

[Note]

www.whxb.pku.edu.cn

肌醇在碱金属氯化物溶液中的体积性质

赵 强 邢生凯 张 骞 孙得志*

(聊城大学化学化工学院, 山东 聊城 252059)

摘要: 使用精密数字密度计测定了 298.15 和 308.15 K 肌醇在不同浓度的 LiCl-H₂O、NaCl-H₂O 或 KCl-H₂O 溶液中的密度, 计算了肌醇的表观摩尔体积 V_{Φ} 和极限偏摩尔体积 V_{Φ}^{∞} , 得到了其由纯水溶剂转移至混合溶剂中的迁移偏摩尔体积 $\Delta_{\text{tr}}V_{\Phi}^{\infty}$. 结果表明, LiCl, NaCl 和 KCl 在溶液中对肌醇的体积性质影响显著, 极限偏摩尔体积 V_{Φ}^{∞} 和极限迁移偏摩尔体积 $\Delta_{\text{tr}}V_{\Phi}^{\infty}$ 都随盐浓度的增大而增加; 温度对肌醇的极限偏摩尔体积和极限迁移偏摩尔体积只有轻微影响. 从分子-离子间的相互作用角度对实验结果进行了讨论.

关键词: 极限偏摩尔体积; 肌醇; 碱金属盐

中图分类号: O642

Volumetric Properties of *myo*-Inositol in Aqueous Alkali Metal Chloride Solutions

ZHAO Qiang XING Sheng-Kai ZHANG Qian SUN De-Zhi*

(College of Chemistry and Chemical Engineering, Liaocheng University, Liaocheng 252059, Shandong Province, P. R. China)

Abstract: Apparent molar volumes (V_{Φ}) of *myo*-inositol in aqueous solutions of LiCl, NaCl, and KCl were obtained from densities, measured with a vibrating-tube densimeter, at 298.15 and 308.15 K. These data have been used to deduce limiting partial molar volumes V_{Φ}^{∞} and limiting partial molar volumes of transfer $\Delta_{\text{tr}}V_{\Phi}^{\infty}$ from water to different salt solutions at different concentrations. The results indicated that influence of salt (LiCl, NaCl or KCl) on volumetric property of *myo*-inositol in aqueous solution was evident while temperature could only slightly change V_{Φ}^{∞} and $\Delta_{\text{tr}}V_{\Phi}^{\infty}$. The result was discussed in the light of interaction between the charged centers of *myo*-inositol and ions.

Key Words: Limiting partial molar volume; *myo*-Inositol; Alkali metal salt

肌醇即环己六醇(*myo*-inositol)是生物体内的维生素类物质, 广泛存在于各种天然动植物及微生物组织中^[1,2], 是合成多种药物的中间体, 也是一种用途很广的精细化工产品^[3]. 肌醇能促进细胞新陈代谢, 改善细胞营养, 促进发育; 尤其能促进脂肪代谢、降低血脂, 抑制胆固醇的生成及动脉硬化. 目前肌醇已应用于合成烟酸肌醇酯、脉通、氟化肌醇、肌醇硒酸酯等药物, 用以治疗慢性肝炎、肝硬化、脂肪肝、胆固醇过高、血管硬化及肝癌等^[4]. 由于肌醇在医学、药学领域的重要性, 关于它的研究日益增多^[5-8]. 前一

时期, 我们应用微量热法研究了肌醇在纯水, 卤化钠及其甲酰胺水溶液中相互作用的热力学^[9,10], 本工作是通过测定 298.15 和 308.15 K 肌醇在不同浓度的 LiCl-H₂O, NaCl-H₂O 和 KCl-H₂O 溶液中的极限偏摩尔体积和极限迁移偏摩尔体积来探讨温度和离子半径对肌醇体积性质的影响规律.

1 实验部分

1.1 试剂与溶液配制

LiCl, NaCl 和 KCl(分析纯, 上海化学试剂公司)

Received: November 1, 2007; Revised: February 14, 2008; Published on Web: March 13, 2008.

*Corresponding author. Email: undezhisdz@163.com; Tel: +86635-8230614.

山东省自然科学基金(2004ZX15)资助项目

用二次蒸馏水重结晶提纯两次, 358 K 的温度下真空干燥 8 h 存于真空干燥器中, 肌醇(Aldrich 公司产品, 纯度 $\geq 99\%$); 实验用水为二次重蒸水, 溶液配制采用称重法. 天平(METTLER TOLEDO AG 135 分析天平)的准确度为 ± 0.00001 g.

1.2 密度的测定

溶液密度由 Anton Paar DMA5000 型精密数字密度计(奥地利 Anton Paar 公司)测量. 测量前密度计用二次重蒸水和丙酮反复清洗, 并用干燥空气及二次重蒸水校正(298.15, 308.15 K 水和空气的密度分别取为 0.997051 , 0.994032 $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ^[11], 1.1845×10^{-3} , 1.1460×10^{-3} $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ^[12]), 测量精度为 ± 0.000001 $\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. 密度计自动控温精度为 ± 0.001 K, 所取密度数值为三次重复实验的平均值.

2 结果与讨论

2.1 数据处理

肌醇的表观摩尔体积 V_{ϕ} 根据(1)式^[13]计算:

$$V_{\phi} = M/\rho - 1000(\rho - \rho_0)/(m_i \rho \rho_0) \quad (1)$$

式(1)中, ρ , ρ_0 分别是溶液和溶剂的密度, m_i 是肌醇的质量摩尔浓度, M 是肌醇的摩尔质量. 测得的密度值连同计算所得的表观摩尔体积列于表 1.

从表 1 中数据可见, 在 LiCl, KCl 和 NaCl 三种盐溶液中当盐的浓度一定时, 尽管溶液的密度随肌醇的浓度增加而增大但肌醇的表观摩尔体积与其浓度之间不呈现单调的函数关系, 而是在较小的数值范围内波动. 根据文献[14,15]的阐述, 这时该溶质的表观摩尔体积的平均值就可近似视为其极限偏摩尔体积, 为比较纯水溶剂和盐溶液中肌醇的体积性质, 可用(2)式求得肌醇(从水溶剂向盐溶液)的极限迁移

偏摩尔体积^[13].

$$\Delta_{\text{ts}} V_{\phi}^{\circ} (\text{water to mixed solvent}) = V_{\phi}^{\circ} (\text{in mixed solvent}) - V_{\phi}^{\circ} (\text{in water}) \quad (2)$$

计算所得肌醇的极限偏摩尔体积 V_{ϕ}° 和极限迁移偏摩尔体积 $\Delta_{\text{ts}} V_{\phi}^{\circ}$ 列于表 2.

肌醇的 V_{ϕ}° 和 $\Delta_{\text{ts}} V_{\phi}^{\circ}$ 与所用碱金属氯化物的浓度关系见图 1-3.

由图 1-3 可以看出肌醇的极限偏摩尔体积 V_{ϕ}° 和极限迁移偏摩尔体积 $\Delta_{\text{ts}} V_{\phi}^{\circ}$ 均为正值且随着 LiCl, NaCl 和 KCl 浓度的增大而增大. 根据共球交盖模型^[16,17], 对于水的结构, 非极性基团疏水水化作用起结构形成作用, 对体积有正的贡献. 故当两个非极性基团的溶剂化球发生交盖时, 从溶剂化层中释放出—部分水分子到溶剂中, 整个体系的体积变化为负. 相反, 极性基团的溶剂化层中的水分子体积较溶剂中的水分子要小. 这主要来自两方面的影响: (i) 电致收缩效应; (ii) 溶剂化层中氢键网状结构的破坏. 所以当两个极性基团的溶剂化球发生交盖时, 整个体系的体积变化为正. 当一个极性基团和一个非极性基团的溶剂化球发生交盖时, 整个体系的体积变化为负. 依据上述理论, 可以认为在肌醇、盐和水组成的三元体系中, 离子与肌醇带电中心间的相互作用占了主导地位^[18]. 在电解质溶液中对于不同的阳离子, 由于 Li^+ 、 Na^+ 和 K^+ 带有相同电荷, 电致收缩效应基本一致, 但由于离子半径 $\text{K}^+ > \text{Na}^+ > \text{Li}^+$, 所以对肌醇分子溶剂化层水结构的破坏作用 K^+ 较大 Na^+ 次之 Li^+ 最小. 因此肌醇在混合溶液中的极限偏摩尔体积 V_{ϕ}° 和极限迁移偏摩尔体积 $\Delta_{\text{ts}} V_{\phi}^{\circ}$ 的顺序为 $\text{KCl} > \text{NaCl} > \text{LiCl}$.

从图 1(a)、2(a)、3(a)中可以看出在同一氯化物

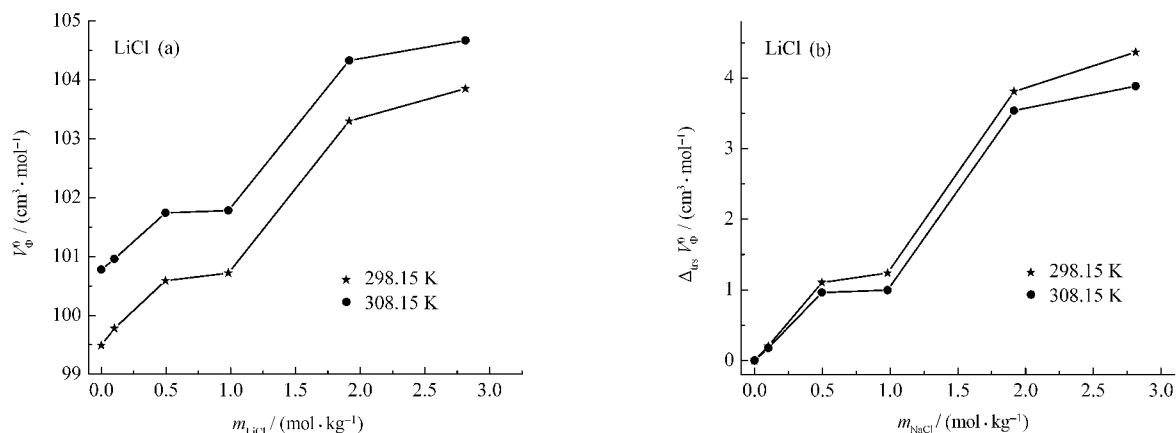


图 1 肌醇在 LiCl 溶液中的极限偏摩尔体积(a)和极限迁移偏摩尔体积(b)

Fig.1 Limiting partial molar volumes V_{ϕ}° (a) and limiting partial molar volumes of transfer $\Delta_{\text{ts}} V_{\phi}^{\circ}$ (b) of myo-inositol in aqueous LiCl solution

溶液中温度升高肌醇的极限偏摩尔体积 V_{Φ}^0 增大, 依照基团贡献的观点, —OH 随着温度的升高对体积

表 1 298.15 和 308.15 K 温度条件下肌醇-盐水溶液的密度(ρ)和肌醇的表现摩尔体积(V_{Φ})
Table 1 Densities (ρ) of *myo*-inositol/salt aqueous solutions and the apparent molar volumes (V_{Φ}) of *myo*-inositol at 298.15 and 308.15 K

| m_i (mol·kg ⁻¹) | 298.15 K | | 308.15 K | | m_i (mol·kg ⁻¹) | 298.15 K | | 308.15 K | |
|---|-------------------------------|---|-------------------------------|---|---|-------------------------------|---|-------------------------------|---|
| | ρ /(g·cm ⁻³) | V_{Φ} /(cm ³ ·mol ⁻¹) | ρ /(g·cm ⁻³) | V_{Φ} /(cm ³ ·mol ⁻¹) | | ρ /(g·cm ⁻³) | V_{Φ} /(cm ³ ·mol ⁻¹) | ρ /(g·cm ⁻³) | V_{Φ} /(cm ³ ·mol ⁻¹) |
| $m_{LiCl}=0.00000 \text{ mol}\cdot\text{kg}^{-1}$ | | | | | $m_{NaCl}=0.96463 \text{ mol}\cdot\text{kg}^{-1}$ | | | | |
| 0.09957 | 1.005227 | 97.1553 | 1.002081 | 98.5314 | 0.09984 | 1.045226 | 97.2595 | 1.041415 | 98.8101 |
| 0.19811 | 1.012444 | 100.9033 | 1.009193 | 102.1814 | 0.19796 | 1.051704 | 103.6558 | 1.047875 | 104.6109 |
| 0.29717 | 1.020699 | 98.2665 | 1.017330 | 99.5318 | 0.29768 | 1.059252 | 102.3366 | 1.055277 | 103.4705 |
| 0.39609 | 1.026986 | 101.5820 | 1.023478 | 102.9289 | 0.39613 | 1.065232 | 104.8398 | 1.061185 | 105.9161 |
| 0.49612 | 1.035192 | 99.5224 | 1.031613 | 100.7495 | 0.49568 | 1.073449 | 101.9591 | 1.069309 | 103.0073 |
| $m_{LiCl}=0.10041 \text{ mol}\cdot\text{kg}^{-1}$ | | | | | $m_{NaCl}=1.85889 \text{ mol}\cdot\text{kg}^{-1}$ | | | | |
| 0.09904 | 1.007259 | 100.4116 | 1.004102 | 102.0137 | 0.09962 | 1.084121 | 95.8001 | 1.079784 | 96.4408 |
| 0.19844 | 1.014733 | 101.5392 | 1.011483 | 102.8554 | 0.19802 | 1.089934 | 105.0460 | 1.085534 | 105.7730 |
| 0.29762 | 1.023075 | 98.4196 | 1.019691 | 99.7611 | 0.29806 | 1.097073 | 104.1598 | 1.092608 | 104.8893 |
| 0.39604 | 1.029878 | 100.2585 | 1.026409 | 101.5144 | 0.39670 | 1.102508 | 106.9581 | 1.097988 | 107.6971 |
| 0.49511 | 1.038323 | 97.8266 | 1.034935 | 98.6660 | 0.49663 | 1.109737 | 105.3546 | 1.105138 | 106.1156 |
| $m_{LiCl}=0.49551 \text{ mol}\cdot\text{kg}^{-1}$ | | | | | $m_{NaCl}=2.69471 \text{ mol}\cdot\text{kg}^{-1}$ | | | | |
| 0.09898 | 1.016864 | 101.2231 | 1.013684 | 102.3879 | 0.09957 | 1.122073 | 91.7870 | 1.117305 | 92.4208 |
| 0.19806 | 1.024438 | 101.2003 | 1.021147 | 102.3790 | 0.19833 | 1.126794 | 106.5328 | 1.122099 | 106.7230 |
| 0.29742 | 1.032434 | 99.3599 | 1.029038 | 100.5132 | 0.29762 | 1.133403 | 106.0117 | 1.128494 | 106.8032 |
| 0.39631 | 1.038949 | 101.6895 | 1.035456 | 102.8350 | 0.39600 | 1.138473 | 108.5352 | 1.133704 | 108.9146 |
| 0.49568 | 1.047160 | 99.4814 | 1.043562 | 100.6148 | 0.49597 | 1.144944 | 107.6512 | 1.139995 | 108.3009 |
| $m_{LiCl}=0.98172 \text{ mol}\cdot\text{kg}^{-1}$ | | | | | $m_{KCl}=0.09982 \text{ mol}\cdot\text{kg}^{-1}$ | | | | |
| 0.09981 | 1.029547 | 100.6827 | 1.026341 | 101.8151 | 0.09997 | 1.009513 | 101.8524 | 1.006315 | 103.0834 |
| 0.19895 | 1.036932 | 101.6913 | 1.033623 | 102.8092 | 0.19831 | 1.017615 | 98.6521 | 1.014301 | 99.8816 |
| 0.29729 | 1.045045 | 98.9931 | 1.041636 | 100.0823 | 0.29739 | 1.025182 | 99.0739 | 1.021762 | 100.2786 |
| 0.39596 | 1.051697 | 100.9085 | 1.048271 | 101.8017 | 0.39651 | 1.031332 | 102.5181 | 1.027820 | 103.6989 |
| 0.49579 | 1.058658 | 101.347 | 1.055075 | 102.3933 | 0.49568 | 1.039737 | 99.7325 | 1.036114 | 100.9062 |
| $m_{LiCl}=1.91490 \text{ mol}\cdot\text{kg}^{-1}$ | | | | | $m_{KCl}=0.49019 \text{ mol}\cdot\text{kg}^{-1}$ | | | | |
| 0.09900 | 1.052467 | 103.8861 | 1.049233 | 104.9179 | 0.09966 | 1.027847 | 100.7547 | 1.024418 | 101.8203 |
| 0.19826 | 1.059213 | 105.9651 | 1.055831 | 107.2434 | 0.19848 | 1.035249 | 101.5598 | 1.031730 | 102.5855 |
| 0.29715 | 1.066939 | 103.0666 | 1.063532 | 104.0242 | 0.29739 | 1.043014 | 100.1851 | 1.039388 | 101.2445 |
| 0.39609 | 1.068543 | 115.6941 | 1.065119 | 116.5637 | 0.39631 | 1.049188 | 103.0387 | 1.045484 | 104.0707 |
| 0.49511 | 1.088856 | 87.8683 | 1.085192 | 88.8757 | 0.49544 | 1.057457 | 100.3936 | 1.053572 | 101.5835 |
| $m_{LiCl}=2.81321 \text{ mol}\cdot\text{kg}^{-1}$ | | | | | $m_{KCl}=0.95927 \text{ mol}\cdot\text{kg}^{-1}$ | | | | |
| 0.09929 | 1.074070 | 101.9989 | 1.070851 | 102.8274 | 0.09924 | 1.050875 | 96.3727 | 1.047368 | 97.1876 |
| 0.19793 | 1.080718 | 104.7946 | 1.077425 | 105.6151 | 0.19844 | 1.057370 | 103.3881 | 1.053705 | 104.6212 |
| 0.29768 | 1.087069 | 106.4051 | 1.083702 | 107.2276 | 0.29735 | 1.064854 | 102.1231 | 1.061002 | 103.5681 |
| 0.39662 | 1.095308 | 102.5102 | 1.091864 | 103.3145 | 0.39624 | 1.070578 | 105.2842 | 1.066654 | 106.5945 |
| 0.49573 | 1.101537 | 103.5557 | 1.098017 | 104.3700 | 0.49513 | 1.078349 | 103.0589 | 1.074468 | 104.0405 |
| $m_{NaCl}=0.10010 \text{ mol}\cdot\text{kg}^{-1}$ | | | | | $m_{KCl}=1.83984 \text{ mol}\cdot\text{kg}^{-1}$ | | | | |
| 0.09904 | 1.008928 | 101.1316 | 1.005715 | 102.4209 | 0.09917 | 1.094992 | 97.3653 | 1.090893 | 97.8198 |
| 0.19844 | 1.016757 | 100.0831 | 1.013431 | 101.3327 | 0.19807 | 1.100815 | 105.6393 | 1.096647 | 106.2859 |
| 0.29762 | 1.024690 | 98.8221 | 1.021246 | 100.0730 | 0.29735 | 1.107519 | 105.5293 | 1.103267 | 106.2643 |
| 0.39604 | 1.031418 | 100.7375 | 1.027885 | 101.9368 | 0.39633 | 1.113489 | 106.7126 | 1.109199 | 107.4033 |
| 0.49511 | 1.039971 | 97.9894 | 1.036317 | 99.1964 | 0.49511 | 1.120182 | 105.8981 | 1.115853 | 106.5535 |
| $m_{NaCl}=0.49150 \text{ mol}\cdot\text{kg}^{-1}$ | | | | | $m_{KCl}=2.65511 \text{ mol}\cdot\text{kg}^{-1}$ | | | | |
| 0.09946 | 1.025036 | 101.4139 | 1.021549 | 102.5304 | 0.09935 | 1.136471 | 107.4061 | 1.132059 | 108.0764 |
| 0.19813 | 1.032595 | 101.1070 | 1.029006 | 102.2155 | 0.19822 | 1.145016 | 98.5926 | 1.140809 | 98.1466 |
| 0.29733 | 1.040230 | 100.3972 | 1.036540 | 101.4966 | 0.29691 | 1.150169 | 104.2378 | 1.145616 | 104.9655 |
| 0.39666 | 1.047178 | 101.3969 | 1.043401 | 102.4688 | 0.39639 | 1.154829 | 107.9058 | 1.150251 | 108.5829 |
| 0.49548 | 1.054648 | 100.6178 | 1.050780 | 101.6738 | 0.49621 | 1.162028 | 105.8035 | 1.157398 | 106.4609 |

表 2 298.15 和 308.15 K 温度条件下肌醇在 LiCl-H₂O, NaCl-H₂O 和 KCl-H₂O 溶液中的极限偏摩尔体积 V_{ϕ}^0 和极限迁移偏摩尔体积 $\Delta_{ts}V_{\phi}^0$

Table 2 Limiting partial molar volumes V_{ϕ}^0 and limiting partial molar volumes of transfer $\Delta_{ts}V_{\phi}^0$ of aqueous solutions of *myo*-inositol in aqueous LiCl-H₂O, NaCl-H₂O, and KCl-H₂O solutions at 298.15 and 308.15 K

| $m_{MCl}/(\text{mol}\cdot\text{kg}^{-1})$ | 298.15 K | | 308.15 K | |
|---|--|---|--|---|
| | $V_{\phi}^0/(\text{cm}^3\cdot\text{mol}^{-1})$ | $\Delta_{ts}V_{\phi}^0/(\text{cm}^3\cdot\text{mol}^{-1})$ | $V_{\phi}^0/(\text{cm}^3\cdot\text{mol}^{-1})$ | $\Delta_{ts}V_{\phi}^0/(\text{cm}^3\cdot\text{mol}^{-1})$ |
| | pure H ₂ O | | | |
| 0 | 99.48589 | 0 | 100.7846 | 0 |
| | LiCl-H ₂ O solution | | | |
| 0.10041 | 99.69111 | 0.20522 | 100.9621 | 0.1775 |
| 0.49551 | 100.5909 | 1.10501 | 101.7460 | 0.9614 |
| 0.98172 | 100.7245 | 1.23861 | 101.7803 | 0.9957 |
| 1.91490 | 103.2960 | 3.81011 | 104.3250 | 3.5404 |
| 2.81321 | 103.8529 | 4.36701 | 104.6709 | 3.8863 |
| | NaCl-H ₂ O solution | | | |
| 0.10010 | 99.75274 | 0.26685 | 100.9919 | 0.2073 |
| 0.49150 | 100.9866 | 1.50071 | 102.0770 | 1.2924 |
| 0.96463 | 102.0102 | 2.52431 | 103.1630 | 2.3784 |
| 1.85889 | 103.4637 | 3.97781 | 104.1832 | 3.3986 |
| 2.69471 | 104.1036 | 4.61771 | 104.6325 | 3.8479 |
| | KCl-H ₂ O solution | | | |
| 0.09982 | 100.3658 | 0.87991 | 101.5698 | 0.7852 |
| 0.49019 | 101.1864 | 1.70051 | 102.2609 | 1.4763 |
| 0.95927 | 102.0454 | 2.55951 | 102.9600 | 2.1754 |
| 1.83984 | 104.2289 | 4.74301 | 104.8654 | 4.0808 |
| 2.65511 | 104.7891 | 5.30321 | 105.2465 | 4.4619 |

有正的贡献^[19,20], 而肌醇每个分子中含有 6 个—OH。此外, 温度的升高能促使极性基团溶剂化层中水分子的有序结构破坏。综合两方面的因素, 肌醇的极限偏摩尔体积 V_{ϕ}^0 值随着温度的升高而变大。

从图 1(b)、2(b)、3(b)中可以看到, 随着温度的升高, 肌醇的极限迁移偏摩尔体积 $\Delta_{ts}V_{\phi}^0$ 反而减小, 这是因为随着温度的升高肌醇在纯水和电解质溶液中的表观摩尔体积都是增加的, 但是在电解质溶液中,

肌醇分子和电解质离子的水化层发生交盖时对整个分子离子相互作用体系的体积变化产生一定的负影响, 这就使得肌醇在电解质溶液中的表观摩尔体积随温度增加的幅度小于在纯水中, 从而导致电解质溶液中极限摩尔体积增加幅度小于纯水中的, 最终使肌醇的极限迁移偏摩尔体积 $\Delta_{ts}V_{\phi}^0$ 随着温度的增加而减小。

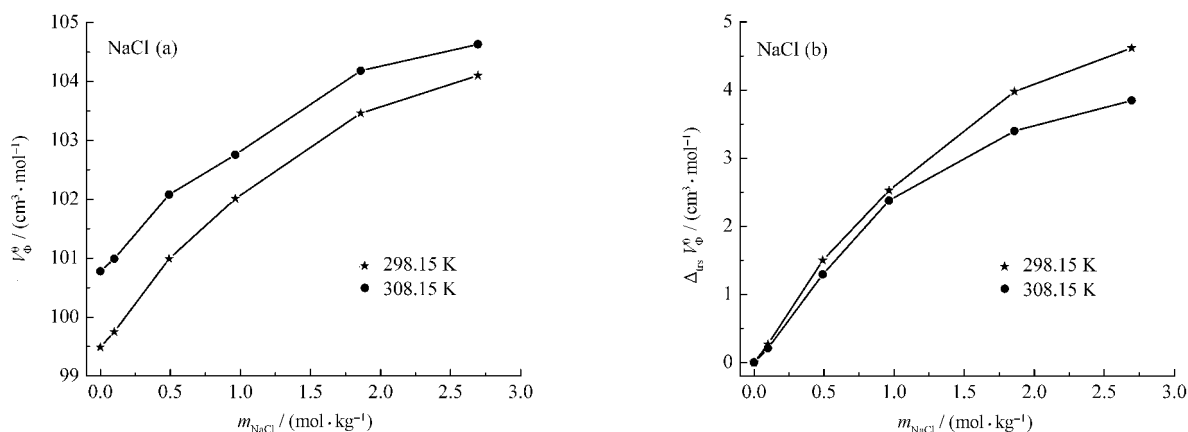


图 2 肌醇在 NaCl 溶液中的极限偏摩尔体积(a)和极限迁移偏摩尔体积(b)

Fig.2 Limiting partial molar volumes V_{ϕ}^0 (a) and limiting partial molar volumes of transfer $\Delta_{ts}V_{\phi}^0$ (b) of *myo*-inositol in aqueous NaCl solution

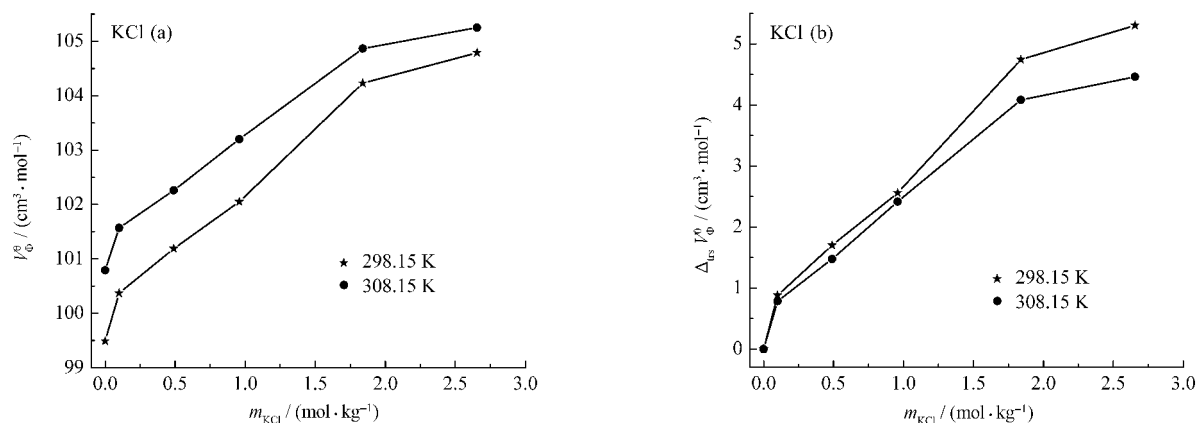


图3 肌醇在 KCl 溶液中的极限偏摩尔体积(a)极限迁移偏摩尔体积(b)

Fig.3 Limiting partial molar volumes V_{∞}^0 (a) and limiting partial molar volumes of transfer $\Delta_{\text{ts}}V_{\infty}^0$ (b) of *myo*-inositol in aqueous KCl solution

3 结论

通过对肌醇在碱金属氯化物溶液中密度的测定及其表观摩尔体积, 极限摩尔体积和迁移摩尔体积的计算, 最终得到肌醇的极限偏摩尔体积 V_{∞}^0 和迁移偏摩尔体积 $\Delta_{\text{ts}}V_{\infty}^0$ 都随 LiCl、KCl 和 NaCl 浓度的增大而增加; 随着温度的升高极限偏摩尔体积 V_{∞}^0 有较小幅度的增大, 但是极限迁移偏摩尔体积 $\Delta_{\text{ts}}V_{\infty}^0$ 却随温度升高有所减小. 从共球交盖模型和基团贡献方面进行讨论, 可知三种碱金属离子对肌醇体积性质的影响随离子半径的增大而加强.

References

- Einicker-Lamas, M.; Nascimento, M. T. C.; Masuda, C. A.; Oliveira, M. M.; Caruso-Neves, C. *Experimental Parasitology*, **2007**, *117*: 171
- Lahjouji, K.; Aouameur, R.; Bissonnette, P.; Coady, M. J.; Bichet, D. G.; Lapointe, E. Y. *Biochimica et Biophysica Acta*, **2007**, *1768*: 1154
- Shi, Q. Z.; Liu, Q. R.; Dong, W. J.; Yang, J. M. *Chinese Journal of Pharmaceuticals*, **2005**, *36*(1): 56 [石起增, 刘巧茹, 董文举, 杨健茂. 中国医药工业杂志, **2005**, *36*(1): 56]
- Plattner, R.; Irvin, B. J.; Guo, S.; Blackum, K.; Kazlauskas, A.; Abraham, R. T.; York, J. D.; Pendergast, A. M. *Nat. Cell Biol.*, **2003**, *5*(4): 309
- Moon, S. C.; Echeverria, G. A.; Punte, G.; Ellenad, J.; Bruno-Blanch, L. E. *Carbohydrate Research*, **2007**, *342*: 1456
- Blodgett, M. B.; Ziemer, S. P.; Brown, B. R.; Niederhauser, T. L.; Woolley, S. M. *J. Chem. Thermodynamics*, **2007**, *39*: 627
- Liu, M.; Sun, D. Z.; Lin, R. S.; Qu, X. K.; Wang, X. *J. Chem. Eng. Data*, **2007**, *52*: 783
- Sun, D. Z.; Zheng, W. Q.; Qu, X. K.; Li, L. *J. Chem. Eng. Data*, **2007**, *52*: 898
- Zheng, W. Q.; Sun, D. Z.; Qu, X. K. *Acta Phys.-Chim. Sin.*, **2006**, *22*(10): 1277 [郑文清, 孙德志, 曲秀葵. 物理化学学报, **2006**, *22*(10): 1277]
- Liu, M.; Sun, D. Z.; Lin, R. S.; Qu, X. K.; Wang, X. *Acta Chim. Sin.*, **2007**, *65*(4): 361 [刘敏, 孙德志, 林瑞森, 曲秀葵, 王旭. 化学学报, **2007**, *65*(4): 361]
- Boca Raton, F. L. *Handbook of chemistry and physics*. 71st ed. CRC Press Inc., 1991
- Boca Raton, F. L. *Handbook of Chemistry and Physics*, 85th ed. CRC Press Inc. 2005
- Xu, L.; Wang, X.; Ma L.; Lin, R. S. *Chemical Journal of Chinese Universitie*, **2006**, *27*(8): 1549 [许莉, 王旭, 马林, 林瑞森. 高等学校化学学报, **2006**, *27*(8): 1549]
- Singh, S. K.; Kishore, N. *J. Sol. Chem.*, **2003**, *32*: 117
- Hakin, A. W.; Kowalchuck, M. G.; Liu, J. L.; Marriott, R. A. *J. Sol. Chem.*, **2000**, *29*: 131
- Hakin, A. W.; Duke, M. M.; Klassen, S. A.; Mckay, R. M.; Press K. E. *Canadian Journal of Chemistry*, **1994**, *72*: 362
- Frank, H. S.; Evans, M. W. *J. Chem. Phys.*, **1945**, *13*: 507
- Hakin, A. W.; Duke, M. M.; Klassen, S. A.; Mckay, R. M.; Preuss, K. E. *Can. J. Chem.*, **1994**, *72*: 362
- Lin, G. M.; Bian, P. F.; Lin, R. S. *Acta Chim. Sin.*, **2006**, *64*(6): 579 [林贵梅, 边平凤, 林瑞森. 化学学报, **2006**, *64*(6): 579]
- Xu, L.; Jin, Y.; Lin, R. S.; Hu, X. G. *Acta Phys.-Chim. Sin.*, **2004**, *20*(1): 55 [许莉, 金钰, 林瑞森, 胡新根. 物理化学学报, **2004**, *20*(1): 55]