

柴达木盆地西部尕斯库勒盐湖周缘岩系和湖内沉积物含铀性模拟

叶传永^{1,2}, 王志明³, 郑绵平^{1,2}, 郝伟林^{3,4}, 林效宾^{3,4}, 韩军^{3,4}

1. 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

2. 中国地质科学院盐湖与热水资源研究发展中心, 北京 100037

3. 核工业北京地质研究院, 北京 100029

4. 中核集团铀资源勘查与评价技术重点实验室, 北京 100029

摘要 以柴达木盆地西部尕斯库勒盐湖周缘岩系和湖内沉积物为研究对象, 通过淋滤实验和悬浮平衡模拟实验, 探讨该盐湖不同物源的含铀性。分析表明, 尕斯库勒盐湖周缘3种岩系(老地层、上新世含盐岩系、第四纪沉积物)淋滤液水化学特征类似, 且从淋滤液水化学特征可知该盐湖化学具有明显的再溶盐特征; 3种岩系淋滤作用强烈, 盐湖第四纪沉积物中的铀最容易被淋出, 上新世含盐岩系中的铀次之, 蚀源区岩石中的铀难淋出; 悬浮平衡实验表明, 悬浮液中铀含量随平衡时间增长呈现先迅速降低而后缓慢升高的变化趋势, 而沉积颗粒物中铀含量变化趋势与悬浮液中铀含量刚好相反, 说明铀在悬浮液和沉积颗粒物之间确实发生了交换, 且交换速率较快; 在平衡实验初期, 悬浮液中铀含量快速降低的现象可能是悬浮液中的铀被固相吸附所致; 不同时期铀的来源分析表明, 在新近纪和第四纪早期, 尕斯库勒盐湖内卤水和沉积物中的铀主要来自周边岩石的风化淋滤作用, 铀补给量相对较少, 而到了第四纪中、晚期, 铀主要来自上新世含盐岩系风化淋滤和深部水补给, 再加上沉积物和周边岩石化学风化, 铀补给量相对前一时期大得多。

关键词 周缘岩系; 湖内沉积物; 淋滤实验; 悬浮平衡实验; 含铀性; 尕斯库勒盐湖

中图分类号 P619.14

文献标志码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2014.35.007

Simulation Experiments on the Uraniferous Possibility of Peripheral Rock Series and Sediment from Gasikule Salt Lake, Western Qaidam Basin

YE Chuanyong^{1,2}, WANG Zhiming³, ZHENG Mianping^{1,2}, HAO Weilin^{3,4}, LIN Xiaobin^{3,4}, HAN Jun^{3,4}

1. MLR Key Laboratory of Saline Lake Resources and Environments; Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China

2. Research and Development Center for Saline Lake and Epithermal Deposit, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China

3. Beijing Research Institute of Uranium Geology, Beijing 100029, China

4. Key Laboratory of Uranium Resources Exploration and Evaluation Technology of China National Nuclear Corporation, Beijing 100029, China

Abstract In order to explore the uraniferous possibility in different parts of China, the leaching experiments of peripheral rock series and the equilibration experiment of sediment from Gasikule Salt Lake located in the western margin of Qaidam Basin are conducted in this paper. It is shown that the leachate has similar hydrochemical characteristics of three types of rock series (old strata, Pliocene salt-bearing

收稿日期: 2014-09-16; 修回日期: 2014-11-05

基金项目: 国防科工局核能开发项目(地HY230)

作者简介: 叶传永, 博士后, 研究方向为盐湖矿产普查与勘探, 电子信箱: chuanyongye@163.com; 郑绵平(通信作者), 中国工程院院士, 研究方向为盐湖学与盐类地质矿床学, 电子信箱: zhengmp2010@126.com

引用格式: 叶传永, 王志明, 郑绵平, 等. 柴达木盆地西部尕斯库勒盐湖周缘岩系和湖内沉积物含铀性模拟[J]. 科技导报, 2014, 32(35): 61-71.

strata and Quaternary sediment) around Gasikule Salt Lake. The hydrochemistry of Gasikule Salt Lake basin is deeply influenced by peripheral rock series and characterized by re-dissolved salt obviously. Three types of rock series suffer severely from eluviations, and the leaching trend is in the order of Quaternary sediment > Pliocene salt-bearing strata > old strata. In the equilibration experiment, the uranium concentration in the suspension decreases first and then slowly increases against the balance time. However, the uranium concentration in the sediments sees a reverse trend, which illustrates that the uranium has a rapid exchange between the suspension and the sediment. The uranium in the suspension absorbed by the sediment may be accounted for the decrease of the uranium concentration in the suspension at the first stage of the equilibration experiment. During Neogene and early Quaternary, the uranium in Gasikule Salt Lake's brine and sediment mainly comes from the chemical weathering in the peripheral old strata. However, the Pliocene salt-bearing strata and the deep water contain the majority of uranium sources during late Quaternary, coupled with sediment and old strata weathering, this period enjoys larger uranium supplementary amount than that in the periods of Neogene and early Quaternary.

Keywords peripheral rock series; sediment; leaching experiments; equilibration experiment; uranium mineralization; Gasikule Salt Lake

目前,关于中国盐湖物质来源方面的研究很多。郑绵平等^[1]通过构造地球化学等研究,提出了青藏高原盐湖物质来源主要来自岩石风化、继承性含盐岩系和深部补给,指出构成大量富B、Li等组分的特种盐湖,主要来自地壳深部的重熔岩浆(中酸性岩浆等),通过地热水和富硼岩石(主要是新生代火山沉积岩、花岗岩等)的溶滤水携出,并在收缩盐湖次级盆地富集成矿。郑喜玉等^[2]认为西藏盐湖成盐物质主要来自蚀源区岩石和土壤中可溶盐类的风化和淋滤作用,壳内深部重熔岩浆或火山作用的热溶液和天然水热溶液循环是次要来源,海源和深层卤水补给则很少。新疆盐湖成盐元素的补给来源主要来自蚀源区岩石风化淋滤作用、古盐(盐丘构造)再溶解、地下水循环,其中以古盐再溶解为主,大气降水也有少量补给^[3]。关于柴达木盆地盐湖成盐物质来源问题,虽然整个盆地各个时期不同地区的成矿物质来源稍有不同,大致有4种来源:周围岩石风化淋滤、深循环水、火山热泉水和古盐湖迁聚水^[1,4-6]。

在盐湖物质来源已经基本查明的前提下,开展了一些蚀源区岩石淋滤实验研究。例如,为证明柴达木盆地新生代上新世含盐地层的盐类矿物再溶解对区域水化学的影响,张彭熹等^[4]对盆地西部含盐岩系的组合样品进行淋滤风化实验,结果表明该含盐岩系阴离子迁出顺序为 $\text{Cl}^- \rightarrow \text{SO}_4^{2-} \rightarrow \text{HCO}_3^-$,与盆地范围内(除大气降水之外)所有天然水离子含量顺序($\text{Cl}^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{HCO}_3^- + \text{CO}_3^{2-}$)相同,而与世界河川水离子含量顺序($\text{HCO}_3^- + \text{CO}_3^{2-} > \text{SO}_4^{2-} > \text{Cl}^-$)^[7]不同,进一步证实盆地内一些河流水或者油田水所出现的碳酸根离子有时大于硫酸根离子是由雨水或冰雪融水掺杂导致。张彭熹等^[4]采用硫酸盐型河水对锡铁山至盐湖构造之间的第三纪和第四纪许多沉积岩进行的溶滤实验结果证实,溶滤数天后即可检出钾,说明了钾在沉积岩中的再迁移作用对柴达木盆地现代盐湖钾资源的形成有一定作用。迄今为止,柴达木盆地盐湖还未见关于蚀源区岩石和沉积物对盐湖卤水中铀含量影响的模拟实验的报道。

尕斯库勒盐湖位于柴达木盆地西北部,目前已有部分盐湖成矿物质来源研究^[4,6,8-15]。该盐湖北部油砂山组岩层中,夹

有较多的新近纪含石膏盐层。这些岩层在早更新世中期的褶皱隆起,使岩石中的成矿元素遭受淋滤并随地表和地下径流迁移到湖泊中,它们自上新世末以来一直在持续不断地补给盐湖,是盐湖盐类物质的来源之一。尕斯库勒盐湖边也可见到深层水补给的迹象^[6]。因此,尕斯库勒盐湖成矿物质来源主要有3种,即周边岩石风化、上新世含盐岩系淋滤、深部水(原生水、热液水、深层淋滤水),只是在不同时期、不同区域内,3种来源所占比重各不相同。

基于此,认为尕斯库勒盐湖周缘地质体与盐湖中铀的来源有二个关系:一是盐湖周缘基岩和沉积岩系经过降雨淋滤作用产生的溶解铀通过地表水和地下水的径流进入盐湖;二是已经沉积的含铀盐湖沉积物在盐湖内部与卤水间的水岩交换作用释放或者吸附的铀。结合尕斯库勒盐湖周边地质背景,设计了2组模拟实验:蚀源区岩石、上新世含盐岩系、第四纪沉积物的淋滤实验和盐湖沉积物的悬浮平衡实验,分别模拟上述2种关系。文献中报道的淋滤实验多在淋溶管中利用动态模拟系统完成^[16-20],而且悬浮平衡实验多为研究颗粒物对重金属的吸附解吸行为^[18,21-27]及颗粒物向水体中释放重金属的行为^[28],而盐湖蚀源区岩石和湖内沉积物含铀性研究则很少。本研究通过淋滤实验和悬浮平衡实验,以确定不同类型岩石含铀性和淋出效果及悬浮平衡时间对沉积物中铀释放的影响。

1 研究区概况

尕斯库勒盐湖位于柴达木盆地西北缘,地理坐标为:90°35'E~91°07'E,37°57'N~38°15'N,面积约800 km²,属青海省海西蒙古族藏族自治州茫崖镇管辖(图1^[29])。盐湖北部为阿哈堤山,属阿尔金山山系,最高峰阿卡腾能山海拔4790 m;东北部为油砂山,走向NW,海拔一般为3200~3600 m,主峰高3835 m;东部为东柴山丘陵;南为祁漫塔格山,属昆仑山系,山体走向NWW,海拔一般为4000~4500 m,主峰高5684 m,其上终年积雪并发育有现代冰川。盐湖位于由以上这些高低不等的山体围成的尕斯库勒盆地中央低洼地带,海拔2860 m左右。

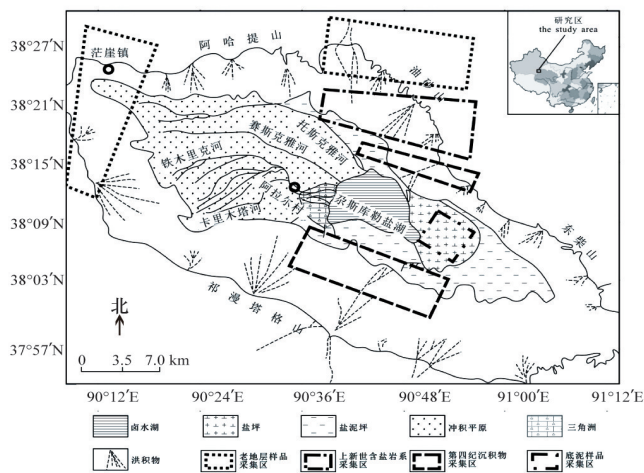


图1 尕斯库勒盐湖位置图及样品采集区分布

Fig. 1 Location of Gasikule Salt Lake and the distribution area of samples

周边及盐湖区出露分布的地层有新元古界震旦系、下古生界(未细分)、泥盆系、石炭系、三叠系、侏罗系、白垩系、古近系、新近系、第四系^[4,30,31]。1) 新元古界震旦系。为本区出露的最古老地层,主要见于盐湖西北部的阿尔金山山前,在祁漫塔格也有零星分布,呈出露面积不大的断块状产出,原岩为一套浅变质到中深变质片岩、千枚岩、大理岩、片麻岩等,其中夹中基性变质火山岩。2) 下古生界。在阿尔金山和祁漫塔格均有发育,但盐湖周边附近地区仅在阿尔金南麓见其零星分布,为碳硅泥岩型建造,主要岩性为灰岩、大理岩、白云质灰岩、硅质岩、板岩、千枚岩夹酸性-基性火山岩。3) 上古生界。泥盆系只发育上统,石炭系齐全。泥盆系上统,出露在茫崖镇石棉矿一带,其岩性为灰黑、黑色灰岩。受后期构造变形影响,其岩性较破碎,裂隙发育,普遍被网状白色方解石脉充填。石炭系,出露在盐湖南部的祁漫塔格北坡,与泥盆系相伴,被华力西期中酸性岩浆岩侵入,由砂岩、页岩、和灰岩组成。4) 中生界。三叠系,在阿尔金山及湖区缺失,在祁漫塔格地区发育,由砂岩、页岩、灰岩夹中酸性火山岩和煤层组成,总厚2000~5500 m,显示了印支旋回构造运动的南北差异性特征。侏罗系,广泛分布在阿尔金山山前;在祁漫塔格仅侏罗系下统在局部地段发育。本区的侏罗系为陆相含煤碎屑岩建造夹少量中酸性火山岩,属于山前或山间断陷类磨拉石式沉积。白垩系,阿尔金山地区有发育,祁漫塔格地区缺失,岩性由灰绿色砂砾岩、粗砂岩与紫红色砂岩、砂砾岩互层组成。5) 新生界。(1) 古近系,分布在盐湖北部的狮子沟-干柴沟之间的古近系与新近系组成背斜构造。古新统和始新统岩性为灰色、黑灰色泥岩、泥灰岩。古新统上部夹薄层硬石膏和芒硝(钙芒硝或芒硝,有待核查);始新统上部亦夹有薄层硬石膏(石膏)、芒硝外还有薄层石盐。渐新统为暗色泥岩、灰质和云质泥岩、粉砂岩,其下段夹膏、盐和芒硝薄层,厚257~2389 m。(2) 新近系,广泛分布在

盐湖北部的阿尔金山及油砂山一带,中新统和上新统均有发育,且厚度都在km以上,为本区的主要生/储油层。盐湖北部油砂山一带的中新统由绿灰色、灰黑色泥岩、砂质泥岩夹泥灰岩组成,含卤水层厚达1529~2162 m。上新统在狮子沟一带岩性为灰绿色砂岩、砂质泥岩、泥岩,厚776~2048 m;在南翼山一带,赋有大量膏盐层,间夹芒硝和白钠镁矾和薄层盐及丰富富钾卤水。(3) 第四系的更新统为冲洪积砂砾层、湖积粉砂岩、泥岩夹岩盐、芒硝、石膏层。在盐湖北面分布的更新统灰色含石膏粗砂岩、砂砾岩。岩石的碎屑组分有黑色硅质岩、肉红色花岗岩、中酸性火山岩等,其物源并非来自下伏的古近系和新近系,而是较遥远的阿尔金山基底地体。全新统有冲洪积层、风成砂、含粉砂石盐、粉砂石盐和淤泥等组成。

盐湖地下水主要为南部祁漫塔格山、西部泉集河(铁木里克河、卡里木塔河、赛斯克雅河、托斯克雅河)和北部阿哈提山地表径流渗透补给。卡里木塔河、铁木里克河、赛斯克雅河为季节性河流,托斯克雅河为常年性河流。其中,卡里木塔河和铁木里克河在阿拉尔村汇集形成阿拉尔河,阿拉尔河为常年性河流。

2 模拟实验及样品分析

2.1 样品选择及处理

样品选择:由于尕斯库勒盐湖周边地层出露较多,鉴于目前条件所限,为确定蚀源区不同时代岩性的淋出效果,本次淋滤实验的样品是2011年采集的盐湖周围蚀源区年代早于中新世(寒武纪、泥盆纪、石炭纪、侏罗纪、白垩纪)的15个样品混合样(以老地层混合样表示)、上新世含盐岩系18个样品混合样、第四纪沉积物19个样品混合样,分别记为GSLLG12-01、GSLLG12-02、GSLLG12-03,样品采集区分布如图1所示。悬浮平衡实验选择2011年采集的盐湖内23个底泥混合样,记为GSJPG12-0(表1)。这些样品已经碎至200目并用于主微量分析。

表1 尕斯库勒盐湖悬浮平衡和淋滤实验样品信息

Table 1 Details of the samples in the leaching experiments and equilibration experiment

序号	样品编号	岩性	平均铀含量/($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$)	实验项目
1	GSLLG12-01	老地层混合样	2.56	淋滤
2	GSLLG12-02	上新世含盐岩系混合样	2.36	淋滤
3	GSLLG12-03	第四纪沉积物混合样	2.67	淋滤
4	GSJPG12-0	底泥混合样	7.95	悬浮平衡

原液选择:蚀源区主要补给水来自大气降水,用当地大气降水能较真实地模拟当地的状况,故采集当地大气降水作为淋滤液,编号为GSLL12-0。由于湖内沉积物主要与卤水

接触,所以悬浮平衡实验中悬浮液选择该盐湖卤水,编号为GSJP12-0。

2.2 淋滤实验方案设计

1) 淋滤装置设计:直径为5 cm、高为35 cm带刻度的有机玻璃管(图2),管子上端开口,底部封闭,在距管底部高约1 cm处的侧面设有一直径约1 cm的出水孔。

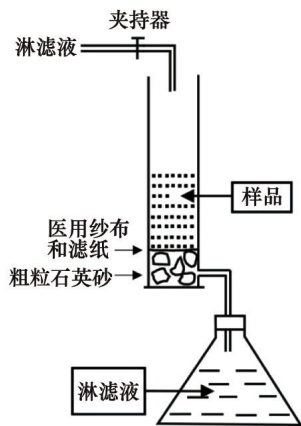


图2 淋滤实验装置

Fig. 2 Installation of leaching experiment

2) 样品填充:为防样品从出水口流出,出水口安装过滤网,为便于淋滤液收集,出水孔用有机玻璃管连接后套上乳胶管作为淋滤水出口连接到淋滤液收集器上。由于样品为碎至200目的粉末,粒度小,为使出水孔不被堵塞,在管子底部铺上高约3 cm的粗粒石英,高度超过出水孔1 cm,然后在石英上面铺设一层医用纱布和滤纸。粗粒石英在使用前已经用稀盐酸浸泡7 d并用去离子水清洗3遍。采用湿法装柱,边倒样品边用玻璃棒捣实。样品量为100 g,在柱中高度约为3 cm,在样品上面铺一层滤纸。

3) 进水:每根有机玻璃管每天加入100 mL淋滤液,小心沿管壁加入以免扰动表层样品,并控制夹持器,保证100 mL淋滤液在一天的时间内全部流过样品。

4) 淋滤液收集:第0~100、100~200、300~400、500~600、800~900 mL淋滤液通过样品时收集淋滤液,立即测定电导率(CON)、总溶解固体(TDS)、盐度,然后淋滤液用于水筒分析和微量元素分析。

5) 最后一次淋滤液通过后,将有机玻璃管内固体样品倒出并固液分离,测试微量元素含量。

6) 同时进行一组平行实验。

2.3 悬浮平衡实验方案设计

1) 选择5份自然风干的底泥混合样(GSJPG12-0),样品各100 g。

2) 取5个500 mL烧杯,各加入盐湖卤水500 mL,固液比为1:5。

3) 为减少悬浮平衡过程中水分的挥发,用铝箔将杯口封住,室温悬浮平衡21 d。

4) 每天搅拌2次,搅拌前测量物化参数(CON、TDS、盐度、pH值);第1、2、4、9、21 d将一个样品固液分离;分离得到的卤水用于水筒分析和微量元素分析;分离出来的沉积物用于微量元素分析。

5) 同时进行一组平行实验。

悬浮平衡实验流程如图3所示。

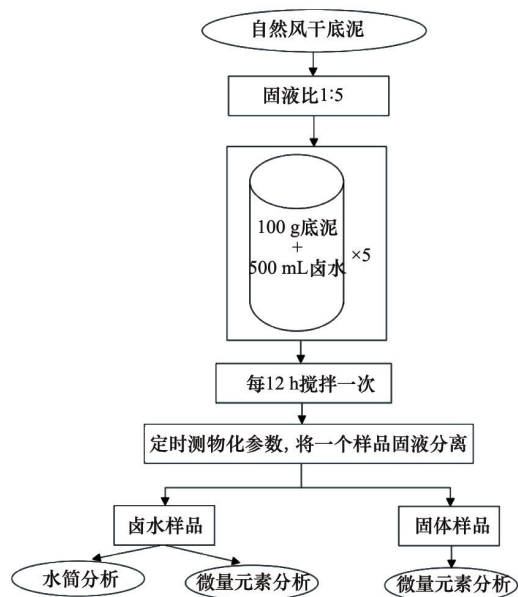


图3 悬浮平衡实验流程

Fig. 3 Flowchart of equilibration experiment

2.4 样品分析方法

水筒分析: Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 CO_3^{2-} 、 HCO_3^- 、 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Na^+ 、 Mg^{2+} , 依据《DZ/T0064.51—93 地下水水质检验方法》,用DIONEX-500离子色谱仪测定 F^- 、 Cl^- 、 NO_3^- 、 SO_4^{2-} ; 依据 DZ/T0064.28—93, 用DIONEX-500离子色谱仪测定 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Na^+ 、 Mg^{2+} ; CO_3^{2-} 、 HCO_3^- 用滴定法测试。总溶解性固体(TDS)的计算方法为所有筒分析离子总和减去 HCO_3^- 的50%^[32,33]。

水样微量元素分析:将水样用定性滤纸过滤,准确移取过滤后水样50 mL于150 mL锥形瓶中,加入少量乙酸氨,用 HNO_3 (2 mol/L) 调节pH值为5.3,加入预先处理好的Chelex-100螯合树脂,贴封口膜放振荡器震荡15 h后取出,转入分离装置,待无液体流出后,用 HNO_3 (2 mol/L) 少量多次淋洗树脂至20 mL,加水至50 mL用HR-ICP-MS(ElementII)测试。

固样微量元素分析:将50 mg粉末(200目)置于Teflon烧瓶中分别用 HNO_3 和 HF 溶解2 d后加入 HClO_4 进一步溶解。蒸干后用5%的 HNO_3 溶液将样品稀释到50 mL,最后做微量元素分析。分析过程中同时测定2个GBW系列标样,分析误差<5%。详细分析测试流程可参考《DZ/T0223—2001 电感耦合等离子体质谱(ICP-MS)方法通则》和Qi等^[34]。

所有样品在核工业北京地质研究院分析测试所完成。

3 淋滤实验结果

3.1 淋滤液 pH 值变化特征

3 个样品淋滤液的 pH 值变化特征如表 2 和图 4 所示。淋

滤液的 pH 值均未超过 8, pH 值的变化趋势相同: 增大→降低→增大→趋于稳定, 即初始淋滤液的弱酸性迅速变为中性, 随着淋滤体积增多, pH 值在中性附近震荡变化。

表 2 尕斯库勒盐湖淋滤实验淋滤液水化学特征和铀含量

Table 2 Hydrochemistry and uranium concentration of leachate in the leaching experiments

淋滤液编号	岩性	淋滤液阶段/mL	pH 值	主量离子含量/(mg·L ⁻¹)								TDS/(g·L ⁻¹)	水化学类型	铀含量/(μg·L ⁻¹)
				Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	CO ₃ ²⁻	HCO ₃ ⁻	Na ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺			
GSL12-0		初始淋滤液	5.48	3.58	76.20	0	26.70	33.90	2.79	0.52	10.20	0.14	SO ₄ -Na·Ca	
GSL12-1-1	老地层混合样	0~100	6.90	2456	1883	0	76.10	1430	124	81.50	623	6.64	Cl·SO ₄ -Na·Ca	1.35
GSL12-1-3	上新世含盐岩系混合样		7.07	30522	4148	0	106	21581	620	378	712	58.01	Cl-Na	2.20
GSL12-1-5	第四纪沉积物混合样		7.24	3925	2476	0	119	2776	66.10	93	641	10.04	Cl·SO ₄ -Na	3.56
GSL12-2-1	老地层混合样	100~200	6.69	993	1633	0	44.60	710	91.50	51.50	500	4.00	SO ₄ ·Cl-Na·Ca	0.51
GSL12-2-3	上新世含盐岩系混合样		6.72	9574	3111	0	46.40	6982	256	180	715	20.84	Cl-Na	0.89
GSL12-2-5	第四纪沉积物混合样		6.91	1409	2452	0	65	1163	52	67.70	643	5.82	SO ₄ ·Cl-Na·Ca	2.24
GSL12-3-1	老地层混合样	300~400	7.58	39.20	144	0	48.40	53.30	15	3.51	41.40	0.32	SO ₄ -Na·Ca	0.05
GSL12-3-3	上新世含盐岩系混合样		7.74	151.00	158	0	145	204	7.13	3.27	24.10	0.62	Cl·SO ₄ -Na	0.18
GSL12-3-5	第四纪沉积物混合样		7.12	17.10	1437	0	26.70	32.90	15.70	9.15	540	2.07	SO ₄ -Ca	0.44
GSL12-4-1	老地层混合样	500~600	7.07	5.50	75.60	0	54.70	30.60	10.10	1.52	18.60	0.17	SO ₄ ·HCO ₃ -Na·Ca	0.03
GSL12-4-3	上新世含盐岩系混合样		7.43	7.12	81.60	0	106	83.30	4.30	0.20	2.06	0.23	HCO ₃ ·SO ₄ -Na	0.12
GSL12-4-5	第四纪沉积物混合样		7.02	6.15	85.80	0	89.20	31.70	3.87	1.06	38.60	0.21	SO ₄ ·HCO ₃ -Ca·Na	0.07
GSL12-5-1	老地层混合样	800~900	6.84	1.90	33	0	58.40	11.70	7.22	1.42	18.1	0.10	HCO ₃ ·SO ₄ -Ca·Na	0.03
GSL12-5-3	上新世含盐岩系混合样		7.28	2.14	22	0	78.40	31.90	10.20	0.22	2.61	0.11	HCO ₃ -Na	0.03
GSL12-5-5	第四纪沉积物混合样		7.04	2.74	38.20	0	84.80	17.60	3.52	1.37	24.10	0.13	HCO ₃ ·SO ₄ -Ca·Na	0.07

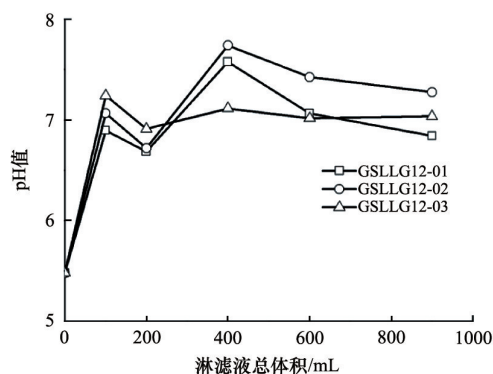


图 4 尕斯库勒盐湖淋滤实验中淋滤液 pH 值变化特征

Fig. 4 Variations of pH values in the leachate

但是 3 个样品的淋滤液的 pH 值变化趋势稍微有些不同, 变化幅度从大到小为: GSL12-02 > GSL12-01 > GSL12-03, 即上新世含盐岩系淋滤液的 pH 值变化最大, 盐湖第四纪沉积物淋滤液的 pH 值变化最小。可能是含盐岩系中含有大量盐类物质, 随着淋滤体积变化, 淋出的盐类成分也随着变化, 影响淋滤液的成分, 故影响淋滤液的 pH 值。而盐湖第四纪沉积物的物性较一致, 淋滤液成分随淋滤体积变化不大。

3.2 淋滤液水化学特征

淋滤液主要化学组成见表 2。总体而言, 淋滤前期阴离子以 Cl⁻、SO₄²⁻ 为主, 后期以 HCO₃⁻ 为主, 而阳离子始终以 Na⁺ 为主, 还有少量 K⁺、Ca²⁺、Mg²⁺ 则很少。因此造成了水化学类型

渐变趋势,即从前期的 $\text{Cl}\cdot\text{SO}_4\text{-Na}\cdot\text{Ca}$,转变为后期的 $\text{HCO}_3\cdot\text{SO}_4\text{-Ca}\cdot\text{Na}$ 。

老地层混合样(CGLLG12-01)随着淋滤溶液量增大,淋滤液中所有离子含量均在100 mL淋滤液达到最大值,而后就快速降低,意味着淋出的离子越来越少(图5)。但是 HCO_3^- 有些例外,200 mL后基本保持相对稳定的变化趋势,由于淋滤实验中淋滤速度很慢,因此淋滤液中的 HCO_3^- 浓度基本上反映了与大气 CO_2 的平衡,所以变化不大。随着淋滤进程加深,淋滤液水化学特征由以碱和强酸为主的水溶液转变为以碱土金属和弱酸为主的水溶液(图6),且碳酸盐硬度超过50%,可见该样品中碱金属和强酸性物质较易被淋出。且水化学类型变化趋势为: $\text{SO}_4\text{-Na}\cdot\text{Ca}\rightarrow\text{Cl}\cdot\text{SO}_4\text{-Na}\cdot\text{Ca}\rightarrow\text{SO}_4\cdot\text{Cl-Na}\cdot\text{Ca}\rightarrow\text{SO}_4\text{-Na}\cdot\text{Ca}\rightarrow\text{SO}_4\cdot\text{HCO}_3\text{-Na}\cdot\text{Ca}\rightarrow\text{HCO}_3\cdot\text{SO}_4\text{-Ca}\cdot\text{Na}$ 。除了开始100 mL淋滤液中 Cl^- 大于 SO_4^{2-} 之外,其他淋滤液中离子含量从大到小的顺序始终为: $\text{SO}_4^{2-} > \text{Cl}^- > \text{Na}^+ > \text{Ca}^{2+} > \text{K}^+ > \text{Mg}^{2+} > \text{HCO}_3^-$ 。

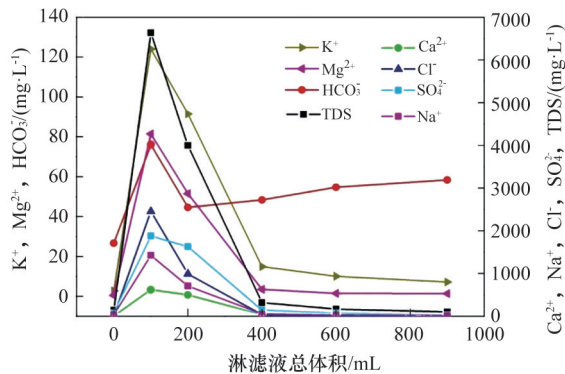


图5 尕斯库勒盐湖老地层混合样淋滤液离子含量变化特征
Fig. 5 Ion content in the leachate from old strata

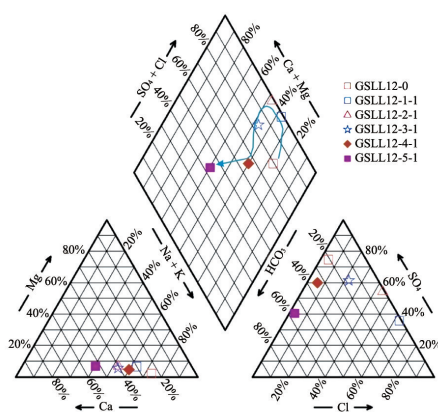


图6 尕斯库勒盐湖老地层混合样淋滤液Piper图解
Fig. 6 Piper chart of the leachate from old strata

上新世含盐岩系混合样(CGLLG12-02)随着淋滤溶液增多,淋滤液中离子变化趋势与老地层混合样类似,离子含量快速降低(图7)。同样是由于淋滤实验中淋滤速度很慢,淋滤液与大气的 CO_2 平衡造成淋滤液中的 HCO_3^- 浓度基本保持

相对稳定的变化趋势。随着淋滤进程加深,淋滤液水化学特征由以碱和强酸为主的水溶液转变为以碱土金属和弱酸为主的水溶液(图8)。且水化学类型变化趋势为: $\text{SO}_4\text{-Na}\cdot\text{Ca}\rightarrow\text{Cl-Na}\rightarrow\text{Cl}\cdot\text{SO}_4\text{-Na}\rightarrow\text{HCO}_3\cdot\text{SO}_4\text{-Na}\rightarrow\text{HCO}_3\text{-Na}$ 。淋滤液中离子含量从大到小的顺序为: $\text{Cl}^- > \text{Na}^+ > \text{SO}_4^{2-} > \text{Ca}^{2+} > \text{K}^+ > \text{Mg}^{2+} > \text{HCO}_3^-$ 。

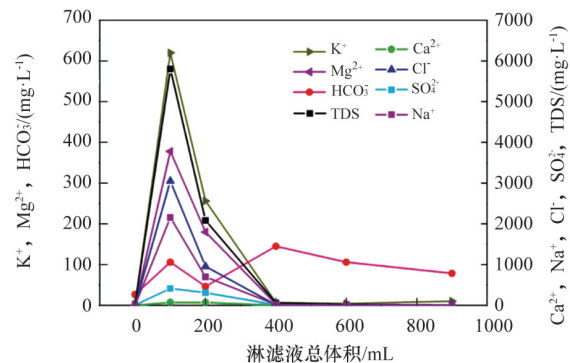


图7 尕斯库勒盐湖上新世含盐岩系混合样淋滤液离子含量变化特征
Fig. 7 Ion content of leachate from Pliocene salt-bearing strata

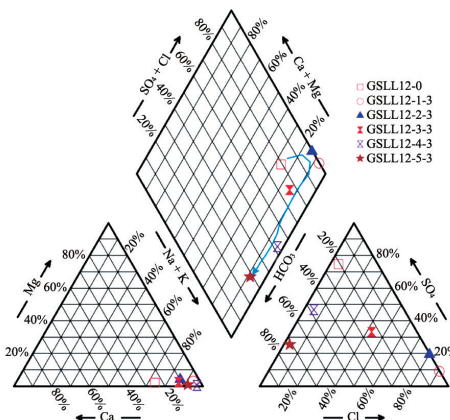


图8 尕斯库勒盐湖上新世含盐岩系混合样淋滤液Piper图解
Fig. 8 Piper chart of the leachate from Pliocene salt-bearing strata

盐湖第四纪沉积物混合样(CGLLG12-03)随淋滤溶液增多,淋滤液中离子含量迅速降低,变化趋势与前面2个混合样类似,只是淋滤后期有些离子相对析出速率有差异(图9)。虽然 HCO_3^- 没有呈现逐渐降低趋势,但是前期变化幅度较大,后期趋于稳定,还是空气中 CO_2 与淋滤液相互平衡的结果。随着淋滤进程加深,淋滤液水化学特征发生较大变化,由碱和强酸为主的水溶液转变为非碳酸盐硬度超过50%水溶液,再转变成阴阳离子毫克当量百分数均匀的水溶液,最后变成以碱土金属和弱酸为主的水溶液(图10)。且水化学类型变化趋势为: $\text{SO}_4\text{-Na}\cdot\text{Ca}\rightarrow\text{Cl}\cdot\text{SO}_4\text{-Na}\rightarrow\text{SO}_4\cdot\text{Cl-Na}\cdot\text{Ca}\rightarrow\text{SO}_4\text{-Na}\cdot\text{Ca}\rightarrow\text{SO}_4\cdot\text{HCO}_3\text{-Na}\cdot\text{Ca}\rightarrow\text{HCO}_3\cdot\text{SO}_4\text{-Ca}\cdot\text{Na}$ 。

$\text{Ca} \rightarrow \text{SO}_4 \cdot \text{HCO}_3 - \text{Ca} \cdot \text{Na} \rightarrow \text{HCO}_3 \cdot \text{SO}_4 - \text{Ca} \cdot \text{Na}$ 。淋滤液离子含量从大到小顺序大部分为: $\text{Cl}^- > \text{Na}^+ > \text{SO}_4^{2-} > \text{Ca}^{2+} > \text{HCO}_3^- > \text{Mg}^{2+} > \text{K}^+$ 。

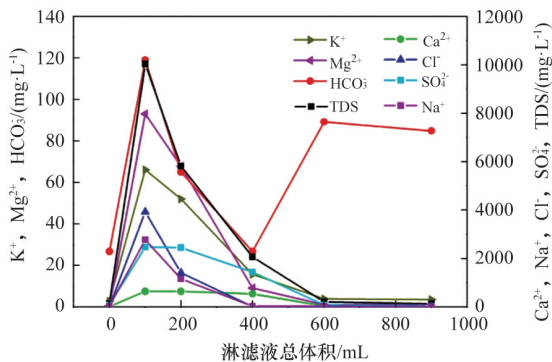


图9 尕斯库勒盐湖第四纪沉积物混合样淋滤液离子含量变化特征

Fig. 9 Ion content of leachate from Quaternary sediment

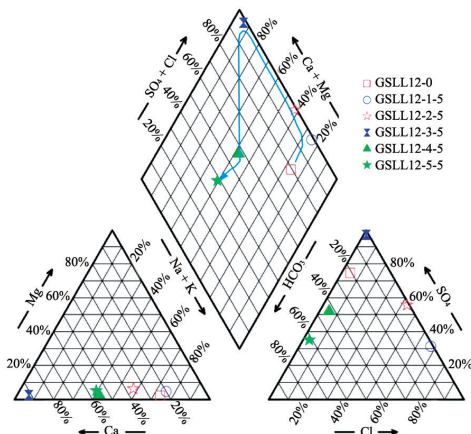


图10 尕斯库勒盐湖第四纪沉积物混合样淋滤液Piper图解

Fig. 10 Piper chart of the leachate from Quaternary sediment

虽然不同岩性样品的淋滤效果存在较大差异,但是水化学特征都是以碱金属及 H^+ 为主的水溶液逐渐转变成以碱土金属及 HCO_3^- 为主的水溶液,中间的演变过程稍有不同。

3.3 淋滤液铀含量变化特征

淋滤液铀含量组成见表2。淋滤液体积在100、200、400、

600、900 mL时,老地层混合样淋滤液中铀含量分别为1.35、0.51、0.05、0.03、0.03 $\mu\text{g/L}$;上新世含盐岩系混合样淋滤液中铀含量分别为3.56、2.24、0.44、0.07、0.03 $\mu\text{g/L}$;第四纪沉积物混合样淋滤液中铀含量分别为2.20、0.89、0.18、0.12、0.07 $\mu\text{g/L}$ 。随着淋滤体积增多,3种岩性淋滤液中铀含量都显著降低(图11),显示了强烈淋滤的作用。前面400 mL淋滤液中,3种岩性淋滤液中铀含量顺序为GSLLG12-03>GSLLG12-02>GSLLG12-01,而到了600 mL以后,3种岩性淋滤液铀含量相差不大。说明了2个变化特征,其一,在同样条件下,盐湖第四纪沉积物中的铀最容易被淋出,上新世含盐岩系中的铀次之,蚀源区岩石中的铀难淋出;其二,600 mL淋滤液把3种岩性内大部分的铀淋出来。

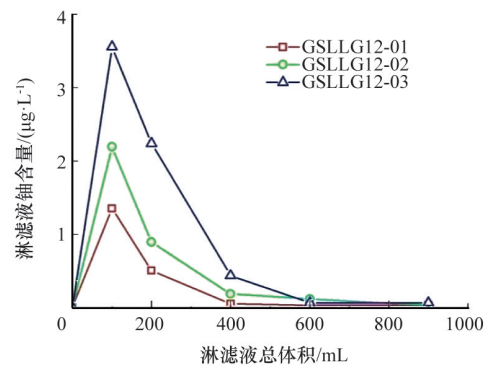


图11 尕斯库勒盐湖淋滤实验中淋滤液铀含量随淋滤体积变化特征

Fig. 11 Variations of uranium concentration in leachate

4 悬浮平衡实验结果

4.1 悬浮液pH值变化特征

底泥沉积物悬浮液的pH值变化特征如表3和图12所示。悬浮平衡21 d,pH值呈现先增高后降低趋势,在第4、9 d达到最大值,但所有悬浮液的pH值均没有超过7,都显示为弱酸性。说明随着平衡时间增长,先有少量弱碱性物质从底泥转入悬浮液,导致pH值缓慢增高,而后受悬浮液本身水化学成分和空气中 CO_2 影响,慢慢接近原始悬浮液pH值。

表3 尕斯库勒盐湖悬浮平衡实验分析结果

Table 3 Analysis results of suspension liquid and sedimental particulate matter from equilibration experiment

序号	样品编号	平衡时间/d	悬浮液离子含量/($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)								TDS/($\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$)	pH值	卤水水化学类型	悬浮液中铀含量/($\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$)	沉积颗粒物中铀含量/($\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$)	对迁移率(K_a)
			Cl^-	SO_4^{2-}	CO_3^{2-}	HCO_3^-	Na^+	K^+	Mg^{2+}	Ca^{2+}						
1	GSJP12-0	0	187430	35680	0	385	47200	3350	46100	1010	320.96	6.08	硫酸镁亚型	153.00	8.49	6.620
2	GSJP12-1	1	201870	34880	0	578	55200	3330	44050	1070	340.69	6.24	硫酸镁亚型	54.80	8.49	1.521
3	GSJP12-2	2	200710	31720	0	577	54226	3528	46150	1075	337.70	6.39	硫酸镁亚型	47.20	9.52	1.202
4	GSJP12-3	4	201040	34460	0	584	56300	3195	45550	1225	342.06	6.46	硫酸镁亚型	36.20	9.14	0.982
5	GSJP12-4	9	190910	33990	0	648	54850	3240	44950	610	328.87	6.46	硫酸镁亚型	38.50	8.74	1.026
6	GSJP12-5	21	194120	34810	0	580	52545	3645	46991	839	333.24	6.27	硫酸镁亚型	52.25	7.21	1.653

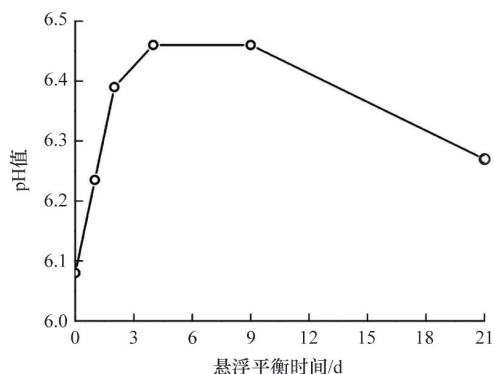


图12 尕斯库勒盐湖悬浮平衡实验悬浮液pH值
随时间变化特征

Fig. 12 Variations of pH values in
the suspension liquid

4.2 悬浮液水化学特征

悬浮液的水化学特征如表3所示。阴离子以 Cl^- 和 SO_4^{2-} 为主,阳离子以 Na^+ 和 Mg^{2+} 为主,而 CO_3^{2-} 几乎没有。与柴达木盆地盐湖平均值相差不大,但又有区别,显示出独特的化学组分系列和不同的水文地球化学形成条件。TDS为320.96~342.06 g/L,显示了较高的溶解性离子含量。悬浮液水化学类型都为硫酸镁亚型,没有发生变化。

随着平衡时间加长,各离子组分有了一定变化,其中 Cl^- 、 HCO_3^- 、 Na^+ 比原始悬浮液高, SO_4^{2-} 比原始悬浮液低,而其他离子没有一定规律性。可见不同离子在固体和悬浮液之间的分配规律不同。由于化学性质的差异造成了离子在悬浮液和估计之间交换速率和交换程度不同。但是悬浮液的TDS含量始终大于原始悬浮液,可见从固体进入悬浮液的离子比悬浮液进入固体的离子多。

4.3 悬浮液和沉积颗粒物中铀分布特征

悬浮液和沉积颗粒物中铀含量变化如表3所示。在第1、2、4、9、21天时,悬浮液中铀含量分别为54.80、47.20、36.20、38.50、52.25 $\mu\text{g/L}$ 。从中可知悬浮液中铀含量在1 d内迅速降低,随后降速变缓并在在第4天降到最低值36.20 $\mu\text{g/L}$,其后又缓慢升高至52.25 $\mu\text{g/L}$ (图13)。

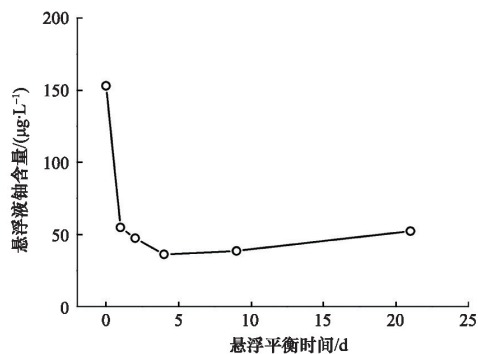


图13 尕斯库勒盐湖悬浮平衡实验悬浮液中铀含量变化特征
Fig. 13 Variations of uranium concentration in
suspension liquid

图13表明,卤水中铀转移到沉积颗粒物主要发生在1 d以内,而后又慢慢地从沉积颗粒物转移到卤水中。此平衡时间与兰州、包头、三门峡黄土在黄河水中的铀平衡时间^[35]类似。

在第1、2、4、9、21 d时,沉积颗粒物中铀含量分别为8.49、9.52、9.14、8.74、7.21 $\mu\text{g/g}$ 。从中可知沉积颗粒物中铀含量在前面2 d内稍有增高,到了第2天之后又迅速降低,总体上表现为先增高后降低的变化趋势(图14),与悬浮液中铀含量变化趋势(图13)刚好相反,说明了铀在悬浮液和沉积颗粒物之间确实发生了交换。

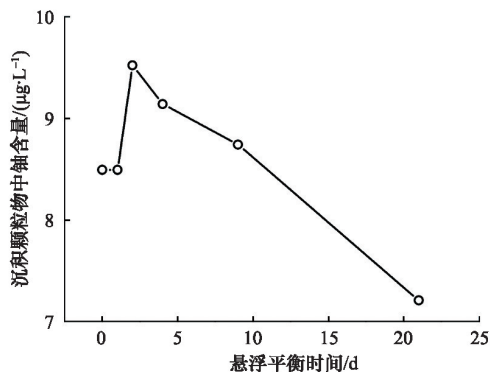


图14 尕斯库勒盐湖悬浮平衡实验沉积颗粒物中
铀含量变化特征

Fig. 14 Variations of uranium concentration in
sedimental particulate matter

5 讨论

5.1 水化学再溶盐特征

由2.3节可知,老地层混合样前面100 mL淋滤液中阴离子迁出顺序为 $\text{Cl}^- \rightarrow \text{SO}_4^{2-} \rightarrow \text{HCO}_3^-$,上新世含盐岩系和第四纪沉积物混合样所有淋滤液中阴离子迁出顺序为 $\text{Cl}^- \rightarrow \text{SO}_4^{2-} \rightarrow \text{HCO}_3^-$,与盆地范围内(除大气降水之外)所有天然水离子含量多少的顺序($\text{Cl}^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{HCO}_3^- + \text{CO}_3^{2-}$)^[4]相同,而与世界河川水离子含量顺序($\text{HCO}_3^- + \text{CO}_3^{2-} > \text{SO}_4^{2-} > \text{Cl}^-$)^[7]不同。说明上新世含盐岩系,乃至老地层岩石和湖内第四纪沉积物中的盐类矿物再溶解作用强烈,盐类物质按其溶解度的大小依次溶解后,改变了地表和部分地下水的化学组成。因此,尕斯库勒盐湖盆地水化学深受周围岩系(包括老地层、上新世含盐岩系、第四纪沉积物)的影响,具有明显的再溶盐的特征。

5.2 周围岩系供铀量

若假设各阶段淋滤液铀浓度为该阶段开始和结束时2个时间段的淋滤液平均值,阶段淋出的铀量=阶段淋出液体积×阶段淋滤液铀浓度。3个样品每个阶段淋出的铀量如表4所示。可见3种岩性各阶段淋出的铀量虽均不同,但都小于0.4 μg 。盐湖周缘老地层混合样、上新世含盐岩系、第四纪沉积物5个阶段总共900 mL淋滤液分别淋出0.3022、0.5344、0.9838 μg 铀。

表4 尕斯库勒盐湖淋滤实验各阶段淋滤液中铀含量
Table 4 Uranium concentration of leachate in each stage of leaching experiments

岩性	淋滤液 总体积/ mL	阶段淋 滤液体 积/mL	阶段淋滤 液铀浓度/ ($\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)	阶段淋 出的铀 量/ μg	累计淋 出的铀 量/ μg
老地 层混 合样	100	100	1.35	0.1353	0.1353
	200	100	0.93	0.0929	0.2281
	400	200	0.28	0.0556	0.2837
	600	200	0.04	0.0085	0.2921
	900	300	0.03	0.0101	0.3022
上新 世含 盐岩 系混 合样	100	100	2.20	0.2195	0.2195
	200	100	1.54	0.1544	0.3739
	400	200	0.54	0.1078	0.4817
	600	200	0.15	0.0302	0.5119
	900	300	0.08	0.0225	0.5344
第四 纪沉 积物 混合 样	100	100	3.56	0.3560	0.3560
	200	100	2.90	0.2900	0.6460
	400	200	1.34	0.2677	0.9137
	600	200	0.25	0.0503	0.9640
	900	300	0.07	0.0199	0.9838

就淋滤液中累计淋出铀量而言,3种岩性表现出不同的累计速率。如图15所示,老地层混合样在200 mL淋滤液之后,淋滤液中铀含量变化不大;湖内第四纪沉积物淋滤液中铀含量在600 mL淋滤液以后才变化不大;上新世含盐岩系的变化趋势介于上述2种岩性之间。另一个变化特征是,淋滤液累计淋出的铀量一直都是第四纪沉积物>上新世含盐岩系>老地层混合样。将各种岩系900 mL累计淋出的铀量与岩系初始铀含量(表1)对比可知,第四纪沉积物、上新世含盐岩系、老地层混合样900 mL累计淋出的铀量占初始铀含量的比例分别为0.37%、0.23%和0.12%。进一步说明尕斯库勒盐湖周缘地质体中,第四纪沉积物中的铀最容易淋出,上新世含盐岩系次之,而蚀源区岩石中的铀最难淋出。

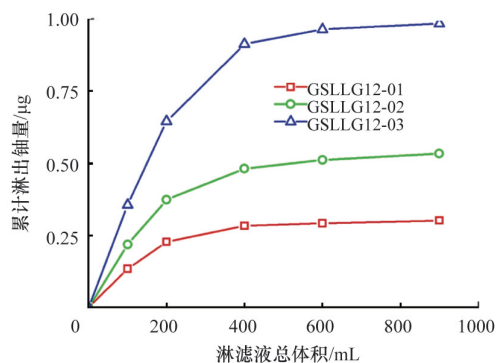


图15 尕斯库勒盐湖不同岩性样品淋滤液累计淋出铀量变化特征

Fig. 15 Variations of uranium concentration in the accumulative leachate

5.3 不同时期铀的来源分析

尕斯库勒盐湖成矿物质来源主要有3种,即周边岩石风化、上新世含盐岩系淋滤、深部水(原生水、热液水、深层淋滤水),只是在不同时期、不同区域内,3种来源所占比重各不相同。新近纪和第四纪早期,由于气候较为温暖湿润,化学风化作用进行得比较彻底,成矿物质来源主要是周边岩石的风化淋滤,同时较为强烈的地热活动也提供了丰富的B、Li、Sr等成矿物质。到了第四纪中、晚期,由于气候日趋干旱,化学风化作用减弱。上新世含盐地层的褶皱和断裂,使背斜构造地层中的盐类物质受到淋滤并使深层水沿断裂向上,含盐岩系的风化淋滤和深层水补给来源所占比重越来越大^[4,6]。因此,在新近纪和第四纪早期,尕斯库勒盐湖内卤水和沉积物中的铀主要来自周边岩石的风化淋滤作用,而含盐岩系和深部补给则很少,由于周边岩石铀淋出量少,所以该时间段内盐湖铀补给量相对较少。到了第四纪中、晚期,新构造运动使上新世含盐地层发生褶皱和断裂,使上新世盐类物质受到风化淋滤且深层水沿断裂向上流动,这段时期内尕斯库勒盐湖铀主要来自上新世含盐岩系风化淋滤和深部水补给,而且新近纪和第四纪早期沉积物也能提供一些铀,尽管此时周边岩石化学风化已经减弱,但是总体而言,该段时期内铀补给量相对前一时期大很多。

5.4 铀在卤水和沉积颗粒物间的分配关系

迁移强度是指单位时间内,元素由一个体系转入另一个体系(如由岩石转入水中)的数量。直接计算迁移强度比较困难,所以常采用元素的水迁移系数 K_a 评价其在风化淋滤过程中的活动性。 K_a 值越大,元素迁移能力越强,反之则弱^[36,37]。为衡量卤水和沉积物作用时,沉积物中元素的迁移能力,结合江雪艳^[35]衡量黄河黄土进入水体后元素的迁移能力公式和张祖还等^[37]风化作用中铀从岩石和矿物内带出和迁移的水迁移系数计算公式,本研究采用相对迁移率衡量沉积颗粒物中元素的迁移能力,定义为卤水相中某元素的物质的量分数与沉积颗粒物中该元素的物质的量分数的比值,其计算公式为

$$K_a = \frac{(M_a)_s / \sum (M_x)_s}{(M_a)_L / \sum (M_x)_L}$$

式中, $(M_a)_s$ 为卤水中某元素a的物质的量分数, mol/L; $(M_x)_s$ 为卤水中各元素的物质的量分数, mol/L; $(M_a)_L$ 为沉积物中某元素a的物质的量分数, mol/g; $(M_x)_L$ 为沉积物中各元素的物质的量分数, mol/g。

从上式可以看出,该系数比卤水中元素的绝对含量更加如实的反映出元素的迁移能力。一种元素的相对迁移率越大,则该元素从沉积物中转移进入水体的量愈多,元素的迁移能力愈强。因此,本文用水迁移系数 K_a 评价微量元素卤水和沉积颗粒物间的分配关系。

铀在悬浮平衡实验中的相对迁移率 K_L 介于0.98~6.62,小于Mo、Cd、Pb,大于Cu、Ni、Cr、Co、Th,表明铀从沉积颗粒物进

入悬浮液的迁移能力一般。图 16 为悬浮平衡实验中铀元素相对迁移率随悬浮平衡时间的变化特征,从中可知,第 1 天内相对迁移率下降很多,在第 4 天达到最低值,而后又稍有增大,此变化趋势与悬浮液中铀含量变化趋势(图 13)一致,可能是沉积颗粒物中铀总量为悬浮液中铀总量的 11 倍所导致。

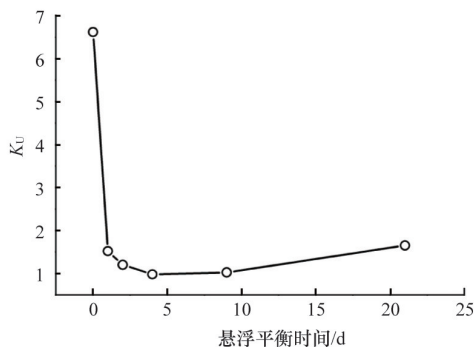


图 16 尕斯库勒盐湖悬浮平衡实验中铀元素相对迁移率随时间的变化

Fig. 16 Variations of uranium relative mobility against time (days) in equilibration experiment

悬浮液中溶解金属离子的浓度由以下 2 个相反的过程控制:由于离子交换和(或)与有机物结合的固体组分的降解导致的金属向悬浮液迁移;已释放进入悬浮液的金属离子被原有或新生成的固相所吸附^[28]。因此,在实验初期,悬浮液中铀元素浓度先快速降低的现象可能是悬浮液中的铀被固相吸附,而后期又缓慢上升,可能是铀元素在悬浮液与沉积颗粒物之间达到大致平衡的前提下,已释放进入悬浮液的铀被原有或新生成的固相所吸附。

6 结论

1) 尕斯库勒盐湖周缘 3 种岩系(老地层、上新世含盐岩系、第四纪沉积物)淋滤液中的水化学特征类似。pH 值表现出同样的变化趋势:增大→降低→增大→趋于稳定;阴离子前期以 Cl^- 、 SO_4^{2-} 为主,后期以 HCO_3^- 为主,而阳离子始终以 Na^+ 为主,含少量 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 则很少。由淋滤液阴离子迁出顺序可知,尕斯库勒盐湖盆地水化学深受周围岩系(包括老地层、上新世含盐岩系、第四纪沉积物)的影响,具有明显的再溶盐的特征。

2) 随着淋滤体积增多,3 种岩性淋滤液中铀含量都显著降低,显示强烈淋滤作用。淋滤液铀含量和累计淋出铀量均说明在同样条件下,盐湖第四纪沉积物中的铀最容易淋出,上新世含盐岩系中的铀次之,蚀源区岩石中的铀难淋出。

3) 悬浮平衡实验中,悬浮液中铀含量在 1 d 内迅速降低,随后降速变缓并在第 4 天降到最低值,后又缓慢升高;沉积颗粒物中铀含量随平衡时间增长呈现先增高后降低的变化趋势,与悬浮液中铀含量变化趋势相反,说明了铀在悬浮液和沉积颗粒物之间确实发生了交换,而且交换速率较快,在 1~2 d 内几乎达到平衡。在平衡实验初期,悬浮液中铀元素浓度先快速降低的现象可能是悬浮液中的铀被固相吸附,而后期

又缓慢上升,可能是铀元素在悬浮液与沉积颗粒物之间达到大致平衡的前提下,已释放进入悬浮液的铀被原有或新生成的固相所吸附。

4) 结合该地区新近纪以来气候和构造运动可知,尕斯库勒盐湖自新近纪以来铀在不同时间内有不同的物源,且有不断增多的趋势。

5) 第四纪沉积物、上新世含盐岩系、老地层混合样 900 mL 累计淋出的铀量占初始固体混合样铀含量的比例分别为 0.37%、0.23% 和 0.12%,而此时淋滤液中的铀含量已经很低。说明岩系中其他大量的铀还没有被淋滤出来,是否与岩性或者铀存在形态有关,有待于进一步做深入研究。

参考文献 (References)

- [1] 郑绵平, 向军, 魏新俊, 等. 青藏高原盐湖[M]. 北京: 北京科学技术出版社, 1989.
Zheng Mianping, Xiang Jun, Wei Xinjun, et al. Saline lakes of Tibetan Plateau[M]. Beijing: Beijing Science and Technology Press, 1989.
- [2] 郑喜玉, 唐渊, 徐昶, 等. 西藏盐湖[M]. 北京: 科学出版社, 1988.
Zheng Xiyu, Tang Yuan, Xu Chang, et al. Saline lakes of Tibet[M]. Beijing: Science Press, 1988.
- [3] 郑喜玉, 李秉孝, 高章洪. 新疆盐湖[M]. 北京: 科学出版社, 1995.
Zheng Xiyu, Li Bingxiao, Gao Zhanghong. Saline lakes of Xinjiang[M]. Beijing: Science Press, 1995.
- [4] 张彭熹, 郑喜玉, 关玉奎. 柴达木盆地盐湖[M]. 北京: 科学出版社, 1987.
Zhang Pengxi, Zheng Xiyu, Guan Yukui. Saline lakes of Qaidam Basin [M]. Beijing: Science Press, 1987.
- [5] 张彭熹, 张保珍, 唐渊, 等. 中国盐湖自然资源及其开发利用[M]. 北京: 科学出版社, 1999.
Zhang Pengxi, Zhang Baozhen, Tang Yuan, et al. Saline lakes of Qaidam Basin[M]. Beijing: Science Press, 1987.
- [6] 魏新俊, 邵长铎, 王弭力, 等. 柴达木盆地西部富钾盐湖物质组分、沉积特征及形成条件研究[M]. 北京: 地质出版社, 1993.
Wei Xinjun, Shao Changduo, Wang Mili, et al. Material composition, sedimentary characteristics and formation conditions of potash-bearing saline lakes in the western of Qaidam Basin[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1993.
- [7] 半谷高久. 水质调查法[M]. 东京: 丸善株式会社, 1960.
Ban Gugaojiu. Investigation methods of water quality[M]. Tokyo: Joint-stock Company Press, 1960.
- [8] Fan Q S, Ma H Z, Lai Z P, et al. Origin and evolution of oilfield brines from Tertiary strata in western Qaidam Basin: Constraints from $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$, δD , $\delta^{18}\text{O}$, $\delta^{34}\text{S}$ and water chemistry[J]. Chinese of Journal Geochemistry, 2010, 29: 446-454.
- [9] Tan H B, Rao W B, Chen J S, et al. Chemical and isotopic approach to groundwater cycle in Western Qaidam Basin, China[J]. Chinese Geographical Science, 2009, 19(4): 357-364.
- [10] Tan H B, Rao W B, Ma H Z, et al. Hydrogen, oxygen, helium and strontium isotopic constraints on the formation of oilfield waters in the western Qaidam Basin, China[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2011, 40: 651-660.
- [11] Tan H B, Chen J, Rao W B, et al. Geothermal constrains on enrichment of boron and lithium in salt lakes: An example from a stream-salt lake system on the northern slope of the eastern Kunlun Mountains, China[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2012, 51: 21-29.

- [12] 樊启顺, 马海州, 谭红兵, 等. 柴达木盆地西部卤水水化学特征与找钾研究[J]. 地球学报, 2007, 28(5): 446-455.
Fan Qishun, Ma Haizhou, Tan Hongbin, et al. Hydrochemical characteristics of brines and potassium-prospecting researches in western Qaidam Basin[J]. Acta Geoscientica Sinica, 2007, 28(5): 446-455.
- [13] 樊启顺, 马海州, 谭红兵, 等. 柴达木盆地西部卤水特征及成因探讨[J]. 地球化学, 2007, 36(6): 633-637.
Fan Qishun, Ma Haizhou, Tan Hongbin, et al. Characteristics and origin of brines in western Qaidam Basin[J]. Geochimica, 2007, 36(6): 633-637.
- [14] 李廷伟. 柴达木盆地西部油田卤水形成演化的水化学和锶同位素研究[D]. 西宁: 中国科学院青海盐湖研究所, 2007.
Li Tingwei. The origin analysis by hydro-chemical characters and Sr isotope of oil field brines in west of Qaidam Basin[D]. Xining: Qinghai Institute of Salt Lakes, Chinese Academy of Sciences, 2007.
- [15] 谭红兵, 曹成东, 李廷伟, 等. 柴达木盆地西部古近系和新近系油田卤水资源水化学特征及其化学演化[J]. 古地理学报, 2007, 9(3): 313-320.
Tan Hongbing, Cao Chengdong, Li Tingwei, et al. Hydrochemistry characteristics and chemical evolution of oilfield brines of the Paleogene and Neogene in western Qaidam Basin[J]. Journal of Palaeogeography, 2007, 9(3): 313-320.
- [16] Zhang J, Huang W W, Letolle R, et al. Major element chemistry of the Huanghe (Yellow River), China- weathering processes and chemical fluxes[J]. Journal of Hydrology, 1995, 168: 173-203.
- [17] 许卉, 杨昕. 黄土中矿物元素的淋溶释放研究[J]. 土壤与环境, 2002, 11(1): 38-41.
Xu Hui, Yang Xin. Releasing of major elements from loess leached by rain[J]. Soil and Environment Sciences, 2002, 11(1): 38-41.
- [18] Mason C F V, Turney W R J R, Thomson B M, et al. Carbonate leaching of uranium from contaminated soils[J]. Environmental Science & Technology, 1997, 31: 2707-2711.
- [19] Bonotto D M, Andrews J N, Darbyshire D P F. A laboratory study of the transfer of ^{234}U and ^{238}U during water-rock interactions in the Carnmenellis granite (Cornwall, England) and implications for the interpretations of field data[J]. Applied Radiation and Isotopes, 2001, 54: 977-994.
- [20] Kolahchi Z, Jalali M. Effect of water quality on the leaching of potassium from sandy soil[J]. Journal of Arid Environments, 2007, 68: 624-639.
- [21] 王鹏, 王胜艳, 郝少盼, 等. 模拟扰动条件下太湖沉积物的再悬浮特征[J]. 水科学进展, 2010, 21(3): 399-404.
Wang Peng, Wang Shengyan, Hao Shaopan, et al. Characteristics of sediment resuspension in Taihu Lake under simulative disturbing conditions[J]. Advances in Water Science, 2010, 21(3): 399-404.
- [22] 周孝德. 渭河泥沙对重金属污染物吸附的实验研究[J]. 水利学报, 1993(7): 44-49.
Zhou Xiaode. Experimental study on the adsorption of heavy metals in the sediment of Weihe[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1993(7): 44-49.
- [23] 赵蓉, 倪晋仁, 孙卫玲, 等. 黄河中游泥沙对铜离子的吸持行为研究[J]. 环境科学学报, 2003, 23(4): 441-446.
Zhao Rong, Ni Jinren, Sun Weiling, et al. Copper sorption by sediments from the middle Yellow River[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2003, 23(4): 441-446.
- [24] 张岚, 倪晋仁, 孙卫玲, 等. 高含沙水体中黄土吸持和释放铜的机理[J]. 环境科学, 2011, 24(3): 79-84.
Zhang Lan, Ni Jinren, Sun Weiling, et al. Copper sorption and desorption by Loess in water-sediment system[J]. Environmental Science, 2003, 24(3): 79-84.
- [25] 陈静生, 张宇, 于涛, 等. 对黄河泥沙有机质的溶解特性和降解特性的研究—再论黄河水的COD值不能真实反映其污染状况[J]. 环境科学学报, 2004, 24(1): 1-5.
Chen Jingsheng, Zhang Yu, Yu Tao, et al. A study on dissolution and bio-degradation of organic matter in sediments from the Yellow River[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2004, 24(1): 1-5.
- [26] Herzl V M C, Millward G E, Wollast R, et al. Species of dissolved Cu and Ni and their adsorption kinetics in turbid riverwater[J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2003, 56(1): 43-52.
- [27] Michael H A, Mulligan A E, Harvey C F. Seasonal oscillations in water exchange between aquifers and the coastal ocean[J]. Nature, 2005, 436: 1145-1148.
- [28] Shulkin V M, Bogdanova N N. Mobilization of metals from riverine suspended matter in seawater[J]. Marine Chemistry, 2003, 83(3/4): 157-167.
- [29] 刘成林, 曹养同, 杨海军, 等. 库车前陆盆地古近纪—新近纪盐湖环境变迁及其成钾效应探讨[J]. 地球学报, 2013, 34(5): 547-558.
Liu Chenglin, Cao Yangtong, Yang Haijun, et al. Discussion on paleogene-enogene environmental change of salt lakes in Kuqa Foreland Basin and its potash-forming effect[J]. Acta Geoscientica Sinica, 2013, 34(5): 547-558.
- [30] 袁亚娟, 夏斌, 吕宝凤. 柴达木盆地断裂组合特征及油气成藏意义[J]. 断块油气田, 2011, 18(2): 212-216.
Yuan Yajuan, Xia Bin, Lü Baofeng. Assemblage characteristics of faults and its significance to hydrocarbon accumulation in Qaidam Basin[J]. Fault-block Oil & Gas Field, 2011, 18(2): 212-216.
- [31] 黄麒, 韩凤清. 柴达木盆地盐湖演化与古气候波动[M]. 北京: 科学出版社, 2007.
Huang Qi, Han Fengqing. Environmental evolution and ancient climate fluctuations in Saline Lakes of Qaidam Basin[M]. Beijing: Science Press, 2007.
- [32] 沈照理, 朱宛华, 钟左桑. 水文地球化学基础[M]. 北京: 地质出版社, 1993.
Shen Zhaoli, Zhu Wanhua, Zhong Zuoshen. The basis of hydrochemistry [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1993.
- [33] Wang J B, Zhu L P, Wang Y, et al. Comparisons between the chemical compositions of lake water, inflowing stream water, and sediment in Nam Co, central Tibetan Plateau, China and their controlling mechanisms[J]. Journal of Great Lakes Research, 2010, 36: 587-595.
- [34] Qi L, Hu J, Conrad G D. Determination of trace elements in granites by inductively coupled plasma mass spectrometry[J]. Talanta, 2000, 51(3): 507-513.
- [35] 江雪艳. 黄河干流、河口及莱州湾南岸铀的分布及成因研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2008.
Jiang Xueyan. Study of the distribution and genesis of uranium in the main channel and estuary of Yellow River and the southern coast of Laizhou Bay[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2008.
- [36] 王剑锋. 铀地球化学教程[M]. 北京: 原子能出版社, 1986.
Wang Jianfeng. The course of uranium geochemistry[M]. Beijing: Atomic Energy Press, 1986.
- [37] 张祖还, 赵懿英, 章邦桐, 等. 铀地球化学[M]. 北京: 原子能出版社, 1984.
Zhang Zuhuan, Zhao Yiyang, Zhang Bangtong, et al. Geochemistry of uranium[M]. Beijing: Atomic Energy Press, 1984.

(编辑 陈华蛟)