

罗布泊盐湖化学沉积序列及其控制因素*

刘成林, 马黎春, 焦鹏程, 孙小虹, 陈永志

(中国地质科学院矿产资源研究所, 北京 100037)

摘要 罗布泊位于塔里木盆地的东部, 是世界最大的第四纪干盐湖之一。罗布泊盐湖化学沉积序列总体简单, 即为石膏—钙芒硝(巨厚)—石盐(很薄), 但细节变化则很复杂, 在钙芒硝阶段和石盐阶段出现了很多含钾盐矿物的薄层, 按时代从老到新, 可划分出9个区段。罗布泊化学沉积序列除了与江汉盆地第三纪古盐湖有一定的相似性之外, 与其他陆相、非海相和海相蒸发沉积序列有明显的差异, 这可能与该地区的气候变化、物源背景及构造环境等有关。这种特殊的化学沉积序列应该是全球气候变化与大地构造运动在盐湖沉积中的响应, 气候持续干化与补给变化的耦合, 是造成罗布泊盐湖特殊的化学沉积序列的机制。

关键词 地球化学 盐湖 化学沉积 沉积序列 析盐序列 罗布泊 新疆

中图分类号: P619.21⁺1

文献标志码: A

Chemical sedimentary sequence of Lop Nur salt lake in Xinjiang and its controlling factors

LIU ChengLin, MA LiChun, JIAO PengCheng, SUN XiaoHong and CHEN YongZhi
(Institute of Mineral Resources, CAGS, Beijing 100037, China)

Abstract

Located in the eastern part of the Tarim Basin, Lop Nur Lake is one of the largest playa lakes in the world. Although the overall chemical sedimentary sequence of the salt lake appears quite simple, represented by gypsum-glauberite (very thick)-halite (rather thin), the detailed variation of the sequence is rather complex and can be divided into nine zones according to ages of the strata. The chemical sequence of Lop Nur salt lake is remarkably different from many non-marine and marine chemical sedimentary sequences except for that of Tertiary paleo-salt lake in Jiangnan Basin, Hubei Province, which shows some similarity with the sedimentary sequence of Lop Nur salt lake. The differences are probably related to such factors as regional climate, substance sources and tectonic environments. This special chemical sequence should have been the response to global climate changes and tectonic movements. Therefore, the coupling of continuous drying and supply variation might have been responsible for the formation of the special and complex chemical sedimentary sequence in Lop Nur salt lake.

Key words: geochemistry, salt lake, chemical sedimentation, sedimentary sequence, salt-separating sequence, Lop Nur, Xinjiang

* 本文得到国家自然科学基金重点项目(编号 40830420)资助

第一作者简介 刘成林, 男, 1963年生, 研究员, 博士生导师, 主要研究盐湖与钾盐。

收稿日期 2010-03-31; 改回日期 2010-04-29。许德焕编辑。

罗布泊盐湖沉积具有其独特性,与柴达木盆地察尔汗、美国大盐湖、智利阿塔卡玛及中东的死海等众多著名大型富钾盐湖明显不同,主要表现为在盐湖沉积演化中出现巨量钙芒硝沉积,属于较早阶段,在钙芒硝岩中形成和储集了富钾卤水,出现了钾盐大规模聚集成矿(王弼力等,2001;刘成林等,2007),显然,在盐湖化学沉积系列上具有明显的超前性。这种超前性可能受多种因素控制,包括气候变化、不同水体掺杂作用、成岩作用、钙芒硝沉积、深部地层水补给及卤水异地迁移等。本文拟通过对罗布泊盐湖化学沉积序列进行了细致分析和对比研究,探讨其盐湖沉积演化的控制因素。

1 地质概况

罗布泊位于塔里木盆地东部,其南面为同属青藏高原的昆仑山脉和阿尔金山脉,北面为天山山脉,西面为世界第二大沙漠——塔克拉玛干沙漠。罗布泊盐湖是世界上最大的第四纪干盐湖之一,蕴藏有大规模的钾盐资源(王弼力等,2001),是中国第二个超大型钾盐矿床。第四纪时期,罗布泊湖泊总的基本特征是:早更新世时期,为单一环境(微咸水-咸水环境),属“一元结构”;中更新世时期,逐渐演变为“二元结构”,即南部仍保持微咸水-咸水环境,主要沉积物为粉砂与石膏,而北部则为盐湖环境,出现钙芒硝沉积及钾盐聚集(刘成林等,1999);到全新世末期,罗布泊盐湖基本干涸。

2 研究方法

对罗布泊盐湖区内钻孔(ZK1200B,ZK0800,ZK95-1、2、3,ZKD0017,ZKD0018,ZKD0019,ZKD0020,ZKD0001,ZKD0002,ZKD0010等)岩芯和浅坑中的岩石进行详细编录、薄片鉴定、化学分析、扫描电镜-能谱、矿物红外及XRD等分析研究,鉴定出盐类矿物的种类和特征;通过铀系法、C-14、热释光和光释光等确定地层的年代。在这些工作的基础上,确定出盐类矿物在地层中的分布状况,编制罗布泊盐湖化学沉积序列,然后,再根据罗布泊补给河水的化学组成,利用水化学平衡模型(EQL/EVP)模拟罗布泊古湖水析盐顺序。在上述工作的基础上,与国内外海水海相蒸发沉积序列及湖水陆相蒸发沉积序列进行对比,探讨罗布泊盐湖化学沉积序列的特

殊性及控制因素。

3 海相及非海相和陆相蒸发岩沉积序列

3.1 海相沉积序列

乌西格里奥(Usiglio)于1889年首次提出了海水蒸发析盐序列,共分出下列7个阶段及其产物:

- (1)氧化铁+碳酸钙
- (2)石膏
- (3)石膏+石盐
- (4)石膏+石盐+泻利益
- (5)石膏+石盐+泻利益+软钾镁矾
- (6)石膏+石盐+泻利益+软钾镁矾+光卤石
- (7)石膏+石盐+泻利益+软钾镁矾+光卤石+水氯镁石。

可见,石膏和石盐在大多数阶段均有析出,并依次出现泻利益、软钾镁矾、光卤石和水氯镁石。

陈郁华(1983)根据实验提出的黄海海水蒸发析盐序列为:

- (1)文石
- (2)石膏+文石
- (3)石膏
- (4)石膏+石盐(少)
- (5)石盐+石膏(少)
- (6)石盐+泻利益(少)
- (7)石盐+泻利益
- (8)石盐(少)+泻利益+钾石盐
- (9)石盐(少)+泻利益+光卤石
- (10)石盐(少)+泻利益(少)+光卤石+水氯镁石。

黄海海水蒸发析盐可分出10个沉积阶段,与乌西格里奥的序列基本相似。

瓦里亚什科(1965)提出的海水结晶顺序为:

- (1)石盐
- (2)石盐+白钠镁矾
- (3)石盐+泻利益(六水泻利益→硫镁矾)+钾盐镁矾
- (4)石盐+硫镁矾+光卤石
- (5)石盐+硫镁矾+光卤石+水氯镁石。

瓦里亚什科序列与前两者有一定的差异,这可能与海水组成的变化有关。

3.2 非海相和陆相盆地沉积序列

3.2.1 异常海相

Lowenstein 等(1989)提出,一些异常海相蒸发岩(钾盐)可能形成于非海相卤水(nonmarine brine)而不是海水(seawater)。柴达木盆地的卤水起源于大气降水和河水,并混合有少量氯化钙型泉水(其成分与很多深部建造盐卤和地下热卤相似)。富含泉水的径流经过蒸发作用产生了光卤石、水氯镁石和溢晶石,这与几个异常海相蒸发岩矿床一致;河水和泉水的其他混合也产生了与海水蒸发类似的盐类矿物组合。混合有泉水的水体经过蒸发依次析出:

- (1)碳酸盐
- (2)石膏-硬石膏
- (3)石盐
- (4)光卤石
- (5)水氯镁石和溢晶石(Ca-Mg-Cl 盐矿物)。

这种矿物沉积序列可在南美和西非的下白垩统裂谷蒸发岩矿床中见到(Arod, 1969; Borchert, 1977),也可在泰国呵勒高原的上白垩统蒸发岩(钾盐)内发现(Hite et al., 1979; Utha-Aroon, 1993),这些所谓的异常钾盐矿床可能形成于陆相卤水。异常海相蒸发岩(钾盐)可能来源于陆相卤水蒸发的的事实,说明其物质来源比海水更加富含钾离子,是异常补给来源。

3.2.2 典型陆相

青海湖湖水蒸发析盐序列(孙大鹏等, 1995)为:

- (1)文石
- (2)三水菱镁矿
- (3)水菱镁矿
- (4)石盐
- (5)石盐+无水芒硝+水钙芒硝(?)
- (6)石盐+无水芒硝+白钠镁矾
- (7)石盐+白钠镁矾+软钾镁矾+泻利盐
- (8)石盐+软钾镁矾+泻利盐+钾石盐
- (9)石盐+泻利盐+光卤石
- (10)石盐+泻利盐+钾石盐+光卤石
- (11)石盐+泻利盐+光卤石
- (12)石盐+泻利盐+六水泻利盐+光卤石。

此沉积序列与黄海海水沉积序列有一定的相似性。

柴达木盆地马海盐湖析盐顺序(王弭力等, 1992)为:

- (1)石膏
- (2)石膏+石盐
- (3)石膏+石盐+芒硝
- (4)石膏+石盐+芒硝+钠镁矾
- (5)石盐+钾石盐
- (6)石盐+钾石盐+光卤石
- (7)水氯镁石。

马海盐湖沉积序列相对简单,与异常海相沉积序列有一定的相似性,可能与其受到深部卤水的补给有关^①。

江汉盆地第三纪盐湖析盐顺序(王弭力, 1982)为:

- (1)石膏
- (2)钙芒硝
- (3)石盐+无水芒硝
- (4)钠镁硫酸盐
- (5)杂卤石
- (6)钾芒硝。

此沉积序列中出现钙芒硝和杂卤石阶段,与上述诸沉积序列有较明显的差异,可能与其沉积环境及补给源的特殊性有关。

4 罗布泊盐湖

4.1 罗布泊盐湖地层中盐类沉积序列

罗布泊盐湖化学沉积序列总体简单,为石膏—钙芒硝(巨厚)—石盐(很薄),但细节变化复杂,按时代从古到新,可划分为 9 个区段(表 1)。

由表 1 可见,罗布泊盐湖化学沉积序列,除与江汉盆地第三系沉积序列有一定的相似性之外,与上述其他典型沉积序列几乎没有共性,显示出其独特性,即沉积序列中钙芒硝阶段最长,而石盐阶段则很短。

4.2 罗布泊补给河水——塔里木河水蒸发析盐序列模拟

EQL/EVP 是基于 Pitzer 所提出的离子相互作用模型、采用 Newton-Raphson 算法求解线性质量-平衡方程组和非线性质量-活度方程组的卤水化学演化平衡模型,可定量计算卤水体系中各离子的富集特征,以及盐类矿物的蒸发析出序列(Risacher et al., 2001)。其模拟可在开放和封闭 2 类系统中分别

^① 青海省盐湖勘查开发研究院,地质矿产部矿床地质研究所, 1991. 柴达木盆地第四纪钾盐矿床形成条件与找矿方向的综合研究。“七五”地质矿产部重点科技攻关成果报告, 133-139. 内部资料。

表1 罗布泊盐湖化学沉积序列及分布特征

Table 1 Chemical sedimentary sequence and distribution features of the Lop Nur Salt Lake

序号	地层年代	矿物组合	产状	资料来源
1	中更新统	菱镁矿	分散状	ZK1200B等
2	中更新统	石膏	层状	ZK1200B, ZK0800等
3	中更新统-上更新统	石膏+钙芒硝(主)	厚层状	ZK95-1、2、3, ZK1200B, ZK0800等
4	上更新统	钙芒硝(主)+杂卤石(次)	钙芒硝为厚层状,杂卤石为薄层状及分散状	ZK95-1、2、3, ZK1200B, ZK0800等
5	上更新统顶部	钙芒硝(主)+芒硝(次)	钙芒硝为厚层状,芒硝为薄层状	ZKD0017, ZKD0022, ZKD0019、ZKD0020等
6	全新统底部	石膏	中-薄层状	ZK95-1、2、3, ZK1200B, ZK0800等
7	全新统	石盐(主)+白钠镁矾(次)	石盐为中-薄层状,白钠镁矾呈分散状	ZK1200B, ZK0800等
8	全新统	石盐(主)+钾盐镁矾(次)光卤石(次)钾石盐(次)	石盐为中-薄层状,钾盐镁矾为薄层状	ZKD0010, 罗中(南小团)铁南凹地浅坑
9	全新统	石盐(主)+无水芒硝(次)+杂硝矾(次)	石盐为中-薄层状,无水芒硝、杂硝矾为细层及分散状	铁湾浅坑等

进行。封闭系统是指,在淡水-高浓度卤水-蒸干的过程中,卤水及析出的盐类矿物始终在一个系统内,允许卤水与矿物发生反应。而开放系统则是指,在卤水蒸发过程中,一旦有盐类矿物析出,便将其从系统内取出,不存在卤水与矿物间的反应。

本研究利用EQL/EVP卤水化学平衡模型对罗布泊主要入流河水——塔里木河水进行了模拟,模拟温度 $t = 25^{\circ}\text{C}$,二氧化碳分压 $p_{\text{CO}_2} = 10^{-3.4}$,模拟结果如下:

开放系统的EQL/EVP模拟,盐类矿物的析出序列为:

- (1) 方解石
- (2) 水菱镁矿
- (3) 石膏+水菱镁矿
- (4) 钙芒硝+水菱镁矿
- (5) 钙芒硝+水菱镁矿+白钠镁矾
- (5) 钙芒硝+白钠镁矾+石盐
- (6) 白钠镁矾+石盐+杂卤石
- (7) 石盐+泻利盐
- (8) 石盐+钾盐镁矾
- (9) 石盐+钾盐镁矾+硫酸镁石
- (10) 石盐+硫酸镁石+光卤石
- (11) 石盐+硫酸镁石+水氯镁石
- (12) 石盐+水氯镁石+无水石膏。

假设1 kg卤水开始蒸发(矿物析出量的单位为mol/kg H₂O)相继析出:方解石(1.1×10^{-3})、水菱镁矿(1.5×10^{-5})、石膏(8.9×10^{-6})、钙芒硝(1.34×10^{-5})、白钠镁矾(1.6×10^{-3})、石盐(2.6×10^{-3})、杂卤石(4.6×10^{-7})、泻利盐(1.2×10^{-4})、钾盐镁矾

(1.6×10^{-4})、硫酸镁石(1.1×10^{-4})、光卤石(4.3×10^{-5})和水氯镁石(5×10^{-4})。其中,丰度最高的矿物为石盐(36.5%),方解石(26%)和白钠镁矾(23.58%),其次为水氯镁石(7.17%)、钾盐镁矾(2.25%)、硫酸镁石(1.97%)和泻利盐(1.76%),其他矿物总和不超过1.2%。

由此可见,在不考虑卤水与矿物相互作用的情况下,钙芒硝的析出量很少,不足盐类矿物析出总量的1%,这与罗布泊盐湖实际蒸发岩沉积序列及矿物丰度不吻合。而岩芯薄片分析发现,有很多钙芒硝是交代而成的(刘成林等,2003),微孔隙发育良好。

由于卤水化学反应和矿物交代作用对于钙芒硝的巨量沉积有着重要作用,因此,将水文化学数据重新输入EQL/EVP模型,在封闭系统下再次进行了模拟,其盐类矿物析出序列为:

- (1) 方解石
- (2) 水菱镁矿
- (3) 石膏
- (4) 钙芒硝
- (5) 钙芒硝+硬石膏
- (6) 钙芒硝+硬石膏+石盐
- (7) 硬石膏+石盐+杂卤石
- (8) 硬石膏+石盐+杂卤石+白钠镁矾
- (9) 石盐+杂卤石+白钠镁矾+泻利盐。

卤水蒸发初期,首先析出方解石(1.1×10^{-3}),其次析出少量水菱镁矿(1.05×10^{-6}),紧接着,方解石开始溶解,形成水菱镁矿和大量石膏(约 1.8×10^{-3}),此后,石膏逐渐被钙芒硝取代,或脱水转化成硬石膏,之后,硬石膏再次被钙芒硝取代,达到钙芒

硝析出峰(1.6×10^{-3})。卤水继续蒸发,石盐开始析出,此后,高浓度的卤水与钙芒硝反应,生成杂卤石(1.6×10^{-3})和少量硬石膏(1×10^{-4})。最后,析出少量白钠镁矾(8×10^{-4})和泻利盐(6.7×10^{-4})。在这一封闭系统中,钙芒硝由石膏和硬石膏交代而来,析出范围很宽。卤水的蒸发过程大体可分为3个时期:

卤水蒸发早期,气候不十分干旱,蒸发岩矿物以石膏为主(20%~82%),逐步演化为石膏(42%~82%)和钙芒硝(8%~40%)混合出现。

卤水蒸发中期,气候日趋干旱,以钙芒硝为主(42%~70%)。

卤水蒸发晚期,气候极端干旱,以石盐为主(39%~58%),伴生一定数量的钙芒硝(0~39%)和硬石膏(6%~22%),还有少量白钠镁矾(0~11%)和杂卤石(0~1.3%)。

这一卤水蒸发模拟结果与罗布泊盐湖实际化学沉积及丰度较为接近。同时,可根据蒸发岩化学沉积序列、盐类矿物组合特征和沉积厚度来反演出区域古气候古环境的演变过程。

5 讨论与结论

罗布泊盐湖化学沉积序列有明显的特殊性和异常情况,除了与江汉盆地第三纪盐湖化学沉积序列有一定的相似性之外,与其他陆相、非海相及海相蒸发沉积序列有明显的差异,这可能与该地区气候变化、物源背景及构造环境有关,这种特殊的化学沉积序列应该是全球气候变化与大地构造运动在盐湖沉积中的响应。

罗布泊的钙芒硝可能有很多是交代石膏而形成的(刘成林等,2003;2006a;2007),但在钙芒硝阶段内仍然出现石膏薄层,说明钙芒硝的沉积环境出现反复交替。在钙芒硝析出阶段的中晚期,出现多个杂卤石夹层,说明卤水中钾离子含量已较高,或气温出现变化,有利于杂卤石沉积(刘成林等,2008)。钙芒硝是罗布泊盐湖的主要盐类矿物,可能是在干热的气候条件下形成的(刘成林等,2006b),但是,在钙芒硝沉积阶段的末期,出现了几个薄的芒硝层,这可能与末次冰期的降温事件有关(刘成林等,2007)。晚更新世末,在钙芒硝沉积之后,沉积了一层1~2 m厚的石膏,这层石膏在罗布泊凹地具有很好的对比性,石膏多为针状结构,垂向生长,这可能是罗布泊

盐湖出现了淡化,与塔里木流域的洪水泛滥事件有关。

石膏沉积之后,基本上见不到大量钙芒硝沉积,而出现以石盐为主的化学沉积。晶间卤水等温蒸发试验(王弭力,2001)显示,除微量石膏外,再没有钙芒硝析出,其直接原因是,晶间卤水中钙离子含量很低。之后,再没有出现钙芒硝沉积和交代石膏的现象,取而代之的是石盐沉积。这期间似乎发生了某种事件,导致卤水中钙离子的补充中断。如果钙离子主要由河水带来,那么,在淡化期出现针状石膏沉积之后,应该重复以前曾发生过的地质作用——钙芒硝交代石膏。而且,较深部的钙芒硝晶间卤水与浅部的石盐晶间卤水在化学组成特征上相近,可见,钙芒硝晶间卤水似乎在1万年前突然变成了石盐晶间卤水,这个造卤机制的转换可能与几种地质事件有关。首先,钙源补给中断,如果钙源主要来自塔里木河水,那么,在末次冰期内,冰川发育,降水量减少,致使塔里木流域水量锐减,导致钙芒硝析出量下降,但这种补给似乎不能解释现有的矿物组合。如果钙源由深部地层水补给,似乎受气候条件影响不大,但钙芒硝的析出还是停止了。如果钙芒硝晶间卤水是由浅部石盐阶段的卤水下渗形成,那么,这在罗北凹地可以解释得通,但对于罗北凹地东、西两侧台地内的钙芒硝岩晶间卤水又解释不通,因为,它们的顶部没有达到石盐沉积阶段。

综上所述,气候变化和补给(地表水和深部地层水)可能是控制罗布泊盐湖化学沉积序列的因素。气候变化可能是由全球变化引起的,而补给量的锐减则可能是青藏高原天山隆升共同影响的结果。可以认为,气候持续干化与补给变化的耦合机制造成了罗布泊盐湖特殊的化学沉积序列。

References

- Arod A. 1969. Mineral spring and saline lake of the western rift valley, Uganda[J]. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 10: 1152-1162.
- Borchert H. 1977. On the formation of Lower Cretaceous potassium salts and tachhydrite in the Sergipe Basin (Brazil) with some remarks on similar occurrences in West Africa (Gabon, Angola etc.) [A]. In: Klemm D D and Schneider H J, eds. *Time- and strata-bound ore deposits* [C]. Berlin: Springer-Verlag. 94-111.
- Chen Y H. 1983. Sequence of salt separation and regularity of some trace elements distribution during isothermal evaporation (25°C) of the Huanghai sea water [J]. *Acta Geologica Sinica*, 4: 379-390 (in Chinese with English abstract).

- Hite R J and Japakasetr T. 1979. Potash deposits of the Khorat Plateau, Thailand and Laos [J]. *Econ. Geol.*, 74(2): 448-458.
- Liu C L, Jiao P C, Wang M L, Yang Z C, Li S D and Chen Y Z. 2003. Characteristics of diagenesis of the Quaternary salt-bearing strata, Lop Nur Lake, Xinjiang [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 21(2): 240-246 (in Chinese with English abstract).
- Liu C L, Chen Y Z, Jiao P C and Wang M L. 2006a. Crystallizing experiments and probing of chemical reaction of glauberite, Lop Nur salt lake, Xinjiang, China [J]. *Mineral Deposits*, 25(Supp.): 223-236 (in Chinese).
- Liu C L, Chen Y Z, Chen W S, Jiao P C, Wang M L and Li S D. 2006b. Studies of fluid inclusions in glauberite of Middle -Upper Pleistocene strata and their paleoclimate significance in Lop Nur salty lake, Xinjiang, NW China [J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 26(1): 94-98 (in Chinese with English abstract).
- Liu C L, Jiao P C, Wang M L and Chen Y Z. 2007. Sedimentation of glauberite and its effect on potash deposits formation in Lop Nur salt lake, Xinjiang, China [J]. *Mineral Deposits*, 26(3): 322-329 (in Chinese with English abstract).
- Liu C L, Jiao P C, Chen Y Z and Wang M L. 2008. Late Pleistocene mirabilite deposition in the LOP Nur saline lake, Xinjiang, and its paleoclimate implications [J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 29(4): 397-404 (in Chinese with English abstract).
- Lowenstein T K, Spencer R J and Zhang P X. 1989. Origin of ancient potash evaporites: Clues from the modern nonmarine Qaidam Basin of Western China [J]. *Science*, 245: 1090-1092.
- Risacher F and Clement A. 2001. A computer program for the simulation of evaporation of natural waters to high concentration [J]. *Comput. Geosci.*, 27: 191-201.
- Sun D P, Li B X, Ma Y H and Liu Q Z. 1995. An investigation on evaporating experiments for Qinghai-Lake Water, China [J]. *Journal of Salt Lake Science*, 3(2): 10-19 (in Chinese with English abstract).
- Usiglio I L. 1889. Analyse de l'eau de la Mediteranee sur les cotes de Fiance. Etutes sur la composition de l'eau dela Mediteranee et sur l'exploitation des sels quelle contient [J]. *Ann. Chim. Phys.*, (3): 1152.
- Utha-Aroon C. 1993. Continental origin of the Maha Sarakham evaporites, northeastern Thailand [J]. *Journal of Southeast Asian Earth Sciences*, 8(1): 193-206.
- Valyashko M G. 1965. Translated by Fan L, et al. Geochemical regularity for the formation of potash deposits [M]. Beijing: China Industrial Press. 144p (in Chinese).
- Wang M L. 1982. The geological significance of polyhalite in depression [J]. *Geol. Rev.*, 28(1): 28-37 (in Chinese with English abstract).
- Wang M L, Liu C L, Jiao P C, Han W T, Song S S, Chen Y Z, Yang Z C, Fan W D, Li T Q, Li C H, Feng J X, Chen J Z, Wang X M, Yu Z H and Li Y W. 2001. Saline lake potash resources in the Lop Nur, Xinjiang [M]. Beijing: Geol. Pub. House. 199-209 (in Chinese).

附中文参考文献

- 陈郁华. 1983. 黄海水 25℃ 恒温蒸发时的析盐序列及某些微量元素的分布规律 [J]. *地质学报* (4): 379-390.
- 刘成林, 王弼力. 1999. 罗布泊第四纪沉积环境演化与成钾作用 [J]. *地球学报*, 20(增) 264-270.
- 刘成林, 焦鹏程, 王弼力, 杨智琛, 李树德, 陈永志. 2003. 罗布泊第四纪含盐系成岩作用特征研究 [J]. *沉积学报*, 21(2): 240-246.
- 刘成林, 陈永志, 焦鹏程, 王弼力. 2006a. 罗布泊盐湖钙芒硝结晶实验与化学反应探讨 [J]. *矿床地质*, 25(增) 233-236.
- 刘成林, 陈永志, 陈伟十, 焦鹏程, 王弼力, 李树德. 2006b. 罗布泊盐湖更新世晚期沉积钙芒硝包裹体特征及古气候意义探讨 [J]. *矿物学报*, 26(1): 94-98.
- 刘成林, 焦鹏程, 王弼力, 陈永志. 2007. 罗布泊盐湖巨量钙芒硝沉积及其成钾效应分析 [J]. *矿床地质*, 26(3): 322-329.
- 刘成林, 焦鹏程, 陈永志, 王弼力. 2008. 罗布泊盐湖晚更新世末期芒硝岩沉积及其古气候意义 [J]. *地球学报*, 29(4): 397-404.
- 孙大鹏, 李秉孝, 马育华, 刘群柱. 1995. 青海湖湖水的蒸发实验研究 [J]. *盐湖研究*, 3(2): 10-19.
- 瓦里亚什科 M Г. 1965. 范立, 等译. 钾盐矿床形成的地球化学规律 [M]. 北京: 中国工业出版社.
- 王弼力, 刘成林, 焦鹏程, 韩蔚田, 宋松山, 陈永志, 杨智琛, 樊卫东, 李廷祺, 李长华, 冯紫星, 陈建忠, 王新民, 于志鸿, 李亚文. 2001. 罗布泊盐湖钾盐资源 [M]. 北京: 地质出版社.
- 王弼力. 1982. Q 凹陷杂卤石的地质意义 [J]. *地质论评*, 28(1): 28-37.
- 王弼力, 吴必豪, 田白, 李兴. 1992. 柴达木盆地马海盐矿床基本地质特征及形成条件浅析 [J]. *中国地质科学院矿床地质研究所刊*, 第 1 号 81-93.