

罗布泊地下卤水中幔源稀有气体及其意义

伯 英^{1,2} 刘成林¹ 焦鹏程¹ 叶先仁³

1. 中国地质科学院矿产资源研究所, 北京 100037; 2. 国土资源部成矿作用与资源评价重点实验室, 北京 100037;

3. 中国科学院油气资源研究重点实验室, 甘肃 兰州 730000;)

摘要:采集于塔里木盆地东部罗布泊地区的地下卤水中稀有气体具有高于大气的值, 显示出有高 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 值源区流体的贡献。这揭示了该区域深部存在壳-幔流体相互作用, 深部地幔流体可能沿活动构造断裂带(比如阿尔金断裂带)上涌。其卤水释出气的 $^4\text{He}/^{20}\text{Ne}$ 比值在 0.572~2.105, 略高于大气值至 7 倍于大气值, 这表明罗布泊的地下卤水对大气是比较开放的, 即受到近地表流体或大气的混染。同时, 采集于塔里木盆地北缘库车盆地(又叫库车坳陷)的 2 件样品具有远低于大气的 R 值, 其 $^4\text{He}/^{20}\text{Ne}$ 比值为 585.3~84.8, 是大气值的数百倍, 说明该区地下卤水源自于构造稳定的深部地壳, 近地表流体对卤水的改造不明显而没有强烈地改变其 R 值。样品的 $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 比值均接近于大气值(295.5), 这揭示了近地表流体参与了源区卤水的运移与改造, 只是库车盆地地下卤水受到近地表流体改造的程度较低。如果扣除大气(来自浅层流体)的混染, 那么罗布泊地下卤水的 R 值将会比实际检测到的值更高, 这进一步揭示了地幔流体参与了罗布泊地下卤水的形成演化。中国西北地区具有地壳厚、盆地长期稳定的特点, 因此地幔流体活动不易出露于地表, 但地幔流体所携带的地幔物源和热源会通过断裂带而影响地壳流体的特征。

关 键 词: 稀有气体; 罗布泊; 改造; 断裂带; 地幔流体

中图分类号: P618.7

文献标志码: A

文章编号: 1000-3657(2012)04-0978-07

1 引 言

罗布泊位于中国新疆塔里木盆地东部广袤沙漠边缘的低洼地区, 为第四纪干盐湖。自 1995 年发现罗布泊超大型钾盐矿床以来^[1-3], 该盐湖区因其巨大的矿产资源价值而受到普遍关注^[4-9]。该钾盐矿的成因认识, 已从地质构造背景与盆地演变、沉积作用、卤水流体运动与地球化学等方面进行研究, 提出了多种成因解释, 例如, “高山深盆迁移”论和“两段式”成钾论^[10]和“深部上升卤水流体补给成钾”论^[11]。刘成林等^[12]对罗布泊内部的断裂构造特征和形成机理进行深入研究, 发现罗布泊盐湖沉积期间, 受到近南北向主压应力作用, 形成了 7 条相同方向地堑式断裂, 这些断陷带长可达 60 余千米, 宽 1~4 km,

向下延伸可达 1 000 余米。这些地堑式断裂带不仅是控制成钾凹地形成的主要原因, 其本身也是良好的卤水储集构造并储集了丰富的富钾卤水^[13]。同时, 张性断裂也是卤水流体运移的重要通道, 对罗布泊富钾卤水的形成具有重要的影响。通过考察罗布泊地下卤水中氢氧同位素、Sr 同位素特征, 可以示踪研究卤水的来源。

整个罗布泊地区卤水主要由塔里木地区大气降水补给, 尤其罗布泊西部的塔克拉玛干沙漠南、北部河流水补给很重要, 这些河流水在进入罗布泊前已经受到一定程度的蒸发^[14]。此外, 罗布泊干盐湖地表分布有众多的流体上涌通道, 地下卤水流体正是通过这些通道上升, 至地表或进入盐湖水体及沉积物中, 为钾盐成矿提供重要的物质基础^[11]。本文通过对

收稿日期: 2012-03-02; 改回日期: 2012-07-07

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(40830420)资助。

作者简介: 伯英, 女, 1980 年生, 在站博士后, 主要从事地球化学研究工作; E-mail: sunnybritney@hotmail.com。

通讯作者: 刘成林, 男, 1963 年生, 研究员, 主要从事第四纪盐湖环境与钾盐研究; E-mail: liuchengl@263.net。

地下卤水上升过程中自释放气体的稀有气体同位素分析研究,首次发现了罗布泊卤水中富含幔源流体,为卤盐成矿提供了新的视角。

2 样品采集与检测

本研究涉及的采样点位于罗布泊大耳朵地区、罗东地区各 1 处钻孔以及库车盆地 1 处钻孔 (每个钻孔 2 件,共 6 件样品)。使用特制采气装置取样并用排水集气法收集气体:将容积为 200 ml 的采气装置一端的导气管伸入倒置的充满饱和食盐水的集气瓶中,另一端的导气管伸入钻孔卤水液面以下一定深度进行气体取样和收集(罗布泊两钻孔取样深度为分别为液面下 1.0 m 和 0.4 m,库车盆地取样深度为液面下 0.5 m)。深部气体在上升过程中是一个解压的过程,在野外钻孔取样时,能够看到卤水表面有明显的气泡冒出,因此可以认为采样点周围的大气已经被深部卤水释放的气体所改造而不会受到大气的过多

污染(至少对低含量的组分比如 He 是这样)。样品采集后,立即被送到中国科学院油气资源研究重点实验室,在 30 d 内完成稀有气体同位素检测。

气体抽提线和净化管线在约 150 °C焙烤 24 h 以上,以脱除管壁内表面吸附气的记忆效应。分析样品时,将在线取气针头插入样品容器的橡胶垫中(但不插透)抽真空以消除检测环境中大气的污染。当真空系统压力降低至 1×10^{-5} Pa 以下时,实施取样。分取适量的气体样品用 800 °C 的钛炉和室温下的 ZrAl 泵净化,5 种稀有气体(He、Ne、Ar、Kr、Xe)用活性炭先后于液态氮和冰水混合物的恒温条件下分别吸附分离。各稀有气体组分分别进入质谱计进行含量和同位素测试。稀有气体同位素组成的测定用中国科学院油气资源研究重点实验室的 MM5400 质谱计(英国 Micromass 公司生产)在线完成。所有的分析结果均进行了标准样校准和本底扣除。国际上通常用流动性好的新鲜空气作为稀有气体同位素检测的标准

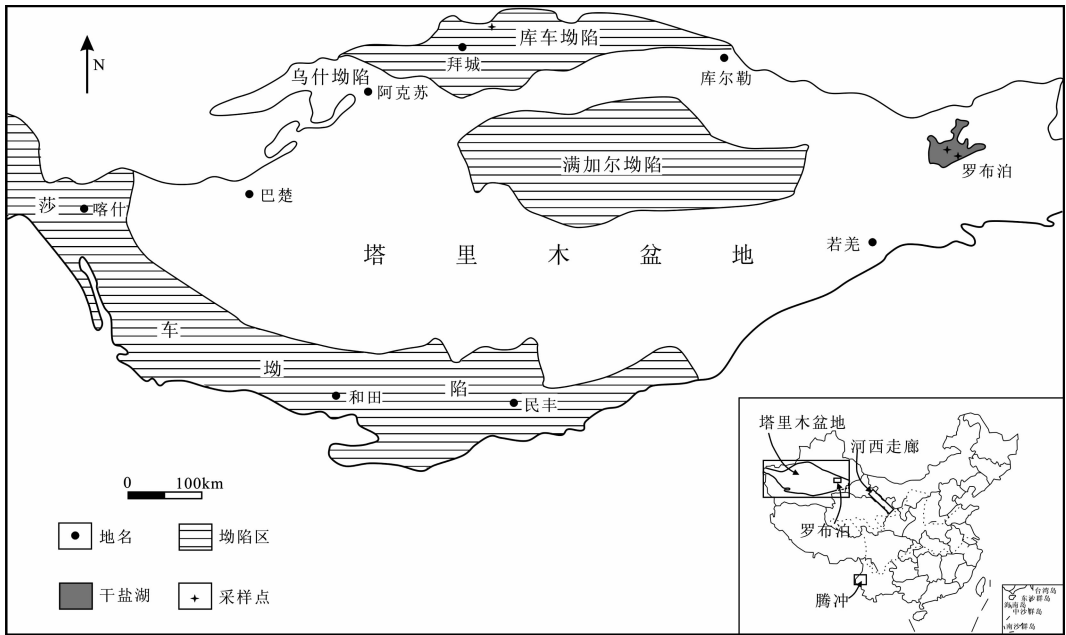


图 1 采样点和文中涉及其他稀有气体样点分布区

注 1:采样点位于罗布泊大耳朵地区(ZK1103[#] 钻孔, 40°17'33.96"N, 90°17' 54.24"E)和罗东地区(阿尔金山前溢出带附近, ZK0404[#] 钻孔, 40°08'55.5"N, 91° 10' 29"E);另外,在位于塔里木盆地北缘的库车盆地(又叫库车坳陷)克孜尔(KZE, 41°57' 39.4"N, 82°25'22.3"E) 地区一处钻孔也采集了卤水中气体样品,用于作对比分析。文中后面涉及了引用资料中的塔里木盆地天然气、河西走廊温泉水、腾冲热泉水稀有气体同位素数据,因此将这几个地区的位置在图中一并标注。库车盆地底图来自曹养同博士论文

Fig.1 Sampling sites and positions of the data referred to in the paper

Note 1: The sampling sites lie in the Big Ear (No. ZK1103 drill hole, 40°17'33.96"N, 90°17' 54.24"E) and Luodong area (No. ZK0404 drill hole, 40°08'55.5"N, 91° 10' 29"E, near the groundwater spilt belt of the Altun Mountains) of Lop Nur and Kizil (KZE, 41°57' 39.4"N, 82°25'22.3"E) of the Kuqa Basin. Besides, positions of some other areas referred to in the paper are also shown in the map. The base map is from doctoral dissertation of Cao Yangtong (2010)

物质。本次检测使用的标准样为:兰州市皋兰山顶的空气(AIRLZ2007)(海拔 2 060 m)。本次工作的本底值为 (cm3STP/g): ^4He = 2.46×10^{-10} , ^{20}Ne = 4.08×10^{-10} , ^{40}Ar = 1.39×10^{-8} ,本底中各种稀有气体的同位素组成接近于空气值,更详细的实验方法参见文献[15-17]。

3 实验结果

本次研究样品的 He、Ar、Ne 同位素数据见表 1。采集于罗布泊地区的两个钻孔的卤水样品自释出气均具有高于大气的 R 值,明显地显示出有 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 值源区流体的贡献;采集于塔里木盆地北缘库车盆地的 2 件样品具有远低于大气的 R 值,表现出有大量的地壳流体的贡献。罗布泊 1103[#] 钻孔卤水释出气的 $^4\text{He}/^{20}\text{Ne}$ 比值为 0.572~0.577,略高于大气值 (0.3185);罗布泊 0404[#] 钻孔卤水释出气的 $^4\text{He}/^{20}\text{Ne}$ 比值为 2.059~2.105,是大气值的近 7 倍;库车盆地的 KZE 钻孔卤水释出气的 $^4\text{He}/^{20}\text{Ne}$ 比值为 585.3~84.8,是大气值的数百倍。这些表明罗布泊 1103[#] 钻孔的卤水对大气是比较开放的,即受到近地表流体或大气的混染;库车盆地的地下卤水受到近地表流体的改造不明显而没有强烈地改变其 R 值。本次检测的样品的 $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 比值均接近于大气

值(295.5),这更直接地揭示了近地表流体参与了源区卤水的运移与改造。在所研究的样品之间,库车盆地地下卤水受到近地表流体改造的程度较低。

4 讨论

4.1 罗布泊高 R 值气体的来源

地球在形成演化过程中,形成了具有不同稀有气体同位素特征的端元储藏。按照已有的 He 同位素特征,可以将固体地球划分为 5 个储藏区:热点(下地幔)区^[18-19]、高 ^3He 的 OIB 区^[20-21]、与消减有关的洋岛或岛弧区(又称低 ^3He 的 OIB 区)^[22-23]、MORB(上地幔)区^[24-25]、壳源区^[26-27]。以重力异常线为划分标志,中国东部地区具有比较薄的大陆壳,加上西太平洋板块的俯冲影响,壳幔相互作用的痕迹(比如地幔捕虏体、天然温泉、火山岩出露等)随处可见;中国西南地区也因为印度板块与欧亚板块的汇聚作用而出露有大量的地幔流体或地幔捕虏体^[28];中国西北地区具有地壳厚、盆地长期稳定的特点,因此地幔流体活动不易出露于地表,但地幔流体所携带的地幔物源和热源会通过断裂带而影响地壳流体的特征。此次研究,在罗布泊地下卤水中发现了明显高于大气的 R 值。在已有的研究中,这种高 R 值的稀有气体主要有 3 种来源:经核反应 $^6\text{Li}(\text{n}, \alpha)^3\text{He}$ 生成

表 1 罗布泊及库车盆地卤水样品稀有气体同位素分析结果
Table 1 Analytical results of isotopic compositions of noble gases (He, Ar and Ne)
in brine samples from the Lop Nur and the Kuqa Basin

样品编号	$^4\text{He}(\text{E-4})(\text{V/V})$	$^{20}\text{Ne}(\text{E-4})(\text{V/V})$	$^{40}\text{Ar}(\text{E-4})(\text{V/V})$	$^4\text{He}/^{20}\text{Ne}$	$^4\text{He}/^{40}\text{Ar}$	R/Ra	$^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$
1103 [#] -1	0.0923	0.160	81.1	0.577	0.00114	1.355	289.7
AD	±0.0062	±0.011	±6.1			±0.036	±9.0
1103 [#] -2	0.0953	0.167	114.4	0.572	0.000833	1.0929	296.5
AD	±0.0064	±0.011	±8.7			±0.0055	±7.6
0404 [#] -1	0.289	0.1403	63.1	2.059	0.00458	2.199	288.7
AD	±0.019	±0.0098	±4.7			±0.027	±6.7
0404 [#] -2	0.293	0.1391	73.5	2.105	0.00399	2.372	313.6
AD	±0.020	±0.0097	±5.2			±0.041	±21.0
KZE-Q ₁	2.09	0.0246	11.97	84.8	0.174	0.0306	321.1
AD	±0.14	±0.0021	±0.82			±0.0010	±17.4
KZE-Q ₂	2.23	0.00381	9.10	585.3	0.245	0.0313	332.1
AD	±0.15	±0.00037	±0.62			±0.0021	±14.0
air	0.0524	0.1645	93.04	0.3185	0.0005633	1.000	295.5

注:AD 为绝对偏差,同位素的含量是体积比,R 表示样品中的 He 同位素比值, $\text{R}=(^3\text{He}/^4\text{He})_{\text{sample}}$, Ra 代表地球大气中的 He 同位素比值, $\text{Ra}=(^3\text{He}/^4\text{He})_{\text{air}}=1.40 \times 10^{-6}$ 。

的核成因 ^3He , 宇宙射线长期强烈辐射产生的宇宙成因 ^3He 和深部地幔流体上涌带来的 ^3He 。

核反应 $^6\text{Li}(n, \alpha)^3\text{He}$ 需要中子源, 在地壳中能提供中子的是 U 、 Th 元素, 但其提供的中子是由于衰变产生 ^4He 而生成的, 也就是说: 此种状态下, ^3He 与 ^4He 是同步增加的; 如果没有足够的 Li 含量, 则生成的放射性成因 ^4He 就占绝对优势。事实上, 我们经常观察到地壳源区样品的 R 值远低于大气值, 只有在高含量的 Li 矿物中才发现有高于大气的 R 值。即便有这种核成因的 ^3He 被流体所浸取, 那也不足以造成 ^3He 的明显富集^[29], 且还会被先后浸取的放射性成因 ^4He 所平衡, 流体将难以表现出高 R 值的特点。因此可以认为本次研究的卤水样品的高 R 值不是核成因 ^3He 所造成的。另外, 罗布泊地区曾经是中国核试验区, 其地下水中的氚值大多高于其他区域地下水中的值^[30-31]。经过近 50 年的衰变, 该地区的地质放射性已经无明显的放射性异常^[32]。因氚产生的 ^3He 即便全部保留在地下水中, 其贡献也不足 1.5% 的份额, 可以忽略^[33]。

宇宙成因 ^3He 的影响就更不可能了。一般地, 地下流体几乎不受宇宙射线的辐射, 而且宇宙射线中的高能粒子难以在流体中保留, 这就从根本上排除了宇宙成因 ^3He 的影响。

最后的可能性就是具有高 R 值的地幔流体对罗布泊地下卤水进行了改造。对于 He 同位素而言, 在地质历史过程中, 后期放射性成因主要生成 ^4He , 因此, 地质体的年龄越老, 放射性成因的 ^4He 就越多 (^3He 几乎不变), 从而其 R 值就越低, 淋滤期间的地下流体也就具有较低的 R 值。如果这种流体是对大气开放的, 那么流体的 R 值则小于或接近于大气值; 如果这种流体长期循环于地壳岩石矿物之间, 则由于流体对地壳岩石的淋漓作用, 流体的 R 值一般会接近于地壳岩石的, 具有很低的值(比如塔里木盆地天然气)。如果具有较高 R 值的幔源流体与地壳流体发生了混合, 则结果会使最终混合的流体具有较高的 R 值。塔里木盆地自古生代以来一直是稳定的^[27], 因此, 塔里木盆地及其周边的地下流体应当具有低 R 值, 这也从塔里木盆地天然气样品的结果(中国科学院油气资源研究重点实验室内部资料)所证实。

本次研究采集于塔里木北缘库车盆地的地下卤水样品具有很低的 R 值, 说明该区地下卤水源自于构造稳定的深部地壳; 而采集于塔里木东侧的罗布

泊地下卤水具有高于大气的 R 值, 这揭示了该区域不同于塔里木盆地北缘, 该区域深部存在壳-幔流体相互作用, 深部地幔流体可能沿活动构造断裂带(比如阿尔金断裂带)上涌。

4.2 罗布泊与中国西部其他地区稀有气体数据对比

将本次样品数据(塔里木盆地地下卤水)、中国西部腾冲的热泉气^[34]、河西走廊活动断裂带的温泉气^[33]和塔里木盆地的天然气数据一并投射在 $^4\text{He}-R/R_a$ 图上(图 2)。从图中可以清晰地发现: 第一, 腾冲热泉气的 He 同位素比值比较均一, 呈窄带状分布于 $R_a=1$ 的大气线之上, 且有少量地球大气的混染。腾冲的热泉属于高温热泉(温度达 100°C), 常年喷流数百年, 可以较好地表征中国西部地幔流体的特征。第二, 塔里木盆地天然气具有典型的地壳 He 同位素特征, 多集中于 $R=0.02 R_a$ 区域, 或沿地壳-大气混合线分布。塔里木盆地基底长期稳定, 其中储藏的天然气可以作为中国西部地壳流体稀有气体同位素特征的代表。第三, 河西走廊活动断裂带一部分温泉气中的氦一部分则主要来自地壳, 还有一部分沿地壳-大气混合线分布或沿地幔流体-大气混合线分布; 第四, 采集于罗布泊的卤水样品数据点全部位于 $R_a=1$ 的大气线之上, 且沿地幔流体-大气混合

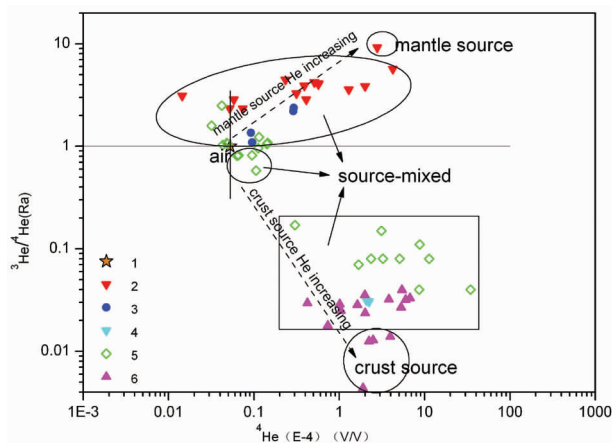


图 2 罗布泊与中国西部其他地区稀有气体 ^4He 与 R/R_a 关系图

1—空气; 2—腾冲热泉水; 3—罗布泊地下卤水; 4—库车盆地地下卤水; 5—河西走廊温泉水; 6—塔里木盆地天然气

Fig.2 Plot of ^4He versus R/R_a ratio in gas samples from the Lop Nur and other places of western China

1—Air; 2—Gas samples from warm springs of Tengchong; 3—Gas samples from underground brine of the Lop Nur; 4—Gas samples from underground brine of Kuqa Basin; 5—Gas samples from warm springs of the Hexi Corridor; 6—Natural gas samples from Tarim Basin

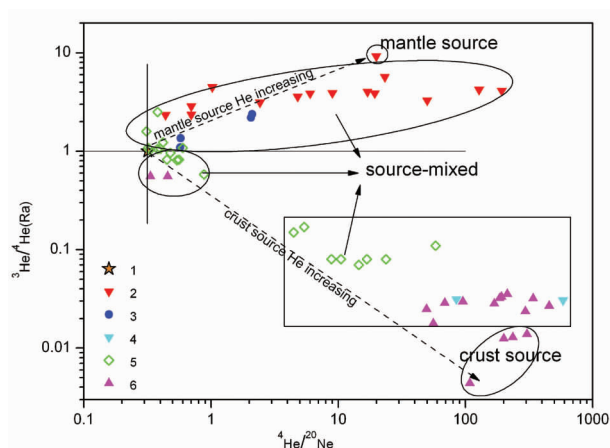


图3 罗布泊与中国西部其他地区稀有气体 $^4\text{He}/^{20}\text{Ne}$ 与 R/R_a 关系图

1—空气;2—腾冲温泉水;3—罗布泊地下卤水;4—库车盆地地下卤水;5—河西走廊温泉水;6—塔里木盆地天然气

Fig.3 Plot of $4\text{He}/^{20}\text{Ne}$ ratio versus R/R_a ratio in gas samples from the Lop Nur and other places of western China
1—Air; 2—gas samples from warm springs of Tengchong; 3— Gas samples from underground brine of the Lop Nur; 4— Gas samples from underground brine of Kuqa Basin; 5—Gas samples from warm springs of the Hexi Corridor; 6—Natural gas samples from Tarim Basin

线分布;采集于塔里木北缘的卤水样品数据点集中于中国西部壳源流体区,大气的混染不明显。这种特征在塔里木盆地寒武系底部硅质岩中也得到了非常一致的体现:塔里木盆地西北边缘的柯坪地区(位于新疆阿克苏地区)硅质岩的 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比值 $R=0.032\sim 0.319 R_a$,位于塔里木盆地东北缘、罗布泊地区北岸的库鲁克塔格硅质岩的 R 比值为 $0.44\sim 10.21 R_a$ ^[35],表明罗布泊地区深部壳—幔相互作用一直很活跃。

在 $^4\text{He}/^{20}\text{Ne}-R/R_a$ 图中(图3),不同构造背景的地下卤水分布于不同的区域:罗布泊地下卤水因为受到大气或近地表流体的混染,其数据点沿地幔—大气混合线分布。塔里木北缘库车盆地的地下卤水数据点沿地壳—大气混合线分布。如果扣除大气的混染,那么罗布泊地下卤水的 R 值将会比实际检测到的值更高,这进一步揭示了地幔流体参与了罗布泊地下卤水的形成演化。

此外,从罗布泊卫星影像图上解译出大量环形影像,大环内侵入岩、火山岩类广泛发育,岩浆活动频繁剧烈,中、小环形影像密集成群。这些环体应与地下流体在应力作用下垂直向上喷涌有关,大量的环形影像可能对应着壳层重熔、岩浆侵入和喷出的中心,指示着深部作用的存在。环形可能是由地壳内,特别是下伏含盐系中的可溶盐在压力与热力作

用下向上运移,与地下水混合后在表层薄弱出喷溢产生的^[3]。本研究中幔源稀有气体的发现为这一推断提供了更有力的证据,也为更好地解释深部地幔流体参与罗布泊富钾卤水的形成演化提供了科学依据。

5 结 论

罗布泊地下卤水中高 R 值的特征揭示了地幔流体参与了该地区地下卤水的形成演化。该地区广泛分布的断裂带为地幔流体提供了上升通道。具有还原性的地幔流体携带了大量的成盐(岩)成矿物质改造地壳流体,有助于罗布泊盐湖钾盐成矿。该区地幔流体能在多大的地质区域范围内影响地下卤水,还需进一步深入研究。

致谢: 本研究中,稀有气体分析测试工作由中国科学院油气资源研究重点实验室(GDLIGCAS,兰州)协助完成;稀有气体样品采集得到了中国地质科学院矿产资源研究所曹养同、马黎春、中国地质大学硕士研究生高超以及国投罗钾公司等帮助,在此表示诚挚的谢意!

参考文献(References):

- [1] 王弭力,李廷祺,刘成林.新疆罗布泊罗北凹地钾矿的重大发现[C]//“八五”地质科技重要成果学术交流论文选集.北京:冶金工业出版社,1996:446-449.
Wang Mili, Li Tingqi, Liu Chenglin. Discovery of a large potash deposit in Lop Nur, Xinjiang [C]//Paper Selections on Significant Achievements of Geological Science and Technology during the State's Eighth Five-Year Plan Period. Beijing:Metallurgical Industry Publishing House, 1996:446-449(in Chinese).
- [2] 王弭力,刘成林,焦鹏程.罗布泊罗北凹地超大型钾盐矿床特征及其开发前景[J].矿床地质,17(增刊):1998:433-436.
Wang Mili, Liu Chenglin, Jiao Pengcheng. Characteristics and development prospect of potash deposit in Lop Nur [J]. Mineral Deposits, 1998, 17 (supp.):433-436(in Chinese).
- [3] 王弭力,刘成林,焦鹏程,等.罗布泊盐湖钾盐资源[M].北京:地质出版社,2001:17-20.
Wang Mili, Liu Chenglin, Jiao Pengcheng, et al. Saline Lake Potash Resources in the Lop Nur, Xinjiang [M]. Beijing:Geological Publishing House, 2001:17-20(in Chinese).
- [4] 周廷儒.论罗布泊的迁移问题[J].北京师范大学学报,1978,(3):34-40.
Zhou Tingru. Discussion on migration of Lop Nur [J]. Journal of Beijing Normal University, 1978, (3):34-40(in Chinese).
- [5] 谢连文,李锋,李兵海,等.罗布泊盐湖环状影像成因解释[J].沉积与特提斯地质,2004,4(4):76-80.
Xie Lianwen, Li Feng, Li Binghai, et al. The genesis of the ring salt

- crust images of the Lop Nur salt lake, (Xinjiang) [J]. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 2004, 4 (4):76–80(in Chinese with English abstract).
- [6] 胡东生, 张华京. 罗布泊荒漠地区湖泊蒸发盐资源的形成及环境演化[J]. 冰川冻土, 2004, 26(2): 212–218.
- Hu Dongsheng, Zhang Huajing. Lake–evaporated salt resources and the environmental evolution in the Lop Nur Region [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2004, 6 (2): 212–218 (in Chinese with English abstract).
- [7] 马黎春, 李保国, 蒋平安, 等. 罗布泊盐湖“大耳朵”盐盘特征、成因及古环境意义[J]. 沉积学报, 2011, 29(1):47–12.
- Ma Lichun, Li Baoguo, Jiang Pingan, et al. Sedimentary features, origin and paleoenvironmental significance of “great ear” salt pans in the Lop Nor Playa [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2011, 29(1): 47–12(in Chinese with English abstract).
- [8] Li B G, Ma L C, Jiang P A, et al. High precision topographic data on Lake Lop Nur’s “Great Ear” and the timing of its becoming a dry salt lake[J]. Chinese Science Bulletin, 2008, 56(6):904–914.
- [9] 马黎春, 李保国, 蒋平安, 等. 罗布泊干盐湖电磁感应电导率与“耳纹”成因关系探讨[J]. 地球物理学报, 2007, 50(2):651–654.
- Ma Lichun, Li Baoguo, Jiang Pingan, et al. The correlation between the electromagnetic induction measurements and pixel values associated with the “Great Ear” rings in Lop Nur [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2007, 50 (2):651–654 (in Chinese with English abstract).
- [10] Wang M L, Liu C L, Jiao P C and Yang Z C. Minerogenic theory of the superlarge Lop Nur potash deposit, Xinjiang, China [J]. Acta Geologica Sinica, 2005. 79(1):53–65.
- [11] 刘成林, 焦鹏程, 王弭力, 等. 新疆罗布泊第四纪盐湖上升卤水流体及其成钾意义[J]. 矿床地质, 2003. 22 (4):386–392.
- Liu Chenglin, Jiao Pengcheng, Wang Mili, et al. Ascending brine fluids in Quaternary salty lake of Lop Nur in Xinjiang and their significance in potash formation[J]. Mineral Deposits, 2003. 22 (4): 386–392(in Chinese with English abstract) .
- [12] 刘成林, 王弭力, 焦鹏程. 中国新疆罗布泊盐湖断裂构造特征、形成机制及成钾意义[J]. 地质学报:2006, 80(12):1866.
- Liu Chenglin, Wang Mili, Jiao Pengcheng. characteristics, genetic mechanism and granitic gneiss of fault structure from the salty lake of Lop Nur in Xinjiang, China[J]. Acta Geologica Sinica, 2006, 80 (12):1866(in Chinese with English abstract) .
- [13] 刘成林, 陈永志, 陈伟十, 等. 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, 2006, 26, (1): 93–98.
- Liu Chenglin, Chen Yongzhi, Chen Weishi, et al. 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, 2006, 26(1):93–98(in Chinese with English abstract) .
- [14] 王弭力, 刘成林, 焦鹏程, 等. 罗布泊盐湖钾盐资源[M]. 北京:地质出版社 2001.:141–143.
- Wang Mili, Liu Chenglin, Jiao Pengcheng, et al. Saline Lake Potash Resources in the Lop Nur, Xinjiang [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2001:141–143(in Chinese)
- [15] 叶先仁, 陶明信, 余传鳌, 等. 用分段加热法测定的雅鲁藏布江蛇绿岩的 He、Ne 同位素组成:来自深部地幔的信息[J]. 中国科学(D), 2007, 37(5):573–583.
- Ye Xianren, Tao Mingxin, Yu Chuanao, et al. Helium and neon isotopic compositions in the ophiolites from the Yarlung Zangbo River, Southwestern China: The information from deep mantle[J]. Science in China (Series D:Earth Sciences), 2007, 37(5):573–583 (in Chinese) .
- [16] 叶先仁, 吴茂炳, 孙明良. 岩矿样品中稀有气体同位素组成的质谱分析[J]. 岩矿测试, 2001, 20(3):174–178.
- Ye Xianren, Wu Maobing, Sun Mingliang. Determination of the noble gas isotopic composition in rocks and minerals by mass spectrometry[J]. Rock and Mineral Analysis, 2001, 20(3):174–178 (in Chinese with English abstract).
- [17] Ye X R, Tao M X, Yu C A, et al. Helium and neon isotopic compositions in the ophiolites from the Yarlung Zangbo River, Southwestern China: The information from deep mantle [J]. Science in China (Series D:), 2007, 50:801–812.
- [18] Graham D W, Christie D M, Harpp KS, et al. Mantle plume helium in submarine basalts from the Galapagos Platform [J]. Science, 1993. 262:2023–2026.
- [19] Honda M, McDougall I, Patterson D B, et al. Possible solar noble–gas component in Hawaiian basalts[J]. Nature, 1991. 349:149–151.
- [20] Kaneoka I, Takaoka N, Upton B G J. Noble gas systematics in basalts and dunite nodule from Reunion and Grand Comore islands, Indian Ocean[J]. Chem. Geol., 1986, 59:35–42.
- [21] Staudacher T H, Sarda P H, Allegre C J. Noble gas systematics of Reunion Island, Indian Ocean[J]. Chem. Geol., 1990, 89:1–17.
- [22] Nagao K and Takahashi E. Noble gases in the wedge and lower crust:an inference from the isotopic analyses of xenoliths from Oki–Dogo and Ichinomegata, Japan [J]. Geochem J., 1993. 27: 229–240.
- [23] Patterson D B, Honda M, McDougall I. Noble gases in mafic phenocrysts and xenoliths from New Zealand [J]. Geochim. Cosmochim. Acta, 1994, 58:4411–4427.
- [24] Kurz M D, le Roex A P, Dick J B. Isotope Geochemistry of oceanic mantle near the Bouvet triple junction [J]. Geochim. Cosmochim. Acta, 1998, 62:841–852.
- [25] Matsumoto T, Honda M, McDougall I, et al. Noble gases in anhydrous lherzolites from the Newer Volcanics, southeastern Australia: A MORB–like reservoir in the subcontinental mantle[J]. Geochim. Cosmochim. Acta, 1998, 62:2521–2533.
- [26] Sano Y, Nagao K, Pillinger CT. Carbon and noble gases in Archean chert[J]. Chem. Geol., 1994, 112:327–342.
- [27] Zhou S X,Ye X R. Noble gas isotopic compositions of deep carbonate rocks from the Tarim Basin[J]. Chin. Sci. Bull., 2002, 47 (9): 774–778.
- [28] 徐胜. 中国天然气中稀有气体丰度和同位素组成[J].矿物岩石地球化学通报, 1997. 16(2):71–74.
- Xu Sheng. Noble gas abundances and isotopes in natural gases in China [J]. Bulletin of Mineralogy Petrology and Geochemistry,

1997. 16(2):71–74(in Chinese with English abstract).
- [29] Yokoyama T, Nakai S, Wakita H. Helium and carbon isotopic compositions of hot spring gases in the Tibetan Plateau [J]. J Volcanol. Geoth. Res., 1999. 88:99–107.
- [30] 王弭力, 刘成林, 焦鹏程, 等. 罗布泊盐湖钾盐资源[M]. 北京:地质出版社 2001.:145–151.
- Wang Mili, Liu Chenglin, Jiao Pengcheng, et al. Saline Lake Potash Resources in the Lop Nur, Xin Jiang [M]. Beijing: Geological Publishing House 2001.:145–151(in Chinese)
- [31] 焦鹏程, 王弭力, 刘成林. 新疆罗布泊盐湖卤水的氦同位素特征及其地质意义[J]. 核技术, 2004, (9):710–715.
- Jiao Pengcheng, Wang Mili, Liu Chenglin. Characteristics and origin of tritium in the potassium-rich brine in Lop Nur, Xinjiang [J]. Nuclear Techniques, 2004, (9):710–715 (in Chinese with English abstract).
- [32] 张正为, 侯新生. 罗布泊地区环境样品中的放射性检测[J]. 光的微量元素科学, 2009, 16(7): 56–58.
- Zhang Zhengwei, Hou Xinsheng. Radioactive detection of environmental samples in Lop Nur region [J]. Guangdong Trace Elements Scienc, 2009, 16(7):56–58(in Chinese with English abstract).
- [33] 赵霞, 陈建生, 饶文波, 等. 河西走廊盆地地下水的氮同位素指示[J]. 地质学报, 2007, 81(4):563–569.
- Zhao Xia, Chen Jiansheng, Rao Wenbo, et al. Tracing groundwater with Helium isotopic compositions in the Hexi corridor basin, Northwestern China [J]. Acta Geologica Sinica, 2007, 81(4): 563–569(in Chinese with English abstract).
- [34] Ren J G, Wang X B, Ouyang Z Y. Mantle-derived CO₂ in hot springs of the Rehai geothermal field, Tengchong, China [J]. Acta Geologica Sinica, 2005, 79(3):426–431.
- [35] 孙省利, 陈践发, 郑建京, 等. 塔里木盆地寒武系底部硅质岩的稀有气体同位素组成特征 [J]. 中国科学 (D 辑), 2008, 38 (增刊 II):105–109.
- Sun Shengli, Chen Jianfa, Zheng Jianjing, et al. Noble gas isotopic composition of silicolites in lower Cambrian in the Tarim Basin [J]. Science China (Series D), 2008, 38 (supplement II): 105–109 (in Chinese).

The mantle source noble gas from underground brine of the Lop Nur in Xinjiang and its scientific significance

BO Ying^{1,3}, LIU Cheng-lin¹, JIAO Peng-cheng¹, YE Xian-ren²

(1. Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China; 2. MLR Key Laboratory of Metallogeny and Mineral Assessment, Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China; 3. Geochemistry Department, Lanzhou Institute of Geology, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, Gansu, China)

Abstract: Gas samples whose R values ($R = {}^3\text{He}/{}^4\text{He}$) are higher than R values of the air were collected from underground brine in the Lop Nur within eastern Tarim Basin of Xinjiang. This shows the contribution of a fluid source with higher R values. It is also revealed that there exists the interaction between the crust fluid and the mantle fluid in the depth of the Lop Nur. The mantle fluid may ascend through active fault belts (for example, the giant Altun fault belt). Besides, the ${}^4\text{He}/{}^{20}\text{Ne}$ ratio of the gas released from the underground brine in the Lop Nur is between 0.572 (a little bit higher than that of the air) and 2.105 (six times higher than the air ${}^4\text{He}/{}^{20}\text{Ne}$ ratio), which indicates that the brine is relatively open to the atmosphere, i.e., it is contaminated by near-surface fluid or the air. For comparison, two gas samples were collected from Kuqa Basin (depression) on the northern margin of Tarim Basin, and the analytical result shows lower R value than that of the air, and the ${}^4\text{He}/{}^{20}\text{Ne}$ ratio is 84.8 and 585.3 respectively (dozens of times to several hundred times higher than that of the air). This shows that underground brine in Kuqa Basin comes from the stable deep crust, and its R value hasn't been changed by near-surface fluid. What's more, the ${}^{40}\text{Ar}/{}^{36}\text{Ar}$ ratio is close to that of the air (295.5) in all noble gas samples, which indicates that the near-surface fluid more or less joins in the transfer and formation of deep original brine, but such effects in Kuqa Basin is not too obvious to change its R value. If the contamination from atmosphere (from the shallow fluid) had been deducted, the R value in underground brine in Lop Nur would have been much higher than the analytical result. This further demonstrates that the mantle source fluid plays a great role in the formation and evolution of underground brine in the Lop Nur. The crust in northwest China is very thick and stable, so mantle source fluid isn't apt to come out to the surface. However, the mantle source fluid can carry material and heat through fault belts, thus affecting the characteristics of the fluid in the crust.

Key words: noble gas; Lop Nur; transformation; fault belts; mantle fluid

About the first author: BO Ying, female, born in 1980, doctorate, engages in the study of geochemistry of salt-bearing basins; E-mail: sunnybritney@hotmail.com.

About the corresponding author: LIU Cheng-lin, male, born in 1963, senior researcher, engages in the study of Quaternary saline lake environment and potash ore deposits; E-mail: liuchenglin@263.net.