基于四重表征的跨学科教学实践

——以初中化学“中和反应”为例

龙芝香

（长沙市望城区黄金中学，湖南长沙 410200）

摘　要：为突破初中生对“无明显现象”化学反应的认知障碍，以“中和反应”为核心案例，引入手持技术（pH传感器、电导率传感器）实时监测反应进程中溶液理化参数的动态变化。通过建构“宏观—微观—符号—曲线”四重表征认知模型，引导学生建立“问题猜想—技术实证—模型迁移”的实证推理思维路径。教学实践表明，该模型显著深化了学生对反应微观实质的理解层次，促进了其数字化探究能力与跨学科素养的进阶。在此基础上，可为农村学校依托手持技术低成本开展数字化实验教学提供可参考的实践路径。

关键词：四重表征；跨学科教学；手持技术；中和反应；数字化实验

DOI：10.19935/j.cnki.1004-2326.2026.09.010

引用格式：龙芝香.基于四重表征的跨学科教学实践：以初中化学“中和反应”为例[J].实验教学与仪器，2026，43(09)：38-43.

在新时代核心素养导向下，跨学科实践与数字化实验技术正深刻重构基础科学教育范式。“中和反应”作为初中化学核心概念之一，其“无明显现象”的问题长期困扰着学生对微观本质的理解。

传统教学依赖指示剂变色等间接证据，难以突破“宏观现象缺失→微观本质认知薄弱→知识迁移困难”的认知闭环；尤其在农村学校，高端数字化实验设备的短缺尤为突出，进一步制约了实验教学的深度开展。

基于上述分析，笔者以四重表征认知模型为理论框架，创新性地引入低成本手持技术（pH传感器、电导率传感器），构建起“宏观—微观—符号—曲线”四重表征的跨学科教学路径。通过实时监测中和反应过程中pH值与电导率的动态变化，将不可见的离子反应转化为可视化数据曲线，融合化学、物理、数学及信息技术等多学科思维，旨在为破解农村学校数字化实验教学困境探索一条可复制的实践路径。

教学成效显示，这一教学创新不仅彰显了四重表征认知模型在微观概念建构中的有效性，更为核心素养导向的农村化学教学改革提供了实证支撑。

1　研究背景与理论基础

1.1　现实动因：新课标要求与农村实验教学困境的双重驱动

（1）政策依据。《义务教育课程方案（2022年版）》明确要求，各学科应安排不少于10%的课时用于跨学科主题学习[1]。该案例基于四重表征认知模型，融通化学、物理、数学与信息技术等多学科知识与思维，是对跨学科实践教学要求的积极响应，也为破解“无现象”反应的微观认知难题提供了合规路径。

（2）现实困境。农村学校高端数字化实验设备配置不足，传统仪器（如专业pH计、电导率仪）购置及维护成本高昂，难以支撑常态化分组实验教学。而中和反应的“无现象”问题，使得学生微观认知障碍尤为凸显。对照班的课堂概念测试数据显示，87名参测学生的微观概念认知障碍率高达57.5%，逾半数学生难以建立微观表征，充分印证了开展低成本数字化实验教学改革的紧迫性。

1.2　理论支撑：四重表征与建构主义的融合应用

（1）建构主义学习理论。该理论倡导以学生为中心的探究式学习，认为学习是学习者主动建构知识的过程：教师的教学并非简单传递现成知识，而是要激活学生原有的认知结构，促进其知识的深度重构与意义生成。

该实践活动以生活化问题“皮蛋食用过程中加醋去碱”为切入点，引导学生经历“无明显现象”实验的方案设计与探究过程，自主建构中和反应的微观实质，这一过程亟须一套能将“不可见”的微观变化转化为“可见”认知的认知模型。

（2）四重表征认知模型。为破解“无现象”反应的微观认知难题，笔者引入化学教育领域的经典认知工具——四重表征认知模型。该模型源于认知心理学的多重

表征理论，强调人类认知系统需协同调用多种感知方式与认知模式处理信息[2]。

多重表征有助于学习者突破单一认知视角的局限，实现对知识的深度理解，更高效地实现知识的迁移应用。为此，笔者引导学生从颜色变化、pH动态响应、电导率波动等宏观现象入手，通过实时绘制盐酸滴加量与pH、电导率的变化曲线，过渡到对离子反应微观实质的解析，并最终用化学符号进行表征。

四重表征认知模型并非“宏观—微观—符号—曲线”4个维度的简单叠加，而是通过建立维度间的内在关联，帮助学生建构起结构化、系统化的认知框架，实现从“现象感知”到“本质理解”的认知升级。显然，实现不同表征间的灵活转化与深度融合，有助于学生将零散的知识整合成连贯的认知结构。

2 教学主题与教学现状分析

2.1 教学主题

中和反应选自人教版（2024年版）《化学》九年级下册第十单元“常见的酸和碱”。作为“认识物质性质的一般思路和方法”的载体，该课题要求学生通过实验探究，自主建构酸、碱的主要性质。

酸、碱、盐是初中化学的核心重难点之一，其中学生对酸、碱的认知建构水平直接制约着后续盐类知识的学习。鉴于此，在教学中突破中和反应的微观认知难点，对促进学生建构结构化的物质性质认知体系至关重要。

2.2 教学现状分析

教材在处理中和反应内容时，直接呈现“氢氧化钠与盐酸反应”，缺乏生活情境的铺垫，趣味性不足，难以激发学生的深层学习动机。

在教学实践中，教师多照搬教材演示实验，仅验证酸碱反应的发生，导致学生的认知停留于表层，难以建构“宏观—微观—符号—曲线”四重表征认知模型，进而造成知识迁移困难、遗忘率高的问题。

在知识迁移层面，学生虽然能机械书写化学方程式，却无力解决“污水处理”“酸雨防治”等真实问题，社会责任意识薄弱。尤为关键的是，教材对“有水生成”的鉴定，仅局限于“干冷烧杯罩火焰”的宏观观察法，但该方法无法适用于溶液体系内的中和反应。现有研究虽课例丰富，但缺乏对实验本身的系统性审视[3]，能够深度融合手持技术，实现“宏观—微观—符号—曲线”四重表征的典型案例仍较为匮乏[4]。

鉴于此，笔者利用手持技术实时监测中和反应进程中pH与电导率的变化，绘制动态响应曲线，实现微观离子反应可视化，并融通数学、物理等学科知识，以期探索出一条核心素养导向下的跨学科教学实践路径。

3 教学目标

（1）通过宏观现象推断中和反应的发生，进而抽象概括其定义及特征。

（2）利用手持技术测定反应过程中溶液的pH和电导率，同步绘制盐酸滴加量与pH、电导率的变化曲线；通过解读曲线，明确pH突跃点与电导率谷值的化学含义。

（3）通过实验探究，从宏观、微观双视角解释中和反应的实质，结合定性与定量分析方法理解反应的微观本质。

（4）设计“无明显现象反应”的探究思路，提炼通用探究方法，建构“无明显现象反应”的认知模型。

4 教学创新设计

4.1 手持技术的低成本适配方案

笔者所在学校为农村中学，高端数字化实验设备相对匮乏。故而，笔者基于低成本理念，对传统中和反应实验进行设计优化，选用便携式电导率检测笔（俗称水质检测笔，后文统一使用该俗称）作为核心监测工具。该工具在解决农村学校实验困境及适配中和反应微观表征方面的优势如表1所示。

表1 传统实验方案与低成本手持技术实验方案对比

对比维度	传统实验方案	低成本手持技术实验方案	适配优势
设备成本	大型数显pH计、电导率仪（单价均高于1 000元）	水质检测笔（pH/电导率二合一，单价大约50元/支）	成本降低95%以上，适合农村学校批量采购，可满足分组实验需求
操作难度	设备调试复杂，需专业培训	一键开机，简单校正后直接读数，操作简单	符合九年级学生的认知水平，降低了实验操作门槛
数据采集	单次只能采集一种参数，耗时较长	同步获取pH、电导率双参数，实时显示数据	提高数据采集效率，便于观察两个物理量的同步变化
实验形式	仅限教师演示，学生被动观察	学生分组操作，自主采集数据	增强了学生实践体验，落实了“学生主体”教学理念
数据精度	精度较高，但需专业校准	精度满足初中教学要求（pH误差±0.05，电导率误差±2%）	兼顾数据准确性与教学实用性，无须复杂校准流程

4.2 四重表征认知模型的实现路径

笔者以中和反应为核心，构建“宏观—微观—符号—曲线”四重表征认知进阶路径，各维度层层递进、相互关联，认知模型见图1。

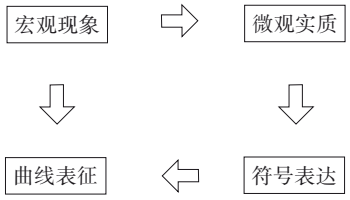


图1 四重表征认知模型

（1）宏观现象：情境驱动，感知冲突。创设“皮蛋食用加醋去碱”的生活情境与“氢氧化钠与稀盐酸混合无明显现象”的实验情境。通过“无明显现象是否意味着未发生反应”的认知冲突，激发学生探究宏观现象背后微观本质的内驱力。

（2）曲线表征：技术赋能，量化证据。引导学生分组使用水质检测笔，实时监测NaOH溶液中逐滴加入稀盐酸（约0.05 mL/滴）过程中的pH与电导率变化。基于实测数据绘制“pH-滴数”及“电导率-滴数”动态响应曲线，将不可见的反应进程转化为可视化的量化证据。

（3）微观实质：模型建构，探寻本源。引导学生聚焦曲线关键特征（如pH突跃点、电导率极小值点），结合“电导率与离子浓度正相关”的物理原理，逆向推导并建构“中和反应微观本质是H^+与OH^-结合生成H_2O”的认知模型。

（4）符号表达：本质外化，结构统整。在明晰微观实质的基础上，引导学生运用化学方程式（NaOH+HCl=NaCl+H_2O）及离子方程式（H^++OH^-=H_2O）精准表征反应规律，实现宏观现象、微观本质与符号语言的深度融通，完成认知结构的自主建构。

5 教学流程

具体教学流程如图2所示。

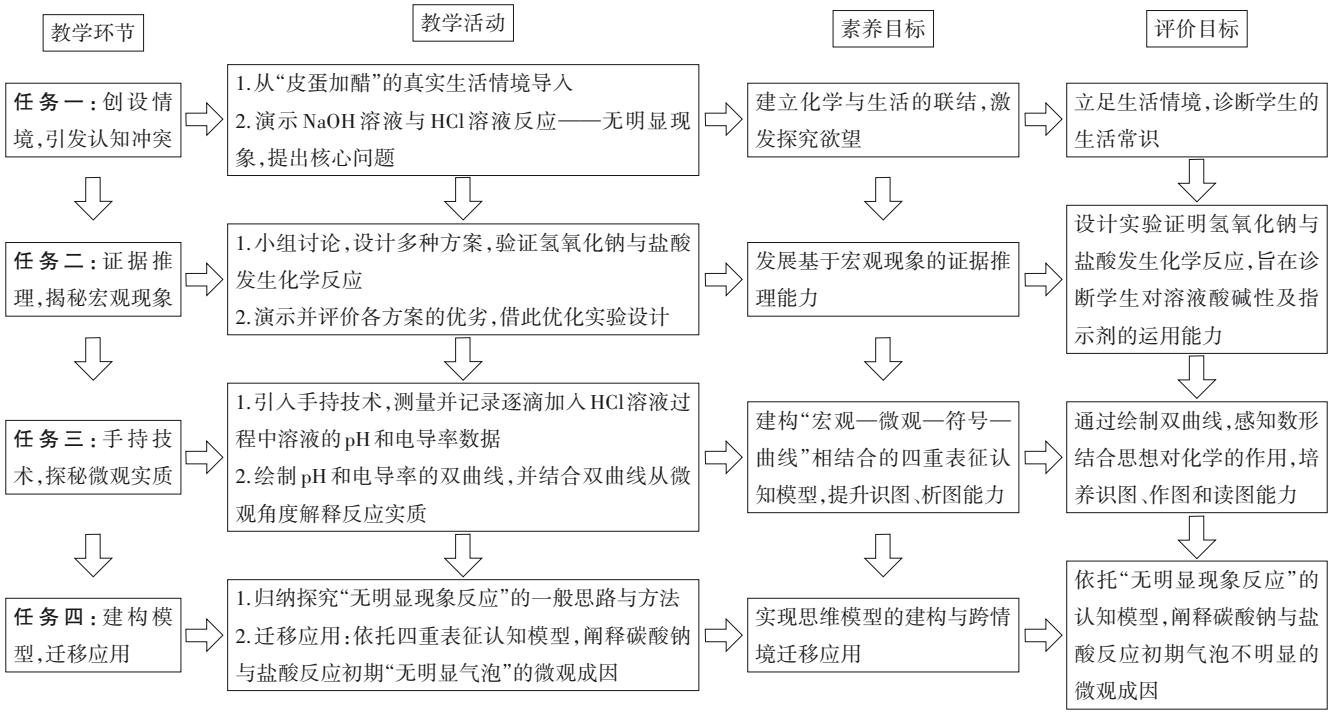


图2 教学流程

6 教学过程

6.1 创设情境，引发认知冲突

【教师】播放短视频展示皮蛋的制作过程，并呈现皮蛋食用过程中加醋改善口感的做法。

【问题链1】生活经验：为什么皮蛋加醋能改善口感？

【学生】皮蛋里面有大量的碱残留，加入的食醋能够与碱发生化学反应。

【问题链2】在实验室用NaOH溶液和HCl溶液模拟该反应，为何无明显现象？

【学生】反应的生成物无明显现象。

【演示实验】氢氧化钠中加入盐酸无明显现象。

【问题链3】科学家如何研究这类反应？我们能否像

科学家一样，找到这类反应发生的“隐藏证据”？

【学生】加入酸碱指示剂，通过颜色的改变可证明反应已发生。

设计意图：从生活经验衔接至实验室探究，从宏观现象深入微观世界，依托进阶式问题链，激发学生的好奇心与探究欲望。

【教师】上述实验在宏观上无明显现象，能否设计实验证明反应的发生？

6.2　证据推理，揭秘宏观现象

【教师】组织学生以小组为单位，开展“实验方案设计大赛”。

【学生】以小组合作方式参与“实验方案设计大赛”，展示设计方案、阐述设计原理并进行现场演示。

【教师】引导学生评价方案，聚焦于“如何通过引起一个可观测的宏观变化（如颜色、气泡、沉淀）来推断不可见的反应”。

【小结】用石蕊或酚酞作指示剂在理论上均可行。但石蕊在酸或碱溶液中颜色变化的对比度较弱；而酚酞在碱性溶液中显红色，在酸性或中性溶液中无色。若将酚酞滴入NaOH溶液中（呈红色），再逐滴加入HCl溶液，可观察到溶液由红色逐渐变为无色，颜色变化对比鲜明，易于观察。因此，教材选择“在NaOH溶液中滴加酚酞，再滴加HCl”的方案。

【深入讨论】酚酞方案更具优越性。教师抛出争议性问题：溶液变红又变为无色，究竟是反应的结果，还是酚酞“施了魔法”？引导学生以此为线索，验证酚酞是“旁观者”而非“参与者”。

设计意图：引导学生实现从“感知现象”到“审视本质”的思维进阶，为引入手持技术奠定基础，培养其基于证据的批判性思维。

6.3　手持技术，探秘微观实质

【技术引入】展示并介绍水质检测笔，并类比为“医生的听诊器”，可以“聆听”溶液中离子的“声音”（pH和电导率）。

【知识回顾】NaOH溶液在水中电离出Na^+和OH^-；HCl溶液在水中电离出H^+和Cl^-。随着HCl溶液的逐滴加入，NaOH不断被消耗，溶液碱性逐渐减弱；当溶液颜色恰好褪为无色时，pH≈8.2，呈弱碱性；继续滴加盐酸，溶液转为酸性。

【实验安全】氢氧化钠溶液、盐酸溶液具有强腐蚀性，实验过程中需佩戴好护目镜，戴好手套，防止溅到眼睛、皮肤、衣服等处。

【实证探究1】证伪酚酞干扰。

①向洁净烧杯中加入50 mL蒸馏水；②向蒸馏水中滴加2滴NaOH溶液；③再滴加1滴酚酞溶液。分别测定上述3种情形下溶液的pH与电导率，实测数据见表2，NaOH溶液中滴加酚酞前后的pH与电导率的变化对比见图3。

表2　不同溶液组成的pH和电导率

阶段	溶液组成	溶液颜色	pH	电导率/($\mu S\cdot cm^{-1}$)
①	蒸馏水	无色	6.86	1
②	蒸馏水+NaOH溶液	无色	11.25	496
③	蒸馏水+NaOH溶液+酚酞	红色	11.25	493

【学生推理1】水分子中不存在带电荷的粒子，NaOH溶液中有带电的Na^+和OH^-；NaOH溶液呈碱性；加入的酚酞并没有影响溶液的pH和电导率。

【学生推理2】酚酞溶液的加入如同向人群中加入一个“观察员”，他只报告情况（颜色变化），但不影响人群的活动（离子反应）。

【教师】能否通过测定溶液的pH和电导率来判断反

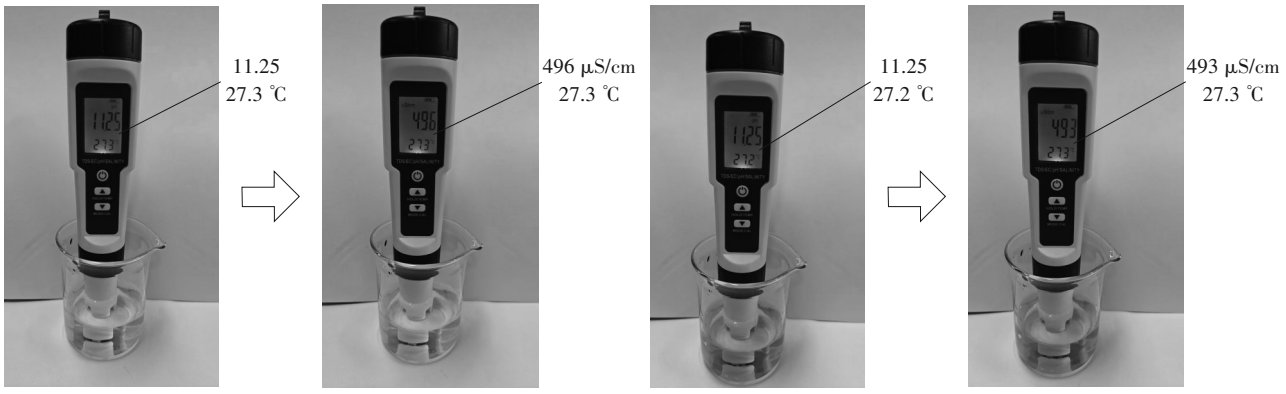


图3　NaOH溶液中滴加酚酞溶液前后pH与电导率的变化对比

应的发生与否？

【实证探究2】④逐滴加入HCl溶液，观察溶液的颜色变化，同时逐次测定溶液的pH和电导率。数据记录如表3所示。

表3 不同盐酸滴数的溶液颜色、pH和电导率变化

V_{HCl}/滴	溶液颜色	pH	电导率/(μS·cm^{-1})
0	红色	11.25	493
1	红色	11.05	434
2	红色	10.95	399
3	红色	10.75	365
4	红色	10.45	327
5	红色	10.25	298
6	红色	9.18	272
7	无色	3.56	283
8	无色	2.08	404
9	无色	1.87	471

【学生】根据表3中的数据，在坐标纸上手动绘制或使用Origin软件绘制消耗盐酸滴数与pH、电导率的双曲线。利用Origin软件绘制的双曲线如图4所示。

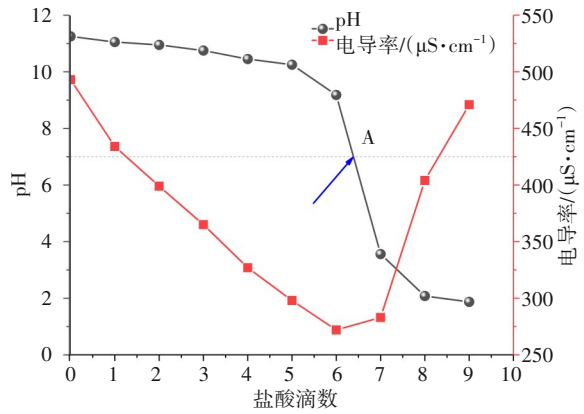


图4 盐酸滴加过程中pH与电导率的变化曲线

【教师】曲线解读指导：①区域分析：将曲线划分为“反应进行区”“终点区”与“酸过量区”；②关键点分析：聚焦pH突跃点与电导率最低点，探究二者在横坐标上的位置关系及其化学含义；③趋势分析：阐释电导率呈“V形”变化的成因，并结合反应进程分析溶液中主要离子种类的转化规律。

【学生推理1】起点到A点前代表反应进行区，A点标志着恰好完全反应，而A点后代表酸过量。随着HCl的逐滴加入，OH^-不断被消耗，溶液的pH逐渐降低。当加入第7滴HCl溶液时，pH出现突跃，由9.18变成3.56，溶液从碱性变成酸性，证明反应经历了从进行到结束，再到HCl开始有剩余的过程。

【学生推理2】pH突跃点、电导率最低点，二者在横坐标上几乎是重合的。NaOH溶液在水中电离出Na^+和OH^-，HCl溶液在水中电离出H^+和Cl^-。在反应前后，Na^+和Cl^-没有参与反应。所以，中和反应的实质是H^+和OH^-结合生成H_2O。

【学生推理3】反应前，溶液里的导电微粒主要是Na^+和OH^-。随着HCl的加入，H^+和Cl^-进来了，但OH^-在不断被消耗。当恰好完全反应时，溶液里的导电微粒主要变成了Na^+和Cl^-，这时候导电能力最弱，所以电导率降到谷值。当酸过量以后，溶液里除了Na^+和Cl^-，又多了很多H^+，导电微粒变多了，电导率就又升高了，所以曲线看起来像个“V”。

【小结】结合上述pH曲线突跃、电导率“V形”变化及微观离子行为分析可知：NaOH溶液与稀盐酸混合后宏观层面无明显现象，但低成本手持技术的定量监测数据显示，溶液pH与电导率发生了规律性变化，证明宏观层面“无现象”的背后，微观层面H^+与OH^-正在发生中和反应，突破了传统宏观观察的认知局限。

设计意图：以绘制曲线与结构化问题链为支架，引导学生完成“实验数据→实证证据→微观解释→模型建构”的认知进阶，基于曲线解读与反应证据提取，深度揭示中和反应的微观实质，最终自主建构“宏观—微观—符号—曲线”四重表征认知模型。

6.4 建构模型，迁移应用

【追问】①实验后的废液呈酸性，能否直接倒入水池进入下水道？应如何正确处理？②不仅是NaOH溶液与HCl溶液的反应无明显现象，还有其他化学反应的发生也无明显现象，如CO_2通入NaOH溶液中。对于这类反应，我们应该以怎样的思路去设计方案并验证反应的发生？

【模型建构】教师带领学生梳理整个探究过程，提炼出验证无明显现象反应的一般思路与方法（图5）。

【模型应用】①解释型问题：Na_2CO_3溶液与HCl溶液反应，为何刚开始无气泡产生？引导路径：宏观无现象→微观分步反应（$CO_3^{2-}+H^+\rightarrow HCO_3^-$）→利用手持技术验证pH呈阶梯下降趋势；②设计型问题：如何证明NaOH溶液与CO_2发生了反应？引导路径：对比反应前后的溶液pH（碱性减弱）、电导率（Na^+浓度不变，OH^-减少）。

【设计依据】通过“解释”和“设计”两个进阶式任务，检验并巩固模型，实现从理解到应用的飞跃。

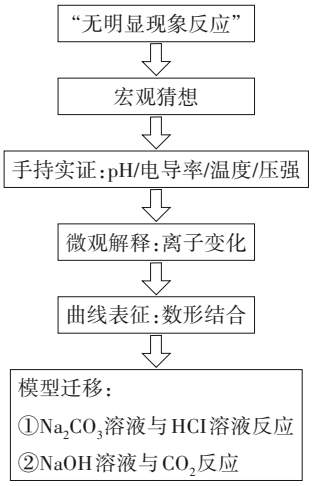


图5 一般思路与方法模型

7 教学成效及反思

7.1 教学成效

（1）量化成效分析。为客观评价教学成效，笔者采用准实验研究法，选取所在学校九年级4个平行班为研究对象。其中，九2班（43人）、九4班（45人）为实验组，实施四重表征跨学科教学；九1班（44人）、九3班（43人）为对照组，实施传统讲授式教学（教师演示实验+知识点讲解）。当该单元教学结束后，立即通过课堂即时测试、跨学科迁移任务及学习兴趣量表进行多维量化评估。统计结果显示，实验组在微观概念理解、知识迁移能力等核心指标上均显著优于对照组（$p<0.05$），详见表4。

表4 实验组与对照组教学成效对比

评估维度	传统教学班	四重表征实验班	提升率/%
微观本质理解正确率	42.5%（37/87）	69.3%（61/88）	+26.8
跨学科任务完成度	35.6%（31/87）	62.5%（55/88）	+26.9
学习兴趣指数	3.1/5.0	4.6/5.0	+30.0

（2）学生质性反馈。课后访谈显示，学生的认知结构与学习情感发生显著转变。

A组学生代表（反馈）：此前误以为混合无明显现象即未发生反应，现已纠正该错误认知。即便宏观现象隐匿，亦可借助手持技术捕捉微观变化，证实反应的实质发生。这让我对“化学变化本质是有新物质生成”的理解更为深刻。

B组学生代表（反馈）：未曾设想化学亦可像数学一般借助图像分析问题，“数形结合”的思想极具启发性。物理课上学习的电导率知识能有效迁移至化学情境，切身感受到跨学科解决实际问题的优势与必要性。

7.2 教学反思

（1）手持技术赋能，深化跨学科实践。该堂课借助手持技术实时监测溶液pH与电导率，实现了微观粒子的宏观可视化。通过绘制“盐酸滴数-pH/电导率”变化曲线，成功将数学“数形结合”思想迁移至化学实验探究中，促进了数理化学科的深度融合。同时，该数据处理过程亦是对教材中“曲线表征”认知模型的巩固与应用，有效提升了学生运用跨学科知识解决实际问题的能力。

（2）认知范式重构，驱动科学思维进阶。针对学生常将“宏观—微观—符号”三者割裂的错误认知，该课依托新课标要求，不仅实现了三者的有机联动，更创新性地引入“曲线表征”，建构了“宏观—微观—符号—曲线”四重表征认知模型。这一模型打破了传统认知壁垒，促使学生的科学思维从孤立记忆向系统化、结构化认知跃迁。

（3）温度数据采集存在局限。尽管手持设备具备温度传感功能，但受限于该实验试剂用量较少、反应放热有限以及环境热交换等因素，全程温度数据波动甚微，难以确证中和反应的放热本质。后续研究将采用微型隔热反应容器，减少热损耗，以实现对反应热效应的精准量化。

（4）研究边界有待进一步拓展。笔者仅聚焦强酸强碱的中和反应，尚未覆盖弱酸强碱、强酸弱碱等反应体系，这可能导致学生对中和反应曲线特征的认识存在局限。在后续教学中，笔者计划在课后拓展及校本课程中增设醋酸与氨水等弱电解质的中和实验，引导学生对比分析曲线差异，深化其对电离平衡及反应本质的理解。

基金项目：长沙市教育科学“十四五”规划2025年度课题“初中化学‘绿色生活’主题项目学习的校本化设计与应用研究”，编号：CJK2025031。

作者简介：龙芝香（1986—），女，一级教师，研究方向：初中化学教育教学，E-mail：709331236@qq.com。

参考文献

[1] 中华人民共和国教育部.义务教育化学课程标准（2022年版）[S].北京：北京师范大学出版社，2022.
[2] 余勇臣.多重表征理论下初中化学酸碱中和反应教学实践[J].新课程研究，2024(03)：114-116.
[3] 麦裕华，钱扬义.“中学化学手持技术数字化实验案例”的多维分析：以钱扬义工作室20年研究的期刊论文为例[J].化学教育（中英文），2020，41(19)：83-89.
[4] 罗正开.手持技术赋能初中化学深度教学：以中和反应为例[J].中学化学教学参考，2025(09)：60-64.