $\delta^{11}\text{B}$ 可以作为判定硼来源的有效示踪剂和指相标志,广泛应用于多种地质过程的示踪研究^[30-38]。Swihart等曾调查过世界上许多典型海相和陆相蒸发岩矿物B同位素组成,发现海、陆相蒸发岩的B同位素分布范围截然不同,提出B同位素可以

作为判断蒸发岩海陆相沉积特征的有效指标^[39]。非海洋蒸发岩的 $\delta^{11}\text{B}$ 值在 $-30\text{‰} \sim +10\text{‰}$ 之间,海洋蒸发岩在 $+15\text{‰} \sim +35\text{‰}$ 之间,海水为 $+40\text{‰}$ ^[40]。谭红兵等^[41]在研究老挝甘蒙钾盐矿床的地球化学特征与物质来源时,根据石盐与钾石盐矿物中B同位素组成为 $19.91\text{‰} \sim +31.01\text{‰}$,并结合Sr同位素组成特征,指出该钾盐矿床的物质来源为海水。Ven-gosh^[42]研究了海水蒸发过程中残余卤水和相应析出的石盐等矿物的B同位素分馏特征之后,使B同位素在示踪卤水—盐相互作用及其物源转化关系方面得到了一些初步应用。近年来,肖应凯、刘卫国等^[43]对潜江拗陷第三纪沉积岩芯和柴达木盆地盐湖石盐矿物的微量B同位素测定方法进行了深入研究,建立了石盐单矿物微量B的高精度同位素测试方法,既提高了硼同位素的测试精度,扩大了蒸发岩硼同位素的应用范围。

3.2 硫同位素

硫有4种稳定同位素,其相对丰度分别为³²S 95.02%、³³S 0.75%、³⁴S 4.21%、³⁶S 0.02%,地球化学研究中一般只考虑分布最广泛、丰度较大的比值,用 $\delta^{34}\text{S}$ 表示^[44]。³⁴S和³²S的相对质量差较小,但 $\delta^{34}\text{S}$ 值的变化范围总体可达180‰,说明硫是自然界同位素分馏效应最明显的元素^[44]。现代大洋溶解的硫酸盐的 $\delta^{34}\text{S}$ 很稳定,约 $+20\text{‰}$,而陆相沉积的 $\delta^{34}\text{S}$ 值远小于 $+20\text{‰}$,又因为石膏与沉淀它的溶液之间的硫同位素分馏很小,仅为 $1.65\text{‰} \pm 0.12\text{‰}$,因此可用海相蒸发岩地层—膏盐层的硫同位素组成追溯地史上海洋硫酸盐矿的 $\delta^{34}\text{S}$ 值^[44]。相反,在非还原条件下,根据蒸发岩系中的石膏或硬石膏 $\delta^{34}\text{S}$ 值分布范围可以判断是否为海相沉积^[45-47]。除此之外,细菌的还原作用会使残留硫酸盐富集 $\delta^{34}\text{S}$,这种富集又与封闭、半封闭的沉积环境有关,借此可以研究盆地演化,探讨沉积环境及岩盐的保存条件^[47]。前人对呵叻高原沙空那盆地石盐中的石膏、硬石膏分析认为,较高的 $\delta^{34}\text{S}$ 值($> +15\text{‰}$)为海相沉积, $+15\text{‰} \sim +10\text{‰}$ 之间为海陆交互相,而 $< +10\text{‰}$ 则为陆相沉积^[45,48]。谭红兵等^[49]和

章振国等^[47]研究塔里木盆地西部古岩盐的硫同位素地球化学特征时指出,塔里木盆地的成盐环境为开阔氧化条件为主,不同构造物质来源单元的各不相同,喀什凹陷以海相蒸发岩沉积为主,库车凹陷及阳霞凹陷则以海陆交互沉积为主。云南勐野井钾盐矿床中的硫酸盐的 $\delta^{34}\text{S}$ 值分布在 $+3.85\text{‰} \sim +15.51\text{‰}$ 之间,其中混合沉积的岩盐其 $\delta^{34}\text{S}$ 值都小于 $+10\text{‰}$,说明其成盐卤水主要与陆源水体有关;而蒸发沉积的岩盐其 $\delta^{34}\text{S}$ 值均大于 $+10\text{‰}$,说明其明显地具有混合水体(海水和陆源水体)的硫同位素组成特征^[28]。

3.3 氯同位素

氯元素有两个天然稳定同位素 ^{37}Cl 和 ^{35}Cl ,二者的质量差为5.7%,在自然界中的分馏效应比较明显^[50]。最初发现氯同位素分馏现象时,人们就已经开始了对石盐岩氯同位素的研究^[51-53]。Eastoe等^[54-55]对Palo Duro盆地二叠纪石盐岩和Gulf Coast盆地侏罗纪引岩盐的氯同位素研究表明,正常沉积的石盐岩中其氯同位素组成与海水相似。孙大鹏等^[56-57]曾对世界各地60多个古岩盐、古钾盐及现代盐湖岩盐单矿物进行了氯同位素分布特征的研究,发现岩盐的氯同位素在不同蒸发浓缩阶段发生明显分馏,从石盐—钾石盐阶段,氯同位素呈有规律的减小。一般钾盐沉积层位的石盐 $\delta^{37}\text{Cl}$ 值小于0,钾石盐及其以后沉积的氯化物 $\delta^{37}\text{Cl}$ 值小于 -0.5‰ 。特别是钾石盐以后析出的氯化物更为偏负,光卤石 $\delta^{37}\text{Cl}$ 一般小于 -1.00‰ ,而钾盐沉积阶段之前早期沉积的石盐的 $\delta^{37}\text{Cl}$ 值显著偏负^[58]。谭红兵等^[49,59,60]在分析塔里木盆地西部成钾的地球化学条件时指出,氯同位素可以用来判断成盐古卤水的蒸发浓缩阶段, $\delta^{37}\text{Cl}$ 值还可以作为贫Br地区指导找钾的有效地球化学指标。

4 结语与展望

研究蒸发岩的元素地球化学行为对于找钾具有重要的意义。蒸发岩常量元素(K,Mg)地球化学特征的研究可以直接反映古卤水的成盐阶段和成盐作用的演化过程,还可以建立用于

指示钾盐层出现的地球化学指标。蒸发岩微量元素(Br,B,Sr,Li,Rb)地球化学特征的研究对阐明矿床成因、成矿环境和盐类矿床的物质来源等具有重要意义,对寻找钾盐矿床有明确的指示意义。蒸发岩同位素($\delta^{11}\text{B}$, $\delta^{34}\text{S}$, $\delta^{37}\text{Cl}$)地球化学研究对探讨钾盐矿床的物质来源、沉积环境以及判断矿床的成矿阶段、划分蒸发岩的沉积旋回和重现古盐湖的演化过程都具有明确的指示作用。在实际工作中,通常要将各种地球化学研究方法结合在一起才能更好地揭示盐类矿物的形成规律和更有效地用于指导钾盐矿床的寻找。

云南兰坪—思茅盆地是我国具有大型钾盐成矿条件和找矿前景的重点地区之一。兰坪—思茅盆地勐野井钾盐矿床是我国已经发现的唯一一处古代固体钾盐矿床。自矿床发现以来,前人做了大量的地质勘查工作,主要体现在盐类沉积和钾盐矿床的宏观地质特征和矿物组分等方面的研究,查明了矿体的时空分布并计算了各级储量,但是针对于勐野井钾盐矿床的成矿条件和成因的地球化学研究很少。此外,前人根据地球化学特征对勐野井钾盐矿床成因的研究,主要是借助常规的地球化学指标,如溴含量、溴氯系数等进行分析,由于缺乏对比参数,也没有开展过与邻区钾盐矿床的综合对比研究,因而往往难以获得理想的研究结果。因此,今后的工作应重点选取指示意义比较明确的地球化学指标(主要指同位素),研究这些地球化学指标对探讨兰坪—思茅盆地钾盐矿床的成矿机理和进一步评价找钾远景区的成钾条件等是十分必要的。

参考文献:

- [1] 郑大中,郑若锋.钾盐矿床的物质来源和成矿机制[J].云南地质,2006,25(2):125-142.
- [2] 李文光.我国钾盐资源的开发利用[J].盐湖研究,1994,2(3):65-68.
- [3] 李钟模.世界钾盐找矿实践对我国找钾的启示[J].化工矿物与加工,2007,(2):37-38.
- [4] 马鸿文,苏双青,刘浩,等.中国钾盐资源与钾盐工业可持续发展[J].地学前缘,2010,17(1):294-310.
- [5] 王孝峰.我国与世界钾资源及开发利用现状[J].磷肥与氮肥,2005,20(1):10-13.

- [6] 钱自强,曲懿华,刘群. 钾盐矿床[M]. 北京:地质出版社,1994.
- [7] 郑绵平,齐文,张永生. 中国钾盐地质资源现状与找钾方向初步分析[J]. 地质通报,2006,25(11):1239-1246.
- [8] 瓦利亚什科 M T. 钾盐矿床形成的地球化学规律[M]. 北京:中国工业出版社,1965.
- [9] 陈郁华,袁鹤然,杜之岳. 陕北奥陶系钾盐层位的发现与研究[J]. 地质评论,1988,44(1):100-106.
- [10] 牟保垒. 元素地球化学[M]. 北京:北京大学出版社,1999.
- [11] 谭红兵,马海州,马万栋,等. 塔里木盆地西部古岩盐地质地球化学特征与成钾条件分析[J]. 矿物岩石地球化学通报,2004,23(3):194-199.
- [12] 董继和. 石盐中微量元素的研究及其应用[J]. 矿物学报,1984,4(1):573-579.
- [13] 姚远,马海州,谭红兵,等. 古钾盐成矿条件和塔里木盆地找钾分析[J]. 盐湖研究,2004,12(2):8-13.
- [14] 张彭熹,张保珍,洛温斯坦 T K,等. 古代异常钾盐蒸发岩的成因[M]. 北京:科学出版社,1993.
- [15] 袁见齐,杨谦,孙大鹏,等. 察尔汗盐湖钾盐矿床的形成条件[M]. 北京:地质出版社,1995.
- [16] 袁小龙. 沙空那空盆地东缘钾盐沉积微量元素地球化学研究[D]. 西宁:中国科学院青海盐湖研究所,2011.
- [17] 林耀庭. 溴的地球化学学习性及其在四川找钾工作中的应用[J]. 化工矿产地质,1995,17(3):175-181.
- [18] 程怀德,马海州,谭红兵,等. 钾盐矿床中 Br 的地球化学特征及研究进展[J]. 矿物岩石地球化学通报,2008,27(4):399-408.
- [19] Valyashko M G. Geochemistry of bromine in the processes of salt deposition and the use of the bromine content as a genetic and prospecting criterion[J]. Geochemistry,1956,1(6):570-589.
- [20] Holser W T. Mineralogy of evaporites[M]//Burns R G. Ed. Marine Minerals,Reviews in Mineralogy,Mineralogical Society of America,1979,6:211-294.
- [21] Stoessell R K,Moore C H. Chemical constraints and origins of four groups of Gulf Coast reservoir fluids[J]. Amer. Assoc. Petrol. Geol. Bull.,1983,67:896-906.
- [22] Braltch O,Burek P J,Herman A J,et al. Salt deposits, their origin and composition[M]. Berlin: Springer Verlag,1971:138.
- [23] Roulston B. V,Waugh D. C. E. Stratigraphic Comparison of the Mississippian potash deposits in New Brunswick, Canada[J]. Sixth Symposium on Salt,1985,1:115-130.
- [24] 许效松,吴嘉陵. 云南勐野井钾盐矿床特征,微量元素地球化学及成因探讨[J]. 中国地质科学院院报,1983,1:17-36.
- [25] 李善平,马海州,陈有顺,等. 老挝万象盆地钾盐矿床微量元素地球化学特征及矿床的成因[J]. 地质通报,2010,29(5):760-769.
- [26] 张西营,马海州,谭红兵,等. 老挝东泰钾盐矿床地球化学及其沉积后变化初步研究[J]. 矿床地质,2010,29(4):713-721.
- [27] 曲懿华. 兰坪-思茅盆地与泰国呵叻盆地含钾卤水同源性研究[J]. 化工矿产地质,1997,19(2):81-84.
- [28] 许建新. 云南勐野井钾盐矿床地球化学与成因研究[D]. 西宁:中国科学院青海盐湖研究所,2008.
- [29] 谭红兵. 塔里木盆地西部古盐岩地球化学与成钾预测研究[D]. 西宁:中国科学院青海盐湖研究所,2005.
- [30] 汤倩,邸文. 同位素地球化学及其在地质研究中的应用[J]. 中山大学研究生学报(自然科学、医学版),2006,27(3):95-108.
- [31] 夜卫平,冯建忠. 同位素地球化学研究进展及动态[J]. 陕西地质,2006,24(2):74-85.
- [32] 姚海云,鲁红仙,黎金标. 同位素稀释等离子体质谱法测定地质样品中痕量硼[J]. 分析测试学报,2006,25(1):73-76.
- [33] Keles S,Özkul M,Förizs I,et al. Stable isotope geochemical study of Pamukkale travertines: New evidences of low-temperature non-equilibrium calcite-water fractionation[J]. Sedimentary Geology,2011,238:191-212.
- [34] Dias A S,Früh-Green G L,Bernaseconi S M,et al. Geochemistry and stable isotope constraints on high-temperature activity from sediment cores of the Saldanha hydrothermal field[J]. Marine Geology,2011,279:128-140.
- [35] Aggarwal J K,Palmer M R. Boron isotope analysis: A review[J]. Analyst,1995,120(5):1301-1307.
- [36] 张崇耿,肖应凯. 硼同位素分馏及其在环境研究中的应用[J]. 盐湖研究,2002,10(2):54-60.
- [37] 吕苑苑,赵平,高剑锋,等. 硼同位素分析方法研究进展[J]. 地质科学,2009,44(3):1052-1061.
- [38] 肖荣阁,大井隆夫,蔡克勤,等. 硼及硼同位素地球化学在地质研究中的应用[J]. 地学前缘,1999,6(2):361-368.
- [39] Swihart G H,Moore P B. Boron isotopic composition of marine and nonmarine evaporite borates[J]. Geochim Cosmochim Acta,1986,50:1297-1301.
- [40] Hoers J. 稳定同位素地球化学[M]. 北京:海洋出版社,2002.
- [41] Tan H B,Ma H Z,Li B K,et al. Strontium and boron isotopic constraint on the marine origin of the Khammuan potash deposits in southeastern Laos[J]. Chinese Sci Bull,2010,55(3):1-8.
- [42] Vengosh A,Staritsky A,Kolodny Y,et al. Boron isotope variations during the fractional evaporation of sea water[J]. New constraints on the marine vs. nonmarine debate,1992,20:799-802.
- [43] 肖应凯. 石墨的热离子发射特性及其应用[M]. 北京:科学出版社,2003:125-133.
- [44] 郑永飞,陈江峰. 稳定同位素地球化学[M]. 北京:科学出版社,2003:125-133.

- 出版社 2000.
- [45] Tabakh M E , Utha - Aroon C , Schreiber B C. Sedimentology of the Cretaceous Maha Sarakham evaporites in the Khorat Plateau of northeastern Thailand [J]. *Sedimentary-Geology* ,1999 ,123: 31 - 62.
- [46] Maklnach N ,Mikhajlov I ,Kolosov L *et al* Comparative analysis of sulfur isotope behavior in the basins with evaporites of chloride and sulfate types [J]. *Sedimentary Geology* , 2000 ,134: 343 - 360.
- [47] 章振国 ,高继雷 ,张向文. 塔里木盆地古代蒸发岩硫同位素地球化学研究[J]. *甘肃地质* 2010 ,19(1) : 32 - 37.
- [48] El TabaKh M ,Schreiber B C ,Utha-Aroo C *et al* Diagenetic origin of Basal anhydrite in the Cretaceous Maha Sarakham salt: Khorat Plateau ,NE Thailand [J]. *Sedimentology* ,1999 ,45: 45 - 58.
- [49] 谭红兵 ,马海州 ,肖应凯 等. 塔里木盆地西部古岩盐氯同位素分布特征与找钾分析[J]. *中国科学 D 辑* 2005 ,35(3) : 235 - 240.
- [50] 许建新 ,马海州 ,肖应凯 等. 稳定氯同位素及其应用地球化学研究[J]. *盐湖研究* 2008 ,16(1) : 51 - 59.
- [51] Kaufmann R S ,Long A ,Bentley H W *et al*. Natural chlorine isotope variations [J]. *Nature* ,1984(309) : 338 - 340.
- [52] Vengosh A ,Chivas A ,McCulloch M. Direct determination of boron and chlorine isotopic compositions in geological materials by negative thermal-ionization mass spectrometry [J]. *Chemical Geology* ,1989 (79) : 333 - 343.
- [53] 王庆忠 ,肖应凯 ,刘卫国 等. 第四纪察尔汗地区石盐沉积中的氯同位素组成[J]. *盐湖研究* ,1995 ,3(1) : 40 - 44.
- [54] Eastoe C J ,Long A ,Knauth L P. Stable chlorine isotopes in the Palo Duro Basin ,Texas: evidence for preservation of Permian evaporite brines [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta* ,1999 ,63(9) : 1375 - 1382.
- [55] Eastoe C J ,Long A ,Land L S *et al*. Stable chlorine isotopes in halite and brine from the Gulf Coast Basin: brine genesis and evolution [J]. *Chemical Geology* ,2001 ,176(1 - 4) : 343 - 360.
- [56] 孙大鹏 ,刘卫国 ,周引民 等. 氯化物型钾盐矿床氯同位素地球化学研究[J]. *盐湖研究* ,1997 ,5(1) : 21 - 27.
- [57] 孙大鹏 ,帅开业 ,高建华 等. 氯化物型钾盐矿床氯同位素地球化学初步研究[J]. *现代地质* ,1998 ,12(2) : 229 - 234.
- [58] 谭红兵 ,马海州 ,张西营 等. 蒸发岩序列中氯化物盐的氯同位素分馏效应及应用——兼塔里木盆地、柴达木盆地古代岩盐的沉积阶段[J]. *岩石学报* 2009 ,25(4) : 955 - 962.
- [59] 谭红兵 ,马海州 ,许建新 等. 塔里木盆地西部古盐岩同位素地球化学与成钾预测研究[J]. *地球学报* ,2005 ,26(增刊) : 174 - 179.
- [60] Tan H B ,Ma H Z ,Xiao Y K *et al* . Characteristics of chlorine isotope distribution and analysis on sylvinite deposit formation based on ancient salt rock in western Tarim basin [J]. *Science in China Series D ,Earth Sciences* , 2005 ,48 (11) : 1913 - 1920.

Application of Geochemical Research Method to the Prospecting of Potash Deposit

SHI Lin^{1,2} , GAO Dong-lin¹ , ZHANG Cong-wei^{1,2} , ZHANG Yu-shu^{1,2}

(1. Qinghai Institute of Salt Lakes ,Chinese Academy of Sciences ,Xining 810008 ,China;

2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences ,Beijing ,100039 ,China)

Abstract: Potash is one of serious shortage resources in China , it is of important significance for China to seek potash resource especially ancient potash deposit. But because sylvinite is easily dissolve and there are few signs of metallogenic on the surface , it is more difficulty to the prospecting of potash deposit. This paper indicates that geochemistry method has important application to the prospecting of potash deposit by discussing the geochemical study methods in the application research of evaporite , its application can be summarized as that: to judge the evaporation concentration stage of ancient brine and the metallogenic stage of the deposit , to reveal the the genesis and the salt-forming environment of the potash deposit , to divide the sedimentary cycle of evaporite and recreate the evolution of ancient salt lake and analyze the closed evaporation condition and oxidation and reducing of the salt-forming basin etc. Yunnan Lanping-Sima Basin is the most prospect area for finding potash and studying the geochemical characteristics of the evaporite has important instructional significance in looking for potash deposit in the basin.

Key words: Geochemistry; Potash deposit; Potash-searching