

参赛队员姓名: 李英骥、陆明泽、黄子芮

中学: 长春吉大附中实验学校

省份: 吉林省

国家/地区: 中国

指导教师姓名: 冯守华、李金华

论文题目: 水体积异常收缩现象及微观机理探究

本参赛团队声明所提交的论文是在指导老师指导下进行的研究工作和取得的研究成果。尽本团队所知,除了文中特别加以标注和致谢中所罗列的内容以外,论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果。若有不实之处,本人愿意承担一切相关责任。

参赛队员: _____
李英骥
陆明洋
苗子苗

指导老师: _____
冯祥 李金峰

2018年 9月 12日

水体积异常收缩现象及微观机理探究

李英骥、陆明泽、黄子芮

摘要

本项目旨在研究将可溶固体加入水中, 水溶液体积的变化及其规律, 明确影响水体积的微观因素。通过定性研究三十余种可溶固体对水体积的影响, 发现 NaOH 等极少数物质可以引起水体积收缩。为了研究浓度和温度的影响及其规律, 我们自主设计和制作了适用于研究体积变化的实验装置, 并采用恒温直读法开展了研究。取得了以下结果: 1) 绝大多数可溶性固体加入水中, 水溶液体积变化为 $V_1 < V_1 + V_2 < V_2$; 2) 极少数可溶固体物质 (如 NaOH) 可以引起水体积收缩; 3) 随 NaOH 加入量的增加, 水体积依次出现体积收缩、体积不变和体积增加 3 种现象, 其中, NaOH 的浓度为 2.17 mol/L 时, 体积不变, 浓度为 0.99 mol/L 是, 体积收缩达到最大值 (25 °C); 4) 降低温度有利于水体积收缩, 随温度降低, 体积收缩最大值向高浓度方向移动。我们认为: 除了离子半径的影响, 阳离子与水分子之间的偶极作用和阴离子与水分子之间的强氢键作用共同导致了水体积的异常收缩。

关键词 水溶液, 体积异常收缩, 氢氧化钠, 固体物质, 微观机理

目录

1 引言.....	5
2 实验方法与实验装置.....	6
2.1 实验方法.....	6
2.2 实验装置.....	6
2.3 实验试剂.....	6
3 实验结果与讨论.....	7
3.1 水体积与温度的关系.....	7
3.2 氢氧化钠导致水体积异常收缩现象的发现.....	7
3.3 氢氧化钠导致水体积变化的规律研究.....	8
3.3.1 氢氧化钠加入量与水体积变化的关系.....	8
3.3.2 温度与水体积变化的关系研究.....	9
3.4 氢氧化钠溶液的腐蚀性研究.....	9
3.5 氢氧化钠导致水体积收缩现象的机理探究.....	10
3.5.1 阳离子的影响研究.....	10
3.5.2 阴离子的影响.....	11
3.5.3 氢氧化钠水溶液体积收缩现象的微观机理初探.....	15
4 结论与展望.....	16
4.2 展望.....	17
参考文献.....	18
致谢.....	19

1 引言

水是万物之源, 水和水溶液在生产生活中发挥着不可替代的重要作用。水分子呈 V 型对称 (Fig. 1a), 其键长和键角分别为 0.096 nm 和 104.5°。尽管水分子的结构很简单, 不过从物理、化学的角度看, 水的结构和性质却是相当非常复杂的^[1-4], 比如, 异常高的熔点、沸点以及“异常的” 4 °C 密度最大等。水分子之间可以形成强大、复杂的氢键, 这是液态水物理性质复杂的主要原因。一般地, 每个水分子可以和四个水分子形成氢键 (Fig. 1b)^[5]。水溶解能力很强大, 并且水溶液体系被定义为特殊环境^[1], 其异常现象及微观结构也是科学家们高度关注的研究方向。



Fig. 1 The structures of a) water molecule b) liquid water^[5].

我们知道将 1 体积的酒精和 1 体积的水混合, 总体积小于 2 体积。可溶固体溶于水, 水体积怎么变呢? 常天才认为“NaOH、NaCl 等物质溶于水, 都会导致体积增加”^[6]。马赫观察到氟化钠可以引起水体积的收缩^[7]。《世界中学生》则提到“把少量盐放进一杯水里, 水面会降低”^[8]。此外, 《无机化学》提到“摩尔浓度受温度的影响”^[9], 这些矛盾或不确定的描述进一步激发了我们的好奇心, 经过与指导老师讨论后, 我们决定深入探究可溶固体导致水体积变化的现象和规律。

2 实验方法与实验装置

2.1 实验方法

我们采用恒温直读法分别确定纯水的体积 V_0 和溶液的体积 V_c , $V_c - V_0$ 为体积变化值 ΔV 。当 $\Delta V < 0$, 溶液体积小于水的体积, 即“1+1<1”; 当 $\Delta V = 0$, 溶液体积等于水的体积, 即“1+1=1”; 当 $\Delta V > 0$, 溶液的体积大于水的体积, 即“1+1>1”。对于含结晶水的物质, 我们通过下列方程计算扣除结晶水的体积。结晶水体积 (V_j) 的计算方法: $V_j = m/M \cdot n \cdot 18/\rho$, 其中, m 为溶质的质量, M 为摩尔质量, n 为结晶水数量, ρ 为实验温度下水的密度。

2.2 实验装置

为了确定溶质对水体积的影响, 我们自主设计制作了一套实验装置。它包括: 循环恒温装置 (Fig. 2), 带精密刻度的容量瓶 (Fig. 3) 和防水磁力搅拌器。



Fig. 2 Thermostatic device.



Fig. 3 Volumetric flask with precision scale.

2.3 实验试剂

试剂

去离子水, 试剂均为分析纯。

KOH, NaOH, LiOH·H₂O, NaCl, KCl, LiCl, NH₄Cl, MgCl₂, NiCl₂, ZnCl₂, CuCl₂, MnCl₂·4H₂O, FeCl₃, Na₂CO₃, NaHCO₃, K₂CO₃, (NH₄)₂CO₃, Na₂SO₄, K₂SO₄, (NH₄)₂SO₄, MgSO₄, CuSO₄·5H₂O, ZnSO₄·7H₂O, NaNO₃, KNO₃, Mg(NO₃)₂·6H₂O, Ca(NO₃)₂·4H₂O, Zn(NO₃)₂·6H₂O, NaF, KF·2H₂O, NH₄F, NH₄HF₂, NaBr, K₂Cr₂O₇, H₂SO₄, D₂O 等。

2.4 分析仪器

BRUKER Ascend™600 型核磁共振谱仪; **Renishaw** INVIA 激光拉曼光谱仪。

3 实验结果与讨论

3.1 水体积与温度的关系

为了消除温度变化对容量瓶及水体积的影响, 我们首先考察了体积与温度的关系, 研究结果如 Fig. 4 所示, 各容量瓶都在 4.5 °C 出现了体积最小值。

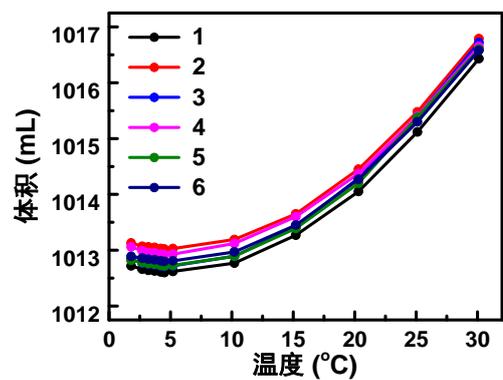


Fig. 4 The water volume at different temperature.

3.2 氢氧化钠导致水体积收缩现象的发现

为了确定合适的研究对象, 我们首先定性地考察了可溶的碱、氯化物、碳酸盐、硫酸盐、硝酸盐以及氟化物等物质溶于水的体积变化, 结果见 Table 1。

Table 1 The volume change related to some typical soluble solids

溶质	化学式	水体积 (mL)	摩尔质量 (g/mol)	密度 (g/cm ³)	溶质质量 (g)	液面变化
氢氧化钠	NaOH	250.00	40.01	2.130	0.397	下降
氢氧化钾	KOH	250.00	56.10	2.044	0.560	上升
氯化钠	NaCl	250.00	58.44	2.165	0.584	上升
氯化钾	KCl	250.00	74.55	1.984	0.748	上升
氯化锂	LiCl	250.00	42.39	2.068	0.426	上升
氯化铵	NH ₄ Cl	250.00	53.49	1.527	0.535	上升
氯化镁	MgCl ₂	250.00	95.21	1.569	2.033	上升
氯化镍	NiCl ₂	250.00	129.60	3.550	1.297	上升
氯化锌	ZnCl ₂	250.00	136.30	2.907	1.364	上升
氯化铜	CuCl ₂	250.00	134.45	2.540	1.344	上升
氯化锰	MnCl ₂ •4H ₂ O	250.00	197.91	2.010	1.980	上升
氯化铁	FeCl ₃	250.00	162.21	2.900	1.626	上升
碳酸钠	Na ₂ CO ₃	250.00	105.99	2.530	4.065	上升
碳酸氢钠	NaHCO ₃	250.00	84.01	2.159	0.840	上升
碳酸钾	K ₂ CO ₃	250.00	138.21	2.428	1.381	上升
碳酸铵	(NH ₄) ₂ CO ₃	250.00	96.08	1.500	0.962	上升
硫酸钠	Na ₂ SO ₄	250.00	142.04	2.680	1.420	上升
硫酸钾	K ₂ SO ₄	250.00	174.24	2.662	1.743	上升

硫酸铵	(NH ₄) ₂ SO ₄	250.00	132.14	1.770	1.321	上升
硫酸锌	ZnSO ₄ •7H ₂ O	250.00	287.55	1.957	2.874	上升
硫酸铜	CuSO ₄ •5H ₂ O	250.00	249.68	2.284	2.500	上升
硫酸镁	MgSO ₄	250.00	120.37	2.660	1.200	上升
硝酸钠	NaNO ₃	250.00	84.99	2.260	0.863	上升
硝酸钾	KNO ₃	250.00	101.10	2.109	1.011	上升
硝酸镁	Mg(NO ₃) ₂ •6H ₂ O	250.00	256.40	1.461	2.565	上升
硝酸钙	Ca(NO ₃) ₂ •4H ₂ O	250.00	164.09	2.504	1.642	上升
硝酸锌	Zn(NO ₃) ₂ •6H ₂ O	250.00	297.51	2.065	2.975	上升
氟化钠	NaF	250.00	41.99	2.558	0.42	下降
氟化钾	KF•2H ₂ O	250.00	94.13	2.480	0.941	上升
氟化铵	NH ₄ F	250.00	37.04	1.009	0.370	上升
氟化氢铵	NH ₄ HF ₂	250.00	57.04	1.500	0.572	上升

很明显,在上述这些固体物质中,只有 NaOH 和 NaF 可以引起水体积收缩。不过,氟化钠在水中的溶解度比较小(4.06 g, 20°C),并且溶解慢,这不利于探究规律。NaOH 溶解度大且溶解速度快。因此,本项目以 NaOH 为模型物质开展了系统的研究。

3.3 氢氧化钠导致水体积变化的规律研究

3.3.1 氢氧化钠加入量与水体积变化的关系

为了研究溶质加入量的影响,我们采用控制变量法研究了氢氧化钠加入量的影响,将容量瓶恒温以消除温度的影响。由 Fig. 5 可以看出,水体积变化呈现出先减小后增加的规律。水体积收缩最大时(-1.74 mL), NaOH 的加入量为 1 mol,水体积恢复至初始体积时, NaOH 的加入量为 2.20 mol,再继续加入 NaOH,溶液体积则大于初始体积。

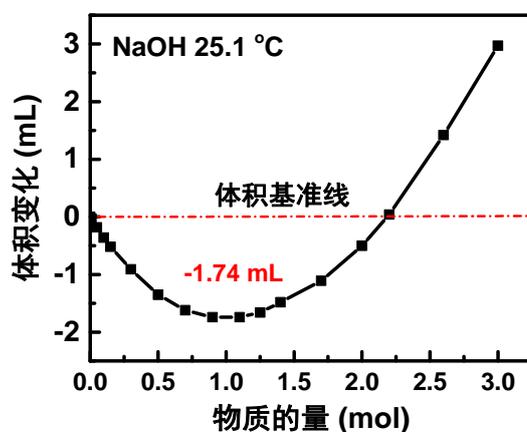


Fig. 5 The volume change related to the amount of NaOH.

3.3.2 温度与水体积变化的关系研究

温度是影响溶液体积的重要因素，那么温度又将如何影响氢氧化钠导致的体积变化？为此，在更低的恒定温度下（1.8°C），我们再次研究了水体积变化与氢氧化钠加入量的关系，如 Fig. 6 所示，加入 1.55 mol 氢氧化钠时，其体积出现最小值，这时体积收缩达到了 5.48 mL；当氢氧化钠加入量达到 3.65 mol 时，溶液体积则回到了零点；继续加入 NaOH，溶液的体积则大于初始体积。为了进一步确定温度对水体积的影响，我们分别研究了纯水和氢氧化钠溶液体积随温度的变化，如 Fig. 7 所示，很明显，纯水在 4.5°C 出现了体积最小值，然而氢氧化钠溶液的体积则随着温度降低而降低，其并未在 4°C 出现体积最小值。根据上述数据，我们得出如下结论：随着 NaOH 加入量的增加，溶液体积均呈现先减小后增大的规律，并且温度越低，体积收缩值越大。

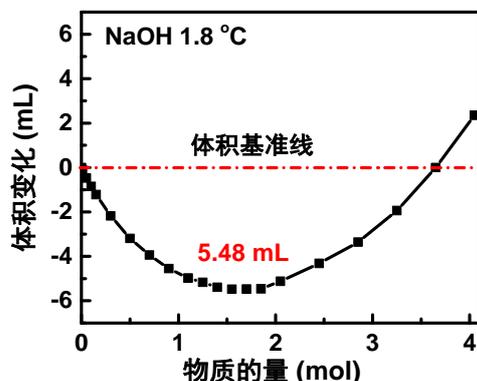


Fig. 6 Volume change with the increase of NaOH.

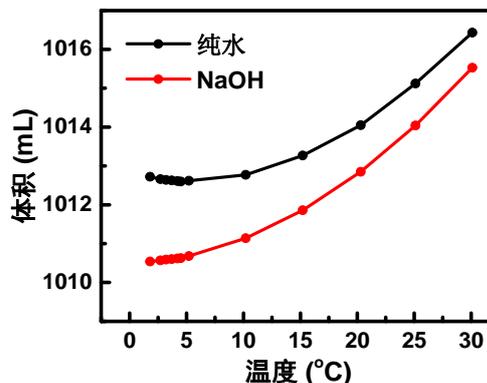


Fig. 7 The volume of water and NaOH at different temperature.

3.4 氢氧化钠溶液的腐蚀性研究

容量瓶的主要成分是 SiO_2 ，而 NaOH 可以与其反应，反应方程如下：



该反应是否会明显发生？我们用 3mol/L NaOH 溶液做了为期 7 天的腐蚀性影响研究。实验结果见 Table 2。这说明在室温 25°C 下，3mol/L 氢氧化钠溶液对玻璃的腐蚀是可以忽略的。

Table 2 The corrosion of NaOH solution (25 °C)

	1#	2#	3#
溶液体积变化 (mL)	0	0	0
容量瓶质量变化 (mg)	-1	-1	-1

3.5 氢氧化钠导致水体积收缩现象的机理探究

我们都学过固体物质的溶解, 也懂得相似相溶原理。其中碱、盐大多是电解质, 可以在水中解离, 形成阴离子和阳离子。阳离子与水分子之间的相互作用较强, 并能够形成水合离子。一般地, 阳离子的半径越小, 所带电荷越多, 极化作用越大, 与水分子的作用越强有利于水体积减小。

对于大多数阴离子, 由于其带有额外的负电荷, 容易被极化变形。不过, 氢氧根离子却有其特殊性——氧的电负性大, 导致其不易被极化, 并且可以与水形成非常强的氢键; 另外, 通过分析氢键的键能数据, 可得出以下结论: 氧原子与推电子基团相连或者带有负电荷, 能够增强氢键的强度。

基于以上认识, 我们提出了假设: 氢氧化钠导致水体积异常收缩的现象是由于氢氧化钠在水中解离后, 阴阳离子与水分子之间的相互作用导致的。那么, 阴阳离子又是如何影响水分子的呢? 为此, 我们进一步设计实验来探究这个问题。

3.5.1 阳离子的影响研究

根据前面的假设, 进一步减小阳离子的半径, 或者提高阳离子所带的电荷, 都可能发现导致水体积减小的新特例。由文献^[11]可知, 水合离子半径的顺序为 $\text{NH}_4^+ > \text{K}^+ > \text{Ca}^{2+} > \text{Na}^+ > \text{Mg}^{2+} > \text{Li}^+$ 。那么可能引起体积收缩的物质还有: LiOH 、 $\text{Mg}(\text{OH})_2$ 、 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 、 LiF 、 MgF_2 和 CaF_2 。不过, 只有 LiOH 可溶于水, 而且锂离子的半径更小、极化能力更大, 因此, 氢氧化锂应该会导致更大的体积收缩。为此, 我们做了对比研究, 研究对象为具有相同阴离子的 KOH , NaOH 和 LiOH 。研究结果如 Fig. 8 所示。

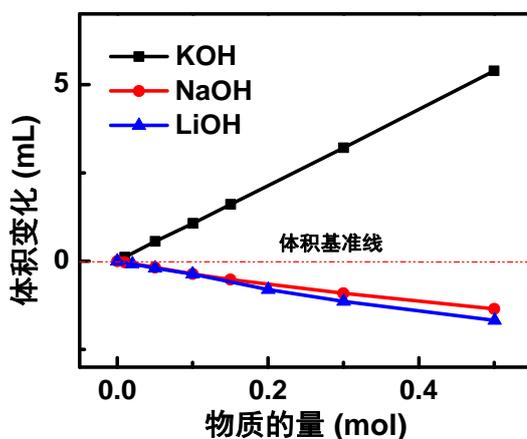


Fig. 8 The volume change related to the amount of LiOH , NaOH and KOH .

当溶质是氢氧化锂、氢氧化钠时, 溶液体积的确发生了收缩; 而溶质是氢氧

化钾时, 溶液体积则出现了增加。这个实验结果验证了我们之前的推断: 氢氧化钾的确可以导致水溶液的体积收缩, 并且收缩量大于氢氧化钠。

3.5.2 阴离子的影响

与阳离子相比, 阴离子与水分子的作用更加复杂^[12], 怎么探究溶液中阴离子和水分子的化学环境呢? Hoffmann 等^[13]认为氢键强度与质子化学位移存在线性关系。为此, 我们用核磁共振技术研究了氘代水以及分别含有 0.5 mol/L 氢氧化钠、氯化钠的氘代水溶液。如 Fig. 9 所示, 与水的 ¹H NMR 谱峰相比, NaOH 溶液的 ¹H NMR 谱峰明显向低场方向偏移, 这表明 OH⁻ 所带氢原子上的电子云密度更低, 这可以增强 OH⁻ 和水分子之间的氢键强度^[13]。此外, 水分子之间以及水分子与 OH⁻ 离子间的氢键键能 (Table 3) 也与 ¹H NMR 谱的结果一致。因此, 我们能够得出如下结论: OH⁻ 离子半径小, 且可以与水分子形成更强的氢键, 这有利于体积收缩。

Table 3 Energy of hydrogen bond^[14]

State of aggregation	Bond energy kcal mol ⁻¹
[HO—H—OH] ⁻	23
[HO—H·····OH ₂]	5.0

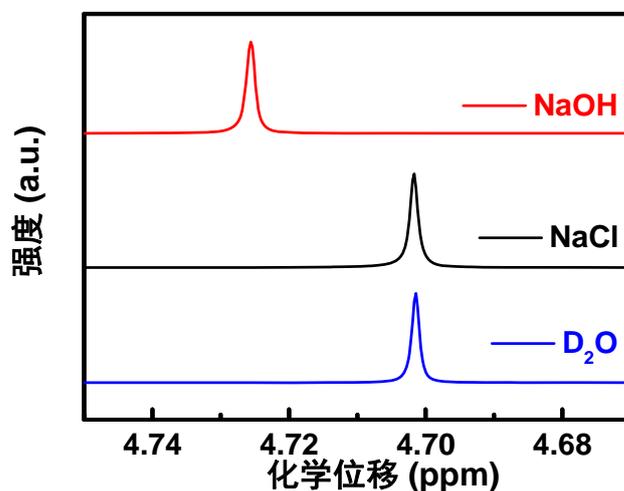


Fig. 9 ¹H NMR spectra of NaOH, NaCl and water in D₂O.

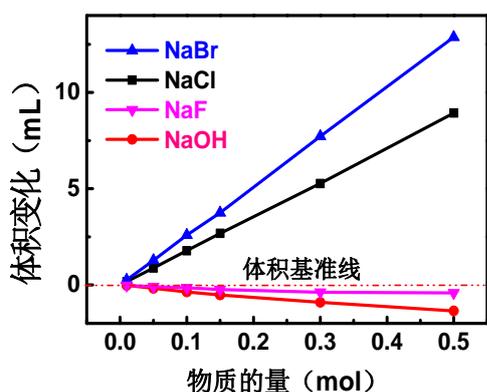


Fig. 10 Volume change to the amount of NaBr, NaCl, NaF and NaOH. (25.1°C)

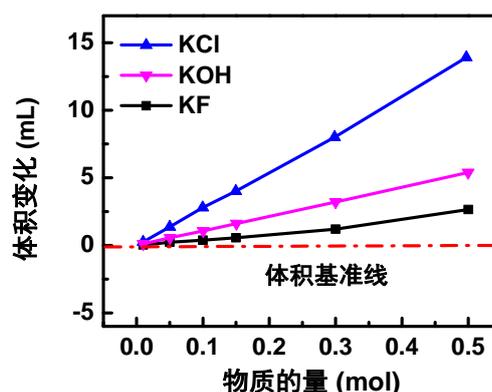


Fig. 11 Volume change to the amount of KCl, KOH and KF (25.1°C)

为了进一步探究阴离子对水溶液体积的影响, 我们研究了 NaOH、NaF、NaCl 和 NaBr 加入量与体积变化的关系。如 Fig. 10 所示, 很明显, 加 NaCl 和 NaBr 导致溶液体积增加, 且半径大的溴离子引起的体积增加值更大。加入 NaOH 和 NaF 则导致体积减小。这是因为 OH⁻和 F⁻离子的半径小, 并且可以和水分子形成强氢键。从实验角度说明形成氢键以及较小的阴离子半径有利于水体积减小。不过电负性更大、离子半径更小的 F⁻离子引起的体积收缩值竟然小于 OH⁻离子导致的体积收缩。我们认为这主要与 NaF 的水解相关, 其可以水解形成少量的 HF 分子, 从而导致其收缩量小于相同量的氢氧化钠。

为了进一步探究阴离子对溶液体积的影响, 我们还研究了氟化钾、氯化钾和氢氧化钾溶液的体积变化, 如 Fig. 11 所示, 很明显, 加入氯化钾导致溶液体积增加的幅度明显大于氟化钾和氢氧化钾, 其中, 氟化钾溶液体积增加最小。这是因为 K⁺离子的碱性大于 Na⁺离子, 降低了 F⁻离子的水解程度, 此时, 氢键的强弱起主要作用。

进一步地, 温度是影响水分子间氢键强度的主要因素之一^[15]。随着温度的升高, 水分子的热运动加剧, 能够部分破坏水分子间的氢键。因此, 与氢键作用直接相关的水分子伸缩振动峰将发生明显的变化, 其振动频率应该向高频方向移动, 而且温度越高, 位移越多^[15]。这一点我们通过变温拉曼光谱进行了研究: 如 Fig. 12 所示, 可以看出, 水分子的伸缩振动峰峰位明显移动了, 30 °C 时 (红线所示), 谱峰中心位于 3450 cm⁻¹, 比 2 °C 时 (黑线所示) 的中心峰位明显向高频区移动了 21 cm⁻¹。这与我们的预期是相符的, 即降低温度会引起水分子间的氢键增强。

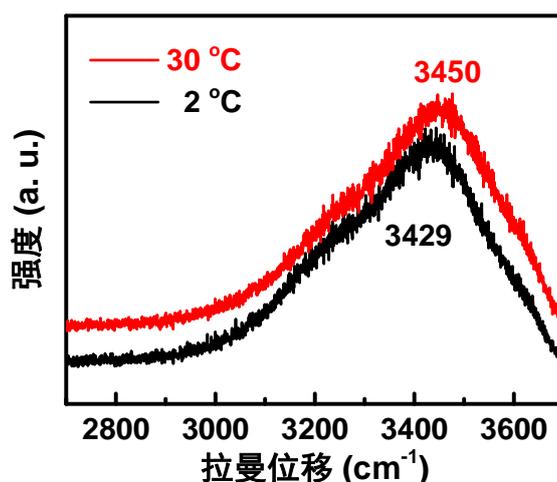


Fig. 12 Raman spectra of NaOH solution at 2 and 30 °C.

基于上述分析, 我们进一步设计了实验, 保持溶液浓度恒定, 通过改变温度, 从实验角度研究阴离子对溶液体积的影响。分别加入 0.3 mol 氢氧化钠, 氯化钠, 氢氧化钾, 氯化钾以及氟化钾, 体积变化见 Table 4。从 Table 4 的数据可以看出, 随着温度升高, 溶液体积均呈现随温度升高而逐渐增加, 这主要是水分子间氢键作用减弱所导致的。

Table 4 The volume change of the solution (0.3M) at different temperature.

温 度	1# NaOH (mL)	2# KOH (mL)	3# NaCl (mL)	4# KCl (mL)	5# KF
30.1	-0.90	3.30	5.08	8.45	2.07
25.1	-1.08	3.18	5.04	8.31	1.82
20.3	-1.20	2.95	5.03	8.16	1.76
15.2	-1.41	2.72	5.01	7.94	1.67
10.2	-1.63	2.49	4.99	7.78	1.53
5.2	-1.94	2.22	4.75	7.61	1.34
4.5	-1.97	2.18	4.73	7.61	1.34
4.2	-1.99	2.17	4.7	7.6	1.32
3.7	-2.03	2.13	4.67	7.57	1.30
3.2	-2.05	2.12	4.65	7.55	1.30
2.7	-2.09	2.09	4.62	7.51	1.24
1.8	-2.18	2.00	4.54	7.44	1.17

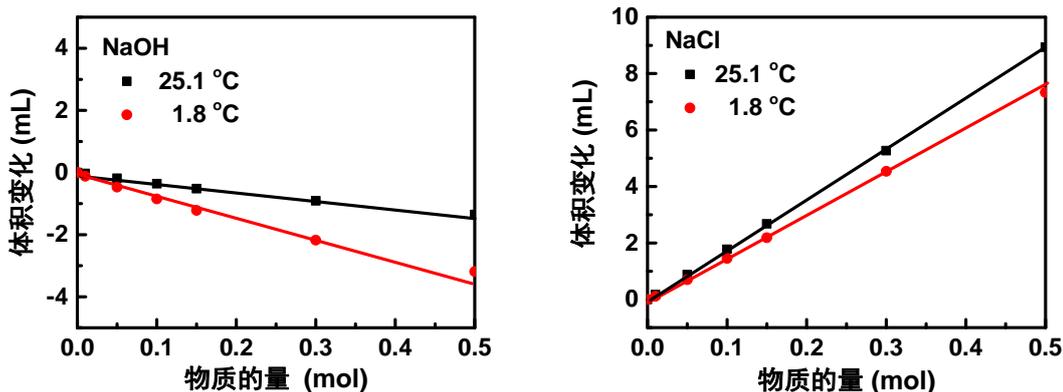


Fig. 13 Volume change to different amount of NaOH and NaCl at 1.8 and 25.1°C.

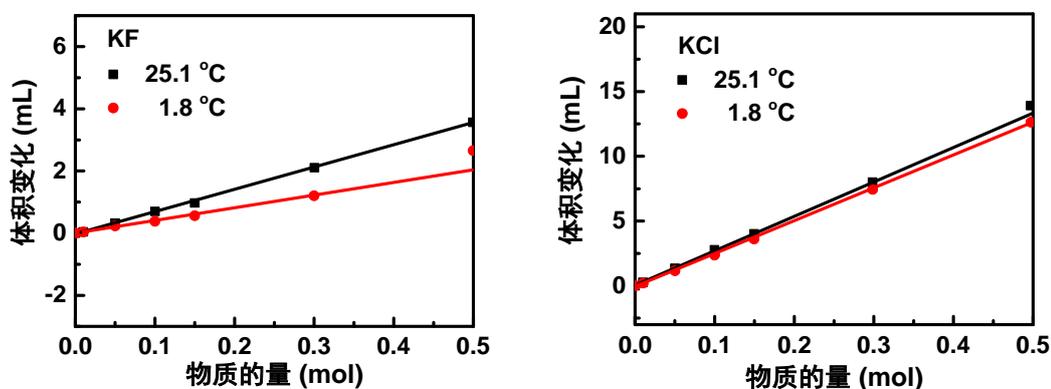


Fig. 14 Volume change to different amount of KF and KCl at 1.8 and 25.1°C.

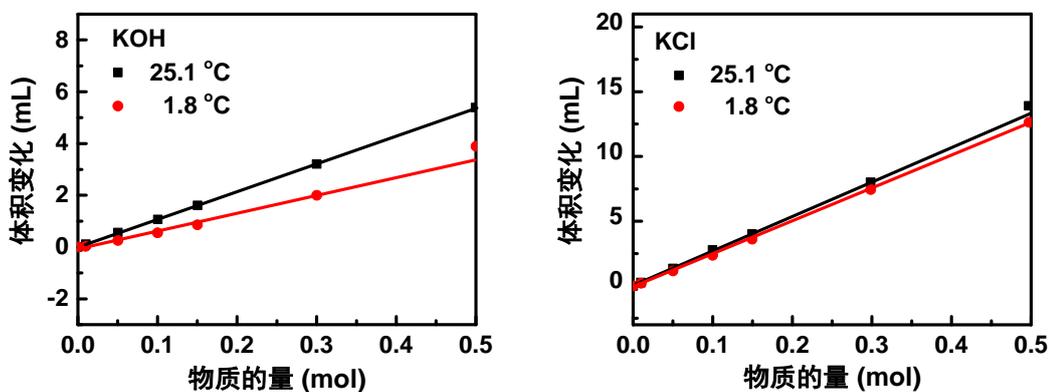


Fig. 15 Volume change to different amount of KOH and KCl at 1.8 and 25.1°C.

在保持阳离子相同的情况下，我们进一步研究了温度对溶液体积的影响。如 Fig. 13、14 及 15 所示，在 25.1°C 和 1.8°C，我们分别比较了 NaOH 和 NaCl、KOH 和 KCl 以及 KF 和 KCl 的摩尔数与体积变化的关系。通过分析所得数据，我们发现：阴离子能与水形成氢键的溶质，其体积变化受温度的影响更大。如：

NaOH 比 NaCl 溶液的体积变化多了 0.54mL, KOH 的体积变化比 KCl 多增加了 0.29mL, KF 比 KCl 多增加了 0.33mL。这些阳离子相同的物质所引起的体积变化, 从实验的角度进一步证明了氢键对溶液体积的影响。

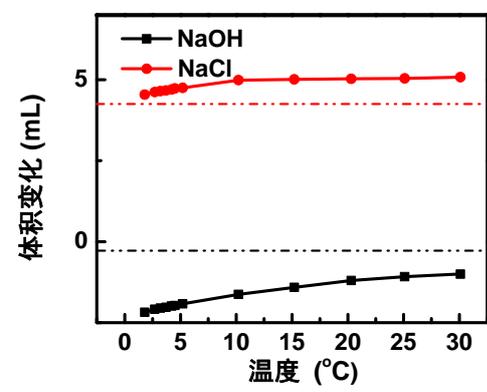
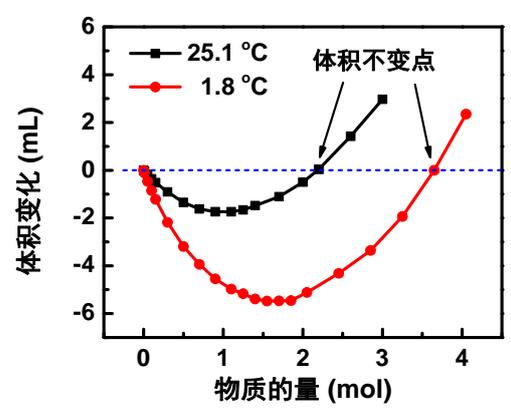


Fig. 16 Volume change and the amount of NaOH Fig. 17 Volume change of NaOH and NaCl at different temperature.

进一步比较 25.1°C 和 1.8°C 下, 氢氧化钠溶液体积变化规律 (Fig.16)。可以看出, 随着温度降低体积不变点和体积收缩最大点均右移, 这也说明在较低温下 OH⁻ 与水分子的作用大于较高温度。另外, 从 Fig. 17, 我们可以看出, 升高温度对氢氧化钠溶液体积变化的影响也大于氯化钠溶液, 与 Cl⁻ 相比, OH⁻ 是一种难以极化的阴离子, 并且能够与水分子发生强氢键作用, 而 Cl⁻ 则易变形且难与水形成氢键。

3.5.3 氢氧化钠水溶液体积收缩现象的微观机理初探

通过以上实验探究, 我们认为 NaOH 引起溶液体积异常收缩现象是阴阳离子共同作用的结果, 而具体的作用过程可以用下述机理图来进行描述。如 Fig. 18 所示, 当 NaOH 溶解后, 会解离成 Na⁺ 和 OH⁻。Na⁺ 离子半径小、极化作用大, 能够与水分子间发生较强的相互作用, 进而结合生成半径较小的水合离子, 有效降低溶液体积。这是因为 Na⁺ 对水分子的极化作用, 增加了水分子的电荷分离程度, 使得氢上的电子云密度降低, 有利于其与其他水分子和 OH⁻ 形成更强的氢键及偶极作用。与此同时, OH⁻ 半径小、不易被极化, 并且其氢原子上的电子云密度更低, 氧上的电子云密度更大, 这可以增大其与水分子间氢键的强度, 从而有利于减小水分子之间的距离。

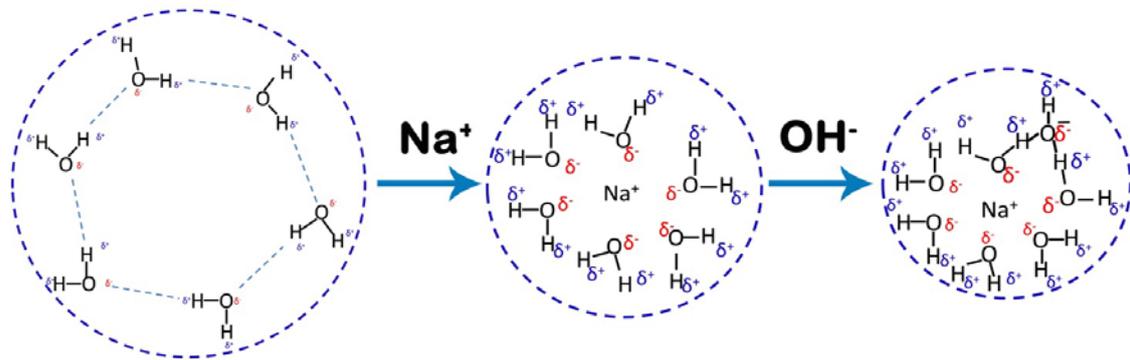


Fig. 18 The scheme for the interaction between Na^+ , OH^- and water.

另外, 基于离子半径小与水分子相互作用较强以及水分子结构中的较大空隙这一认识, 水溶液体积收缩应该有一定的范围, 特别地, 当溶质的解离度下降, 即离子之间结合数量达到一定程度时, 其引起的体积增加大于阴阳离子引起的体积收缩时, 水溶液的体积就大于初始的水体积。因此, 在氢氧化钠体系中, 我们可以观察到 3 种情况, 即体积收缩、体积不变和体积增加。

4 结论与展望

4.1 结论

我们发现了氢氧化钠导致水体积收缩的现象, 得出了氢氧化钠导致水体积变化的规律, 提出了氢氧化钠导致水体积收缩的微观机理, 并通过实验进行了验证。在此基础上, 我们还发现氢氧化锂也可以导致水体积的收缩。我们观察到的体积异常收缩现象, 是微观状态下阴阳离子与水分子间相互作用的宏观体现。

4.2 展望

本项目发现了氢氧化钠水导致水体积异常收缩的现象及规律, 并提出了可能的微观机理。但是, 由于知识水平和实验条件所限, 对于这一异常现象的解释还不够深入。另外, 液态水的结构具有复杂性和易变性, 其真实结构和状态还有待进一步的研究确定, 这也是水和水溶液研究的难点。为此, 我们希望在理论计算的基础上构建模型, 并找到合适的研究方法进行验证, 为解决水和水溶液的结构问题做出贡献。

参考文献

- [1] 邓耿, 尉志武, 《科学通报》, 61, 3181 (2016)
- [2] 林珂等, 《中国科学》: 物理学力学天文学, 5, 057003 (2016)
- [3] 顾健德等, 《中国科学》(B辑) 9, 923 (1995)
- [4] 杨成, 周昕, 《物理学报》, 17, 176501 (2016)
- [5] Smith J. D., et al. Science, 2004, 306: 851-853
- [6] 常天才, 《天中学刊》, 2, 117 (2001)
- [7] 马赫, 全国青少年科技创新大赛 (2004)
- [8] 《世界中学生文摘》, 6, 55 (2004)
- [9] 宋天佑等《无机化学》高等教育出版社 (2015 年第 3 版)
- [10] <https://wenku.baidu.com/view/adb7e22bb4daa58da0114a9d.html>
- [11] Yizhak Marcus, Chemical Review, 88, 1474 (1988)
- [12] 王文华等, 《化学通报》, 6, 491 (2010)
- [13] Markus M. Hoffmann and Mark S. Conradi, J. Am. Chem. Soc., 119, 3811 (1997)
- [14] Thomas Steiner, Angew. Chem. Int. Ed. 41, 48-76 (2002)
- [15] 蔡然等, 《化工环保》, 6, 192 (2010)

致谢

非常感谢吉林大学化学学院的冯守华院士、邹晓新副教授以及吉大附中实验学校的李金华老师对我们的悉心指导！感谢吉林大学化学学院的邹永存老师、王春宇老师、陈刚老师在核磁共振和拉曼光谱测试以及数据分析等方面的帮助！

非常感谢我们的母校和我们的所有老师。老师们教导我们要努力学习、勤于思考、勇于质疑，既要学会发现问题，也能解决问题。

我们更要感谢我们的父母和家人在项目研究过程中的关心与支持！他们不但注重培养我们的观察能力、学习能力、领悟能力以及动手能力，还鼓励我们沿着自己的兴趣深入探究。

队员承担工作及贡献

本项目是我们合作研究完成的, 研究报告所涉及的实验装置及数据采集等都是我们分工合作完成的。具体承担工作如下:

李英骥, 全面负责项目的研究工作。提出了固体物质对水体积影响这一问题及初步的研究思路以及研究体积变化的方法, 包括制作带精密刻度的容量瓶, 防水磁力搅拌器以及读数方法。实验数据的分工采集和分析, 体积收缩机理的讨论以及研究论文的撰写与修改等工作。

陆明泽, 全面参加了项目的研究工作, 包括防水磁力搅拌器的制作, 实验方案的设计和讨论, 具体实验数据的分工采集, 负责撰写浓度对溶液体积变化的影响研究, 参与机理讨论, 并一起修改研究论文。

黄子芮, 参加了项目的全部研究工作及方案讨论, 包括恒温装置的设计制作, 实验方案的讨论, 以及具体实验数据的采集工作, 负责撰写温度对体积变化的影响研究以及研究论文和机理的讨论和修改。

队员简历

李英骥

一、学习经历

2008.9-2014.6	吉林大学附属小学
2014.9-2017.6	吉林大学附属中学慧谷学校
2017.9-至今	长春吉大附中实验学校

二、曾经获得的奖励和发表的论文

优秀学生	多次获得优秀学生称号
全国小学生科技大赛	金奖
第九届全国中学生击剑锦标赛	优秀志愿者
撰写论文(2016年)	《长春水质调查及改进方案再研究》
发表文章(2016年)	《援建山村小学图书馆活动感想—如何有效地做公益》
2018英才计划“我爱化学”夏令营	优秀营员称号
第33届吉林省青少年科技创新大赛	金奖
第33届全国青少年科技创新大赛	铜奖

陆明泽

一、学习经历

2008.9—2014.7	吉林大学附属小学
2014.9—2017.7	吉林大学附属中学
2017.9—至今	长春吉大附中实验学校

二、曾经获得的奖励和发表的论文

国际青少年数学竞赛(中国区)	二等奖
第六届全国小学生科技大赛	二等奖
第七届全国小学生科技大赛	二等奖
全国小学生英语竞赛	优胜奖
全国百万小学生作文大赛	优秀奖
全国汉语作文考级暨现场作文大赛	优秀奖
优秀学生	小学优秀毕业生
第33届吉林省青少年科技创新大赛	金奖
第33届全国青少年科技创新大赛	铜奖

黄子芮

一、学习经历

2008.9-2013.6	长春市一〇八小学
2013.9-2017.6	吉林大学附属中学
2017.9-至今	长春吉大附中实验学校

二、曾经获得奖励

“华翰杯”读写大赛	一等奖
“金蛋格杯”硬笔书写大赛	一等奖
“梦想舞台”金话筒	银奖
“书写经典传承文明”硬笔书法大赛	一等奖
学校年度奖	2008-2009 “灿烂七彩星明星少年”
校三好学生	2009-2010 及 2012-2013 年度
新加坡学习经历	新加坡学习证书
“中国梦”书法奖	银奖
英才计划“我爱化学”夏令营	优异奖
第16届叶圣陶杯全国中学生新作文大赛	二等奖
“鸿宇杯”数学竞赛	三等奖
第33届全国青少年科技创新大赛	铜奖

指导教师简历:

冯守华 院士

1975.08—1978.08 吉林大学化学系无机化学 本科

1980.08—1983.08 吉林大学化学系无机化学 硕士

1984.08—1986.12 吉林大学化学系无机化学 博士

1978.09-1983.08 吉林大学化学系 助教

1983.09-1987.09 吉林大学化学系 讲师

1987.10-1989.07 吉林大学化学系 副教授

1989.08-1992.05 美国新泽西州立大学(Rutgers)化学系 博士后

1992.10-现在 吉林大学化学学院教授

1993-10-现在 吉林大学化学学院 博士生导师

2005 年当选中国科学院院士

李金华 老师

从事科技创新教育 20 余年，专注于青少年科技普及和创新能力培养，致力于中学生科技创新平台建设，率先开展大学生创新思维研究。

中国青少年社会教育“银杏奖”获得者，宋庆龄发明奖专家委员会委员，长春师范大学客座教授，吉林建筑大学创新创业指导教师，华东师范大学科教合作研究中心教师培训项目专家助理，教育部“优课”评审专家，全国“十佳优秀教师”，中国科协青少年科技中心人才培养项目总决赛全国优秀科学教师，全国科普创新教育先进工作者，2004—2018 连续 15 年全国青少年科技创新大赛优秀辅导教师，宋庆龄少年儿童发明“园丁奖”获得者，长春市第五批有突出贡献专家，享受长春市政府特殊津贴人员，吉林省教育厅在 08 年和 14 年两次确认为“吉林省级骨干教师”，吉林省科技教育协会常务理事，吉林省科协代表大会代表。