

[Article]

www.whxb.pku.edu.cn

Na⁺, K⁺//Cl⁻, B₄O₇²⁻ - H₂O 四元体系 273 K 介稳相平衡

曾 英* 王瑞林 林晓峰 彭 芸

(成都理工大学材料与化学化工学院, 成都 610059)

摘要: 采用等温蒸发法研究了四元体系 Na⁺, K⁺//Cl⁻, B₄O₇²⁻-H₂O 273 K 时的介稳相平衡与相图. 测定了该体系 273 K 平衡液相中各组分的溶解度及平衡液相的密度; 绘制了该体系的介稳相图. 该四元体系 273 K 相图由 5 条溶解度单变量线、4 个结晶区及 2 个共饱和点组成. 体系无复盐或固溶体形成. 四个结晶区分别对应单盐 NaCl、KCl、K₂B₄O₇·4H₂O 和 Na₂B₄O₇·10H₂O. 共饱和点 E₁ 处 KCl、NaCl 及 Na₂B₄O₇·10H₂O 三盐共饱和, 所对应的平衡液相组成为 $w(\text{Cl}^-)=29.15\%$, $w(\text{B}_4\text{O}_7^{2-})=0.64\%$, $w(\text{K}^+)=5.97\%$, $w(\text{Na}^+)=15.55\%$; 共饱和点 E₂ 处盐 KCl、Na₂B₄O₇·10H₂O 和 K₂B₄O₇·4H₂O 的三盐共饱和, 所对应的平衡液相组成为 $w(\text{Cl}^-)=22.84\%$, $w(\text{B}_4\text{O}_7^{2-})=10.98\%$, $w(\text{K}^+)=28.01\%$, $w(\text{Na}^+)=1.53\%$. 同体系 298 K 时的稳定相图相比, 273 K 时硼酸钠的结晶区变大, 而硼酸钾、氯化钠结晶区变小.

关键词: 四元体系; 介稳相平衡; 硼酸盐; 273 K

中图分类号: O642

Metastable Phase Equilibria of the Quaternary System Na⁺, K⁺//Cl⁻, B₄O₇²⁻ - H₂O at 273 K

ZENG Ying* WANG Rui-Lin LIN Xiao-Feng PENG Yun

(College of Materials and Chemistry & Chemical Engineering, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, P. R. China)

Abstract: The metastable phase equilibria of the quaternary system Na⁺, K⁺//Cl⁻, B₄O₇²⁻-H₂O were studied at 273 K by isothermal evaporation method. Solubilities and densities of the equilibrium solution of this system were determined. According to the experimental data, the metastable equilibrium phase diagram was plotted. The phase diagram of the system consists of five univariant curves, four crystallization fields and two invariant points. No double salt or solid solution was formed. The four crystallization fields were corresponding to single salt NaCl, KCl, K₂B₄O₇·4H₂O and Na₂B₄O₇·10H₂O, respectively. Invariant point E₁ was saturated with salt KCl, NaCl and Na₂B₄O₇·10H₂O, the mass fraction composition of the equilibrium solution corresponding to E₁ is $w(\text{Cl}^-)=29.15\%$, $w(\text{B}_4\text{O}_7^{2-})=0.64\%$, $w(\text{K}^+)=5.97\%$, $w(\text{Na}^+)=15.55\%$, while that of point E₂ was $w(\text{Cl}^-)=22.84\%$, $w(\text{B}_4\text{O}_7^{2-})=10.98\%$, $w(\text{K}^+)=28.01\%$, $w(\text{Na}^+)=1.53\%$. Point E₂ is saturated with salt KCl, Na₂B₄O₇·10H₂O and K₂B₄O₇·4H₂O. Compared with the stable phase diagram at 298 K, the crystallization field of Na₂B₄O₇·10H₂O became large at 273 K in this system, whereas the crystallization fields of K₂B₄O₇·4H₂O and NaCl became small.

Key Words: Quaternary system; Metastable phase equilibrium; Borate; 273 K

随着固体矿产资源的日益枯竭, 盐湖卤水、地下卤水等液态矿产资源的开发成为研究的热点. 位于青藏高原的扎布耶盐湖卤水富含锂、钾、硼等元素, 储量之高, 世界罕见. 已探明锂的储量约为 150 万吨, 钾的储量为 3540 万吨, 硼的储量达到了 650 万

吨, 经济总价值愈 2000 亿人民币^[1], 极具开发前景.

盐湖卤水的开发需以相平衡为指导. 在卤水自然蒸发过程中, 不同程度地存在介稳现象. 介稳相平衡的研究, 可客观地反映和再现卤水自然蒸发结晶过程中液固相相互作用关系, 对盐湖卤水资源开发

Received: September 20, 2007; Revised: October 17, 2007; Published on Web: December 11, 2007.

*Corresponding author. Email: zengy@cdu.edu.cn; Tel:+8628-84079016.

国家自然科学基金(40673050、40303010)资助项目

© Editorial office of Acta Physico-Chimica Sinica

工艺路线的制定具有直接指导意义. 近年来, 金作美^[23]、苏裕光^[4]等完成了海水型五元体系介稳相图研究; 宋彭生^[5]对海水型四元体系介稳相图进行了计算; 高世扬等^[6]开展了天然含硼盐卤的实际蒸发相图研究, 同金作美^[23]的介稳相图非常吻合; 郭智忠等^[7]完成了硫酸盐型卤水介稳相图研究; 我们前期针对扎布耶盐湖夏季卤水组成特征开展了碳酸盐体系 288K 的介稳相关系研究^[8-10]. 这些相关系研究成果, 都为盐湖卤水资源综合利用工艺路线的制定提供了重要的基础数据. 但扎布耶盐湖常年平均温度为 $-0.4\text{ }^{\circ}\text{C}$, “要指导低温条件的扎布耶盐湖开发还要从低温相图最基础工作做起”^[11]. 以往的相关研究, 主要集中在 298 K、288 K, 对 273 K 低温下的相关系研究还很少涉及, 桑世华等^[12]开展了简单四元体系 $\text{K}_2\text{B}_4\text{O}_7\text{-Na}_2\text{B}_4\text{O}_7\text{-Li}_2\text{B}_4\text{O}_7\text{-H}_2\text{O}$ 273 K 介稳相关系研究. 但低温溶解度数据十分缺乏, 对实践的指导作用减弱. 为此, 开展低温条件下的相关研究, 是扎布耶盐湖及青藏高原其他盐湖卤水资源开发必不可少的基础性研究工作.

扎布耶盐湖卤水主要成分可归属于 $\text{Li}^+ + \text{K}^+ + \text{Na}^+ + \text{Cl}^- + \text{CO}_3^{2-} + \text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-} + \text{B}_4\text{O}_7^{2-} + \text{H}_2\text{O}$ 八元体系. 该体系同经典的海水体系不同, 可称其为“盐湖卤水体系”. 四元体系 $\text{Na}^+, \text{K}^+//\text{Cl}^-, \text{B}_4\text{O}_7^{2-}\text{-H}_2\text{O}$ 为该盐湖复杂多组分体系中的一个特征四元子体系. 本文将报道该四元体系在 273 K 时的介稳相平衡溶解度及相应平衡液相的密度, 并给出体系的介稳相图.

1 实验部分

1.1 试剂及仪器

去离子水 $\text{pH} \approx 6.6$, 电导率 $< 1 \times 10^{-4} \text{ S} \cdot \text{m}^{-1}$, 实验过程中配制料液和分析用的标液均用此水; 配制料液前煮沸除去 CO_2 . 实验用的 NaCl 、 KCl 、 Na_2CO_3 、 K_2CO_3 均为分析纯; K_2CO_3 和 Na_2CO_3 在使用前需灼烧除去 KHCO_3 和 NaHCO_3 .

SHH250型恒温箱(重庆英博实验仪器有限公司, 精度 $\pm 0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$); AL 104 电子分析天平(精度 0.0001 g, 上海梅特勒-托利多仪器有限公司); GGX-A 型原子吸收分光光度计(北京地质仪器厂); X 射线衍射仪(DMAX-3C, 日本理学公司).

1.2 介稳相图的研究方法

介稳相图的研究采用等温蒸发法. 在恒温恒定风速的蒸发室内进行等温蒸发实验. 根据实验盐类 273 K 下的溶解度, 根据三元体系的共饱和点对应

组成配制初始试液, 再按照预计相图点的组成添加第三种盐类, 配制成实验试液, 置于硬质塑料盒(长 24 cm, 宽 14 cm, 高 7 cm) 中进行等温蒸发实验. 实验条件: 温度(273.0 ± 0.1) K; 风量 $90 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$.

观察试液蒸发过程中固相的析出变化, 根据固相生长情况不定期分离液相及固相, 同时取液相及固相样进行化学分析. 固相在偏光显微镜下观察晶形, 并作 X 射线粉晶衍射分析和热重分析, 以确实固相组成.

平衡液相的密度用称量瓶法测定.

由于低温条件下溶剂蒸发速率减慢、溶液粘度增强, 使得低温相平衡研究比常温相图研究更加复杂和困难. 要求配制试样时要尽可能准确, 否则长时间达不到平衡; 分离取样时要求速度快, 减少实验温度和环境温度差对实验造成的影响.

1.3 化学分析方法^[13]

Cl^- : 莫尔法; $\text{B}_4\text{O}_7^{2-}$: 在甘露醇存在下, 以碱量法滴定; K^+ : 采用四苯硼钠-季胺盐返滴定法; Na^+ : 原子吸收分光光度法.

2 结果与讨论

2.1 四元体系 273 K 相平衡实验结果

四元体系 $\text{Na}^+, \text{K}^+//\text{Cl}^-, \text{B}_4\text{O}_7^{2-}\text{-H}_2\text{O}$ 273 K 介稳平衡时液相组成及平衡液相的密度测定值列于表 1 中. 平衡液相的组成用质量分数 $w(\text{B})$ 表示; 根据平衡液相的组成, 计算出了各离子的 Janěcke 指数, 由此绘制了该四元交互体系的干盐组成图, 见图 1.

由图 1 可知, 四元体系 $\text{Na}^+, \text{K}^+//\text{Cl}^-, \text{B}_4\text{O}_7^{2-}\text{-H}_2\text{O}$ 为简单共饱和型, 在 273 K 下, 体系无复盐及固溶体生成. 其 273 K 下的介稳相图含有 2 个共饱和点、5 条单变量曲线和 4 个单盐结晶区. 四个结晶区分别对应于盐 $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{K}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ 、 NaCl 和 KCl . 其中, $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ 的结晶区最大, 溶解度最小; NaCl 的结晶区最小, 其溶解度最大.

5 条溶解度单变量线 DE_2 、 CE_2 、 E_1E_2 、 AE_1 、 BE_1 分别为 $\text{K}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 4\text{H}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{K}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 4\text{H}_2\text{O} + \text{KCl}$ 、 $\text{KCl} + \text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O} + \text{NaCl}$ 、 $\text{NaCl} + \text{KCl}$ 的共饱和线.

A、B、C、D 对应于该四元体系的 4 个三元子体系的共饱和点; E_1 、 E_2 为四元体系的共饱和点. 共饱和点 E_1 对应的平衡固相盐为 $\text{NaCl} + \text{KCl} + \text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$, 对应的平衡液相组成为 $w(\text{Cl}^-) = 29.15\%$, $w(\text{B}_4\text{O}_7^{2-}) = 0.64\%$, $w(\text{K}^+) = 5.97\%$, $w(\text{Na}^+) = 15.55\%$; 共饱和点 E_2 对应

表 1 四元体系 Na⁺, K⁺//Cl⁻, B₄O₇²⁻-H₂O 273 K 介稳相平衡溶解度及平衡液相密度测定结果
 Table 1 The determined values of solubility and density of the equilibrium solution in the quaternary system Na⁺, K⁺//Cl⁻, B₄O₇²⁻-H₂O at 273 K

No.	Composition of liquid				Janěcke index				Solid phase	$\rho/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$
	$w(\text{Cl}^-)(\%)$	$w(\text{B}_4\text{O}_7^{2-})(\%)$	$w(\text{K}^+)(\%)$	$w(\text{Na}^+)(\%)$	$J(\text{Cl}_2^-)$	$J(\text{B}_4\text{O}_7^{2-})$	$J(\text{K}_2^+)$	$J(\text{Na}_2^+)$		
1,D	0.00	7.71	4.42	0.29	0.00	100.0	89.99	10.01	kb+nb	1.0745
2	1.62	6.97	4.91	0.22	33.67	66.33	93.08	6.92	kb+nb	1.1086
3	1.74	6.66	4.88	0.22	36.39	63.61	92.81	7.19	kb+nb	1.1079
4	1.80	6.42	4.86	0.20	38.02	61.98	93.36	6.64	kb+nb	1.1066
5	1.88	6.32	4.91	0.20	39.41	60.59	93.68	6.32	kb+nb	1.1050
6	1.90	6.30	4.94	0.19	39.76	60.24	93.94	6.06	kb+nb	1.1024
7	1.94	6.59	5.05	0.23	39.17	60.83	92.70	7.30	kb+nb	1.1082
8	1.99	6.35	5.01	0.21	40.66	59.34	93.22	6.78	kb+nb	1.1068
9	3.25	4.67	5.52	0.24	60.36	39.64	93.23	6.77	kb+nb	1.1065
10	3.63	4.21	5.69	0.24	65.36	34.64	93.21	6.79	kb+nb	1.1056
11,C	10.05	0.78	11.43	0.00	96.57	3.43	100.0	0.00	kb+kc	1.1605
12	20.04	2.66	23.17	0.11	94.28	5.72	99.23	0.77	kb+kc	1.1631
13	19.92	2.82	23.19	0.07	93.91	6.09	99.49	0.51	kb+kc	1.1690
14	20.13	2.96	23.48	0.07	93.69	6.31	99.47	0.53	kb+kc	1.1624
15	20.51	3.01	24.00	0.02	93.70	6.30	99.84	0.16	kb+kc	1.1659
16	20.14	3.03	23.38	0.16	93.56	6.44	98.88	1.12	kb+kc	1.1628
17	20.62	3.12	23.89	0.20	93.54	6.46	98.62	1.38	kb+kc	1.1627
18	20.43	3.29	23.78	0.18	93.14	6.86	98.71	1.29	kb+kc	1.1678
19	20.75	3.56	24.43	0.09	92.73	7.27	99.37	0.63	kb+kc	1.1687
20	20.98	3.60	24.31	0.32	92.72	7.28	97.83	2.17	kb+kc	1.1647
21	19.72	3.89	23.23	0.23	91.73	8.27	98.37	1.63	kb+kc	1.1680
22	23.99	9.01	28.83	1.21	85.35	14.65	93.35	6.65	kb+kc	1.1021
23,E ₂	22.84	10.98	28.01	1.53	81.98	18.02	91.50	8.50	kc+kb+nb	1.1001
24	22.82	10.31	23.74	3.84	82.88	17.12	78.49	21.51	kc+nb	1.1206
25	24.84	8.64	21.58	5.93	86.27	13.73	68.23	31.77	kc+nb	1.1600
26	26.82	4.93	14.49	10.29	92.25	7.75	45.38	54.62	kc+nb	1.1906
27	29.19	1.30	9.48	13.71	98.00	2.00	28.96	71.04	kc+nb	1.2106
28	28.61	1.19	8.46	13.90	98.13	1.87	26.42	73.58	kc+nb	1.2138
29,E ₁	29.15	0.64	5.97	15.55	99.01	0.99	18.47	81.53	kc+nc+nb	1.2207
30,B	15.64	0.00	3.68	7.96	100.0	0.00	21.42	78.58	kc+nc	1.2173
31	29.19	0.06	6.92	14.85	99.91	0.09	21.55	78.45	kc+nc	1.2219
32	29.01	0.06	6.62	14.91	99.90	0.10	20.76	79.24	kc+nc	1.2265
33	29.13	0.06	6.81	14.88	99.90	0.10	21.25	78.75	kc+nc	1.2232
34	28.37	1.35	9.20	13.35	97.87	2.13	28.90	71.10	kc+nc	1.2136
35	28.60	0.92	8.57	13.75	98.55	1.45	26.87	73.13	kc+nc	1.2145
36	29.16	0.64	4.98	16.15	99.01	0.99	15.38	84.62	kc+nc	1.2107
37,A	15.69	0.28	0.00	10.25	99.18	0.82	0.00	100.00	nb+nc	1.1986
38	15.91	0.34	0.93	9.86	99.03	0.97	5.26	94.74	nb+nc	1.2064
39	15.88	0.35	0.97	9.82	99.00	1.00	5.52	94.48	nb+nc	1.2127
40	32.28	0.68	2.00	19.93	99.04	0.96	5.60	94.40	nb+nc	1.2077
41	31.78	0.72	2.12	19.55	98.97	1.03	6.02	93.98	nb+nc	1.2086
42	31.68	0.69	2.19	19.44	99.01	0.99	6.24	93.76	nb+nc	1.2156
43	31.55	0.69	2.23	19.33	99.01	0.99	6.38	93.62	nb+nc	1.2107
44	31.94	0.68	2.34	19.51	99.03	0.97	6.61	93.39	nb+nc	1.2055
45	32.26	0.69	2.63	19.55	99.03	0.97	7.36	92.64	nb+nc	1.2044
46	32.33	0.71	3.68	18.99	99.01	0.99	10.25	89.75	nb+nc	1.2039

nb: Na₂B₄O₇·10H₂O, nc: NaCl, kc: KCl, kb: K₂B₄O₇·4H₂O; unit of J: mol/100mol(Na⁺+K⁺)

A, B, C, and D are the invariant points of the ternary subsystems; E₁ and E₂ are two invariant points of the quaternary system.

的平衡固相盐为KCl+Na₂B₄O₇·10H₂O + K₂B₄O₇·4H₂O, 对应的平衡液相组成为 $w(\text{Cl}^-)=22.84\%$, $w(\text{B}_4\text{O}_7^{2-})=10.98\%$, $w(\text{K}^+)=28.01\%$, $w(\text{Na}^+)=1.53\%$.

2.2 介稳相图和稳定相图的对比

闫树旺等^[14]开展了四元体系Na⁺, K⁺//Cl⁻, B₄O₇²⁻-H₂O 298 K 稳定相图的研究. 对照这两个不同温度、

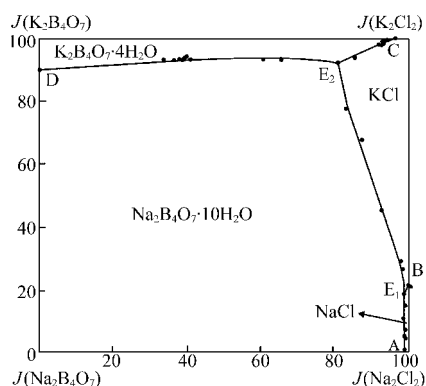


图1 四元体系 $\text{Na}^+, \text{K}^+/\text{Cl}^-, \text{B}_4\text{O}_7^{2-}\cdot\text{H}_2\text{O}$ 273 K 介稳相图
Fig.1 The metastable phase diagram of the quaternary system $\text{Na}^+, \text{K}^+/\text{Cl}^-, \text{B}_4\text{O}_7^{2-}\cdot\text{H}_2\text{O}$ at 273 K

不同平衡状态下的相图发现, 四种原始组分间均没有复盐或固溶体形成; 各盐的结晶形式相同, 即均为无水NaCl、无水KCl、 $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7\cdot 10\text{H}_2\text{O}$ 和 $\text{K}_2\text{B}_4\text{O}_7\cdot 4\text{H}_2\text{O}$ 。但是, 盐的结晶区大小发生了较大变化, 在273 K下, 硼酸钠的结晶区较298 K有明显增大, 而硼酸钾、氯化钠结晶区变小。这种不同温度下盐类结晶区大小间的差异非常有利于盐类的提取分离。

2.3 硼酸盐的结晶形式

硼酸盐在水溶液中的溶解行为非常复杂, 在溶液中极易形成过饱和溶液, 并以不同的形式存在。硼酸根离子在水溶液中的存在形式要受溶液中总硼量、溶液pH值、共存离子种类及浓度等多种因素的影响^[5], 在相图表征中, 通常以其主要存在形式加以统计表示。XRD实验测得, 四硼酸钠盐特征峰所对应的 2θ 值为 3.92° 、 2.67° 、 2.46° 、 2.05° 和 1.94° , 四硼酸钾盐特征峰所对应的 2θ 值为 3.00° 、 2.97° 、 2.86° 、 2.48° 和 2.09° 。结果表明, 273 K下, 钠、钾的硼酸盐结晶主要还是以四硼酸盐形式存在, 平衡固相盐 $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7\cdot 10\text{H}_2\text{O}$ 和 $\text{K}_2\text{B}_4\text{O}_7\cdot 4\text{H}_2\text{O}$ 的完整分子式分别为 $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_5(\text{OH})_4\cdot 8\text{H}_2\text{O}$ 和 $\text{K}_2\text{B}_4\text{O}_5(\text{OH})_4\cdot 2\text{H}_2\text{O}$, 这同对硼酸盐体系288 K介稳相平衡^[7,8,12]及298 K稳定相平衡的研究结果^[10]相一致。

3 结论

1) 采用等温蒸发法研究了273 K下四元体系 $\text{Na}^+, \text{K}^+/\text{Cl}^-, \text{B}_4\text{O}_7^{2-}\cdot\text{H}_2\text{O}$ 的介稳相图。该四元体系属简单共饱和型, 无复盐或固溶体形成。相图含有2个共饱和点、5条单变量线、4个单盐结晶区, 即 $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7\cdot 10\text{H}_2\text{O}$ 、NaCl、KCl 和 $\text{K}_2\text{B}_4\text{O}_7\cdot 4\text{H}_2\text{O}$ 结晶区。共饱和点 E_1 对应的平衡液相组成为 $w(\text{Cl}^-)=29.15\%$, $w(\text{B}_4\text{O}_7^{2-})=0.64\%$, $w(\text{K}^+)=5.97\%$, $w(\text{Na}^+)=15.55\%$; 共饱和点

E_2 对应的平衡液相组成为 $w(\text{Cl}^-)=22.84\%$, $w(\text{B}_4\text{O}_7^{2-})=10.98\%$, $w(\text{K}^+)=28.01\%$, $w(\text{Na}^+)=1.53\%$ 。

2) 该四元体系中 $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7\cdot 10\text{H}_2\text{O}$ 的结晶区最大, 溶解度最小; NaCl的结晶区最小, 溶解度最大; $\text{K}_2\text{B}_4\text{O}_7$ 与 $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$ 相互之间有增溶作用。平衡固相盐 $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7\cdot 10\text{H}_2\text{O}$ 和 $\text{K}_2\text{B}_4\text{O}_7\cdot 4\text{H}_2\text{O}$ 的完整分子式分别是 $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_5(\text{OH})_4\cdot 8\text{H}_2\text{O}$ 和 $\text{K}_2\text{B}_4\text{O}_5(\text{OH})_4\cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 。

3) 与298 K的稳定相图对比, 该四元体系在273 K时盐类的结晶形式没有产生变化, 但盐类的结晶相区大小发生了变化, 硼酸钠的结晶区增大, 而硼酸钾、氯化钠结晶区变小。

References

- Zheng, M. P.; Xiang, J. Saline lakes on the Qinghai-Xizang(Tibet). Beijing: Science and Technology Press, 1989: 34 [郑绵平, 向军. 青藏高原盐湖. 北京: 科学技术出版社, 1989: 34]
- Jin, Z. M.; Xiao, X. Z.; Liang, S. M. *Acta Chim. Sin.*, **1980**, **38**: 313 [金作美, 肖显志, 梁式美. 化学学报, **1980**, **38**: 313]
- Jin, Z. M.; Zhou, H. N.; Wang, L. S. *Chem. J. Chin. Univ.*, **2001**, **22**: 634 [金作美, 周惠南, 王励生. 高等学校化学学报, **2001**, **22**: 634]
- Su, Y. G.; Li, J.; Jiang, C. F. *J. Chem. Ind. Eng.*, **1992**, **42**: 549 [苏裕光, 李军, 江成发. 化工学报, **1992**, **42**: 549]
- Song, P. S. *J. Salt Lake Sci.*, **1998**, **6**(2-3): 17 [宋彭生. 盐湖研究, **1998**, **6**(2-3): 17]
- Gao, S. Y. *J. Salt Lake Sci.*, **1993**, **1**(4): 39 [高世扬. 盐湖研究, **1993**, **1**(4): 39]
- Guo, Z. Z.; Liu, Z. Q.; Chen, J. Q. *Acta Chim. Sin.*, **1991**, **49**: 937 [郭智忠, 刘子琴, 陈敬清. 化学学报, **1991**, **49**: 937]
- Zeng, Y.; Ling, X. F.; Ni, S. J.; Zhang, C. J. *J. Chem. Eng. Data*, **2007**, **52**, 164
- Sang, S. H.; Yin, H. A.; Zeng, Y.; Liu, F. Y. *Acta Chim. Sin.*, **2006**, **64**: 2247 [桑世华, 殷辉安, 曾英, 刘凤英. 化学学报, **2006**, **64**: 2247]
- Zeng, Y.; Sang, S. H.; Ni, Y. Q. *J. Chem. Eng. Data*, **2005**, **50**: 928
- Zheng, M. P. *Acta Geoscientia Sinica*, **2001**, **22**: 97 [郑绵平. 地球学报, **2001**, **22**: 97]
- Sang, S. H.; Yin, H. A.; Ni, S. J.; Zhang, C. J. *Acta Phys. -Chim. Sin.*, **2007**, **23**(8): 1285 [桑世华, 殷辉安, 倪师军, 张成汇. 物理化学学报, **2007**, **23**(8): 1285]
- Institute of Qinghai Salt-Lake, Chinese Academy of Science. Analytical methods of brines and salts. Beijing: Science and Technology Press, 1984: 75 [中科院青海盐湖所. 卤水和盐的分析方法. 北京: 科学技术出版社, 1984: 75]
- Yan, S. W.; Tang, M. L.; Deng, T. L. *Chem. J. Chin. Univ.*, **1994**, **15**: 1396 [闫树旺, 唐明林, 邓天龙. 高等学校化学学报, **1994**, **15**: 1396]
- Felmy, A. R.; Weare, J. H. T. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **1986**, **50**: 2771
- Zeng, Y.; Yang, H. M.; Yin, H. A.; Tang, M. L. *J. Chem. Eng. Data*, **2004**, **49**: 1648