

角色分工机制视域下物理师范生科学推理能力的提升

——基于认知网络分析的一项研究

高 嵩, 冯辰钰, 蔡阳健

山东师范大学物理与光电学院, 山东 济南

收稿日期: 2026年3月1日; 录用日期: 2026年4月2日; 发布日期: 2026年4月14日

摘 要

分小组进行科学探究活动是培养科学推理能力的一个重要途径, 然而组内同伴间的分工不同, 是否会影
响科学推理能力提升的结果却一直未被关注。在物理师范生进行科学探究的过程中采用同伴辅导模式,
进行为期一学期的教学实践, 对协作过程中的因角色分工而导致的科学推理能力发展的影响进行了研究,
证明角色分工机制对科学推理能力各维度都有影响, 不过不同角色的科学推理能力结构的变化也存在差异。

关键词

同伴辅导, 物理师范生, 科学推理能力, 角色分工, 认知网络分析

Promotion of Scientific Reasoning Ability of Physics Normal Students from the Perspective of Role Division Mechanism

—A Study Based on Cognitive Network Analysis

Song Gao, Chenyu Feng, Yangjian Cai

School of Physics and Electronics, Shandong Normal University, Jinan Shandong

Received: March 1, 2026; accepted: April 2, 2026; published: April 14, 2026

Abstract

Scientific inquiry activities in groups are an important way to cultivate scientific reasoning ability. How-
ever, whether the division of labor among peers in groups will affect the improvement of scientific

reasoning ability has not been paid attention to. In the course of scientific inquiry of physics normal college students, peer tutoring mode is adopted for one semester teaching practice. The influence of role division on the development of scientific reasoning ability during collaborative processes is studied. It is proven that the role division mechanism has an influence on all dimensions of scientific reasoning ability, but there are also differences in the structure of scientific reasoning ability of different roles.

Keywords

Peer Tutoring, Physics Normal Student, Scientific Reasoning Ability, Role Division, Cognitive Network Analysis

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 科学推理能力的培养现状与问题

科学推理能力作为 21 世纪认知技能链中的重要组成部分，它指的是一种通过系统化方法，运用科学原理与逻辑推理来阐释世界、构建假说、设计并进行实验、严谨验证与分析数据，最终推导出结论的综合性能力。这样的一种能力既是国际科学教育标准的一个重要方面，也是科学家在科学研究过程中使用的必要技能[1][2]。科学家的科学推理技能体现在他们能够根据观察到的证据建构主张，并证明证据与主张之间存在着合理的关联。与科学家的工作类似，物理师范生作为理科学生以及未来的物理科学教师进行物理知识的讲授时不仅要深入了解“物理学学科的特征和获取物理知识的过程”，还要具备进行科学实践所必需的与证据收集和分析相关的能力、用于进行基于证据的论证的能力即科学推理能力。

已有研究表明本科生的科学推理能力水平状况不容乐观[3][4]，而科学推理能力作为一种解决复杂问题的技能，可以通过采用恰当的教学模式去进行培养，J. Osborne 等人曾发现推理过程中的协作互动既能发展和维持组内伙伴彼此间的共同理解，又能将活动过程中的问题快速概念化[5]。因此，以协作互动方式进行探究活动更有助于科学推理能力的提升[6]。然而，目前教学中重点关注的是学生整体科学推理能力的提升，忽视了群体中学生个体科学推理能力的发展，究其原因，一是个体差异因素的影响。合作过程中同伴间更倾向于讨论双方都具备的共享知识，而个体自身的一些理论知识和科学证据无法完全表述或被动接受同伴观点开展活动。二是合作学习过程中存在任务分配问题。以小组为群体的探究活动是一种自然形态的互动，常存在任务分配不清、角色定位模糊的问题，致使部分学生参与边缘化[6]。这带来两方面负面影响：首先，学生个体推理能力的发展不均衡；其次，边缘化学生缺乏充分的表达与倾听机会，既不利于同伴间的观点融合，也减缓了建设性沟通的进程[7][8]。而科学推理能力的核心是理论 - 证据的协调，需要一定的认知冲突促使学生不断用证据检验和修正自己的原有观念深化科学推理[9]。并且，真正的科学活动是高度社会化的，科学家在团队中明确的分工会形成科学共同体的工作模式，不仅科学推理能力得到进一步提升，而且科学素养和协作能力也得到发展[10]。因此，在现有的探究式教学模式下进一步提供恰当的合作支架，以更秩序化的形式进行教学，应该更有利于提升师范生的科学推理能力。

2. 同伴辅导模式作为技能提升支架的有效性

同伴辅导(Peer Tutoring)又称同伴辅助学习、同伴教育、相互指导和伙伴学习，一般以技能收获为目标，是同伴互助学习模式(Peer-Assisted Learning, PAL)中最广为人知的一种教学方法。它具有三大功能，

一是可作为教学组织形式改善教学模式；二是应用于具体课程优化课程结构；三是作为嵌入式或渗透式的思维训练工具提升对思维能力的[11]。同伴辅导最初以教学组织形式或与具体学科相结合应用于中小学教育阶段，自1980年开始学者们将其作为思维训练工具用于职前教师培训与实习，目前国际上很多一流大学已有针对本科生开展的相应辅导项目，具体开展原则遵循的是S. Goodlad提出的黄金七项法则，包括界定目标、确定角色、培训辅导者、设计辅导内容、给予辅导者支持、清晰易理解的指示、方案评估七项[12]。应用同伴辅导模式的最初目的是基于角色分工深化学习者之间的互动与合作，因为这种“以教为学”的实践方式被证明是增加学生理解能力和思维能力的有效途径[13]。其次，探究式合作学习环境中学生个体的动机与学生能力的发展密切相关。群体合作下影响动机的因素需要考虑需求、期望、外部因素三个方面(见图1)。需求与任务目标相关联，任务目标越明确，学生的方法需求和知识需求就越具体；期望会影响个体的自我效能感和归因，在具有挑战性的探究式学习活动中，个体首先是选择自己能力范围内的活动和任务，继而通过别人给予的反馈检验自身的行为和能力；外部因素指的是来自他人的社会或情感支持，而在高等教育阶段影响学生动机的外部因素主要是课程压力和所面对的任务是否对今后工作有益[14]。因此，物理师范生在探究式合作学习环境所要完成的任务与上述三个因素关联越多，他们对自身提升科学推理能力的动机才会更强烈，也会更积极地参与到探究活动中。为此，本研究借助同伴辅导教学来搭建增强学生学习动机与技能的支架，其方式是赋予学生明确的角色与任务，从而引导他们循序渐进地完成推理任务。并通过同伴之间隐形或显形的方式获得反馈，有助于增强自我效能感和学习动机，同时提供了对自己的行为进行监控的条件，进而提升自身的推理技能。

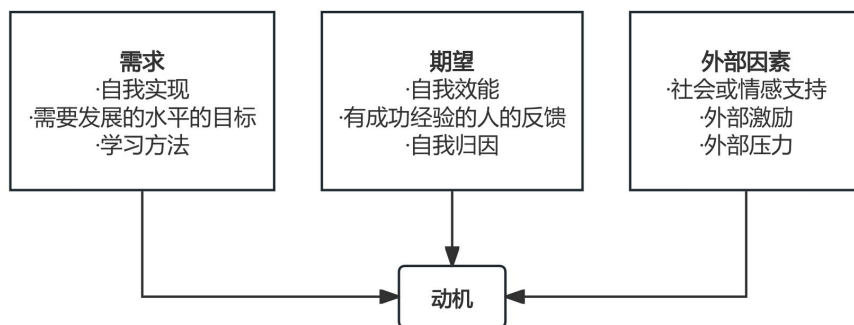


Figure 1. Factors affecting learning motivation
图1. 影响学习动机的因素

3. 构建“同伴辅导 - 科学推理能力”教学框架

3.1. “同伴辅导 - 科学推理能力”教学框架的构成

现有的较为广泛应用于培养物理职前教师科学推理能力的探究性教学模式是由V. Sampson提出、J. Grooms等人改进的论证驱动教学模式(Argument-Driven Inquiry, ADI)，涉及确定任务和指导性问题、设计方法并收集数据、分析数据并提出试探性论据、论证环节、明确和反思性的讨论、撰写调查报告、双盲小组同行评议、修改并提交报告等八个环节，每个环节相互衔接，可以很好地推动学生科学推理各维度的发展[10]。已有研究表明该模式能有效提升师范生的科学推理能力，但由于存在组内任务分配不清，解决问题过程中学生被动接受同伴观点的现象，难以发展个体的深层次科学思维[15]。为此，本研究将可应用于同伴辅导的脚本化合作框架(Scripted-Cooperative Dyads, SCD)和Thomson提出的应用于合作形式的学习周期模型相结合构建“同伴辅导 - 科学推理能力”教学框架[12]。该框架旨在通过角色分工和阶段性引导，解决传统合作学习中任务分配模糊、个体参与度低的问题，最终促进物理师范生科学推理能力的系统性发展。外层的脚本化合

作框架三要素确保每个成员充分参与，内层的学习周期以四级推理循环的形式从内容传递、任务执行、对话分析到推理论证循环与 ADI 模式的八个环节融合，逐级推进科学实践。该框架的具体组成如下。

3.1.1. “同伴辅导 - 科学推理能力” 教学框架的外层三要素

框架外层是可应用于同伴辅导的脚本化合作框架(SCD)，它涉及个体推理能力差异、同伴辅导指南和任务特性激励三个要素：

1) 个体推理能力差异要素与同伴辅导小组的建立和具体的角色分配相关。有效实施同伴辅导的前提是搭建同伴辅导小组，按照班级人数将小组搭建人数定为 5~6 人，角色分配上依据物理实验流程特点设定辅导者 1 人、实验者 3 人、观察者 1~2 人。分组主要考虑“组内异质，组间同质”并遵循成员之间互补、组建自愿、组内成员固定的三大原则：① 成员之间的互补性。辅导小组内每位成员个性不同、每个个体有自己的优缺点，彼此之间可以相互弥补；② 组建自愿。同伴辅导小组的建立遵循民主自愿的原则，以学生自身意愿为主且可依据实际情况做出调整，避免辅导模式实施过程中发生不必要的冲突或矛盾；③ 成员的固定性。一学期的实验课程是一个长期合作的过程，组内成员在辅导流程、实验设计思路上形成了一定的默契，对于论证与反思阶段的效果和效率会比临时建立的小组要高得多[16]。

2) 同伴辅导指南要素代表的是同伴辅导模式下的“协作脚本”。F. Fischer 等人的“协作脚本”理论指出“脚本”代表的是一种程序知识形式，旨在告诉参与者在处理问题或任务时可以执行的过程和顺序，通过这些引导可以整合问题解决过程中个体的观点与问题，而不同推理伙伴的多样化解决策略可能是相互补充的，从而产生伙伴间的脚手架效应，影响团队的整体推理进程[17][18]。本研究的物理实验能力技能训练课程指南(见表 1)作为一个同伴辅导引导流程，依据原有课程的论证驱动教学模式(ADI)生成，该指南的主要目的是帮助学生及时记录实验信息和推理过程中出现的需要厘清的问题。

Table 1. Course guide of physical experiment ability and skill training under peer tutoring mode
表 1. 同伴辅导模式下物理实验能力技能训练课程指南

基本内容	具体信息
小组信息	组别
	实验名称及日期
	成员及角色分工
实验准备	目标设定(实验目的与预期结果)
	理论复习(物理概念与原理回顾)
实验过程	假设提出
	描述实验现象
	数据收集 实验操作
数据分析	结果解释(基于数据分析结果，解释其物理意义)
	误差分析(讨论实验过程中可能存在的误差及其对结果的影响)
结果讨论	假设验证(对比实验结果与先前假设)
	问题探讨(实验过程中呈现的问题及其解决方法) 结果应用(联系实际应用)
观点互动	本次实验中提出了哪些观点以及对他人观点的想法
回顾总结	提出对实验的改进建议

3) 任务特性与激励要素考虑的是激发参与者的学习动机。一方面通过角色分配让每个学生都有任务参与感,减少学生参与失衡的现象;另一方面直接与每组最终的课程成绩相挂钩,由任课教师进行评估,以此激励所有学生积极参与到实验课堂中来。

3.1.2. “同伴辅导 - 科学推理能力” 教学框架的内层学习周期四级推理循环

内部的学习周期四级推理循环模式是该框架的主体部分。加涅认为个体能力的发展依赖于自身生长和学习及其相互作用,学习在很大程度上又依赖于个体与之发生相互作用的环境事件[19]。同时,科学推理能力作为一种复杂技能可以在特定模式或环境中通过学习和培养逐步提升,特别是与他人协作交流的情况下更有利于该能力的提升[20]。而 Thomson 和 Mason 曾给出一个学习周期模型,该模型既关注了学习者的活动,又以对话为导向将学习者的活动重新定向,通过四级管理模式捕捉参与者之间的协作与交流,以此发展需要培养的能力,同时为群体中个体的技能发展创造了新的机会[12][21]。因此,本研究将该学习周期与分阶段后的同伴辅导流程(见图 2)相结合构建了更程序化的推理论证学习周期。具体课程中四级推理论证循环模式安排如下:

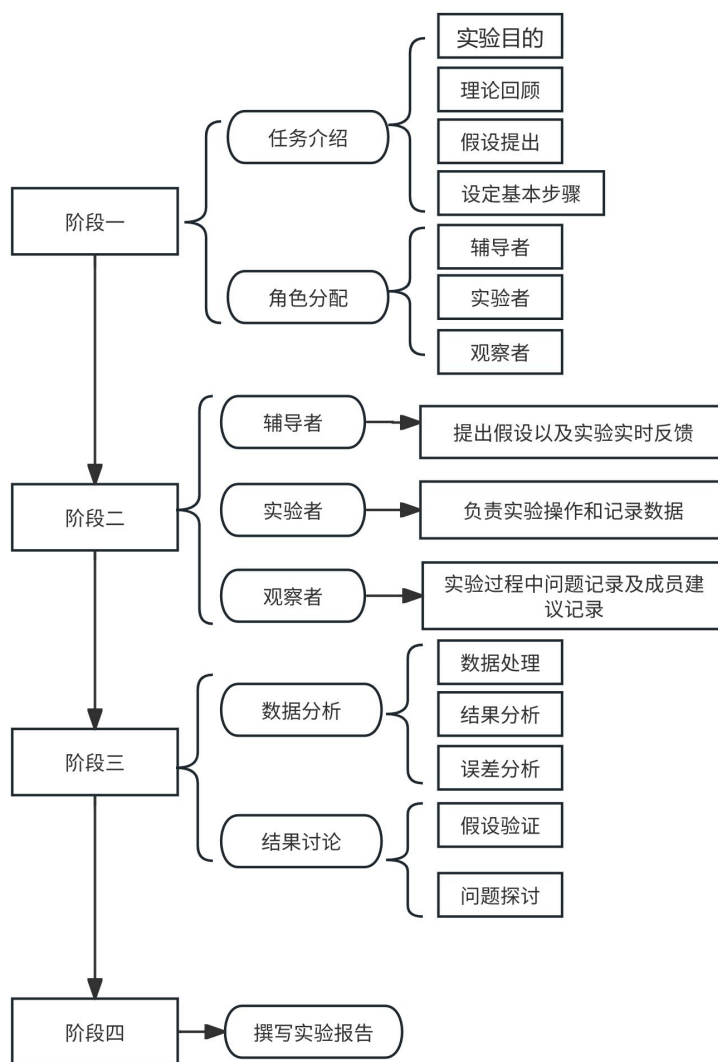


Figure 2. Peer tutoring stage process
图 2. 同伴辅导阶段流程

1) 第一级：内容传递。作为循环周期的第一级，该级旨在形成科学问题情境，使学生明确实验目的、理论背景和初步实验逻辑设计。首先是在外层三要素即建立了辅导小组、熟悉了指导指南和了解了课程评估方式的基础上，在组内明确各参与者的角色分工和任务介绍，以此激发学生的探究动机；其次是该级中的初步实验逻辑设计环节，对应的是学生科学推理中控制变量维度的初步发展。

2) 第二级：任务执行。依据上一级的角色分工和任务分配，这一级开始聚焦于实验操作和数据收集阶段，各角色基于实验设计方案执行任务，通过具体步骤构建有条理的数据，并形成初步原理性认识。本级主要强调任务执行过程中角色之间的协作交流与互动，目的是增强科学推理能力中数据分析维度和控制变量维度的联结。

3) 第三级：对话分析。这一层级的关键落点在于，借助多轮论证互动与反思环节，推动参与者间产生认知碰撞与社会建构进程，产生交互式推理。而这类推导形式，对科学探究与科学推理而言至关重要。Dunbar 曾指出“一个人的推理常成为他人推理的输入项，这会引发问题的快速重新概念化，且在研究方式的各层面引发重大转变”[22]。本级依托对话复盘、实验数据的剖析，来加固科学推理各维度间的联系，推动科学推理能力中数据分析与因果决策的融合。

4) 第四级：推理论证循环。该级是对前三级内容的一个整合，侧重于知识整合、应用和迁移。一组成员在实验后系统梳理探究路径，使内隐推理过程外显化，以填写指导指南、撰写实验报告的具体方式进行总结反思，并在多次实验中以螺旋式循环持续发展科学推理能力，提升科学推理能力的整体平衡性和联结度。具体教学框架图见图 3。

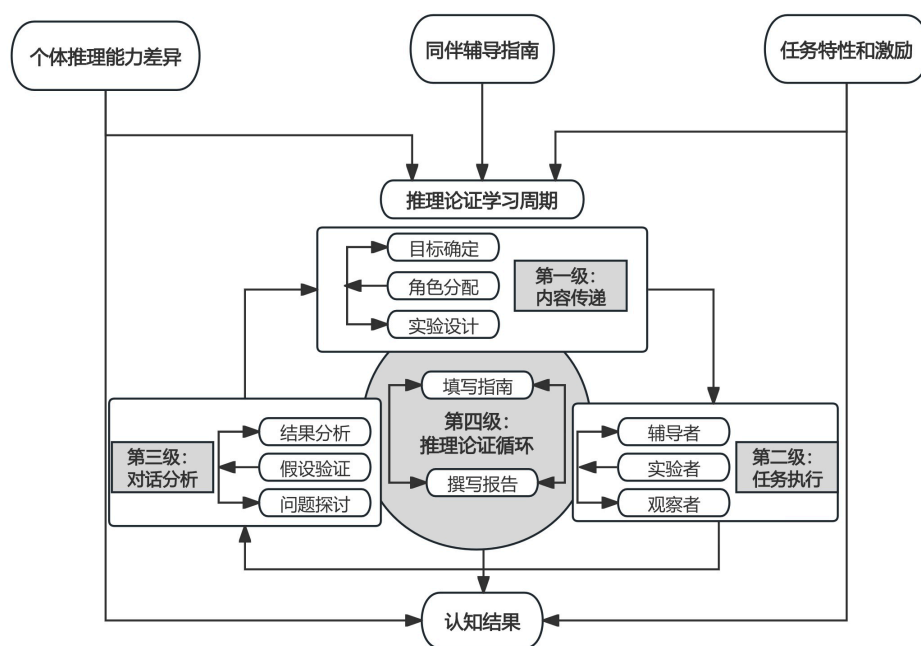


Figure 3. “Peer tutoring-scientific reasoning ability” instructional framework
图 3. “同伴辅导 - 科学推理能力” 教学框架

4. 同伴辅导中角色分工影响科学推理能力的研究设计

在确定了具体的教学框架与实施流程后，需要对该教学框架的应用效果进行分析，即在原有的论证驱动教学模式中嵌入同伴辅导模式，以明确的角色分工机制进行探究式实验活动对参与者的科学推理能力产生了怎样的影响？以下是具体的研究问题与方法。

(一) 研究问题

本研究以包雷的科学推理能力评估工具 iSTAR 作为主要分析框架[9]。该框架主要包括控制变量能力(COV)、数据分析能力(DA)和因果决策能力(CDM)为三个主范畴,每个主范畴下又包含多个具体的子范畴作为识别学生科学推理能力要素的依据(见表 2)。核心问题:一是回答物理师范生的科学推理能力在角色分工机制的干预下科学推理三个维度的联结度的变化情况;二是同伴辅导模式下角色分工后物理师范生的科学推理能力的发展结构是怎样的?

(二) 研究对象

研究对象为山东某师范高校一个自然班的大学物理师范生,考虑“组内异质,组间同质”以及成员互补、组建自愿和成员固定的原则组建 8 个同伴辅导小组。并在辅导前对辅导者进行了一课时的培训,同时建立辅导者 QQ 群以便对辅导者进行及时的支持。

(三) 研究方法

本研究采用的主要方法有内容分析法和认知网络分析。利用内容分析法从学生提交的文本中挖掘出对应的科学推理要素以便转化为数字形式进行统计和比较。认知网络分析法(Epistemic Network Analysis,以下简称 ENA)是由 Shaffer 等人提出的一种基于话语过程之间的共现来识别认知网络的方法[23]。通过 ENA 生成的认知网络图以及网络图中质心的分布状况可以对具体的角色认知网络和进行节点联结强度分析,进而说明角色匹配下各角色与科学推理能力三维度的关联结构是怎样的。

具体而言,首先对物理师范生的实验报告、课堂训练指导指南和实验实录视频的转录文本利用 Nvivo15 进行质性编码分析,为保证编码的准确性,由两名研究生同时进行编码,编码结束后进行一致性检验,首次实验文本编码一致性为 0.66,末次实验文本编码一致性为 0.69,说明编码一致性较强,达到较好水平。其次,采用认知网络分析描述同伴辅导模式下首-末实验学生的科学推理能力三维度的结构变化以及三种角色的科学推理能力维度联结结构变化。

Table 2. Analysis framework for scientific reasoning ability dimension codes based on iSTAR

表 2. 基于 iSTAR 的科学推理能力维度编码分析框架

主范畴	子范畴
控制变量 (COV)	识别或设计具有多个可检验和不可检验变量的 COV 条件
	真实生活和 STEM 场景
	有或没有实验数据
	从简单到复杂的关系 扩展到 DA/CDM 维度
数据分析 (DA)	多变量线性比例
	条件概率(包括变式)
	组合
	多变量相关和协变
因果决策 (CDM)	基础统计学,如加权平均和随机抽样的概念
	贝叶斯概率
	因果决策中的先验知识和偏见
	相关和协变的因果判断
	贝叶斯推理和因果决策
因果判断的条件规则	
	条件概念和用于因果判断的基本统计

5. 数据分析及讨论

为清晰了解同伴辅导模式下角色分工机制对学生科学推理能力的影响，本次随机抽取了一个同伴辅导小组的数据进行认知网络分析。本研究首先选取首末两次实验中该组物理师范生的科学推理能力数据作为双样本组，通过构建认知网络二维质心映射模型，揭示同伴辅导模式下学生科学推理能力的结构分布规律。研究进一步聚焦控制变量能力、数据分析能力和因果决策能力三个主核心维度，针对不同角色定位搭建相应的认知网络模型，并通过计算三个主维度之间的连接系数揭示各能力要素间的互动机制。

(一) 同伴辅导前后师范生科学推理能力认知网络结构特征分析

本研究对物理师范生的相应文本进行编码分析和预处理后进行了二进制转换，再利用 ENA 在线认知网络分析平台建立了首 - 末实验科学推理能力认知网络二维质心分布图，见图 4。主要对比的是三个角色在首末两次实验中科学推理能力三个主维度之间的联结结构变化，分析结果表明，在二维质心投影分布中，第一维度 X 轴(MR1)对数据总体方差的贡献占比为 31.5%，第二维度 Y 轴(SVD2)的贡献占比达 60.7%。从统计视角来看，该网络能够在统计层面有效保留原始数据的信息特征。另外，首末两次实验下科学推理能力数据的二维投影质心(对应图 4 中标记的“首次实验”与“末次实验”质心块)呈现不同的空间分布状态：首次实验对应的质心和科学推理能力三个主维度的空间距离相对更远，末次实验对应的质心和科学推理能力三个主维度的空间距离则更近。这表明，同伴辅导模式前后物理师范生的科学推理能力结构产生了较大变化。接着应用 ENA 认知网络图看同伴辅导前后科学推理能力各维度的变化轨迹，见图 5。图 5 中(a)图呈现的是该同伴辅导小组首次实验时的科学推理能力维度认知联结网络，其中控制变量能力与数据分析能力、因果决策能力之间的关联系数分别为 0.27、0.47，数据分析能力与因果决策能力之间的关联系数为 0.47，该组学生在首次实验中控制变量能力与数据分析能力之间的连接较弱。(b)图呈现的是该同伴辅导小组末次实验时的科学推理能力维度认知网络，经过一学期的同伴辅导训练后，科学推理能力各维度之间的联系发生了变化，控制变量能力与数据分析能力、因果决策能力之间的关联系数为 0.60、0.51，数据分析能力与因果决策能力之间的关联系数为 0.55，各维度之间的联结都有所增强。再看(c)图是首 - 末实验该组的认知网络叠加图，结果显示：从第一次以同伴辅导模式进行实验到最后一次以同伴辅导模式进行实验，科学推理能力三个维度之间的联结系数均呈增长趋势，其中控制变量能力与数据分析能力的增幅最大为 0.33，控制变量能力与因果决策能力的增幅为 0.04，数据分析能力与因果决策能力的增幅为 0.08。

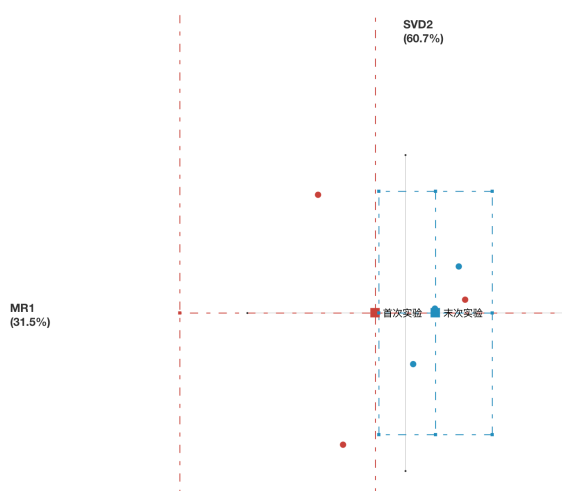


Figure 4. 2D centroid distribution map of cognitive networks for scientific reasoning ability in pre- and post-tests
图 4. 首 - 末实验科学推理能力认知网络二维质心分布图

综合来看，同伴辅导模式的实施整体上促进了科学推理能力三个维度之间的联结度。其中，控制变量能力作为建立受控实验的第一步，不仅仅要对所做实验进行变量的识别，还需要通过调控场景熟悉度、变量数量、数据呈现方式来控制，即需要考虑数据的分析与是否能收集到有效的证据进行决策判断。所以从控制变量能力与数据分析能力之间联结系数的变化来看，该组在同伴辅导模式前后学生对实验的分析把控开始从多个维度进行考虑。

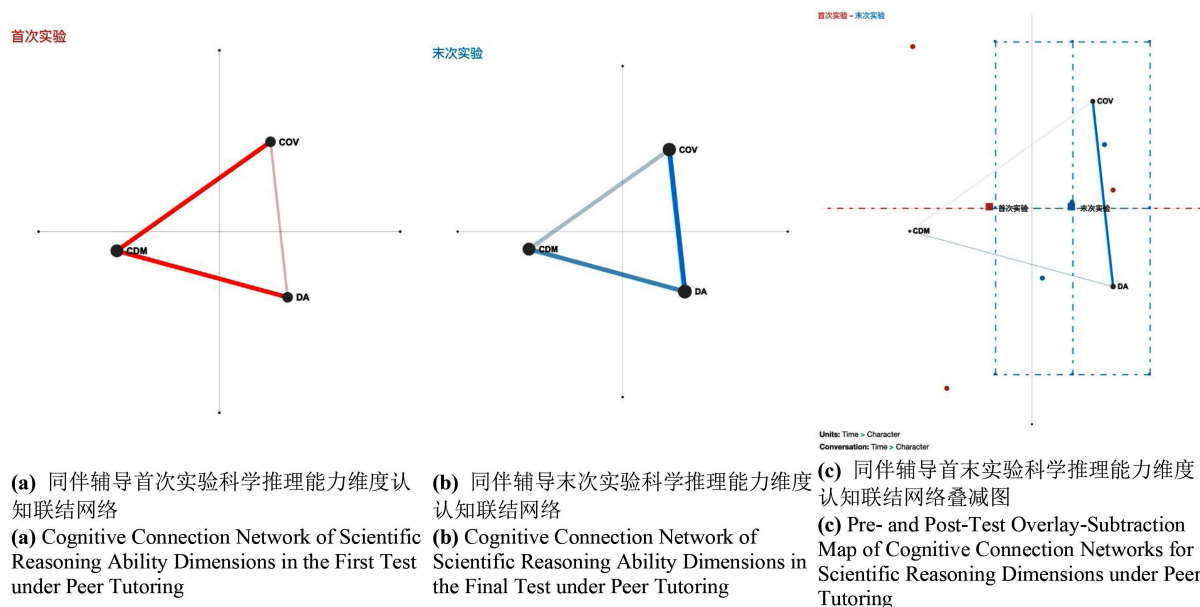


Figure 5. Changes in cognitive network connections of scientific reasoning ability in pre- and post-tests under the peer tutoring mode

图 5. 同伴辅导模式下首 - 末实验科学推理能力认知网络联结变化

(二) 同伴辅导模式中各角色的科学推理能力维度结构变化

上述分析表明，同伴辅导模式的实施对学生的科学推理能力三个主维度联结度产生了影响，促进了该组整体科学推理能力的提升。接着，本研究进一步探究了实验中三种角色的科学推理能力变化轨迹，如图 6 所示。从各角色首末实验认知网络图变化可以发现：辅导者首次实验中控制变量能力与因果决策能力相关性最强，而数据分析与控制变量和因果决策之间无明显相关性，可能由于辅导者在初次辅导中由于任务分配的限制仅限于了实验初始设计和基于数据的分析，而将整个数据收集过程交由实验者进行，而从末次实验的认知网络图可以看到辅导者的三个维度之间的关联性有了明显提升，表明辅导前后辅导者在完成自身任务的同时将视野放宽到了整个实验流程；实验者作为数据收集的主要角色，首次实验中控制变量能力与数据分析能力相关性最强，相关系数为 0.67，而控制变量与因果决策、数据分析与因果决策间的连接较弱，可见首次实验时实验者角色主要集中于收集数据的任务，并未有及时进行数据分析与反思的意识，而在末次实验中实验者的控制变量与数据分析关联性仍最强，但数据分析与因果决策、控制变量与因果决策之间的联结均有所增强，增幅均为 0.14；观察者作为实验过程中的问题记录者与实时反馈者处于一个第三视角去参与整个实验，分析首末两次认知网络图发现，一开始观察者的数据分析与因果决策相关性最强，而这两个维度与控制变量之间无明显相关性，而在一学期辅导活动后，观察者的因果决策、数据分析与控制变量之间相关性增强，表明观察者在问题记录和提出反馈时不再局限于已有的数据，开始追根溯源从一开始的控制变量入手去分析实验中的现象与问题。

以上分析表明，同伴辅导模式中角色的具体分工使得各角色的科学推理能力各维度之间关联度得到

了加强。而由于角色分配任务的不同，各角色的科学推理能力维度结构又呈现出不同的情形。其中，辅导者的科学推理能力结构特征变化最明显，经过一学期的辅导后，科学推理能力的三个维度之间关联性加强并趋于平衡状态；实验者的科学推理能力三个维度之间的结构特征在经过辅导后表现为加强趋势，三个维度之间的相关性更紧密；观察者在辅导过程中，科学推理能力三个维度之间的相关性更显著，逐渐趋于一个平衡的状态。

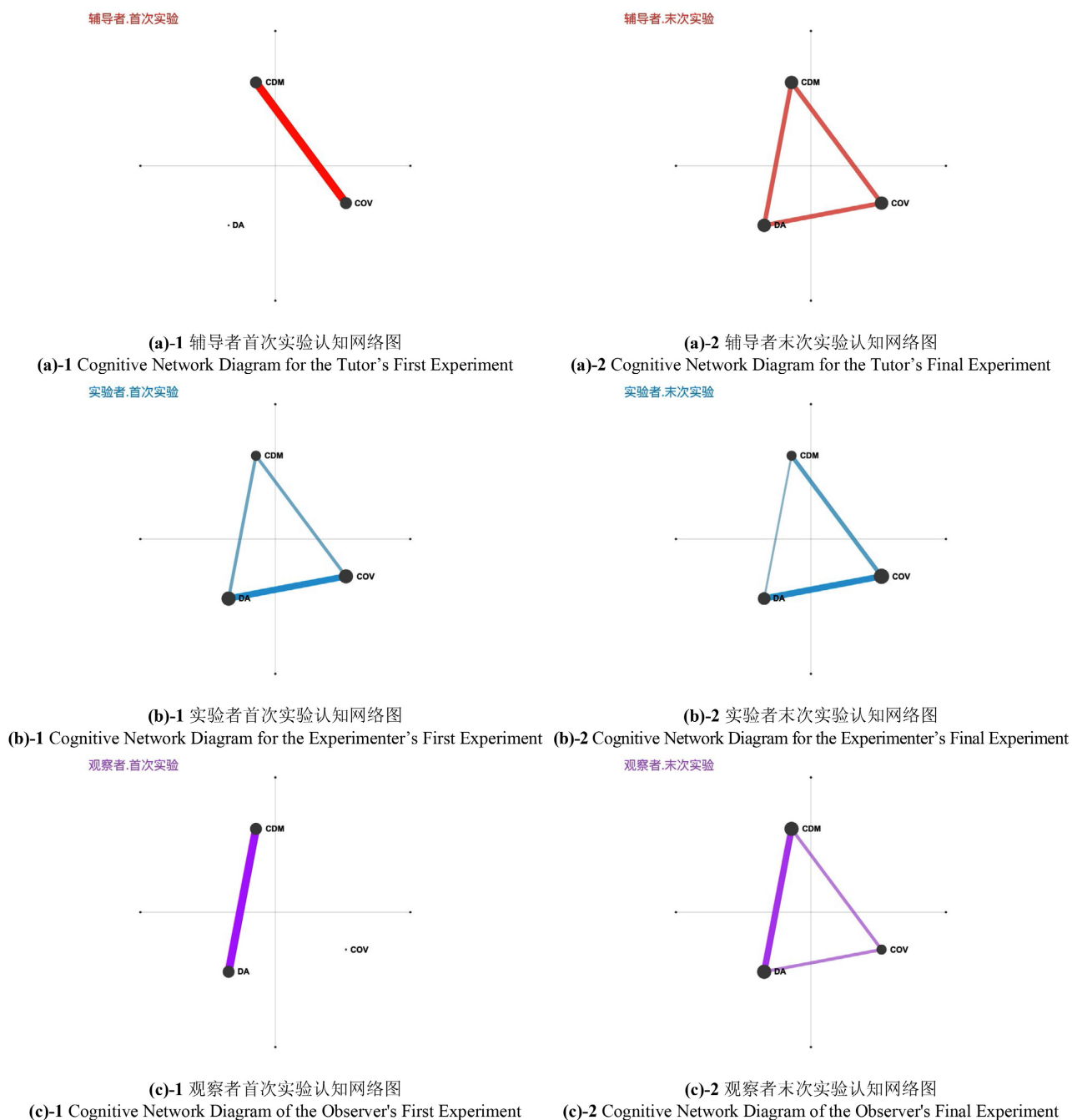


Figure 6. Connection change diagram of roles and three dimensions of scientific reasoning ability in the pre-post experiment peer tutoring mode

图 6. 首 - 末实验同伴辅导模式中各角色与科学推理能力三维度的联结变化图

6. 研究结论与建议

6.1. 研究结论

研究通过分析发现现有的以小组合作培养科学推理能力的探究式活动中，学生存在组内角色分工模糊问题，影响了个体科学推理能力的发展。为此，构建了“同伴辅导 - 科学推理能力”教学框架并应用于物理师范生的培养课程中。该框架的实施效果分析主要围绕控制变量能力、数据分析能力和因果决策能力三大核心维度展开，并利用内容分析法和认知网络分析法进行数据分析，结果显示，使用“同伴辅导 - 科学推理能力”教学框架优化了物理师范生科学推理能力的发展路径：一方面该框架使得物理师范生的整体认知网络结构更加紧密均衡，另一方面利用三种角色将任务拆解，各角色之间的科学推理能力发展展现了互补的成长路径。

科学推理能力作为一个由控制变量、数据分析和因果决策相互交织的非单一的技能网络系统，应该是以不同维度间互补增长的形式呈现，而同伴辅导中的角色分工机制通过为辅导者、实验者和观察者设定不同的任务，帮助学生关注到了任务与任务之间的相关性，在第二级到第四级逐级论证中加强了科学推理能力各维度之间的整合，促使学生基于证据推理，提升各维度联结度与整体平衡性。例如，辅导者从最初集中于实验设计到后期延伸至实验全过程的协调，实验者从最初的数据收集到后期主动加入对数据的反思，观察者则在其中培养了批判性追溯能力，这与推理能力中的因果决策相关技能分不开。可见，角色分工机制应用于培养学生的科学推理能力避免了传统合作模式中个体边缘化问题，通过差异化任务的分配一定程度上实现了科学推理能力的互补增长。

然而，角色分工机制也存在一定局限性，从该组后期各角色认知网络分析情况来看，以固定角色进行探究性实验仍存在维度发展不均的情形：辅导者过于侧重理论梳理而对数据的收集和分析参与不够，实验者以实验数据收集为主线导致对收集的数据是否能有效验证对应假设缺乏深度反思，观察者则可能因脱离实际实验操作而影响推理全面性。对此，在今后实施“同伴辅导 - 科学推理能力”教学框架过程中要考虑角色之间的轮换互动与整合，以确保参与者推理网络整体的一个激活。

6.2. 研究建议

本研究证明“同伴辅导 - 科学推理能力”教学框架可以更精准地服务于物理师范生科学推理能力的培养，为科学教育实践提供更有力的支撑。因此，期望在后续的教学实践中，从以下三个方面优化与完善该教学框架：

1) 系统推行角色轮换机制，促进能力全面发展

“同伴辅导 - 科学推理能力”教学框架中角色分工机制让三种角色的科学推理能力发展路径各有侧重，又能相互补充。固定角色虽有助于学生在特定推理维度上获得强化训练，但也存在明显缺陷，容易导致其对科学推理完整过程的理解不够全面。因此，在后续研究中可尝试引入角色轮换机制。主要目的有两个：一是学生推理能力发展的片面化，二是使学生通过承担不同角色，整合多元视角下的认知，构建更为系统且连贯的科学推理能力结构。另外，还可加入集体反思环节，通过引导学生比较不同角色所带来的思维差异，帮助他们更深入地把握科学推理的内在本质。

2) 加强辅导者专项培训，支持角色成功转型

通过认知网络分析可见，辅导者的推理能力发展呈现出显著的阶段性跃迁——初期聚焦于实验设计与数据反馈层面，后期逐步进阶至全局统筹能力，能够系统性地协调变量控制、数据分析及因果决策等环节。这一转变深刻凸显了辅导者在科学推理协同活动中不可替代的核心价值，但其能力进阶绝非自发形成，需依托一定的外部条件支撑。基于此，建议后续研究为辅导者构建分层培养机制：首先通过角色

重塑明确其“脚手架”定位，推动指导方式从指令式转向启发式；其次强化阶段胜任力训练，帮助其精准把握不同辅导周期的关键要点；最后引入预演机制，借助实验逻辑推演提升方案设计的预见性。这种三维赋能路径既能缓解角色转换期的认知负荷，又能系统性提升辅导效能，最终促进小组科学思维的协同进化。

3) 持续优化教学框架，提升实践适配性与长效性

“同伴辅导 - 科学推理能力”教学框架在本研究中显示出了积极效果，但数据分析也揭示了进一步优化的空间。例如，不同角色在末次实验中科学推理能力各维度的联结虽然增强，但发展节奏还存在差异，这表明框架需更灵活地适配个体差异。后续建议从两方面进一步优化框架：一是动态调整实验任务的分配，可结合认知网络分析反馈，对学生每个实验的表现微调角色对应的任务难度；二是嵌入形成性评估机制，在框架内层各级增加简短的自评或互评环节，让学生及时监控自身推理过程，并与同伴视角对照。

基金项目

2020 教育部高等学校教学研究项目“基于国家物理虚拟仿真实平台的实验教学改革与实践”(项目编号: DJZW202019hd); 山东省研究生教育质量提升计划立项建设项目(项目编号: SDYAL21078)。

参考文献

- [1] National Research Council, Singer, S.R., Nielsen, N.R., *et al.* (2012) *Discipline-Based Education Research: Understanding and Improving Learning in Undergraduate Science and Engineering*. National Academies Press.
- [2] Lawson, A.E. (2010) Basic Inferences of Scientific Reasoning, Argumentation, and Discovery. *Science Education*, **94**, 336-364. <https://doi.org/10.1002/sce.20357>
- [3] Bao, L., Cai, T., Koenig, K., Fang, K., Han, J., Wang, J., *et al.* (2009) Learning and Scientific Reasoning. *Science*, **323**, 586-587. <https://doi.org/10.1126/science.1167740>
- [4] 郭玉英, 魏昕, 仲扣庄, 等. 高师物理专业本科生科学推理能力研究[J]. 物理教师, 2011, 32(1): 1-6.
- [5] Osborne, J. (2010) Arguing to Learn in Science: The Role of Collaborative, Critical Discourse. *Science*, **328**, 463-466. <https://doi.org/10.1126/science.1183944>
- [6] Csanadi, A., Kollar, I. and Fischer, F. (2021) Pre-Service Teachers' Evidence-Based Reasoning during Pedagogical Problem-Solving: Better Together? *European Journal of Psychology of Education*, **36**, 147-168. <https://doi.org/10.1007/s10212-020-00467-4>
- [7] 王萌萌, 赵敏, 方恺. 探究式教学模式对本科生科学推理能力培养的效果分析[J]. 物理与工程, 2018, 28(5): 110-113.
- [8] Lu, H.L. (2010) Research on Peer Coaching in Preservice Teacher Education—A Review of Literature. *Teaching and Teacher Education*, **26**, 748-753. <https://doi.org/10.1016/j.tate.2009.10.015>
- [9] Bao, L., Koenig, K., Xiao, Y., Fritchman, J., Zhou, S. and Chen, C. (2022) Theoretical Model and Quantitative Assessment of Scientific Thinking and Reasoning. *Physical Review Physics Education Research*, **18**, Article ID: 010115. <https://doi.org/10.1103/physrevphyseducres.18.010115>
- [10] Grooms, J., Enderle, P.J., Hutner, T., *et al.* (2016) *Argument-Driven Inquiry in Physical Science: Lab Investigations for Grades 6-8*. NSTA Press.
- [11] Topping, K. and Ehly, S. (1998) *Peer-Assisted Learning*. Routledge.
- [12] Falchikov, N. (2003) *Learning Together: Peer Tutoring in Higher Education*. Routledge.
- [13] Topping, K.J. (2005) Trends in Peer Learning. *Educational Psychology*, **25**, 631-645. <https://doi.org/10.1080/01443410500345172>
- [14] McMillan, J.H. and Forsyth, D.R. (1991) What Theories of Motivation Say about Why Learners Learn. *New Directions for Teaching and Learning*, **1991**, 39-52. <https://doi.org/10.1002/tl.37219914507>
- [15] 高嵩, 汪莹莹, 蔡阳健. ADI 模式下培养物理师范生科学推理能力实证研究[J]. 高等理科教育, 2024(4): 45-56.
- [16] 张春莉, 吴加奇, 姜国伶. 同伴互助配对方式对解决数学问题能力的影响[J]. 教育学报, 2019, 15(1): 74-81.
- [17] Paulus, P. (2000) Groups, Teams, and Creativity: The Creative Potential of Idea-Generating Groups. *Applied Psychology*,

- 49, 237-262. <https://doi.org/10.1111/1464-0597.00013>
- [18] Fischer, F., Kollar, I., Stegmann, K. and Wecker, C. (2013) Toward a Script Theory of Guidance in Computer-Supported Collaborative Learning. *Educational Psychologist*, **48**, 56-66. <https://doi.org/10.1080/00461520.2012.748005>
- [19] Gagné, R.M. (1985) *The Conditions of Learning and Theory of Instruction*. Holt, Rinehart and Winston.
- [20] Mercier, H. and Sperber, D. (2011) Why Do Humans Reason? Arguments for an Argumentative Theory. *Behavioral and Brain Sciences*, **34**, 57-74. <https://doi.org/10.1017/s0140525x10000968>
- [21] Laurillard, D. (1993) *Rethinking University Teaching: A Framework for the Effective Use of Educational Technology*. Routledge.
- [22] Dunbar, K. (1995) How Scientists Really Reason: Scientific Reasoning in Real-World Laboratories. In: *The Nature of Insight*, The MIT Press, 365-396. <https://doi.org/10.7551/mitpress/4879.003.0017>
- [23] Shaffer, D.W., Collier, W. and Ruis, A.R. (2016) A Tutorial on Epistemic Network Analysis: Analyzing the Structure of Connections in Cognitive, Social, and Interaction Data. *Journal of Learning Analytics*, **3**, 9-45. <https://doi.org/10.18608/jla.2016.33.3>