

# 四川宣达盐盆富钾富矿卤水 地球化学特征及资源意义研究

林耀庭<sup>1</sup>, 姚有成<sup>2</sup>, 康正华<sup>2</sup>, 王宁军<sup>2</sup>

(1. 西南石油局第二地质大队, 四川自贡 643013;

2. 四川达州市恒成能源集团有限公司, 四川达州 635000)

**摘要:** 宣达盐盆富钾富矿卤水产于四川盆地东北部黄金口背斜群南段付家山构造近高点, 以深层卤水形式赋存于3 260m左右的下三叠统嘉陵江组五段和中统雷口坡组一段( $T_1j^5-T_2L^1$ )盐系的碳酸盐岩储层中。卤水与海水蒸发系列相比,  $K^+$  含量异常高, 达25.96g/L, 超过海水钾盐沉积阶段, 也超过综合利用和单独开采品位, 为国内外罕见的液态钾矿资源。且富含 $I^-$ ,  $B^{3+}$ ,  $Li^+$ ,  $Rb^+$ ,  $Sr^{2+}$ 等多种有用组分, 品质优异, 构成优质化工原料水, 为一种综合性富钾富矿液态矿藏, 经济价值极高。卤水为沉积变质水和固态钾盐溶滤水的复合成因。开发利用将可为农业提供优质钾肥, 缓解我国钾盐资源不足, 并提供多种短缺的化工产品, 对固态钾盐找矿具有重要现实意义。

**关键词:** 富钾富矿卤水; 地球化学特征; 宣达盐盆; 嘉五一雷一( $T_1j^5-T_2L^1$ )盐系; 复合成因; 资源意义

中图分类号: P619.211

文献标识码: A

文章编号: 1008-858X(2004)01-0008-11

## 0 引言

四川盆地卤水分布广泛, 资源丰富, 品质优异<sup>[1]</sup>, 开发利用历史悠久。据华阳县志(今四川双流县华阳镇)记载, 战国后期(公元前250年)秦蜀守李冰就开始川西凿井制盐, 距今已有2250余年。新中国建立后, 随着四川盆地油气和盐卤钾资源勘查开发和科研工作的不断深入, 从川东—川中—川西、川东北—川西南—川西北下、中三叠统钻井中均陆续发现高品质的富钾卤水, 其中川东北宣(汉)达(州)盐盆是四川最早发现的一处富钾卤水,  $K^+$  含量高达25.955g/L, 其含量之高, 成为国内外罕见的液态钾盐。 $Br^-$ 、 $I^-$ 、 $B^{3+}$ 、 $Li^+$ 、 $Sr^{2+}$ 、 $Rb^+$ 等多种有用组分也普遍达到或超过综合利用和单独开采工业要求, 构成优质化工原料水, 实际上它是一

种富钾富矿卤水, 具有极高经济和开发利用价值的综合性液态矿藏。加大宣达盐盆富钾富矿卤水的探索开发力度, 则对缓解我国钾盐资源不足和提供多种紧缺紧俏化工原料, 将有着重要的现实意义。本文拟就该卤水产出的地质背景条件、卤水水文地球化学特征、品质、成因及其资源意义作一研究阐述, 以利促进四川富钾富矿卤水及固、液态钾盐找矿和科研工作进一步深入开展。

## 1 地质背景条件

宣达盐盆富钾富矿卤水系1980年西南石油局施工的一口油气探井发现。该卤水位于四川盆地东北部华蓥山背斜北延倾没部位的黄金口背斜群南段之罗家坪背斜近南倾没端的付家山高点附近。寓于盆地海相三叠系下统嘉陵江

组五段—中统雷口坡组一段(T<sub>1j</sub><sup>5</sup>—T<sub>2L</sub><sup>1</sup>) 盐系之宣达盐盆(图 1)。

### 1.1 古地理环境

四川盆地古地理位于上扬子台地西北隅, 早、中三叠世时, 远离东南向之广海, 海水联系不畅, 环境相对闭塞, 在干旱气候条件的配合下, 蒸发作用强烈, 水体浓度相对较高, 石膏预

备盆地分布甚广, 几乎遍及整个台地, 面积近 50×10<sup>4</sup>km<sup>2</sup>。石盐主要分布台地西北隅之现今四川盆地内, 面积近 20×10<sup>4</sup>km<sup>2</sup>(图 2)<sup>1,2</sup>, 蒸发岩沉积厚达 800~1 400m。在盆地东北部宣汉—达州地区地壳相对沉降, 则形成高咸化成盐环境, 有钾镁盐及富钾卤水产出, 成为四川盆地固、液态钾盐矿远景最好的含盐盆地之一。

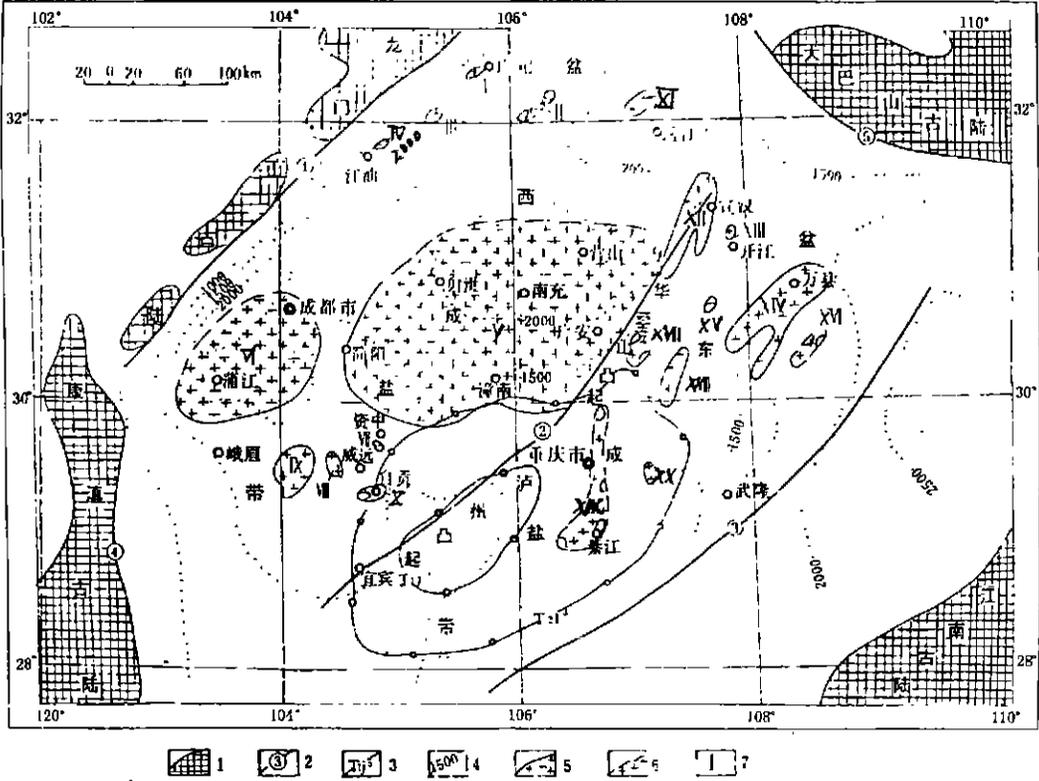


图 1 四川盆地三叠纪盐盆(体)分布图

Fig 1 Distribution diagram of the trias salt basin system in the Sichuan Basin

1—古陆; 2—古断裂及编号; 3—古剥蚀线及层位; 4—沉积厚度等值线(m); 5—盐盆(体)边界; 6—推测盐盆(体)边界; 7—盐盆(体)编号

盆西成盐带: I—广元盐盆(体); II—旺苍盐盆(体); III—剑阁盐盆(体); IV—江油盐盆(体); V—南充盐盆(体); VI—成都盐盆(体); VII—资中盐盆(体); VIII—威远盐盆(体); IX—威西盐盆(体); X—自贡盐盆(体); XI—通江盐盆(体)。

盆东成盐带: XII—宣汉—达县盐盆(体); XIII—江汉盐盆(体); XIV—万县盐盆(体); XV—梁平盐盆(体); XVI—建南盐盆(体); XVII—邻水盐盆(体); XVIII—垫江盐盆(体); XIX—重庆盐盆(体); XX—涪陵盐盆(体)

### 1.2 古气候条件

据 1984 年我队与地科院矿床所合作对四川合川沱鼻峡三叠系剖面古地磁的测定资料, 四川盆地早、中三叠在古纬度为 26°68', 与世界

主要成盐带古纬度的统计资料基本吻合。古纬度控制了古气候的基本特征。从成都地质矿产研究所根据氧、碳同位素对盆地海相三叠系石灰岩的温度测算, 四川盆地早、中三叠世的平均古温度为 34.6℃~36.9℃<sup>3</sup>。可见当时盆地古

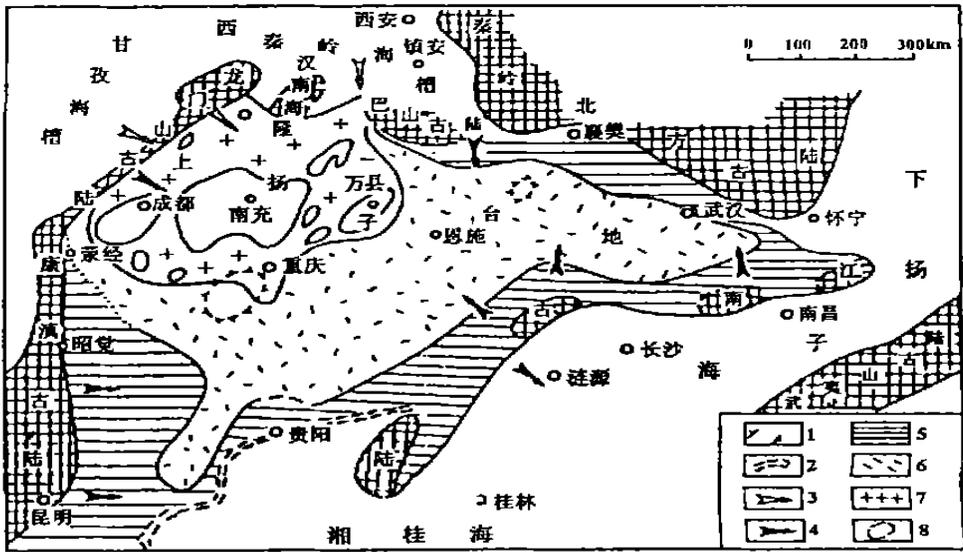


图 2 上扬子台地早中三叠世古地理略图

Fig 2 Paleogeographic sketch of Upper Rantze Platform in the period of early to middle Triassic times

1. 水下隆起; 2. 生物堤礁; 3. 海水补给方向; 4. 陆源补给方向;
5. 碳酸盐岩、碎屑岩沉积区; 6. 石膏沉积区; 7. 石盐沉积区; 8. 盐盆(体)

气候干旱, 有利  $T_{1j}^5 - T_2L^1$  宣达盐盆与外海联系不畅的海水蒸发浓缩, 形成石膏、石盐及更高成化的钾镁盐沉积。

### 1.3 成盐期后的地质经历

盆地海相三叠系沉积后, 至印支晚幕盆地整体上隆, 海水全部退却, 并经历了不同程度的古剥蚀, 此后晚三叠世至中生代, 盆地再次沉降, 广泛接受了 5 000~6 000m 厚的内陆湖沼砂泥岩沉积, 三叠系含盐系地层被深埋地腹, 在上覆层的重荷及地热能的作用下, 盐类沉积经历一个高温、高压的热融水溶变质改造, 促成富钾富矿卤水的形成<sup>[4]</sup>。喜马拉雅运动使盆地强烈褶皱, 并形成一系列断裂构造及裂隙, 有利卤水的聚集<sup>[5]</sup>。 $T_{1j}^5 - T_2L^1$  宣达盐盆富钾富矿卤水即在上述古地理、古气候条件及成盐期后盐类沉积经历深埋变质作用和强烈构造变动的地质背景条件下形成的。

## 2 宣达盐盆 $T_{1j}^5 - T_2L^1$ 含盐系和储卤剖面特征

宣达盐盆  $T_{1j}^5 - T_2L^1$  含盐系剖面有两种类型, 其一为含盐杂卤石剖面, 其二为储卤(富

钾卤水)剖面。前者见石盐、杂卤石, 有时尚有钾镁盐分布, 但无富钾卤水赋存; 后者有富钾卤水产出, 但未见石盐、杂卤石、钾镁盐分布。按  $T_{1j}^5 - T_2L^1$  盐系剖面岩类组合, 由下而上可概括为三个岩性段:

I 下碳酸盐岩段: 为灰色微晶灰岩、时夹白云质灰岩。灰岩常含藻纹和生物碎屑, 有时含磷粒、顶部为白云岩; 厚 25~42m。

II 硫酸盐—石盐岩段: 为硬石膏夹石盐、杂卤石及白云岩、菱镁岩。石盐层累计最厚达 74m。中上部常见多层杂卤石及钾镁盐矿物分布, 其中以无水钾镁矾、硫酸镁矾最为多见。无水钾镁矾含量可达 3%~5%, 最高可达 15%~17%, 构成无水钾镁矾富集层, 厚达 1.34m, 偶尔尚可见钾盐镁矾矿物出现。中上部硬石膏岩中尚夹一层火山凝灰岩, 俗称“绿豆岩”, 为区域标志层, 厚 50~120m。

III 上碳酸盐岩段: 由深灰微—细晶灰岩、白云岩组成, 有时含磷粒及生物碎屑。厚 25~35m。

盐系中石盐的  $Br \cdot 10^3 Cl$  下部为 0.2~0.3, 中上部为 0.4~0.5, 属晚期沉积石盐。据 M. Γ. 瓦里亚什科海水蒸发实验资料, 当海水蒸

发浓缩析出石盐的  $\text{Br} \cdot 10^3 / \text{Cl}$  达到 0.43, 为晚期沉积石盐, 并将进入钾盐沉积阶段<sup>[6]</sup>, 可见  $\text{T}_1\text{J}^5 - \text{T}_2\text{L}^1$  宣达盐盆水体咸化程度较高, 已进入高咸化成盐环境, 达到了成钾阶段。

富钾富矿卤水即赋存于 3 260m 深处  $\text{T}_1\text{J}^5 - \text{T}_2\text{L}^1$  I、II 岩段的石灰岩夹具针状溶孔的粒屑白云岩的碳酸盐岩储层中, 有多个碳酸盐裂隙和孔隙性含卤层显示, 孔隙度 1.08% ~ 6.47%, 主出卤段孔隙度 > 5%, 含卤层顶部有断层通过, 裂隙较发育, 含卤层富水性良好, 富钾富矿卤水可自流溢出井口, 卤层压力为 45.9MPa。富钾富矿卤水产于付家山潜伏构造高点附近及断裂与背斜控制的裂隙发育带上。在深埋封闭条件下的富钾卤水, 具高压特点, 在地静压力驱动下, 测压水头也高, 可自溢, 利于开发, 弹性储量也大。

上述两类盐系剖面, 均经深埋地热增温的影响, 盐类物质发生过热融水溶变质改造。如含盐含杂卤石剖面中的杂卤石、硫镁矾和无水钾镁矾等含钾盐类皆为沉积变质演化的产物<sup>[3]</sup>。而储卤(富钾卤水)剖面, 易溶盐类已受水(盐类热融脱出的结晶水和岩层压密挤出的水)的淋滤发生水溶变质, 使易溶盐类特别是易溶固态钾组分呈液态向储层转移, 与原储层水混合, 形成具溶滤特征的沉积变质卤水——富钾卤水。

### 3 富钾富矿卤水地球化学特征

卤水的化学组成特征是在一定地质环境和物理化学条件下形成和演变的结果, 它是研究卤水成因及品质的基础。

宣达盐盆富钾富矿卤水呈黑色, 具浓  $\text{H}_2\text{S}$  臭, 经多次采样化验, 化学组成和品质稳定, 矿化度 352.69g/L, 密度 1.2253, 水温 89.4℃, pH 值 6.1, 呈酸性, 水型按 M. I 瓦里亚特科分类法, 属氧化物型。其阳离子含量顺序为:  $\text{Na}^+ > \text{K}^+ > \text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+}$ , 化学组成详见表 1。

#### 3.1 化学组成特征

卤水化学组分与 1983 年陈郁华蒸发实验的黄海水资料(表 2)对比<sup>[7]</sup>, 有以下特征。

(1) 富钾卤水  $\text{K}^+$ 、 $\text{B}^{3+}$  含量异常高。

该卤水的矿化度和  $\text{Br}^-$  含量仅相当海水蒸发系列的泻利盐阶段, 但  $\text{K}^+$ 、 $\text{B}^{3+}$  含量异常高, 分别为 25.96g/L 和 1 440mg/L, 远高于海水各浓缩阶段的含量, 即便是钾盐阶段,  $\text{K}^+$ 、 $\text{B}^{3+}$  含量也不可能如此之高。其中  $\text{K}^+$  含量与钾盐阶段  $\text{K}^+$  含量增高比为 1.04,  $\text{B}^{3+}$  含量增高比为 1.34, 呈现出显著的高异常。

(2)  $\text{I}^-$ 、 $\text{Sr}^{2+}$ 、 $\text{Li}^+$ 、 $\text{Rb}^+$  等微量组分呈显著增高特征。

该卤水较海水更富含  $\text{I}^-$ 、 $\text{Sr}^{2+}$ 、 $\text{Li}^+$ 、 $\text{Rb}^+$  等微量组分, 均为正常海水蒸发系列所不能达到的含量, 与海水蒸发系列最高含量比为 1.57 ~ 95.00(表 3), 呈显著增高特征。

(3) 富钾卤水的  $\text{K}^+$  和  $\text{Br}^-$  含量具不对应增高。

正常海水当浓缩到光卤石沉积阶段之前,  $\text{K}^+$  和  $\text{Br}^-$  含量应呈对应急速增高(参见表 2), 但该卤水二者增长极不协调, 其含量与海水钾盐沉积阶段相比,  $\text{K}^+$  含量比为 1.04, 而  $\text{Br}^-$  含量比仅为 0.29, 表现出  $\text{Br}^-$  对应  $\text{K}^+$  含量相对偏低, 呈不对应增高特征。

表 1 富钾富矿卤水化学组成表

Table 1 Chemical composition of the highly mineralized potassium-rich brine

常量组分含量/(g/L)						
$\text{Na}^+$	$\text{K}^+$	$\text{Ca}^{2+}$	$\text{Mg}^{2+}$	$\text{Cl}^-$	$\text{SO}_4^{2-}$	$\text{HCO}_3^-$
100.52	25.96	10.88	1.26	201.97	0.38	0.34
微量组分含量/(mg/L)						
$\text{Br}^-$	$\text{I}^-$	$\text{B}^{3+}$	$\text{Li}^+$	$\text{Sr}^{2+}$	$\text{Rb}^+$	$\text{Cs}^+$
1675.00	38.00	1440.00	323.00	597.00	32.20	3.89

表 2 宣达盐盆  $T_1^5 - T_2^4$  富钾卤水及海水不同浓缩阶段的化学组成对比表

Table 2 Comparison of the composition of the potassium-rich  $T_1^5 - T_2^4$  brine in the Xuanda Salt Basin with those of seawater during different concentration stages

沉积阶段	比重	矿化度 (g/L)	常量组分/(g/L)														微量组分/(mg/L)					$B_2O_3$ (g/L)
			K <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Cl <sup>-</sup>	Br <sup>-</sup>	I <sup>-</sup>	Li <sup>+</sup>	Rb <sup>+</sup>	Sr <sup>2+</sup>	B <sup>3+</sup>							
原始海水	1.0224	32.00	0.34	9.89	0.38	1.19	0.13	2.42	17.53	61.00	<0.01	0.17	0.11	17.80	4.30	0.014						
文石沉积	1.0687	103.10	1.10	32.19	1.13	3.82	0.14	7.96	56.53	200.16	<0.01	0.55	0.38	22.55	17.08	0.055						
石膏	1.1000	148.40	1.40	45.70	1.50	5.62	0.20	11.55	82.05	281.79	<0.01	0.97	0.50	32.89	17.08	0.055						
沉积	1.1620	237.80	2.60	69.97	0.77	9.36	0.15	15.23	137.53	480.81	0.02	1.38	0.83	47.92	45.62	0.147						
开始	1.2124	348.90	3.00	111.20	0.49	12.39	0.07	37.09	183.59	651.80	0.029	1.63	1.18	55.00	46.87	0.151						
沉积	1.2186	332.85	9.00	99.58	0.47	13.84	0.13	20.25	187.89	749.00	0.071	1.85	1.35	59.85	51.25	0.165						
开始	1.2297	340.95	14.50	82.82	0.29	22.66	0.07	32.35	183.54	1178.00		3.00	2.70	56.33	107.50	0.346						
沉积	1.2894	396.76	16.20	42.21	0.25	59.08	/	84.50	189.03	2958.75	0.280	8.13	5.88	20.25	203.15	0.654						
钾石盐沉积	1.3376	459.20	25.00	11.95	0.20	90.40	/	74.00	248.05	5691.00	0.370	16.25	7.00	未见	431.25	1.389						
光卤石沉积	1.3962	532.34	1.14	1.77	0.10	129.02	/	43.10	239.18	10504.00	0.400	35.71	未见	未见	809.50	2.606						
水氯镁石沉积	1.4057	539.16	0.73	1.77	/	130.15	/	50.40	234.91	11614.20		45.24	未见	未见	1077.83	3.470						
宣达盐盆富钾卤水	1.2253	352.69	25.96	100.52	10.88	1.26	0.34	0.38	201.97	1675.00	380.00	323.00	32.20	597.00	1440.00	4.636						
比值			1.60	2.38	43.52	0.02	/	0.005	1.07	0.57	135.71	39.73	5.42	22.74	7.09	7.09						

注:海水各不同浓缩阶段的化学组成系陈郁华 1983 年黄海水蒸发实验资料,其中 1 系李亚文、韩蔚田的南海蒸发实验资料。

(4) 常量组分表现为贫  $Mg^{2+}$ 、贫  $SO_4^{2-}$ 、富  $Ca^{2+}$  特征。

富钾卤水与海水相比, 常量组分  $Mg^{2+}$ 、 $SO_4^{2-}$  显著偏低, 尚不及海水文石阶段的含量, 而  $Ca^{2+}$  却高于海水各浓缩阶段的含量, 表现出贫  $Mg^{2+}$ 、贫  $SO_4^{2-}$  和富  $Ca^{2+}$  的特征 (参见表 2)。

### 3.2 元素地球化学特征

富钾卤水及海水各浓缩阶段的元素地球化学比值经计算列于表 4。两者相比发现, 富钾卤水的  $K \cdot 10^3 / Cl$ 、 $K / Br$  和  $B_2O_3 \cdot 10^3 / Cl$  等比值均远高于海水各浓缩阶段, 其中  $K \cdot 10^3 / Cl$  高达 128.81,  $Br \cdot 10^3 / Cl$  则明显偏低仅 8.29 (应达 15.65~22.94 间)。而  $nMg / nCl$ 、 $SO_4 \cdot 10^2 / Cl$  等比值远低于海水各浓缩阶段,  $Ca / Sr$  则是高于相应矿化度海水的比值。

综上所述, 该富钾卤水具高矿化度、富钾、富硼和富含碘、锶、锂、铷等有用组分及贫镁、贫

硫酸根、高钙以及钾、溴不协调对应增高等特征。它与海水蒸发系列存在明显的差异, 充分表明该富钾卤水与海水迥然不同, 它并非单纯的由古海水蒸发浓缩而成。

## 4 富钾卤水成因剖析

地下卤水通常有沉积型和溶滤型两大成因类型, 有时尚有叠加型和深源补给型<sup>[8]</sup>。宣达盐盆富钾卤水水温为  $89^\circ C$ , 按四川盆地常年平均气温  $15^\circ C$  计及盆地地温梯度  $2.3^\circ C/100m$  推算, 与该卤水埋深 3 260m 的地热增温基本相当, 这无疑排除了该卤水深源补给的可能性。既然该卤水赋存于海相三叠系碳酸盐—蒸发盐岩系之中, 则其形成当与海水戚戚相关。但从富钾卤水化学组成含量特征来看, 它与海水浓缩系列卤水又有显著差异, 则其成因绝非单一的古海水蒸发浓缩的沉积卤水。

表 3 富钾卤水微量组分含量与海水蒸发系列高含量(mg/L)比较表

项 目	$K^+$	$B^{3+}$	$I^-$	$Sr^{2+}$	$Li^+$	$Rb^+$
富钾卤水中含量(A)	25955	1440.00	38.0	597.00	323.00	32.20
海水蒸发系列最高含量(B)	25000	1077.83	0.4	59.85	45.24	7.00
A: B	1.04	1.34	95.0	9.97	7.14	4.6

表 4 富钾卤水与海水各浓缩阶段元素地球化学比值对比表

Table 4 Comparison of the geological ratios of elements in the potassium-rich brine and seawater in different concentration stages

浓缩阶段	矿化度 /(g/L)										
		$Br \cdot 10^3 / Cl$	$K \cdot 10^3 / Cl$	$K / Br$	$Cl / Br$	$nNa / nCl$	$nMg / nCl$	$SO_4 \cdot 10^2 / Cl$	$B_2O_3 \cdot 10^3 / Cl$	$Ca / Sr$	
原始海水	32.00	3.48	19.40	5.37	287.38	0.87	0.20	13.81	0.80	48.72	
石膏	开始	148.40	3.43	17.06	4.97	290.99	0.86	0.20	14.08	0.67	45.61
	沉积	237.80	3.50	18.91	5.41	286.04	0.78	0.20	11.07	1.06	16.07
石盐	开始	348.90	3.55	16.34	4.60	281.66	0.93	0.20	20.20	0.82	8.91
	沉积	332.85	3.99	47.90	12.02	250.85	0.81	0.21	10.78	0.87	7.85
泻利盐	开始	340.95	6.41	78.98	12.31	155.85	0.69	0.36	17.60	1.88	5.15
	沉积	396.76	15.65	85.70	5.48	63.89	0.34	0.91	44.70	3.46	9.32
钾石盐沉积	459.20	22.94	100.78	4.39	43.59	0.074	1.06	29.83	5.60		
光卤石沉积	532.34	26.31	3.36	0.11	38.00	0.0068	0.94	10.80	6.53		
水氯镁石沉积	539.16	36.48	2.18	0.06	28.84	0.0081	1.13	15.05	10.36		
富钾卤水	352.69	8.29	128.51	15.50	120.58	0.77	0.02	0.19	23.90	18.22	

注: 据陈郁华 1983 年黄海海水蒸发实验资料计算

#### 4.1 富钾卤水沉积后经受过深度变质作用

富钾卤水为深层地下卤水,处于深埋封闭条件下,虽不受现代大气降水渗滤的直接影响,但在漫长的地史经历中,由于物理、化学和生物等各种作用的综合叠加作用,对卤水化学组成含量和特征必将产生影响,发生变质改造。

(1)富钾卤水富含  $I^-$ 、 $Sr^{2+}$ 、 $Li^+$ 、 $B_2O_3$  等组

表 5 富钾卤水与自贡黑卤稳定组分含量比较(mg/L)

Table 5 Comparison of the contents of stable components in the potassium-rich brine and the Zigong black brine, in mg/L

项目	$I^-$	$Sr^{2+}$	$Li^+$	$Br^-$	$K^+$	$B_2O_3$
富钾卤水	38.00~39.79	500~597	283~323	1675~1791	24960~25955	4636~5456
自贡黑卤	16±	200±	125±	725±	2500±	2300±
增高比值	2.4±	2.5±	2.4±	2.4±	10±	2.4±

(2)富钾卤水中的  $nNa/hCl$  和  $Cl/Br$  两对系数反映经受深度变质作用。

据资料,海水水最有意义的是  $nNa/hCl$  和  $Cl/Br$  两对系数,它具有最大的稳定性。当  $nNa/hCl$  约等于 0.87、 $Cl/Br$  约等于 300 时,为海成沉积卤水;当  $nNa/hCl$  值为 0.87~0.99 或更高和  $Cl/Br$  值为 1 200~1 2000 或更大时,则为岩盐溶滤卤水;当  $nNa/hCl$  值小于 0.87 和  $Cl/Br$  值小于 300 时,则为沉积变质卤水。该两对系数值越小,则变质作用越深越强烈<sup>[9]</sup>。宣达盐盆富钾卤水的  $nNa/hCl$  为 0.77,  $Cl/Br$  为 120.58,进一步表明该卤水经受了深度变质作用。

#### 4.2 富钾卤水尚具固态钾盐矿的溶滤特征

富钾卤水中的稳定组分均较自贡黑卤增高比值为 2.4,而唯独  $K^+$  含量猛增,增高比值为 10.0(表 5),显然这还不能单一的用沉积变质得到圆满解释。它与海水蒸发浓缩系列卤水及与国外已知成因类型卤水水化学系数相比,明显具有固态钾盐矿的溶滤特征。

(1)富钾卤水中的  $K \cdot 10^3/Cl$  和  $Br \cdot 10^3/Cl$  不协调对应增高与固态钾盐矿溶滤有关。

海水蒸发浓缩过程中,  $K \cdot 10^3/Cl$  和  $Br \cdot 10^3/Cl$  随浓缩发展呈有规律的变化,如图 3 所示。但该富钾卤水  $K \cdot 10^3/Cl$  异常高,达 128 以上,而

分与变质作用有关。

$I^-$ 、 $Sr^{2+}$ 、 $Li^+$ 、 $B_2O_3$  等组分是沉积水体中的稳定组分,它必受卤水蒸发浓缩发展和成岩后正向变质作用影响,随矿化度和变质深度的升高而增高。宣达盐盆富钾卤水与产层一致的 ( $T_{1j}^5-T_{2L}^1$ ) 盆地西南部自贡变质黑卤比较,各稳定组分均有很大的增高,增高比值为 2.4(表 5),说明该富钾卤水较自贡黑卤浓缩质变程度更高。

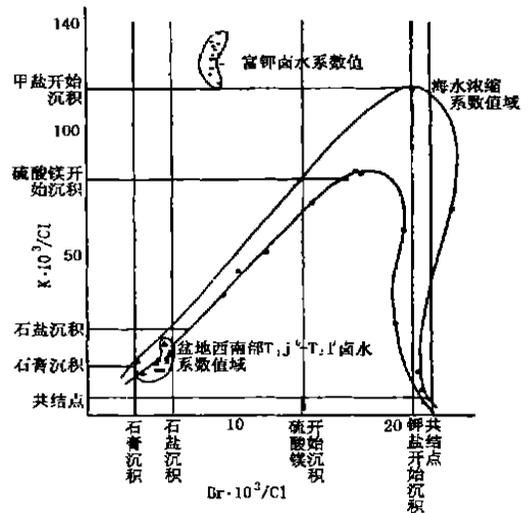


图 3 海水浓缩过程中  $K \cdot 10^3/Cl$ 、 $Br \cdot 10^3/Cl$  系数变化图

Fig 3 Variation of the  $K \cdot 10^3/Cl$  and  $Br \cdot 10^3/Cl$  parameters of seawater during its intensive concentration

$Br \cdot 10^3/Cl$  则显著偏低,仅 8.29,两者极不协调 ( $K \cdot 10^3/Cl$  超出海水浓缩系数值域,而  $Br \cdot 10^3/Cl$  仅在石盐—泻利盐数值域内),其系数值落点位置在图的左上方,远远偏离浓缩曲线。若与盆地西南部的自贡黑卤相比,突出的显示出高钾异常。需要指出的是,海水蒸发浓缩析出氯化物盐时,溴并不形成独立的矿物,而是以类质同相的形式进入氯化物盐的晶格。由于溴在固、液相中的分配系数(比值)小于 1,即进入固相

氯化物盐中的溴比留在液相中的溴要少<sup>[6]</sup>。由此可见, 宣达盐盆富钾卤水  $K^+ \cdot 10^3 / Cl$  异常高, 而  $Br^- \cdot 10^3 / Cl$  显著偏低, 乃与固态钾盐矿的溶滤密切相关。

(2) 富钾卤水中  $Rb^+$  的高异常是固态钾盐矿溶滤的又一佐证

富钾卤水中的  $Rb^+$  高达  $32.2 \text{ mg/L}$ , 较海水各浓缩阶段显著增高。  $Rb^+$  和  $K^+$  的离子半径相近(分别为  $0.149 \text{ nm}$  和  $0.133 \text{ nm}$ ), 地球化学习性相似。  $Rb^+$  在自然界不形成独立的矿物, 而以类质同相方式置换  $K^+$ , 进入钾盐矿物晶

格。因此富钾卤水中  $Rb^+$  的高异常与  $K^+$  的高含量同步, 应是固态钾盐矿溶滤的又一佐证。

(3) 富钾卤水中  $Br^- \cdot 10^3 / Cl$ 、 $nMg / nCl$ 、 $nNa / nCl$ 、 $K^+ \cdot 10^3 / Cl$  和  $K / Br$  等系数值与国外某些钾盐矿床溶滤卤水接近

与国外已知成因卤水相比, 富钾卤水  $K^+$  异常偏高;  $Br^- \cdot 10^3 / Cl$ 、 $nMg / nCl$ 、 $nNa / nCl$ 、 $K^+ \cdot 10^3 / Cl$  和  $K / Br$  等系数值与上卡姆、索尔—伊列斯克钾矿的沉积卤水差异很大, 而与德国南哈茨及白俄罗斯的斯塔罗宾钾盐矿床的溶滤卤水接近, 反映了该富钾卤水溶滤含钾盐类的情况(表 6)。

表 6 富钾卤水与国外不同成因类型卤水元素系数值对比

Table 6 Comparison of the elemental ratios of the potassium-rich brine with these of oversea brines with different types of formation mechanism

项 目	矿化度/(g/L)	$Br^- \cdot 10^3 / Cl$	$nNa / nCl$	$nMg / nCl$	$K^+ \cdot 10^3 / Cl$	$K / Br$	$K^+ \text{ (g/L)}$	
宣达盐盆富钾卤水	352.69	8.29	0.77	0.02	128.51	15.50	25.96	
钾盐溶滤水	南哈茨	324.00	0.4~6.62	0.53~0.97	0.006~0.2	24.4~294.6	44.5~61.4	3.87
	斯塔罗宾	379.50	8.8	0.43	0.48	147.00	16.7	17.37
沉积卤水	上卡姆	310~418	22.7~67.0	0.09~0.16	0.77~0.88	43.8~117.0	1.3~2.0	16.31~30.53
	索尔—伊列斯克	271~354	19.7~26.4	0.26~0.34	0.68	19.7~26.4	2.5~3.7	12.5~16.2

综上所述, 宣达盐盆富钾卤水源于海成沉积水, 但与自贡黑卤比较更具浓缩变质特征。其中  $K^+$ 、 $Rb^+$  的高异常,  $K^+ \cdot 10^3 / Cl$  偏高而  $Br^- \cdot 10^3 / Cl$  偏低的不协调现象, 以及与国外已知成因卤水比较, 反映出固态钾盐矿的溶滤特征。从该卤水的蒸发试验中, 其石盐析出后即析出钾石盐, 且析钾过程较长, 则反映了该卤水与溶滤了氯化钾盐类有关。可见该富钾卤水为沉积变质水和固态钾盐矿溶滤水的复合成因。

总之富钾卤水是在漫长的沉积、埋藏、成岩、溶滤等地质历史发展过程中逐渐演化形成的。它在长期深埋封闭状态下, 经受高温、高压及水—岩相互影响的物理、化学和生物等作用, 经历多次复杂的改造, 使原始沉积卤水化学组分发生改变, 朝着深度变质及高矿化度方向发展, 并溶滤了固态钾盐矿, 最终演化形成富钾卤水<sup>[10]</sup>。

## 5 富钾卤水品质优势

宣达盐盆富钾卤水品质优异,  $K^+$  含量达到

$25.955 \text{ g/L}$ , 不仅高于青海察尔汗盐湖水( $K^+$  为  $12.1 \text{ g/L}$ ), 也远高于智利阿塔卡玛和美国西尔兹盐湖水( $K^+$  含量分别为  $23.6 \text{ g/L}$  和  $23.1 \text{ g/L}$ )。若与已经成为四川盐化工生产基地的自贡之品位最高的黑卤比较,  $K^+$  含量增高比为 10, 其它  $I^-$ 、 $Sr^{2+}$ 、 $Li^+$ 、 $Br^-$ 、 $B_2O_3$  等组分增高比为 2.4 (参见表 5)。按我国 1987 年的《矿产工业要求参考手册》规定, 卤水  $KCl$  工业品位为 1%, 而该卤水换算成  $KCl$  为  $49.49 \text{ g/L}$ , 析合  $KCl$  的百分含量已达 4.04%, 远超过此规定标准, 使其成为当今世界罕见的液态钾矿资源。

此外其  $B^{3+}$ 、 $Br^-$ 、 $I^-$ 、 $Rb^+$ 、 $Sr^{2+}$ 、 $Li^+$  等有用组分与超过或达到综合利用和单独开采工业品位, 分别是综合利用工业品位的 9.60 倍、10.17 倍、2.8 倍、2.22 倍和 26.01 倍、23.66 倍; 及单独开采工业品位的 3.80 倍、4.58 倍、0.27 倍、0.61 倍、12.51 倍和 12.13 倍(表 7)。可见该富钾卤水品质特别优异, 不仅是国内外罕见的液态钾盐矿资源, 而且是很具有很高开发利用价值的优质化工原料水。开发利用可为国家提供优质钾肥及多种无机化工原料, 经济价值极高。

表 7 宣达盐盆富钾水有用组分与工业品位对比(mg/L)

Table 7 Comparison of the utilizable components in the potassium-rich brine from the Xuanda Salt Basin with the industrial levels

有用组分	K <sup>+</sup>	B <sup>3+</sup>	Br <sup>-</sup>	I <sup>-</sup>	Rb <sup>-</sup>	Sr <sup>2+</sup>	Li <sup>+</sup>
工业品位							
综合利用(A)	1300	150	150	10	10	22.1	13.1
单独开采(B)	3100	300	300	30	20	44.2	24.6
宣达盐盆富钾卤水(C)	25955	1440	1675	38	32.2	597	323
综合利用增高倍数( $\frac{C}{A}-1$ )	18.97	9.60	10.17	2.8	2.22	26.01	23.66
单独开采增高倍数( $\frac{C}{B}-1$ )	7.37	3.80	4.58	0.27	0.61	12.51	12.13

注: 工业品位指标系据中国地质科学院矿床所宋鹤彬资料

## 6 富钾卤水的资源意义

### 6.1 可为农业提供优质钾肥,在一定程度上弥补我国固态钾矿的短缺

我国固态可溶性钾矿资源奇缺, 现全国仅有云南思茅地区约 1 000 万 t 保有储量可继续开采<sup>[13]</sup>。我国固态可溶性钾矿成钾条件不够理想, 找钾难度大<sup>[3]</sup>, 要设想在短期内找到大型固态可溶性工业钾盐矿床, 尚不容乐观。而四川盆地东北部宣达盐盆富钾卤水品质优异, K<sup>+</sup>含量达 25.955 g/L, 极具开发利用价值。因此转变观念, 扩大找钾领域, 大力勘查开发利用宣达盐盆富钾卤水资源, 进一步扩大其高品位、大流量、高水头的卤水资源, 则可在一定程度上弥补我国钾盐矿资源的短缺, 为农业提供优质钾肥。

### 6.2 可为国家提供多种紧缺紧俏化工原料

富钾卤水富含多种有用组分, 开发利用可实现全闭路无排放工艺, 生产出氯化钾、硼

酸、溴素、碘素、碳酸锶、碳酸锂等多种无机化工产品, 且各产品皆为我国市场上适销对路、持续需求的紧缺、紧俏物资, 有极大的开发潜力和市场竞争能力, 有的尚可出口创汇, 产生重大的社会效益和经济效益。大力勘查开发利用, 则可为国家提供多种紧缺无机化工产品, 具有重要意义。

据测算, 按该富钾卤水品质, 以日处理 1 000 m<sup>3</sup>及现生产回收率计, 年可生产出氯化钾 12 647 t/a, 溴素 428 t/a, 碘素 9.709 t/a, 硼酸 1 800 t/a, 碳酸锂 313.7 t/a, 碳酸锶 220.3 t/a 和食盐 88 075 t/a, 年总产值可达 8 226.4 万元, 其中化工产品年产值为 3 823.4 万元, 占总产值的 46.5%; 食盐产值 4 403 万元, 占总产值的 53.5%。随着钻采卤水井数量及卤量的相应增加, 其产量和产值必然随之增高(表 8)。

### 6.3 富钾卤水具有固态可溶性钾盐矿的找矿意义

前已述及, 宣达盐盆富钾卤水具有高钾、高铷等异常特征, 其水化学特征系数又与国外已知钾盐矿溶滤卤水接近, 表明该富钾卤水具

表 8 宣达盐盆富钾富矿卤水日处理 1000m<sup>3</sup>的年产量和产值Table 8 The annual output of chemicals and the corresponding values at a scale of treating the potassium-rich brine 1000m<sup>3</sup> per day

卤水组成	含量/(g/L)	产品	单位产量/(kg/m <sup>3</sup> )	理论年产量/t	回收率/%	实际年产量/t	产值	
							单价/(元/t)	产值/万元
K <sup>+</sup>	25.96	KCl	49.50	18067	70	12647	1000	1264.7
Br <sup>-</sup>	1.675	Br <sup>2</sup>	1.675	611.38	70	428	10000	428.0
I <sup>-</sup>	0.038	I <sup>2</sup>	0.038	13.87	70	9.709	150000	145.6
B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4.636	H <sub>3</sub> BO <sub>3</sub>	8.220	3000	60	1800	4500	810.0
Li <sup>+</sup>	0.323	Li <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	1.719	627.43	50	313.72	35000	1098.0
Sr <sup>2+</sup>	0.597	SrCO <sub>3</sub>	1.006	367.19	60	220.31	3500	77.1
NaCl	254	NaCl	254	92710	95	88075	500	4403
年总产值/万元								8226.4

有钾盐矿的溶滤特点,这就揭示了该盐盆的原始盐系剖面中或原始含盐盆地应有固态钾盐矿的存在,这对宣达盐盆中寻找固态可溶性钾盐矿有重要指示意义。这一认识值得重视和探索。因而今后在大力加强富钾卤水勘查开发同时,应把固、液态钾盐找矿工作结合起来,将更利获得找钾工作的实质性进展。

## 7 几点认识和建议

(1) 宣达盐盆富钾卤水品质优异,各有用组分含量均超过开采利用品位,是国内外罕见的富钾富矿的综合性液矿资源。这些组分皆为国家紧俏物资,有较高经济价值。为此建议有关部门和领导要重视和加强该卤水的勘查开发力度,使其尽早产生应有的社会效益和经济效益,为实现西部大开发战略作出贡献。

(2) 富钾富矿卤水为沉积变质水和钾盐矿溶滤水的复合成因。而从卤水含 $K^+$ 量之分析,无论是沉积或溶滤卤水均反映该卤水已达钾盐析出阶段,应有固钾形成。因此这无疑是一个重要的寻找固态钾盐矿的线索,为此建议今后在卤水勘查中,应将固、液态钾盐的找矿工作紧密地结合起来。

(3) 富钾富矿卤水中的有用组分,目前工业回收率偏低,尚需进一步加强其综合利用的研究,提出先进合理的工艺流程,提高回收率,这对合理开发利用该卤水资源是很重要的。

(4) 四川富钾卤水皆为油气探井发现,油、气、卤、钾具有共生关系,空间上分布在统一的一个大盆地中;时代层位上油、气和卤水储集层一致<sup>[14]</sup>,均以盐系地层为隔盖层,具有相似的赋存和富集条件,且勘查手段也基本一致,工作成果可互为补充。为此油气和卤钾勘查部门应进一步贯彻综合找矿方针,加强“油气卤钾”兼探工作,这既可避免重复勘探,造成人力、物力、财力浪费,又可充分利用地下矿产资源作出贡献。

(5) 富钾卤水皆为深层地下卤水,具高承压特点,在地静压力驱动下,测压水头很高,通常可自流溢出井口,对开发利用有利。卤水富集则受后期构造形成的断裂裂缝发育带控制。

宣达盐盆黄金口背斜群为燕山期隆起的北东向构造,有多个高点,就构造形迹分析,尚有北西向构造断裂与其反接复合,具有找卤前景。目前该产卤井因油气钻井施工及固井作业中,卤层受重泥浆(重晶石粉)和水泥的伤害,已被严重污染和堵塞,卤量较小。为此建议有关方面可通过卤层构造分析,有针对性地选择在卤层构造裂隙发育带再行布井,以及在必要时对原卤并含卤层采取压裂酸化等沟通卤层连通性的措施,乃至在卤层中采用水平钻进技术,以便获得承压、自流、大流量的卤水,这是完全可能的。

(6) 富钾卤水虽为富含多种有用组分的优质液矿资源,但目前已探明的储量甚少,地质勘查程度较低,对卤水富集规律、储量计算及评价方法均有待进一步完善和提高。建议有关方面在四川择优选点,安排卤水勘查和科研项目,积极试点探索,总结规律和方法,以利推广应用,促进四川富钾卤水找矿工作。

本文所有认识和意见仅供有关方面参考,不妥之处尚请指正。

### 参考文献:

- [1] 林耀庭,等.四川盆地气田水及开发前景展望[J].盐湖研究,1999,7(4):31~33.
- [2] 林耀庭.论四川盆地三叠系盐类变质作用及找钾方向[J].化工矿产地质,1995,17(2):93~100.
- [3] 林耀庭.论四川盆地海相三叠系含钾性及找钾方向[J].四川地质学报,1994,14(2):112~119.
- [4] 林耀庭,等.四川某地富钾卤水的发现及其成因和意义[J].化肥工业,1997,24(2):11~12.
- [5] 林耀庭.四川盆地三叠系地下卤水储层特征及其富集的控制作用[J].盐湖研究,1999,7(3):5.
- [6] 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):175~176.
- [7] 陈郁华.黄海水 $25^{\circ}\text{C}$ 恒温蒸发的析盐序列及某些微量元素分布规律[J].地质学报,1983(4):379~390.
- [8] 林耀庭,等.氢氧同位素习性及其在四川盆地卤水成因分类研究[J].四川地质学报,2004,21(3):155~156.
- [9] 汪蕴珠,等.深层卤水形成问题及研究方法[M].北京:地质出版社,1982.68~69.
- [10] 林耀庭,等.论四川盆地液态钾盐及其形成机制[J].中国矿盐,1996,(4):25~26.
- [11] 吴智慧,等.我国短缺矿产的问题和对策[J].中国地质,1996,(6):46.
- [12] 林耀庭,等.发挥四川盆地卤水资源优势为实施西部大开发宏观图[J].四川地质学报,2001,21(1):30.
- [13] 王石军,等.我国钾肥工业回顾分析与展望[J].化工矿产地质,2001,23(3):60.
- [14] 林耀庭,等.论盐钾与油气关系[J].化工矿产地质,2000,22(2):70~71.

## Study on the Geochemical Characteristics and Resource Significance of the Highly Mineralized Potassium-rich Brine in the Sichuan Xuanda Salt Basin

LIN Yao-ting<sup>1</sup>, YAO You-cheng<sup>2</sup>, KANG Zheng-hua<sup>2</sup>, WANG Ning-jun<sup>2</sup>

(1. *The second geological group of Southwest Bureau of Petroleum, Zigong 643013, China;*

2. *Hengcheng Energy Resources Group Co. Ltd, Dazhou 635000, China*)

**Abstract:** The highly mineralized potassium-rich brine of Xuanda Salt Basin originates from the Fujiashan structure of south anticline of the Golden Pass in the northeast of the Sichuan Basin. It is located, in the form of deep water, in the carbonate layer of the T<sub>1</sub>J<sup>5</sup>-T<sub>2</sub>L<sup>1</sup> salt system at a depth of 3260 meters. Compared with the concentration series of seawater, the brine contains extraordinarily high amount of potassium ions, i. e., 25.96 g/L, which exceeds the amount in the seawater at the stage of potassium sedimentation, as well as the quality for comprehensive or singular utilization. Therefore, it is a liquid potassium resource of rarity both domestically and abroad. The brine also contains rich amount of other utilizable components, such as I<sup>-</sup>, B<sup>3+</sup>, Li<sup>+</sup>, Rb<sup>+</sup> and Sr<sup>2+</sup>, with fine qualities, which, together with potassium, upgrade it as a superb liquid for chemical exploitation, with tremendous economical significance. The brine is of the composite formation mechanism of sedimentary transformation and the dissolution and filtration of solid potassium salts. The exploitation and utilization of the brine would provide potassium fertilizer to agriculture, to relieve the deficiency of domestic potassium resources, as well as some chemical products of shortage. In addition, it is of good significance for the exploration of solid potassium minerals.

**Key words:** Highly mineralized potassium-rich brine; Geochemical characteristics; Xuanda Salt Basin; T<sub>1</sub>J<sup>5</sup>-T<sub>2</sub>L<sup>1</sup> salt system; Composite formation mechanism; Resource significance

(上接第 7 页)

## A Mossbauer Spectroscopic Study of Salt Lake Sediments

QI Yong-tang, J. Ensling<sup>2</sup>, P. Guetlich<sup>2</sup>

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

2. *Institut fuer Anorganische Chemie und Analytische Chemie, Johannes Gutenberg-Universitaet, D-55099 Mainz, Germany*)

**Abstract:** A series of samples of the sediments from Chaerhan and Kuntayi Playa in Qaidam basin and Luobu-bo Playa in Xinjiang have been studied by Mossbauer spectroscopy. All samples were measured at room temperature. Some samples were also measured at low temperature. The spectral components of the Mossbauer spectra of the samples are attributed to Fe<sup>2+</sup> ions in chlorite and siderite (the latter is contained in the samples of Chaerhan Playa only), Fe<sup>3+</sup> ions in manifold clay minerals and in amorphous ferric hydroxides, and partly in hematite. The components of the iron-bearing minerals and their relative quantity are dependent on the lakes and on the depths. And the Fe<sup>2+</sup>/Fe<sup>3+</sup> ratios of the samples vary in different lakes and different depths. The results reflect the different geochemical and climatic environment during the sedimentation process of salt lakes.

**Key words:** Salt lake sediments; Iron-bearing minerals; Mossbauer effect