

## 物理化学实验“三组分液-液相图的测绘”内容编写及讲授建议

陈玉静, 欧阳红群, 赵丹, 褚燕燕, 乔正平\*

中山大学材料科学与工程学院, 广州 510006

**摘要:** “三组分液-液相图的测绘”是经典的物理化学实验项目, 掌握这一实验内容对于学生理解工业领域广泛应用的三角形坐标系以及萃取原理至关重要。本论文针对学生理论知识储备不足及其对实验的理解停留在表面的现象, 深入探讨实验教学内容的编排与建议。通过在实验教学内容中增加对三角形坐标系下相图读图方法的详细介绍, 阐述组分含量与物系点在坐标轴上的平行线段长度之间的关系, 帮助学生更直观地理解混合过程中物系点的移动规律和杠杆规则。通过阐明教学内容中三角坐标系、溶液混合时物系点移动规律和联结线各物系点相互关系三者之间的讲授逻辑与细节, 助力教师提升教学效率, 使学生获得对三组分液-液相图清晰而深刻的认识。

**关键词:** 物理化学实验; 相图; 三组分液-液体系; 杠杆规则

**中图分类号:** G64; O6

## Recommendations for the Content and Instruction of the Physical Chemistry Experiment “Construction of Ternary Liquid-Liquid Phase Diagrams”

Yujing Chen, Hongqun Ouyang, Dan Zhao, Yanyan Chu, Zhengping Qiao \*

School of Materials Science and Engineering, Sun-Yat Sen University, Guangzhou 510006, China.

**Abstract:** The “Ternary Liquid-Liquid Phase Diagram” is a fundamental experiment in physical chemistry. Mastery of this experiment is essential for students to comprehend the triangular coordinate system and the extraction principle, both of which are widely applied in industrial practices. This paper presents recommendations for improving the content and teaching approach of this experiment, addressing students' lack of theoretical knowledge and superficial understanding of the experimental process. It proposes integrating a detailed explanation of phase diagram interpretation into the curriculum, emphasizing the relationship between component concentrations and the lengths of parallel line segments on the coordinate axes. This helps students better grasp the movement patterns of system points and the lever rule during the mixing process. Furthermore, the paper clarifies the teaching logic and connections between the ternary phase diagram, the movement of system points on the coordinate axes, and the relationships between component points on tie lines. These suggestions aim to enhance teaching efficiency and facilitate students' deep understanding of the ternary liquid-liquid phase diagram.

**Key Words:** Physical chemistry experiment; Phase diagram; Ternary liquid-liquid system; Lever rule

物理化学实验不仅是化学类和药学类专业的必修课程, 也是材料和化工等工科专业的基础课程, 具有较大的受众面和影响力。当前的教学研究不仅聚焦于课程思政、双一流建设等与时代发展紧密相连的课题, 还涵盖了翻转课堂、虚拟仿真技术、线上线下混合式教学等创新教学方法, 也探讨实

收稿: 2024-09-27; 录用: 2024-11-11; 网络发表: 2025-02-24

\*通讯作者, Email: cesqzp@mail.sysu.edu.cn

基金资助: 广东省质量工程项目(粤教高函[2021] 29号)

验装置的设计革新和新实验项目的引入。尽管如此，传统经典实验项目以其高可靠性、合理的教学安排，以及理论与实践的紧密结合，依然占据着各大高校物理化学实验教学的核心位置<sup>[1]</sup>。其中，“三组分液-液相图测绘”实验仅依靠玻璃仪器便可开展，是经典的物理化学实验项目。通过实验训练，学生不仅可以加强对“三角形坐标系下的相图”这一物理化学理论课内容的学习，还可以加深对有机化学实验常用萃取技术的理解，所以其教学研究具有一定的价值。文献关于这类实验的教学研究内容包含早期的数据积累<sup>[2]</sup>以及近年来新体系的引入<sup>[3-5]</sup>和新测试手段的应用<sup>[6]</sup>。本论文在对实验内容进行深入整理的基础上，旨在温故知新，汇集了丰富的教学资源，适用于所有开设此实验项目的高校，供一线教师直接应用。接下来，本文将分别介绍改进后的教学内容、建议的教学逻辑以及课上课下的数据处理方法。

## 1 主要教学内容

### (1) 读图方法。

根据相律 $F = C - P + 2$ ，当相数 $P$ 最少( $P_{\min} = 1$ )时自由度 $F$ (即独立变量)最大。对于三组分体系 $C = 3$ ， $F_{\max} = 4$ ，其中两个独立变量是温度和压力。各组分的重量百分比这3个参数 $w_A$ 、 $w_B$ 、 $w_C$ 中，因为 $w_A + w_B + w_C = 1$ ，所以其中2个 $w$ 是 $F_{\max}$ 的另2个独立变量。当固定温度和压力时， $F_{\max}$ 中剩2个独立变量，可以采用平面直角坐标绘制相图，用水平轴和垂直轴分别表示一个组分的含量，第三个组分的含量只能根据 $w_A + w_B + w_C = 1$ 推算，这妨碍了三组分的等价呈现。为了在二维平面上同时呈现三个组分含量的影响，吉布斯等建议了三角形图示法(等边三角形或直角三角形，本文以前者为例，如图1所示)。

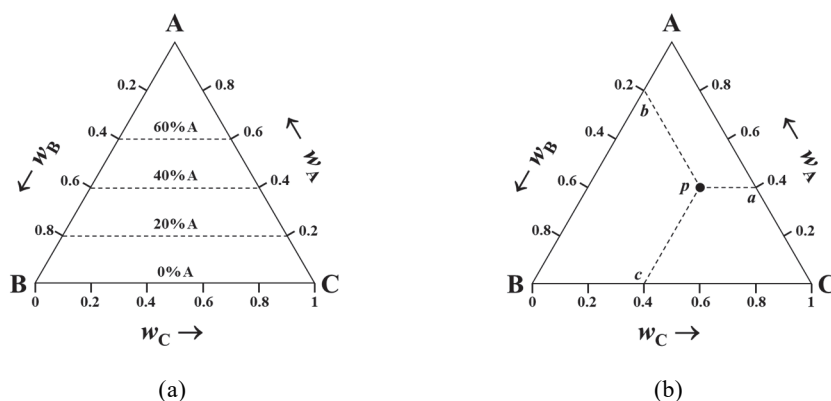


图1 三组分系统组成的图示法：三角形坐标图

由图1(a)可见，越靠近顶点，该组分含量越高；同一条直线上的体系，顶点组分(A)含量相同。由图1(b)可见，任意一个物系点 $p$ 的坐标是 $a$ 、 $b$ 、 $c$ 在坐标轴上的数值。

### (2) 系统混合时物系点的移动规律及杠杆规则。

系统混合时物系点的移动规律见图2。

利用图1(b)的结论可知图2(a)中“ $Bp_0$ 长度代表 $w_C$ ”，则 $p$ 、 $p'$ 、 $p''$ 、 $p_0$ 都具有相同的C含量，且 $cp$ 的长度可代表 $p$ 体系的C含量。拓展到与坐标轴CA( $w_A$ )、AB( $w_B$ )、BC( $w_C$ )平行线段 $ap$ 、 $bp$ 、 $cp$ 的长度可代表 $p$ 体系中各组分含量。

利用图2(a)的结论可知图2(b)中 $Bp_0$ 、 $c_1p_1$ 、 $c_2p_2$ 线段的长度分别代表 $w_{C0}$ 、 $w_{C1}$ 、 $w_{C2}$ ， $b_0p_0$ 、 $b_1p_1$ 、 $b_2p_2$ 线段的长度分别代表 $w_{B0}$ 、 $w_{B1}$ 、 $w_{B2}$ 。根据相似三角形的关系， $w_{C0} : w_{C1} : w_{C2} = w_{B0} : w_{B1} : w_{B2}$ ，即 $w_{C0} : w_{B0} = w_{C1} : w_{B1} = w_{C2} : w_{B2}$ ， $p_0$ 、 $p_1$ 、 $p_2$ 中B、C含量的比例相同。因此，(1) 通过顶点的直线上的系统，其顶点之外的另两个组分含量的比例相同；(2) 当向含有B、C体系中滴加A时，由于未加

B和C, 即 $w_B:w_C$ 始终未变, 只是A含量不断增高; (3) 从 $p_0$ 开始, 滴加A的过程对应着物系点沿着 $p_0$ 、 $p_1$ 、 $p_2$ 向A点移动的过程, 越靠近A, A的含量越高; (4)  $p_0$ 、 $p_1$ 或 $p_2$ 系统与纯A混合, 混合后的物系点必位于 $Ap_0$ 、 $Ap_1$ 或 $Ap_2$ 线上。

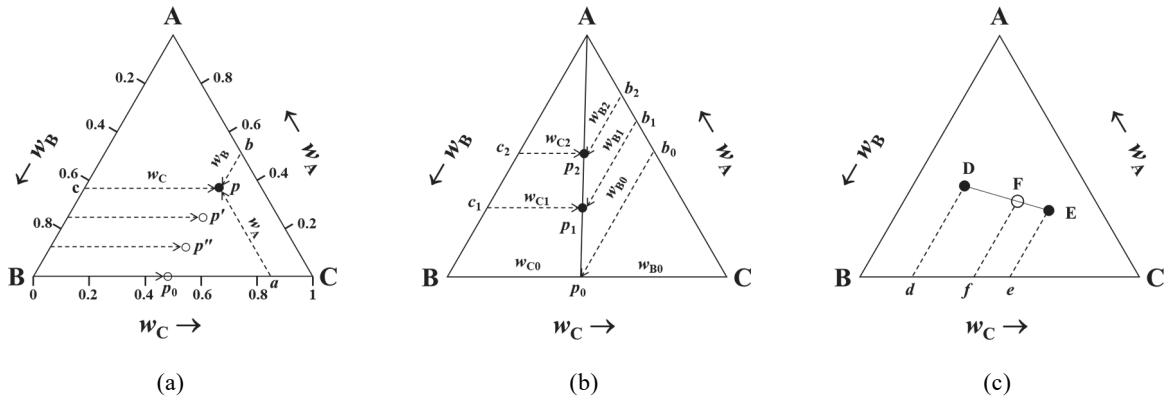


图2 系统混合时物系点的移动规律图

如图2(c)所示, 三组分系统D与E混合, 混合物物系点F必位于DE连线上。系统D与E质量分别为 $m_D$ 、 $m_E$ , 其C组分含量分别由Bd和Be线段的长度表示。混合物质量 $m_F$ 等于 $m_D + m_E$ , 其C组分含量由Bf线段的长度表示。混合前后C总量不变:  $m_D \times Bd + m_E \times Be = m_F \times Bf = m_D \times Bf + m_E \times Bf$ 。所以  $m_E \times Be - m_E \times Bf = m_D \times Bf - m_D \times Bd$ ,  $m_E \times fe = m_D \times df$ , 即 $m_D:m_E = fe:df$ 。根据相似三角形的关系可证明 $fe:df = FE:DF$ , 所以 $m_D:m_E = FE:DF$ , 即符合杠杆规则。

(3) 浊点法(观察法)测定溶解度曲线。

首先, 溶解度是定温、定压下每单位饱和溶液中所含溶质的量, 即物质能够被溶解的最大程度或饱和溶液的浓度。溶解度与温度、压力、溶质/溶剂分子性质相关, 例如部分互溶的双液系统, 溶解度与温度的关系主要有三种情况: 温度越高溶解度越大(图3a<sub>1</sub>)、温度越低溶解度越大(图3a<sub>2</sub>)、高温和低温时溶解度大(图3a<sub>3</sub>)。

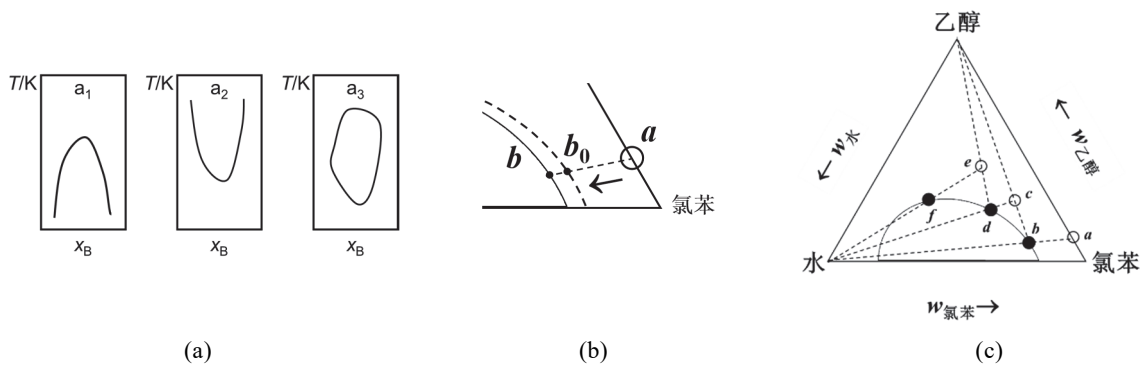


图3 (a) 溶解度与温度关系(部分互溶的双液体系); (b) 溶解度曲线的连续性(部分互溶的三液体系); (c) 浊点法绘制溶解度曲线过程示意图(部分互溶的三液体系)

然而, 微观上溶解和不溶解并不存在清晰的界限, 如图3(b)所示, 配制澄清的氯苯-乙醇起始溶液a, 加水, 系统a向b移动。当溶液接近饱和点 $b_0$ 时, 溶质分子开始聚集, 可能形成微小的聚集体或沉淀, 这些聚集体太小, 尚未达到散射光线的程度, 肉眼看依然是透明的。但随着溶质浓度的增加,  $b_0$ 向b移动, 聚集体有小变大, 当增长到足以散射光线的程度, 肉眼观测到溶液变浑浊, 系统抵达b

点。即溶解度曲线具有连续性。

本实验溶解度曲线测量过程中物系点的移动如图3(c)所示。配制澄清的氯苯-乙醇起始溶液 $a$ ，加水，系统沿“ $a$ -水”直线移动到浑浊液 $b$ ，获得溶解度曲线上第一个点；再加乙醇，系统沿“ $b$ -乙醇”直线移动到澄清溶液 $c$ ；再加水重复上述步骤，陆续得到 $d$ 、 $f$ 等溶解度曲线上的点。最后将 $bdf$ ……连接起来得到溶解度曲线。

实验过程中因溶解度曲线的连续性以及个体差异，浊点位置的判断不尽相同，从而产生测量误差。

#### (4) 联结线测绘方法。

在帽形区内的分层体系(图4)，乙醇在水层和氯苯层中不一定是等量分配的，水层和氯苯层中乙醇的浓度不一定相等，因此联结线不一定平行于底边，数据需要从实验获取。但具体操作上将 $p$ 体系的两层溶液彻底分开常常比较困难，所以需采用间接法获得 $a$ 、 $b$ 的位置。

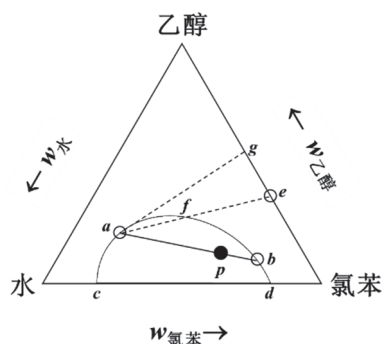


图4 联结线绘制过程示意图

间接法测绘联结线的过程：配制两相系统 $p$ ；取部分水层溶液称重( $m_a$ )；配制一定比例的氯苯-乙醇溶液 $e$ ；用 $e$ 溶液滴定水层溶液 $a$ ，物系点沿直线由 $a$ 向 $e$ 移动，过程中呈现现象“澄清(水层溶液 $a$ )—浑浊(物系点进入两相区 $af$ )—再澄清(开始进入单相区 $f$ )”；停止滴定并记录混合液 $f$ 质量 $m_f$ ，从而推算出 $m_e$ ，利用杠杆规则 $m_a' : m_e = f e : a f$ 得到 $f e : a f$ 的值。固定 $e$ 点，通过 $f e$ 、 $a f$ 长度比及 $a$ 、 $f$ 皆在溶解度曲线上的事实，找到 $a$ 、 $f$ 的位置。连接 $a p$ ，延长线交溶解度曲线于 $b$ ，找到 $b$ 点。完成联结线绘制。

由于部分水层和全部水层虽然质量不同，但各组分含量相同，所以在相图中处于同一点。滴定用的氯苯-乙醇溶液 $e$ ，不是固定的某一个比例，选择依据是：一要在滴定过程中呈现出澄清—浑浊—再澄清的现象，取低于 $g$ 点的某个比例；二要考虑实验过程中滴加的量要适中，太少容易错过澄清—浑浊—再澄清的现象，太多则实验时间过长。通过尝试法找到合适的溶液 $e$ 。

#### (5) 萃取过程物系点移动规律。

萃取过程物系点移动如图5所示：首先有一 $AB$ 混合溶液 $D$ ，向其中加入萃取剂 $C$ ，随着 $C$ 的加入，物系点沿 $DC$ 线移动，当加入某一量的 $C$ 时物系点移至 $E$ 点， $E$ 点的位置可由杠杆规则推算得到。 $E$ 为分层溶液，根据其联结线，两层溶液分别是富含 $B$ 的 $a$ 溶液和富含 $C$ 的 $b$ 溶液。分液漏斗将 $a$ 、 $b$ 溶液分开并分别进行蒸馏除去萃取剂 $C$ ，物系点分别沿 $aG$ 和 $bF$ 达到 $G$ 和 $F$ 。 $G$ 和 $F$ 分别比原 $D$ 溶液含更多的 $B$ 组分和 $A$ 组分，实现了提纯的目的。显然，若要获得高含量的 $A$ 和 $B$ 需要多次蒸馏，对于 $A$ ，最高含量是到 $F'$ 位置。

#### (6) 实验数据处理及呈现。

实测的都是各组分的体积，绘图时要将体积转换为质量，因此实验数据处理过程中需要实验温度下的密度。具体过程是利用手册中各组分不同温度下的密度数据，推导密度—温度方程，再将实验温度代入方程，得到对应的密度。

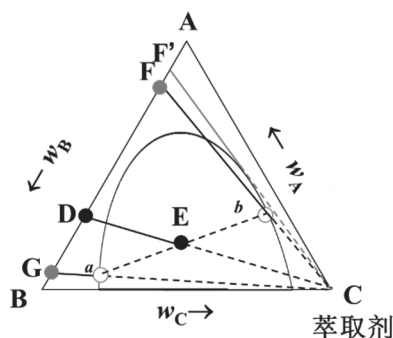


图5 萃取过程物系点移动

实验数据的呈现主要是溶解度曲线和联结线的绘制：以Origin为例，坐标轴设置中没有A、B、C轴而是X、Y、Z，需要将横轴即C轴的氯苯数据设置为X轴，乙醇、水的数据分别设置为Y、Z轴。再绘制软件中的“Ternary”图。

## 2 教学内容的改进

三角形坐标系下的三组分液-液相图是化工原理中相图章节的核心内容。在物理化学和物理化学实验中，由于分配给这部分相图的学时有限，要使学生尤其是初次接触相图的学生能够全面掌握，我们的经验是提供一套详尽且逻辑性强的教学内容和教学设计。以中山大学化学学院和材料科学与工程学院学生的掌握情况为例，我们发现学生普遍面临以下问题：对三角形坐标系的不熟悉，导致读图和制图速度较慢；对溶解过程的微观机制认知不明确，影响对实验过程的深入理解；以及对制图软件操作不熟练，造成作图上的困难。为了解决这些问题，我们对教学内容进行了重新编写，具体内容详见补充材料1第一、二和三部分。主要做了如下改进：

(1) 由于在作图软件如Origin中，坐标轴设置没有A、B、C轴而是X、Y、Z，因此为了方便作图时的坐标轴转换，我们在对三角形坐标系数据编辑时，底边坐标轴的描述方法进行了改变，以横轴为X轴，与传统的从ABC顶点出发并以C物质含量为X轴的直接讲法相比，更符合坐标轴的常规设定，有助于学生迅速记忆和理解。

(2) 我们将组分含量与物系点在坐标轴上的平行线段长度相结合，这样的教学设计使学生能够更直观地理解混合过程中物系点的移动规律和杠杆规则。进一步地，学生能够通过相图中物系点移动规律来掌握浊点法实验过程以及有机化学中常用的萃取过程，这不仅加深了学生对物理化学实验的理解，也纠正了初学者常见的误区——即认为萃取后的混合溶液仅包含萃取剂和被萃取物。

(3) 我们增加了关于溶解度曲线连续性的教学内容。在本实验中，测量溶解度曲线时，曲线上的点对应的是浑浊的液体状态；而在测量联结线时，曲线上的点却对应澄清的液体状态。如果不对这一现象进行清晰的解释，学生可能会对实验的理解不够深入。虽然这一点不会影响实验结论，但可能会导致学生对实验现象采取一种敷衍了事或不够严谨的态度。

(4) 我们采用了不同的符号来区分表示全部水层和部分水层的质量，这一改进纠正了以往教学中将两者混为一谈或忽略表述的问题，使得教学更为严谨。同时，这也有助于学生更深刻地理解物系点坐标的实质含义，即它仅表达各组分的含量，与体系质量无关。

(5) 我们引入了温度-密度、温度-溶解度的拟合方程内容。尽管在本实验中未进行恒温操作，这并不会显著影响实验结果，但我们的主要目的是培养学生认真对待环境因素对实验数据可能产生的影响，增强他们对实验数据精确性的意识。

(6) 与常规教材不同，我们提供了大量的文献数据作为课前处理材料(补充材料2和补充材料1第四部分)。以中山大学以往的物理化学实验教学为例，学生在实验前需要撰写预习报告，这些报告构成了实验报告的主要素材。学生在完成实验后，将数据填入预习报告并进行必要的分析，从而形成

实验报告。这种方法的优点在于能够确保学生在实验前对实验原理和过程有清晰的理解，但缺点是可能导致学生过分依赖书面材料。然而，实际上由于缺乏实践经验与不熟悉实验内容的情况下，抄写讲义便成为预习报告的主要工作量。补充材料1第一部分提供的讲义通过提供预习问题，要求学生在实验前仅进行数据分析工作。这种教学方法的目的是，虽然学生没有撰写具体的实验原理，但他们必须在理解原理的基础上才能完成数据处理。同时，通过处理其他三组分液-液体系的制图实践，学生能够更深刻地理解实验内容。

(7) 与同济大学、浙江大学联合编写的最新教材相仿<sup>[7]</sup>，我们在内容中同样加入了详尽的软件制图步骤。这里我们所提供的制图指导与本实验的结合更为紧密，确保学生能够在实践中更直观、更深入地理解和掌握制图技巧。

总体来说，本次重新编辑的内容清晰地阐释了溶解度曲线上的点，包括浊点法实验中的浑浊液、间接法测绘联结线实验中的澄清液，以及部分水层与全部水层之间的区别与联系，充分展现了物理化学学科对概念严谨性的重视。此外，物理化学作为一门运用数学方法建立变量间函数关系的学科，其数据分析和结果讨论的是实验基本内容。为此，本文在补充材料2中提供了6套全面匹配实验内容的文献数据，包括溶解度曲线和直接法/间接法联结线的绘制，以及50套涵盖饱和溶解度曲线和直接法联结线的文献数据，供学生预习使用。引导学生深入理解并掌握实验数据的处理与分析技巧。

### 3 讲授逻辑与建议

如前文所述，物理化学及其实验课程在三组分液-液相图部分的学时相对有限，尤其是实验课程中，教师的讲授时间更为紧张。这种情况可能导致学生在尚未完全理解实验原理的情况下就匆忙进行实验操作，使得实验课仅仅停留在完成基本操作的层面。为了解决这一问题，教师陆续提出了提升授课艺术<sup>[8]</sup>和采用逆向性教学设计<sup>[9]</sup>等方法。在本项工作中，我们强调注重逻辑性是实现有效教学的关键所在。作者在实践过程中总结出的教学流程如图6所示。从图中可以清晰看出，内容1、2.2、2.3构成了理解实验的核心部分。内容1涉及的知识点难度不大，重点在于识记，因此我们侧重于构建记忆逻辑；内容2是理解本实验的突破口，其中2.2是理解的起点，教师需要通过教学互动确保学生已经牢固掌握；至于2.3中的杠杆规则，在其他类型的相图中也存在相似的规律，根据教学时间的安排，可以选择省略推导过程，直接向学生明确提出结论。

### 4 当堂实验数据处理和课后报告提交

在“三组分液-液体系相图”的实验教学中，学生通常需要在课后自行处理实验数据。鉴于参与本次实验的学生大多是首次接触此类实验，对浊点判断的技巧不够熟练，导致绘制的溶解度曲线不平滑。为了改善这一状况，我们建议学生在完成首轮溶解度数据收集后，即从乙醇-氯苯澄清溶液开始，通过多次加水、加乙醇，得到乙醇-水-氯苯混合液多个浊点体系，记录每一个浊点体系三个组分的体积，当堂做出三角形坐标系下的溶解度曲线图，具体做法是：

将数据输入至电子表格里(补充材料2的体积质量转换表)，此表格已经提前输入温度的可提供密度，可直接将各组分的体积转换为质量百分比。随后，将数据导入Origin文件(补充材料3)，即可自动生成结果图。

这种方法使学生能够即时观察到自己的操作对实验结果的影响，并在必要时及时调整，以避免在重复实验时犯同样的错误。(如果学生集中输入数据，为提高效率，教师可以创建一个共享工作表，模板同样包含在补充材料2中，然后学生可以一键拷贝导入数据，避免排队等待输入数据的情况。)

与一般化学实验相比，物理化学实验更加注重数据的整理与分析。对于刚开始接触科研的二年级学生而言，他们大多数人尚未接受过系统的数据处理训练。为了帮助学生快速掌握科技论文中数据表格的设计方法，并方便教师快速审阅实验结果和批改报告，我们提供了实验报告模板(补充材料1第五部分)，其中特别包含了清晰、规范的数据记录表格，如表1所示。

| 内容及目标                     | 目标  | 关键点及逻辑  |
|---------------------------|---|---|
| 1. 相图-认识三角形坐标系            | 快速读图  | 1.1 顶点组分含量分布规律<br>易识记点: 底边含量 0, 顶点含量 100%<br>1.2 顶点含量与坐标轴刻度的关系<br>易识记点: 顶点含量 100%, 逆时针起点含量 0<br>1.3 底边横轴定义为 X 轴, 逆时针依次为 Y、Z 轴<br>易识记点: 直角坐标系横轴亦为 X 轴  |
| 2. 油点法测溶解度曲线中溶液混合时物系点移动规律 | 对实验过程有清晰的认识;<br>扩展到对萃取有清晰的认识, 实现物理化学-有机化学联动 | 2.1 坐标轴平行线段长度与组分含量关系<br>前提: 清楚 1<br>2.2 底边两组分混合液与顶点组分混合过程中物系点的移动规律<br>前提: 清楚相似三角形各线段比例关系<br>2.3 两个三组分体系混合过程物系点移动规律及杠杆规则<br>2.2-2.5 使用同一个规律, 讲清楚 2.2 的前提下, 后面问题引导的方式讲授, 同时检验听课效果<br>2.4 萃取过程物系点移动规律<br>2.5 油点法测溶解度曲线过程物系点移动规律            |
| 3. 间接法测联结线各物系点相互关系        | 对实验过程有清晰的认识                                 | 3.1 联结线的定义<br>注意: 要讲清楚由于顶点组分在另两个组分中溶解度不同, 联结线不一定是水平的事实<br>3.2 部分水层溶液与滴定液混合过程物系点移动规律<br>前提: 清楚 2.2<br>3.3 杠杆规则 $\frac{m'_a}{m_e} = \frac{ef}{af}$<br>前提: 清楚 2.3<br>3.4 全部水层与部分水层溶液物系点在同一位置<br>前提: 清楚 1<br>3.5 共轭溶液与总体系物系点的关系<br>前提: 清楚 2 |

图6 讲授逻辑与建议

## 5 结语

教学内容的重新整理对于教学研究具有不可或缺的作用。本文的研究工作将教学内容划分为必讲部分(正文)和选讲部分(补充材料1第一、二部分), 在保持教学内容的紧凑性和逻辑性的基础上, 为教师提供了灵活性, 使其能够根据不同的教学时长和学生的接受能力进行适当的调整。通过梳理讲授逻辑, 对教学内容进行知识相关性的合理排序和关键教学环节的提炼, 有助于学生更加高效地吸收和理解知识。

在传统教学内容中, 由于篇幅的限制, 通常未能详尽描述萃取与相图之间的关系。本文在前文“混合过程物系点移动规律”的总结基础上, 对此进行阐述。这不仅有助于初次接触相图的学生实现跨学科知识的整合, 而且通过将物理化学的知识点与有机化学实验中常用的实验手段相互联系, 帮助学生建立综合运用知识解决问题的能力。

本文还为广大教师提供了丰富的教学资源, 这些资源都可以直接使用。包括教学课件(补充材料4)和56套文献中的三组分互溶体系数据库, 以及依此绘制的溶解度曲线图和联结线图。此外, 本文还提供了完整的教学设计, 涵盖了课堂数据的呈现和课后报告的处理。总之, 教学内容的重新整理是一个不断发展和完善的过程, 我们期望本项工作能够助力教师提升教学效率, 实现教学内容与方法的持续优化。

表1 实验报告模板中实验数据记录及处理页内容

| 实验温度: _____ °C;<br>密度: 氯苯: _____ g·cm <sup>-3</sup> ; 乙醇 _____ g·cm <sup>-3</sup> ; 水 _____ g·cm <sup>-3</sup> 。<br>氯苯在水中的溶解度 (质量百分比): _____ % |       |        |             |      |                |           |          |   |          |    |   |
|--|-------|--------|-------------|------|----------------|-----------|----------|---|----------|----|---|
| 滴定终点时各组分的含量  |       |        |             |      |                |           |          |   |          |    |   |
| 步骤   | 序号    | 体积/mL  |             |      | 质量/g           |           |          |   | 质量百分含量/% |    |   |
|  |       | 氯苯     | 乙醇          | 水    | 氯苯             | 乙醇        | 水        | 总 | 氯苯       | 乙醇 | 水 |
| (1)  | 1     | 4.00   | 0.40        |      |                |           |          |   |          |    |   |
|  | 2     | 4.00   | 1.00        |      |                |           |          |   |          |    |   |
|  | 3     | 4.00   | 2.00        |      |                |           |          |   |          |    |   |
|  | 4     | 4.00   | 3.00        |      |                |           |          |   |          |    |   |
|  | 5     | 4.00   | 5.00        |      |                |           |          |   |          |    |   |
|  | 6     | 4.00   | 7.00        |      |                |           |          |   |          |    |   |
|  | 7     | 4.00   | 9.00        |      |                |           |          |   |          |    |   |
| (2)  | 8     | 0.40   | 1.00        |      |                |           |          |   |          |    |   |
|  | 9     | 0.40   | 2.00        |      |                |           |          |   |          |    |   |
|  | 10    | 0.40   | 3.00        |      |                |           |          |   |          |    |   |
|  | 11    | 0.40   | 6.00        |      |                |           |          |   |          |    |   |
|  | 12    | 0.40   | 9.00        |      |                |           |          |   |          |    |   |
| $m_{\text{total}} = m_1 + m_2 + m_3$   |       |        |             |      |                |           |          |   |          |    |   |
| 用 50% 的氯苯-乙醇溶液滴定的实验结果  |       |        |             |      |                |           |          |   |          |    |   |
| 物系点 <i>p</i>   |       |        |             |      |                |           |          |   |          |    |   |
|  |       | 体积/mL  |             |      | 质量/g           |           |          |   | 质量百分含量/% |    |   |
|  |       | 氯苯     | 乙醇          | 水    | 氯苯             | 乙醇        | 水        | 总 | 氯苯       | 乙醇 | 水 |
|  |       | 4.00   | 2.00        | 1.00 |                |           |          |   |          |    |   |
| 联结线相关各点质量/g  |       |        |             |      |                |           |          |   |          |    |   |
| 空瓶   | 空瓶+水层 | 空瓶+混合液 | 部分水层 $m'_a$ | 混合液  | 50%氯苯-乙醇 $m_e$ | $m_a/m_e$ |          |   |          |    |   |
| 各点组分质量百分含量/%   |       |        |             |      |                |           |          |   |          |    |   |
| <i>f</i>   |       |        | <i>a</i>    |      |                |           | <i>b</i> |   |          |    |   |
| 氯苯   | 乙醇    | 水      | 氯苯          | 乙醇   | 水              | 氯苯        | 乙醇       | 水 | 氯苯       | 乙醇 | 水 |
| 教师签名: _____  |       |        |             |      |                |           |          |   |          |    |   |

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

## 参 考 文 献

- [1] 范丽岩, 刘亚菲, 史慧杰, 吴梅芬, 王晓岗, 许新华. 大学化学, 2023, 38 (5), 265.
- [2] 邹永匡, 黄钟奇. 中山大学学报(自然科学版), 1980, No. 2, 64.
- [3] 孟庆民, 刘百军. 大学化学, 2008, 23 (6), 47.
- [4] 李晓霞, 张予辉, 王一蕾, 马淑杰. 机械化工, 2022, 11, 62.
- [5] 王晓琴, 赵树英, 俞英, 俞欣. 大学教育, 2019, No. 1, 90.
- [6] Zhang, Q.; Liu, J.; Bao, H.; Nai, X.; Sun, D.; Ma, B. *J. Chem. Educ.* 2020, 97, 1470.
- [7] 许新华, 王晓岗, 王国平. 物理化学实验. 北京: 化学工业出版社, 2017: 39-84.
- [8] 任成军, 王健礼, 孟祥光, 郑成斌, 杨成, 游劲松. 广州化工, 2023, 51 (2), 322.
- [9] 谭德新, 梁莉敏, 吕宝苒, 关惠文, 陈海程, 王艳丽. 大学化学, 2024, 39 (11), 79.