

国内外物理化学教材对比研究——电解质溶液

张岩, 曹晓燕, 李一鸣, 夏树伟, 包木太*

中国海洋大学化学化工学院, 山东 青岛 266100

摘要: 溶液是化学学科的核心研究体系之一, 电解质溶液是溶液体系的重要组成部分。本文选取了8本国内外代表性物理化学教材, 以电解质溶液为研究对象, 详细比较了不同教材中该部分的章节设置、内容安排, 并对教材中的习题进行了介绍, 期望为物理化学的教材编写和一线教学提供参考。

关键词: 物理化学; 教材建设; 对比研究; 电解质溶液

中图分类号: G64; O64; N43

Comparison of Electrolyte Solutions Section in Physical Chemistry Textbooks at Home and Abroad

Yan Zhang, Xiaoyan Cao, Yiming Li, Shuwei Xia, Mutai Bao *

College of Chemistry and Chemical Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266100, Shandong Province, China.

Abstract: Electrolyte solution is an important part of the solution system. This paper presents a comparative study of electrolyte solution in eight representative physical chemistry textbooks at home and abroad, and analyzes the contents, chapter settings as well as the exercises of representative textbooks in order to provide reference for textbook construction and domestic teaching.

Key Words: Physical chemistry; Textbook construction; comparison study; Electrolyte solution

教材是传授知识和培养人才的重要载体, 反映了学科发展的最新成果及编者的教学理念。由于历史背景、文化传统、教育体系等方面的不同, 其内容、结构和编排方式往往存在一定的差异。国内外教材的发展研究一直是教材研究的重点。国内许多学者就国内外代表性物理化学教材的重点章节知识体系已开展了比较研究, 并在一线教学及教材编撰中发挥了重要的指导性作用^[1-5]。

溶液是化学学科的核心研究体系之一, 电解质溶液是溶液体系的重要组成部分。由于溶液中离子与溶剂分子以及离子间的相互作用, 导致离子在溶液中的行为比较复杂, 难以用理想模型描述。溶液的热力学特征、离子在溶液中的行为、离子的传输等研究需要涉及热力学、动力学、电化学、统计力学、量子化学等多个三级学科知识, 体现了跨章节知识的融合与综合运用。在实际应用中, 电解质溶液相关知识体系已广泛渗透到能源、环境科学、生命科学及众多新兴交叉学科和领域之中, 为电池电解质设计与优化、工业废水净化、生物神经信号传导等关键技术领域提供了理论支撑。本文聚焦物理化学教材中电解质溶液内容, 对章节编排、知识内容以及习题设置等进行梳理和比较, 以期未来物理化学教材编写及一线教学提供参考。

收稿: 2025-02-08; 录用: 2025-04-22; 网络发表: 2025-06-05

*通讯作者, Email: mtbao@ouc.edu.cn

基金资助: 2023年教育部高等学校化学类专业教学指导委员会教学研究课题(H20230807); 山东省本科教学改革研究重点项目(Z2023195); 中国海洋大学本科教育教学一般项目(2024JY026)

1 章节编排

国内外物理化学教材的编著工作一直在蓬勃发展，因此物理化学教材数目十分庞大，多达两千余部^[1]。国外教材更新比较频繁，截止到2024年，仅Atkins系列已有12版。根据广泛的调研，我们选取了8本被国内外高校广泛使用的物理化学教材开展研究，国内包括南京大学和南开大学2本教材，国外包括Peter Atkins、David W. Ball、Thomas Engel、Ira N. Levine、Andrew Cooskey、Donald A. McQuarrie等6本教材。由于国内外课程知识体系、编排思路存在差异，这给具体电解质溶液章节和内容的划分以及后续的比较带来了一定的困难。这里我们基于《高等学校化学类专业物理化学相关教学内容与教学要求建议(2020版)》(以下称《物化教学建议》)^[6]，并参考了南京大学物理化学教材的知识框架，对电解质溶液内容进行了章节和比例统计(表1)。由于电解质的电离平衡多属于化学平衡部分，这里没有统计。

表1 国内外代表性物理化学教材

序号	书名	作者	年份/版次	所属章节	占比(%)	出版社
1	《物理化学》(南京大学)	傅献彩, 侯文华	2022 (6th)	第8章 电解质溶液	4.5	高等教育出版社
2	《物理化学》(南开大学)	朱志昂, 阮文娟, 郭东升	2023 (7th)	第6章 混合物和溶液 第12章 电化学	3.8	科学出版社
3	<i>Physical Chemistry</i>	Peter Atkins <i>et al.</i>	2023 (12th)	Topic 5 Simple Mixtures Topic 21 Molecules in Motion	1.3	Oxford University Press
4	<i>Physical Chemistry</i>	David W. Ball <i>et al.</i>	2015 (2ed)	Chapter 8 Electrochemistry and Ionic Solutions	1.2	Cengage Learning
5	<i>Physical Chemistry</i>	Thomas Engel <i>et al.</i>	2013 (3rd)	Chapter 10 Electrolyte Solutions/34 Transport Phenomena	1.5	Pearson Education
6	<i>Physical Chemistry</i>	Ira N. Levine	2009 (6th)	Chapter 10 Nonideal Solutions Chapter 15 Transport Process	4.2	McGraw-Hill
7	<i>Physical Chemistry: Thermodynamics, Statistical Mechanics, and Kinetics</i>	Andrew Cooskey	2014	Chapter 11 Solution	0.18	Pearson Education
8	<i>Physical Chemistry: A Molecular Approach</i>	Donald A. McQuarrie <i>et al.</i>	1997	Chapter 25 Solutions II: Solid-Liquid Solutions	0.07	University Science Books

表1显示，电解质溶液在教材中所占的比例普遍较低，最大比例是南京大学的教材，约占4.5%，远低于热力学的占比^[3]。热力学、动力学、结构化学是物理化学的三大支柱，具有不可替代的基础性地位。本科教材侧重基础概念与普适方法，因此，教材通常会优先确保学生掌握这些基础理论，再进入具体应用领域。其次，电解质溶液属于溶液化学的分支，基础教材中通常简化理论的介绍和推导过程，因此电解质溶液在物理化学教材中篇幅占比有限，但这并不削弱电解质溶液研究的科学和实际应用的重要性。

国内外教材对电解质溶液内容的编排方式存在一定的差异。多数教材单独设置为2章或2个主题，将电解质溶液的热力学性质与离子传输过程分开编排。例如，Atkins教材将电解质溶液内容编排在“简单混合物”和“运动中的分子”两个主题中。每个主题下设1–2个专题，分别介绍溶液中离子的活度、溶液的导电能力和离子的电迁移。相似地，Levins教材集中在“非理想溶液”和“运输过程”两章，每章下设多个小结进行介绍。南开大学教材编排在“混合物和液体”和“电化学”两章，共通过7个小节进行介绍。另一种编排方式是突出电解质溶液与电化学之间的密切关系。南京大学教材将电解质溶液单独成章，与电化学热力学、电化学动力学、应用电化学一起编排，强调与后续电化学章节的衔接，突出了电化学作为三级学科的系统性^[5]。Ball的教材中以“电化学和离子溶液”呈现，整体刻画了离子溶液的物理化学行为。Cooskey和McQuarrie版本中侧重电解质溶液热力学性质，以2–3个小节的形式进行编排。

整体来看，国内外教材通常先介绍电解质溶液的热力学性质，随后再深入到更复杂的动态过程。从认知角度来看，学生往往需要先理解溶液的基本概念和理论，再学习更为复杂的电导和离子迁移机制。这种分步骤的学习方法有助于降低学习难度，是模块化教学设计的特点之一。

2 主要教学内容

《物化教学建议》中对电解质溶液的知识体系进行了全面的归纳，共包括38个知识点。以《物化教学建议》为参考，我们整理了国内外教材中的知识点情况(表2)。南京大学教材从法拉第定律出发，逐步引入离子电迁移、电导等内容，最后深入讲解电解质活度理论^[7]。教材在小字部分介绍了德拜-休克尔极限公式推导过程、电离理论、离子缔合理论，兼具深度和广度。南开大学教材中包括电解质理论简介、电解质活度和活度系数、德拜-休克尔极限公式、法拉第定律、电解质溶液的导电能力、离子电迁移及电导的测定和应用等7部分内容^[8]。教材对电解质基础概念和分类(如强电解质、弱电解质、真电解质、潜在电解质)介绍得较为全面。总体来看，国内教材中电解质溶液的知识体系较为全面，知识点差异较小，与《物化教学建议》教学要求较为一致，符合国内教学对基础知识的系统性要求。

表2 国内外教材知识点

知识点	章节序号							
	南大	南开	Atkins	Levins	Ball	Engles	Cooskey	McQuarrie
电解	8.4	6.10		10.5		10.1	11.4	
固体电解质		6.10						
聚电解质								
离子液体								
强电解质	8.4	6.10		10.5		17.9		
弱电解质	8.4	6.10		10.5				
*真电解质	8.5	6.10						
*潜在电解质	8.5	6.10						
离子溶剂化	8.5		16B.2	10.5		10.1		
离子对	8.5							
离子平均质量摩尔浓度	8.4	6.10.2	5F.2	10.5	8.4	10.3	11.4	25.5
离子平均活度	8.4	6.10	5F.2	10.5	8.4	10.3	11.4	25.5
离子平均活度系数	8.4	6.1	5F.4	10.5	8.4	10.3	11.4	25.5

(待续)

(续表2)

知识点	章节序号							
	南大	南开	Atkins	Levins	Ball	Engles	Cooskey	McQuarrie
离子强度	8.4	6.10	5F.4	10.7	8.4	10.3	11.4	25.6
路易斯经验公式	8.4							
德拜-休克尔理论	8.5	6.10	5F.4	10.7	8.5	10.4		25.6
离子氛	8.5	6.10	5F.4			10.4		
德拜-休克尔极限公式	8.5	6.10	5F.4	10.7	8.5	10.4		25.6
不对称离子氛	8.5							
德拜-盎萨格公式	8.5			15.6	8.6			
*德拜-休克尔极限公式推导	8.5	6.10	线上资源					25.6
法拉第定律	8.1	12.2	16B.2	15.6				
法拉第常数	8.1	12.2	16B.2	15.6				
电流效率	8.1	12.2						
电量计	8.1	12.2						
电化学容量								
电导	8.3	12.2	16B.1	15.6	8.6	17.9		
电导率	8.3	12.2	16B.1	15.6	8.6	17.9		
摩尔电导率	8.3	12.2	16B.1	15.6	8.6	17.9		
极限摩尔电导率	8.3	12.2	16B.1	15.6				
离子极限摩尔电导率	8.3	12.2	16B.1	15.6				
科尔劳乌施经验定律	8.3	12.2	16B.1	15.6	8.6	17.9		
离子独立运动定律	8.3	12.2	16B.1	15.6		17.9		
电迁移	8.2	12.2	16B.2					
离子电迁移	8.2	12.2	16B.2	15.6				
迁移数	8.2	12.2		15.6				

*为《物化教学建议》中可取舍内容

国外教材中Atkins和Levins的知识点覆盖最为全面，这里我们以Atkins第12版为例进行介绍(表3)，其他教材知识框架见补充材料附表S1。在Atkins教材中，电解质溶液内容独立于电化学部分。5F.4中以电解质溶液活度理论为核心，介绍平均活度系数、德拜-休克尔极限定律、扩展的德拜-休克尔定律、戴维斯公式^[9]，强调了在高浓度离子溶液中的应用。专题16B“液体中的运动”中，从实验的角度介绍溶液电导。从离子所受电场力与黏滞阻力平衡的角度出发，推导了漂移速率和离子电迁移率的表达式，与国内教材离子电迁移率概念的引出方式有所不同，物理意义明确，便于学生理解，值得借鉴。同时，教材还增添了斯托克斯定律、格罗特斯机理、爱因斯坦关系式、能斯特-爱因斯坦关系式等内容，进一步扩展了学生对迁移率与电导率、离子扩散系数与极限摩尔电导率之间关系的认识和理解。教材中未包含电解质分类、路易斯经验公式、不对称离子氛、电流效率、电量计、迁移数，弱化了法拉第定律的介绍和计算。Atkins教材注重数理模型的运用，离子电迁移部分的核心知识点和公式要求高于《物化教学建议》，适合自学和高阶学习。

Ball的教材将电化学原理与电解质溶液的特性相结合，强调了热力学在电化学系统中的应用。教材基于库伦定律引入电功、能量、电势、电压、平衡常数等热力学和电化学核心概念。在电化学框架下，引入了溶液离子活度、德拜-休克尔理论。基于电场力和黏滞阻力的平衡，介绍了离子电迁移率和溶液电导^[10]。电解质溶液部分核心公式涉及离子平均质量摩尔浓度、离子平均活度、离子平

均活度系数、德拜-休克尔极限公式、扩展的德拜-休克尔定律、(德拜-休克尔-)昂萨格公式, 未介绍离子独立运动定律等知识点。

表3 Atkins (12版)对应知识框架及教学内容

章节题目	概念清单
专题5F活度	1. 活度是保持化学势表达形式的有效浓度
5F.1 溶剂活度	2. 理想稀释溶液中溶质的化学势是根据亨利定律定义的。溶质的活度考虑了偏离亨利定律的行为
5F.2 溶质活度	3. 马居尔公式模型将正规溶液模型中各组成部分的活度与其组成相关联。这些公式给出了正规溶液中各组分蒸汽压的表达式
(a) 理想稀释溶液	
(b) 真实溶液	4. 平均活度系数将离子溶液对理想性的偏离等量地分配给阳离子和阴离子
(c) 以摩尔浓度表示的活度	5. 离子氛是溶液中某离子周围存在的反离子的长时间平均累积
5F.3 正规溶液的活度	6. 德拜-休克尔理论对理想性的偏离归因于离子与其周围离子氛的库仑相互作用
5F.4 离子的活度	7. 德拜-休克尔极限定律可通过进一步引入两个经验常数而加以扩展
(a) 平均活度系数	
(b) 德拜-休克尔极限定律	
(c) 极限定律的扩展	
专题16B 液体中的运动	1. 液体的黏度随温度的升高而降低
16B.1 实验结果	2. 科尔劳施定律指出, 在低浓度时强电解质的摩尔电导率随浓度的平方根变化
(a) 液体黏度	3. 离子独立移动定律指出, 在零浓度极限下, 摩尔电导率是各个单独离子的贡献之和
(b) 电解质溶液	4. 当由电场力引起的加速被黏滞阻力平衡时, 离子达到漂移速率
16B.2 离子迁移率	5. 一个离子的流体动力学半径可大于其离子半径
(a) 漂移速率	6. 质子在水中的高迁移率可由格罗特斯机理来解释
(b) 迁移率和电导率	7. 离子的迁移率可与极限摩尔电导率相关联, 并且通过爱因斯坦关系式, 与扩散系数相关联
(c) Einstein关系式	

Engles教材采用热力学与微观模型结合的内容设计。第10章始于离子形成的热力学参数, 从热力学角度表征电解质溶液的性质, 建立宏观能量变化的框架, 再过渡到活度与活度系数, 最后引入德拜-休克尔理论和化学平衡^[10,11]。整体思路符合“宏观-微观-应用”的教学逻辑。在17章“运输现象”中以强电解质溶液为中心, 介绍科尔劳施经验定律、离子独立运动定律、弛豫效应、电泳。以弱电解质溶液为中心, 介绍奥斯特瓦尔德稀释定律。

Cooskey教材先介绍溶液统计力学和热力学, 以极短的篇幅简单介绍了离子溶液, 核心知识点包括离子平均质量摩尔浓度、离子平均活度、离子平均活度系数^[12], 未介绍德拜-休克尔理论等核心基础理论, 反映了编者不同的理念。

McQuarrie教材介绍了电解质溶液的平均活度、德拜-休克尔理论和高离子浓度下德拜-休克尔理论的扩展, 并给出了平均球面近似法详细的数学推导过程^[13]。与Cooskey教材相似, McQuarrie教材中离子电迁移和电导等内容存在缺失。教材中章节标题具有特色, 如“电解质溶液在相对低浓度时是非理想的”“德拜-休克尔理论给出了稀溶液中 $\ln\gamma_{\pm}$ 的精确表达式”。小节标题用一句话来概括或突出该节内容的核心, “结论先行”的设置直观明确, 有助于读者快速抓住重点。

基于上述分析, 在知识体系的构建上, 国内高校教材基本能够覆盖《物化教学建议》对电解质溶液的知识体系要求。相比之下, 国外教材编排方式比较灵活, 均涵盖了电解质溶液活度理论等核心基础内容, 但在是否包含电导及电迁移等相关部分上, 各教材之间存在显著差异。其中, Atkins教材在离子电迁移部分实现了内容的深化与扩展。

由于音译差异、直译与意译的不同选择、翻译习惯等问题,教材中存在一些术语不一致的现象。例如,南开大学教材中“德拜-休克尔理论”是音译加直译,《物化教学建议》中“离子互吸理论”是意译,南京大学教材中表达为“Debye-Hückel离子互吸理论”。此外,“Kohlrausch”在《物化教学建议》和南开大学教材音译为“科尔劳乌施”,南京大学直接用英文Kohlrausch,侯文华等在Atkins第11版中翻译为“科尔劳施”。因此,物理化学教材中还需要进一步依据国标对专业用语进行规范,以减少因译名差异导致的学习混淆。

3 习题设置

习题是知识内化的核心枢纽,也是贯通理论认知与实践创新的关键桥梁。Atkins的教材在习题方面表现出色,设置了讨论题、练习题、问题和综合题。讨论题主要考查对概念或理论的理解,如“描述电解质溶液的德拜-休克尔理论的一般特征”。练习题形式是计算题,侧重考查某个知识点的掌握,如计算某两个混合溶液中某物质离子的平均活度系数。问题是多个知识的整合,例如给出25 °C时不同浓度NaCl水溶液的平均活度系数的几组数据,确认它们支持德拜-休克尔极限定律,以及利用戴维斯公式可以得到改进的拟合。每个主题后会设置综合题,锻炼学生运用多个理论解决复杂现象的能力。例如“在含有带电荷蛋白质的溶液中加入少量无机盐,如(NH₄)₂SO₄,会增加蛋白质在水中的溶解度。这种现象被称为盐溶效应。然而,加入大量无机盐会降低蛋白质的溶解度,以至于蛋白质从溶液中沉淀出来,这种现象被称为盐析效应,被生物化学家广泛用于分离和纯化蛋白质。考虑 $PV_v(s) \rightleftharpoons P^{v+}(aq) + vX^{-}(aq)$ 的平衡,其中P^{v+}是带电荷为v⁺的一种聚阳离子蛋白质,X⁻是它的反离子。利用勒夏特列原理和德拜-休克尔理论背后的物理原理,从分子角度解释盐溶和盐析效应”。题目展现了抽象理论在生物化学现象中的具体应用,要求学生结合蛋白质的化学性质、化学平衡原理、电解质溶液理论等多方面的知识进行分析,体现了对综合知识运用能力的考察。

4 结语

综合分析,国内和国外教材对电解质溶液部分的编写主要表现以下几个特点:在编写形式方面,电解质溶液作为溶液化学的子系统,在多数教材中未独立设章,通常被分散于“溶液”与“输运现象”章节。南京大学与Ball的教材中该部分独立成章,强化其与电化学章节的逻辑衔接。在内容方面,国内外教材内容多以经典理论为主。国内教材知识覆盖面较广,系统性强,遵循《物化教学建议》的教学要求,整体同质化程度较高。国外教材在内容选择上均包括电解质溶液活度理论,但在电导和离子电迁移部分差异较大。Atkins的多层次习题编排有助于提升知识的综合运用能力。

补充材料: 可通过链接 <https://www.dhx.pku.edu.cn> 免费下载。

参 考 文 献

- [1] 张树永, 侯文华, 刘俊吉, 王新平, 万坚, 原弘, 孙宏伟, 姚加, 王志勇, 纪敏, 郭玉鹏. *大学化学*, 2023, 38 (6), 115.
- [2] 侯文华, 张树永. *大学化学*, 2023, 38 (6), 124.
- [3] 姚加. *大学化学*, 2023, 38 (6), 146.
- [4] 原弘, 尹林林, 欧阳述昕, 李武客. *大学化学*, 2023, 38 (6), 134.
- [5] 王志勇, 张树永. *大学化学*, 2023, 38 (6), 142.
- [6] 张树永, 李金林, 范楼珍, 侯文华, 刁国旺, 郭玉鹏. *大学化学*, 2021, 36 (1), 22009052.
- [7] 傅献彩, 侯文华. *物理化学*. 第6版. 北京: 高等教育出版社, 2022.
- [8] 朱志昂, 阮文娟, 郭东升. *物理化学*. 第7版. 北京: 科学出版社, 2017.
- [9] Atkins, P.; Paula, J. D.; Keeler, J. *Physical Chemistry*, 12th ed.; Oxford University Press: London, UK, 2023.

- [10] Ball, D. W.; Baer, T. *Physical Chemistry*, 2nd ed.; Cengage Learning: Stamford, CT, USA, 2015.
- [11] Engels, T.; Reid, P.; Hehre, W. *Physical Chemistry*, 3rd ed.; Pearson Education: Upper Saddle River, NJ, USA, 2013.
- [12] Cooskey, A. *Physical Chemistry: Thermodynamics, Statistical Mechanics, and Kinetics*; Pearson Education: Upper Saddle River, NJ, USA, 2014.
- [13] McQuarrie, D. A.; Simon, J. D. *Physical Chemistry: A Molecular Approach*; University Science Books: Sausalito, CA, USA, 1997.