



ScienceDirect上提供目錄列表

電腦與教育

期刊主頁 :www.elsevier.com/locate/compedu

電腦模擬在科學教育中的學習效果

Nico Rutten a, * , Wouter R. van Joolingen

^b 揚·T·范德維恩

^a 荷蘭特溫特大學教師教育、科學傳播與學校實踐研究所 ·郵政信箱 217 ·7500 AE 恩斯赫德 ·荷蘭
荷蘭特溫特大學行為科學學院 ·郵政信箱 217 ·7500 AE 恩斯赫德 ·荷蘭

文章訊息

文章歷史：
2010年12月23日收到
已收到修改稿
2011年6月29日
2011年7月30日接受

關鍵字：
互動式學習環境
中等教育
模擬

抽象的

本文回顧了過去十年關於電腦模擬在科學教育中學習效果的（準）實驗研究。重點關注兩個問題：電腦模擬如何增強傳統教育，以及如何最佳地利用電腦模擬來改善學習過程和結果。我們報告了將電腦模擬作為傳統教學的替代或補充的研究。具體而言，我們檢視了資訊視覺化方式、教學支援方式以及電腦模擬在教學情境中的嵌入方式等方面的變化所產生的影響。回顧的文獻提供了強有力的證據，顯示電腦模擬可以增強傳統教學，尤其是在實驗活動方面。然而，在大多數研究中，電腦模擬的使用並未考慮教師支援、教學情境以及電腦模擬在課程中的位置等因素可能產生的影響。

2011 Elsevier Ltd. 保留所有權利。

1. 引言

電腦及相關設備（例如智慧白板和行動裝置）的日益普及，以及電腦模擬技術在眾多科學學科中的應用（例如，2011 年在 <http://phet.colorado.edu> 上發布的 PhET 模擬系統），使得模擬教學成為許多科學課程不可或缺的一部分。這就引出了一個問題：如何才能更好地利用模擬技術來促進科學學習？如同 de Jong 和 van Joolingen (1998) 在其綜述中所指出的，電腦模擬技術的應用研究由來已久。在本篇綜述中，我們探討了模擬技術在科學教育領域的最新進展，重點在於如何利用模擬技術來增強傳統教學，以及如何將其融入教學支援體系以促進學習過程。我們也分析了這些介入措施對學習過程和學習成果的影響。

根據 de Jong 和 van Joolingen (1998) 的定義，電腦模擬是「包含系統（自然或人工；例如設備）或製程模型的程式」。在科學課堂中使用電腦模擬有可能以前所未有的方式提升學習效果 (Akpan, 2001)。與教科書和講座相比，電腦模擬學習環境的優勢在於，學生可以系統地探索假設情境，與簡化的過程或系統進行交互，改變事件的時間尺度，並在無壓力的真實環境中練習任務和解決問題 (van Berkum & de Jong, 1991)。當學生在模擬中發現後續事件證實了預測結果，並理解這些事件的成因時，就能加深對某一現象的概念性理解 (Windschitl & Andre, 1998)。促使教師使用電腦模擬的可能原因包括：節省時間，使他們能夠將更多的時間用於學生，而不是用於設定和監督實驗設備；實驗變數易於操縱，從而可以提出和檢驗假設；以及提供各種表示方法來幫助理解，例如圖表和圖形 (Blake & Scanlon, 2007)。

透過強調學習者在知識獲取過程中的正面作用，電腦模擬可以支持真實的探究實踐，包括提出問題、建構假設、收集資料和修正理論。透過逐步完成模擬，學習者可以推論出模擬概念模型的特徵，這可能會導致學習者原有概念的改變 (de Jong & van Joolingen, 1998)。透過積極引導學習者參與探索和發現，電腦模擬可以有效促進學習者在知識獲取過程中的積極參與。

* 通訊作者。電話 :+31 53 489 5627；傳真 :+31 53 489 4755。

電子郵件地址：nprutten@utwente.nl (N. Rutten)、wrvanjoolingen@utwente.nl (WR van Joolingen)、jtvanderveen@utwente.nl (JT van der Veen)。

實踐學習可以成為強大的學習工具，因為實踐學習比聽、讀、看學習更容易記住（Akpan, 2001）。

儘管以學習者為中心而非以教師為中心的教育趨勢使得這種發現式學習方法廣受歡迎（Veermans, van Joolingen 和 de Jong, 2006），但教師向學習者移交控制權的程度並非絕對。如果電腦模擬中對發現式學習過程的支持不足，學習者在產生和調整假設、設計實驗、解釋數據以及調節學習方面就會遇到困難（de Jong 和 van Joolingen, 1998）。

減少指導顯然會導致探究式學習效果的下降。儘管提供學習支援在一定程度上限制了學生自由探索模擬環境的可能性，但它提供的支架式教學可以提高他們在基於模擬的學習中的表現（van Berkum & de Jong, 1991）。

近年來，學習技術失去了最初的光環，因為它們在引入時往往被過度誇大了對學習過程和結果的影響，但事後卻未能達到這些預期（Dillenbourg, 2008）。過去十年關於電腦模擬在科學學習中的應用研究，對於其在這方面的教育效果有何啟示？它們的應用是否可取？就其作為教學介入手段的有效性而言，它們是否可靠？

我們首先對科學學習中教育電腦模擬幹預措施的研究進行了調查，旨在將這些幹預措施的主題歸類。隨後，我們考察了能否從這些主題的角度推斷電腦模擬的有效性。換言之，本研究旨在回答以下研究問題：

如何透過應用電腦模擬來增強傳統科學教育？

如何才能最好地利用電腦模擬來支持學習過程和成果？

我們也對研究人員在多大程度上考慮教師在指導學生學習過程中的作用很感興趣。在進行模擬工作時。

我們根據文獻檢索結果對主題進行了分類，這只是一種組織這些結果的可能方法。因此，我們當然不認為這種分類是全面的。然而，從這些主題的角度更清晰地了解電腦模擬的有效性，可以為制定教師指導方針奠定基礎，從而在學生使用電腦模擬時提供有效的指導。

2. 方法

2.1 數據收集

為了回答研究問題，我們檢索了三個資料庫以查找相關研究文章：ERIC（2011）、Scopus（2011）和ISI Web of Knowledge（2011）。檢索工作始於2009年9月21日，並持續進行以追蹤文獻變化，直至2011年4月14日完成最終檢索。我們將檢索範圍限定在過去十年（2001-2010年）。我們使用以下關鍵字檢索期刊文章和綜述：[「電腦模擬」或「互動學習環境」]、[科學或物理或化學或生物或數學]以及[「教育」或「指導」和「教學」或「訓練」]。ERIC檢索結果為333篇文章。Scopus檢索結果（進一步限定為[社會科學或心理學]）為163篇文章。在ISI Web of Knowledge資料庫中，我們進一步限定檢索範圍為[教育與教育研究 OR 心理學 OR 行為科學]，共檢索到89篇文章。透過比較總共585篇文獻，我們發現其中75篇重複。剔除這些重複文獻後，最終得到510篇唯一文獻。

為了確定相關文獻是否真正屬於我們所理解的電腦模擬範疇，我們首先檢驗了de Jong和van Joolingen（1998）對電腦模擬的定義（如前所述）是否適用。我們認為與模擬互動的可能性是其本質特徵，這使其區別於動畫（教學動畫，Höffler和Leutner, 2007對此進行了精彩的評論）。我們專注於12至20歲的學生，因為這是他們獲得基礎科學知識的關鍵時期。除其他相關的STEM學科（技術、工程和數學）外，其他領域的電腦模擬研究均被排除在外。建模研究也被排除在外，因為建模可以被視為一個獨立的研究領域。我們尤其關注那些將電腦模擬應用於教育目的的研究。因此，我們選擇了那些利用電腦模擬來改變知識和/或技能，並對這些改變進行定量測量，且對不同組別和/或前後測結果進行比較的研究。由於我們對學習效果測量的興趣促使我們專注於（準）實驗研究，因此應用這一標準不可避免地排除了一些雖然探討了相關問題，但並未側重於實證幹預的研究，例如Concord聯盟關於分子工作台的研究（Pallant & Tinker, 2004；Tinker & Xie, 2008）以及物理教育技術（PhET）stein Wieman, 2006；Wieman & Perkins, 2005, 2006）。

僅描述電腦模擬設計或僅使用主觀判斷（如回饋問卷）作為唯一測量工具的研究被排除在外。為確保文獻質量，我們排除了未在ISI Web of Knowledge（2011）資料庫中註冊的期刊發表的研究。在應用所有排除標準後，最終保留了51篇文獻，其中48篇為實證研究，3篇為綜述。

2.2 定性分析

在研究了每篇文獻的內容之後，我們試圖透過檢視各研究介入措施之間的一致性，來尋找對這些研究進行分類的方法。我們區分出以下幾個主題，這些主題有助於將這些研究中涉及的干預措施聯繫起來：表徵方式的差異；沉浸程度（虛擬環境使用者實際感受到自己身處其中的程度）；教學支持；遊戲化；參與度；教師指導；以及協作。

對電腦模擬和傳統教學進行總體比較的研究，因此較少關注特定主題，將被單獨審查。在根據主題相關性對每項研究的干預措施進行相應評分後，

我們認為，將遊戲和參與度視為獨立類別是不合理的，因為這兩個主題分別僅在兩項研究中受到關注。本綜述根據剩餘主題進行組織，並將其歸納為四大類：利用電腦模擬增強傳統教學（包括傳統教學和實驗活動）、不同類型的視覺化（包括表徵和沉浸式）、不同類型的教學支持，以及課堂設置和教學場景（包括參與度、教師指導和協作）。我們將視覺化與表徵區分開來，因為使用不同的媒介，例如立體眼鏡和電腦螢幕，可以以不同的方式呈現相同的表徵。只要研究條件僅限於電腦螢幕，我們就稱之為不同表徵之間的比較；一旦使用其他媒介，例如混合現實技術，或不同條件下使用的媒介不同，我們就使用「視覺化」一詞。顯示隨時間變化的過程的表徵被稱為動態表徵（Ainsworth & VanLabeke, 2004）。

2.3 統計分析

在相關且可行的情況下，我們計算了效應量。我們採用Thalheimer和Cook (2002)的方法，根據研究中提供的資料計算Cohen's d 。儘管Thalheimer和Cook (2002)提供了五種不同的Cohen's d 計算方法，但有19項研究的資料不足以進行計算，因此無法進行統合分析。在報告了介入效果的研究中（43項研究），Cohen's d 缺失的原因包括：t檢定或F檢驗，或可用於計算t檢定或F檢定的資料缺失（12項研究）；或統計資料僅以詳細形式報告，無法計算與作者總體結論相關的效應量（7項研究）。

3. 結果

在對已發表的文獻進行回顧時，所有研究都被歸入四大類：每類又細分為若干具體主題：利用計算機模擬增強傳統教學，細分為計算機模擬與傳統教學以及實驗活動與計算機模擬；不同可視化方式的比較，細分為不同類型的表徵方式和不同程度的沉浸感；不同教學支持方式的比較，以及從課堂支持的情況細分為科學和教學環境的支持程度。毋庸置疑，大多數研究並非僅關注單一主題，而是試圖兼顧多個主題。因此，我們對研究的分類是基於每項研究的核心介入措施。

例如，Gelbart、Brill 和 Yarden (2009)、Mitnik、Recabarren、Nussbaum 和 Soto (2009)、Manlove、Lazonder 和 de Jong (2006) 以及 Saab、van Joolingen 和 van Hout-Wolters (2007) 的研究都考慮了合作因素，但這些研究均未被歸類為這些研究均未被分類。這是因為，儘管這些研究的實驗組和對照組都包含合作學生，但它們的研究重點卻在於其他方面。

3.1. 利用電腦模擬增強傳統教學

本節的17項研究的共同之處在於，它們都探討了電腦模擬作為傳統教學的補充或替代方案的效果，而不是比較不同類型的模擬。我們首先討論研究方法相對多樣化的研究，然後討論專門探討電腦模擬在實驗室活動中應用的研究。表1提供了本節所回顧研究的具體資訊。

3.1.1. 電腦模擬與傳統教學

Jimoyannis 和 Komis (2001) 比較了一組接受傳統課堂教學的學生和一組同時接受傳統課堂教學和電腦模擬的學生。他們研究了這種幹預措施對學生理解地球引力場中簡單運動的基本運動學概念的影響。結果顯示，除了傳統教學外還使用電腦模擬的學生在研究任務中取得了顯著更高的成績。因此，研究人員認為，電腦模擬可以作為其他教學形式的補充或替代，以幫助學生理解速度和加速度。Stern、Barnea 和 Shauli (2008) 也進行了類似的研究，他們比較了兩組學生，兩組學生都學習了分子運動論課程。實驗組隨後額外花費課堂時間使用電腦模擬程式「粒子世界之旅」。在衡量學生對此理論理解的測驗中，實驗組學生的得分顯著高於對照組學生（Cohen's $d = 0.81$ ）。然而，整體成績非常低，長期學習效果差異微乎其微。作者認為這是由於缺乏有效的教學策略，例如未能充分利用學生的現有知識，以及未能引導學生正確理解學習經驗。

McKagan、Handley、Perkins 和 Wieman (2009) 的研究調查了物理課程改革的效果；其中一項改革是在課程中引入了光電效應的電腦模擬。考試成績的提高表明，改革後的課程提高了學生預測光電效應實驗結果的能力。然而，學生邏輯地將觀察結果與推論連結起來的能力並未提升。作者認為，這可能是學生普遍缺乏從觀察結果中進行邏輯推論的推理能力的表現。由於該研究並未對所採用的學習方法進行單獨考察，因此很難就電腦模擬的有效性得出結論。

Gelbart等人 (2009) 在遺傳學領域比較了研究模擬與常規課堂教學，發現電腦模擬對學習成果有顯著的正面影響。他們透過測試學生對是非題的正確回答能力 ($d = 0.87$) 以及解釋其選擇的能力 ($d = 0.80$) 來衡量學生的理解程度。此外，根據學生利用機會熟悉研究實踐的方式不同，可以區分出兩種學習類型：與更注重任務的學生相比，更注重研究的學生似乎更能擴展他們的知識。Riess 和 Mischo (2010) 也透過調查學生的任務表現以及他們解釋答案的能力來評估電腦模擬的學習效果。學生的任務是培育一片模擬森林，以體驗將森林作為人工生態系統進行管理的短期和長期影響。結果表明，系統

表1

利用電腦模擬增強傳統教學。

第一作者 (出版年份)	科學學科認知主題	N	幹預措施	結果/結論	效應量 (科恩d值)
電腦模擬與傳統教學					
Gelbart等人 (2009)	生物學 遺傳學	95	電腦模擬與常規課堂作業	更好地理解	0.87 (聲明) 0.80 (解釋)
學習方法 :研究導向 vs. 任務導向 ;更多知識拓展 ;模擬與課程 vs. 傳統教學 ;更高學習效益					
里斯和米肖 (2010)	生態系森林	424			0.37 (成就) 0.13 (理由) 0.21 (理由)
Kiboss等人 (2004)	細胞理論	102	僅授課 vs. 傳統教學 電腦輔助模擬課程 與傳統教學相比	知識和績效的提升 對課堂的認知改善 環境	1.54** 2.78**
Duran等人 (2007)	工程 馬達	250	軟體教學法與傳統教學法的比較	對主題的態度有所改善 學生之間以及學生與學生之間需要更多討論。 與老師一起進行腦力激盪 學生滿意度更高 ,更多 參與和主動性	2.16** * *
吉莫伊安尼斯和 Komis (2001)	物理 軌跡運動	90	傳統教學與電腦模擬結合 與不使用電腦模擬的傳統教學相比	更好地理解	*
Stern等人 (2008)	分子運動論 133		傳統教學與電腦模擬結合 與不使用電腦模擬的傳統教學相比	短期內更能理解 (然而 ,長期來看並無差異)	0.81
McKagan等人 (2009)	光電效應	47	電腦模擬與傳統教學	更好的預測結果能力	*
實驗室活動和電腦模擬					
Gibbons等人 (2004)	生物學 染色體分析	研究 1 :47	虛擬方法與實際方法	學習時間縮短	3.56 (練習) 2.36 (評估)
	生物資訊學	研究 2 :30		評估分數提高	0.71 (主題 1) 0.40 (主題 2)
White等人 (2010)	蛋白質結構	477	電腦模擬與視覺化研究 1 :15 虛擬實驗室 (前測-後測)	學習收益方面沒有差異	*
Meir等人 (2005)	擴散			更好地理解	*
馬丁內斯·希門尼斯等 (2003)	化學 渗透作用	研究 2 :31	傳統方法與虛擬化學實驗室 與沒有虛擬功能的傳統方法相比	更好地理解這些技術 以及基本概念	*
	咖啡因萃取	274	化學實驗室 交互效應 :虛擬化學實驗室 以及最大的學習缺陷	最高進步	*
溫伯格和伯格 (2007)	茶 酸鹼滴定	研究 1 :175	電腦模擬與實驗室練習	提出更多理論問題 在實驗室工作期間	*
		研究 2 :58		展現更複雜、更正確的用法 面試中化學知識的展現	*
Limniou等人 (2007)	黏度	88	實驗室預實驗模擬練習 與沒有預先模擬練習的實驗室相比	更好地理解	*
Dalgarno等 (2009)	實驗室熟悉度研究 1 :22 虛擬實驗室與真實實驗室對比研究 2 :35			在獲取方面的有效性沒有差異。	*
巴爾齊斯和庫基亞斯 (2009)	工程 類比電子學	518	模擬實驗室與實驗室 沒有模擬	熟悉實驗室	*
扎卡里亞 (2007)	物理 電路	90	模擬實驗室與實驗室 沒有模擬	更好的學業成績和更高的 對課程的興趣	0.70
Chang等人 (2008)	光學透鏡	研究 1 :153 研究 2 :231	模擬學習與實驗室學習	更好的概念理解	0.12 (提示) 0.17 (假設選單) 0.11 (步驟指導)
			抽象推理能力 :高 vs. 低	基於模擬的更多益處	0.06
			實驗提示或假設選單 與逐步指導相比	學習 更好的學習成績	0.03 (提示與步驟) 0.06 (菜單與步驟)

註:所有研究均依本綜述的討論順序排列,並依科學學科分組。Cohen's d 的計算 :na 1/4 不適用; * 1/4 不可能 ;基於 Thalheimer 和 Cook (2002) 的方法; ** 1/4 相等
假設小組人數。

培養思考能力最有效的方法是提供具體的課程和探索電腦模擬的機會（成就 $\bar{M} 0.37$ ，合理性 $\bar{M} 0.13$ ）。

在Duran、Gallardo、Toral、Martinez-Torres 和 Barrero (2007)的研究中，他們同時關注了情緒和認知領域，以探討電腦模擬對學生學習動機和互動的影響。他們用一種以軟體為基礎的電腦模擬方法，取代了「電機與裝置」課程中的部分傳統教學方法。這種方法似乎激發了學生之間以及學生與教師在腦力激盪環節的討論。儘管認知領域的研究結果尚不明確，但情緒領域的研究結果表明，新方法對學生的滿意度產生了顯著影響。作者將這種提升歸因於在課堂上使用真實案例和展示即時模擬。此外，與傳統教學相比，新方法提高了學生的參與度和主動性。我們將在3.4.2節中對這項研究進行更詳細的闡述。Kiboss、Ndirangu 和 Wekesa (2004)的研究也同樣考慮了認知和情緒的效益。他們的電腦輔助模擬程式在生物學細胞理論方面取得了進步，提高了學生的學業成績 ($d = 1.54$)、學生對課堂環境的看法 ($d = 2.78$)以及他們對該學科的態度 ($d = 2.16$)，所有這些效果都非常顯著。

3.1.2 實驗活動與電腦模擬 多項研究致力於利用模擬技術幫助學

生為實驗活動做好準備。在Martinez-Jimenez、Pontes-Pedrajas、Polo 和 Climent-Bellido (2003) 的研究中，對照組和實驗組的學生都進行了從茶葉中提取咖啡因的實驗。實驗組的學生事先透過實驗前的模擬程序熟悉了實驗內容。

學生的表現評估指標包括：實驗操作、實驗報告品質、實驗問題解決能力、筆試成績。研究人員發現，使用預習模擬有助於學生更好地理解實驗操作中使用的技術和基本概念。學習能力最弱的學生從預習模擬中獲益最大。Baltzis 和 Koukias (2009) 的一項研究中，學習模擬電子學的學生被鼓勵在兩人一組進行實驗之前，先獨立完成電路模擬任務。這種幹預措施提高了學生對課程的興趣，並全面提升了他們的學業成績。

Winberg 和 Berg (2007)也進行了一項關於實驗前練習的研究。他們將學生在實驗練習中向老師提出的問題作為認知專注度的指標，並將訪談中學生自發性運用化學知識的情況作為知識可用性的指標。他們的實驗結果表明，在實驗開始前進行電腦模擬練習，能夠促使學生在實驗過程中提出更多理論性問題，並在訪談中展現更豐富的化學知識。因此，作者得出結論：旨在幫助學生將理論概念知識整合到認知圖式中的預習練習，不僅可以為學生提供反思的空間，還有助於他們在實驗過程中更好地掌握方向。同樣，Limniou、Papadopoulos、Giannakoudakis、Roberts 和 Otto (2007) 的研究表明，用協作式實驗前模擬練習來替代部分關於黏度的實驗課程，可以提高學生對相關內容的掌握程度。

在最近的一項研究中，Dalgarno、Bishop、Adlong 和 Bedgood (2009)比較了三維虛擬實驗室 (VL) 和真實實驗室 (RL) 在幫助學生熟悉實驗室空間結構及其儀器設備方面的效用。在虛擬實驗室組探索完模擬環境（見圖 1）後，真實實驗室組參觀了實際實驗室，隨後所有學生都接受了測試，以檢驗他們對實驗室佈局的記憶以及對儀器設備的熟悉程度。研究人員得出結論：虛擬實驗室是幫助學生熟悉實驗室環境的有效工具。

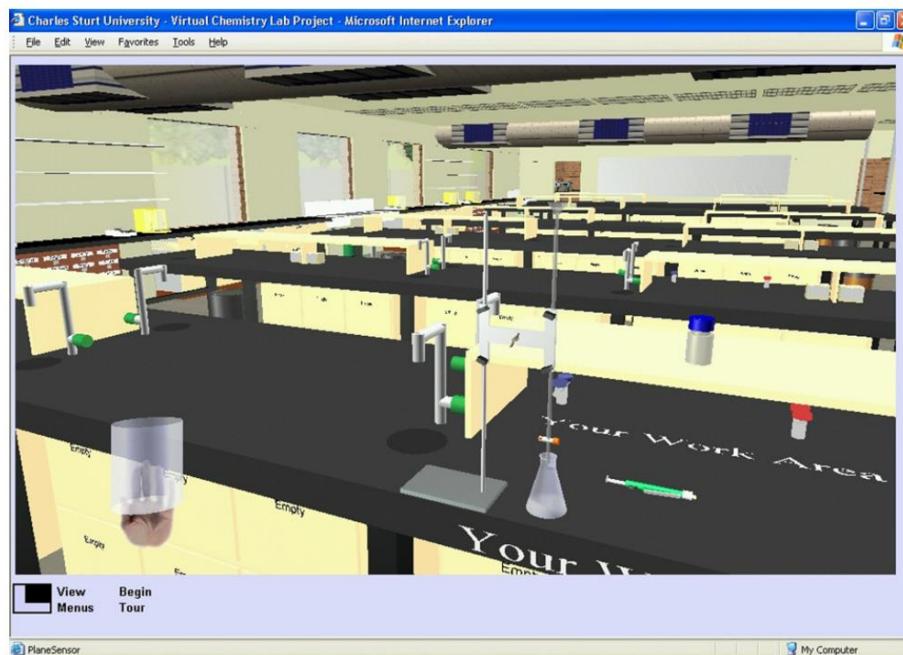


圖 1. Dalgarno 等人 (2009)研究的虛擬化學實驗室。經許可印製。

Zacharia (2007) 在研究所謂真實實驗 (RE) 和虛擬實驗 (VE) 之間的差異時，將僅使用 RE 的對照組與結合使用 RE 和 VE 的實驗組進行了比較（見圖2）。結果表明，在實驗的特定部分以 VE 取代 RE 對學生對電路概念的理解有正面影響，這透過概念測試得到證實 ($d = 0.70$)。Gibbons、Evans、Payne、Shah 和 Griffin (2004) 也在生物資訊課程中研究了虛擬實驗室與真實實驗室作為學習機制的有效性。基於他們的第一項研究，他們認為虛擬實驗室可以為學生節省大量時間，且不影響學習效果 ($d_{practice} = 3.56$ 和 $d_{assessment} = 2.36$ ，兩者對學習時間的影響都非常大，其中練習和評估分別指有即時回饋和無即時回饋的練習)。在第二項研究中，他們發現虛擬實驗室不一定能提高學業成績：虛擬實驗室超越傳統實驗室的潛力取決於所呈現材料的性質 ($d_{topic\ 1} = 0.71$ ， $d_{topic\ 2} = 0.40$)。在一項關於蛋白質結構的研究中，White、Kahriman、Luberice 和 Idleh (2010) 將傳統教學與 3D 視覺化和模擬教學進行了比較，後者展示了改變胺基酸序列對蛋白質折疊的影響。作者得出結論，他們的視覺化和模擬教學活動的學習效果相當，而且這些活動比傳統教學更有效。Meir、Perry、Stal、Maruca 和 Klopfer (2005) 研究了另一個名為 OsmoBeaker 的虛擬實驗室，該實驗室允許學生在分子層面上進行基於探究的擴散和滲透實驗。儘管模擬實驗室有助於提高理解力，並能幫助學生剋服誤解，但作者強調，模擬實驗附帶的書面說明在促進學習方面起著關鍵作用，因為僅僅向學生展示模擬環境是不夠的。

Chang、Chen、Lin 和 Sung (2008) 比較了電腦模擬與傳統實驗室學習，以及不同的輔助學習模式。他們也研究了抽象推理能力是否會影響學生從模擬中學習的程度。結果表明，與傳統實驗室實踐相比，使用模擬學習光學透鏡能顯著提高學習效果（儘管所有效應量都很小：實驗提示 vs. 實驗室 = 0.12，假設菜單 vs. 實驗室 = 0.17，步驟指導 vs. 實驗室 = 0.11）。抽象推理能力較強的學生似乎從基於模擬的學習中獲益更多 ($d = 0.06$ ，效應可忽略不計)。作者得出結論，幫助學生建立假設是支持基於模擬的學習的有效方法。然而，他們也提醒，在實驗過程中提供支持會限制學生的自由度，因為他們必須遵循提供的步驟，這可能會削弱他們的學習效果。

3.1.3. 總結與討論

已發表的研究對比了電腦模擬與傳統教學的應用，結果表明，電腦模擬能夠有效提升傳統教學的效果。在傳統教育中，電腦模擬可以作為一種有益的補充，例如作為實驗前的練習或視覺化工具。大多數情況下，模擬教學能改善學習效果，效應量最高可達 1.54。在認知領域，電腦模擬的使用似乎有助於學生理解概念 (Jimoyiannis & Komis, 2001; Meir et al., 2005; Stern et al., 2008; Zacharia, 2007)，減少教學時間 (Gibbons et al., 2004)，並提高學生預測實驗結果的能力 (McKagan et al., 2004)，並提高學生預測實驗結果的能力 (McKagan et al., 2004)，並提高學生預測實驗結果的能力 (McKagan et al., 2009)。在情緒領域，電腦模擬可以積極影響學生的滿意度、參與度和主動性 (Duran et al., 2007)，並改善他們對課堂環境的感知 (Kiboss et al., 2004)。專門研究將電腦模擬用作實驗前練習工具的研究表明，

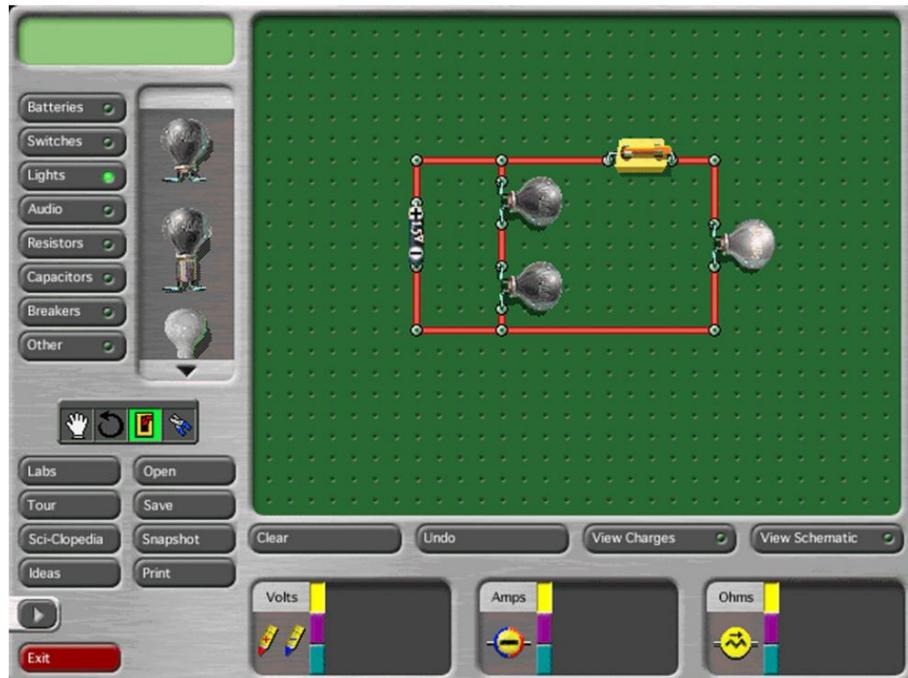


圖 2. Zacharia (2007) 研究的虛擬實驗室電力環境。經許可轉載。

研究表明，這些預習課程能夠有效幫助學生熟悉實驗室環境（Dalgarno et al., 2009），提高學生的認知專注力（Winberg & Berg, 2007），幫助學生更好地理解實驗技術和基本概念（Martinez-Jimenez et al., 2003），並增強學生對課程的興趣，從而提高學業成績（Met. 2007）。Martinez -Jimenez et al. (2003)也指出，學習能力最弱的學生從預習課程中獲益最多。

利用電腦模擬增強傳統教學的研究成果令人鼓舞，多數研究報告稱，認知和情感領域均有所提升。然而，需要注意的是，短期內理解力的提高並不一定能帶來長期的實質學習——正如Stern等人（2008）所指出的——而且此類研究大多僅考察了短期效果。為了確保實現實質學習，必須調整教學策略和課程設定以適應模擬的使用，反之亦然（Stern等人，2008），例如鼓勵學生採用研究導向的方法（Gelbart等人，2009）或將課程重點放在培養科學推理能力上（McKagan等人，2009）。

3.2 不同類型視覺化的比較

除了研究電腦模擬能否增強傳統教學之外，許多研究人員也將注意力集中在如何實施電腦模擬這一問題上。相關研究探討了模擬過程的可視化方法、具體的輔助措施以及課堂環境和教學場景的配置等問題。本節回顧了比較不同視覺化方法的7項研究。我們先討論呈現方式的差異，然後探討透過使用不同媒介來改變學生的沉浸程度。表2提供了本節回顧的研究的具體細節。

3.2.1. 不同的表徵方式 為了探究動態表徵能否提

升學生對折線圖的理解，Ploetzner、Lippitsch、Galmbacher、Heuer 和 Scherrer (2009) 對比了不同組別的學生，這些組別分別使用了不同的模擬運動現象、動態折線圖、動態表徵和動態圖示圖。在初步研究中，學生似乎無法利用動態表徵來提升他們對折線圖的理解。研究人員假設效果不佳是由於支持不足造成的，因此他們進行了第二項研究，在動態表徵的設計基礎上補充了教學措施。在學習過程中，學生可以向老師和同伴提問並獲得幫助，從而澄清他們的疑問。結果表明，將表徵與輔助教學措施相結合比單獨使用動態表徵更能有效地促進學習。

表2 不同視覺化方式的比較。

第一作者（發表年份）	科學學科認知主題 N		幹預措施	結果/結論	效量 (科恩d值)
不同類型的表現形式 特雷和可汗 (2008)	化學 (2008)	勒夏特列 原則	15 採用動態類比的電腦模擬與不採用動態類比的電腦模擬	加強科學中不可觀察現象 的學習	1.45**
戈德斯通父子 (2005)	普通科學 競爭性專業化		研究 1 : 84 具體性消退或具體性引入 vs. 始終理想化或始終具體 研究 2 : 88 具體性消退與具體性引入，研究 1 : 111 個動態視覺化 案例，採用教學措	模擬本身的性能有所提升 更好地轉移到另一個 模擬環境 性能更佳	0.65 (1) 和 0.58 (2) 0.86 (1) 和 0.66 (2)
Ploetzner等人 (2009)	物理	運動學	施的研究 2 : 24 個動態視覺化案例，不採用教學措施的動態視 覺化案例 措施	提高對折線圖的理解	*
不同程度的浸入 莫雷諾和梅耶 (2004)	生物學	植物學	48 個人化客服資訊與非個人化客服訊息 沉浸式體驗：頭戴式顯示器與桌面顯示器 措施	在記憶力測驗和問題解決能力測 驗中表現更佳 雖然報告的實際到場率較高， 但在記憶維持和遷移測驗的 表現並無差異。	0.94 (記憶保持) 1.79 (問題解決) 納
Trindade等人 (2002年)	化學	分子動力學和 原子軌道	20 使用立體眼鏡進行 3D 虛擬環境視覺化與在螢幕上 進行 3D 虛擬環境視覺化的對比	沉浸感較強，但對概念理解的 貢獻不大	*
伯奇菲爾德和 Megowan-Romanowicz (2009)	地球科學	地質演化	72 混合實境學習環境（前測-後測）	學生討論交流增多，考試成績提高	*
Mitnik等人 (2009)	物理	運動學	23 機器人與電腦模擬	更強的圖表解讀能力、更高的工作 動機和更強的協作能力	1.14（技能）

註：所有研究均依本綜述的討論順序呈現，並依科學學科分組。Cohen's d 的計算：na 1/4 不適用；* 1/4 無法計算，基於Thalheimer 和 Cook (2002) 的方法；** 1/4 假設組間樣本量相等。

Trey 和 Khan (2008)特別關注利用電腦類比來模擬不可直接觀察的科學現象。他們讓兩組學生體驗一個關於化學平衡行為的電腦模擬。此模擬以動態的方式展現了勒夏特列原理在平衡態穩定性方面的應用。在模擬過程中，一組學生使用模擬的類比範例進行學習；另一組學生則被要求回想先前兩組學生都已接觸過的、以文字和圖片形式呈現的靜態類比。結果表明，與以文字和靜態圖片形式呈現的類比相比，動態、互動式且融入電腦模擬的類比對學習效果的影響更大 ($d = 1.45$ ，效果非常顯著)。

Goldstone 和 Son (2005)的研究重點在於如何以最佳方式呈現模擬材料，並探討其在具體化和理想化維度上的表現。這指的是細節的多寡以及圖形元素所包含的資訊量是否足以識別所代表的真實世界具體實體。他們進行了兩項實驗，比較了四種情況，其中操縱了兩個模擬中第一個模擬的具體性：始終使用具體元素、始終使用抽象元素、具體性逐漸減弱以及具體性引入。結果表明，學生在模擬本身和遷移測驗中的表現存在差異。雖然具體元素對模擬本身的表現支持最佳，但理想化的圖形似乎更能有效地促進學生將所學知識遷移到抽象相關的模擬中。作者建議結合具體和理想化兩種形式，這一結論與預測當圖式被多次實例化時會形成更普遍圖式的理論相一致（例如，Gick & Holyoak, 1980, 1983）。最有效的順序似乎是從具體表徵開始，並隨著時間的推移使其變得更加理想化。

3.2.2. 不同程度的浸沒

上文討論的電腦模擬程式均透過電腦螢幕呈現給學生。為了探討沉浸感的影響，研究人員在後續研究中特別關注了透過其他媒體呈現模擬程序的效果。

Trindade, Fiolhais 和 Almeida (2002)使用名為「虛擬水」的 3D 虛擬環境，比較了在螢幕上觀看模擬內容和使用立體眼鏡觀看模擬內容的效果。他們也研究了學生的空間能力對理解模擬內容概念的影響。他們的研究表明，對於空間能力較強的學生而言，3D 虛擬環境可以幫助他們更好地理解某些內容，尤其是那些具有強大互動性的內容。然而，儘管立體視覺確實能提供一定的沉浸感，但它似乎對概念理解的貢獻並不很大。

在Moreno 和 Mayer (2004)的一項研究中，學生學習設計植物的根、莖和葉，使其能夠在五種不同的虛擬實境環境中生存。研究基於兩種不同的方法論開發了兩種幹預措施：一種是基於教學媒體的方法，遊戲透過桌上型電腦（低沉浸感）或頭戴式顯示器（高沉浸感）呈現；另一種是基於教學方法，以個性化（例如，使用「我」和「你」）或非個人化（例如，第三人稱獨白）的方式與學生對話。結果表明，與正式的對話方式相比，以對話方式與學生對話能更深入地學習 ($d_{retention} = 0.94$, $d_{problem solving} = 1.79$ ，效果非常顯著)。然而，儘管學生報告在高沉浸感下比在低沉浸感下有更高的沉浸感，但這種前沿的教育技術並沒有提高學生在記憶保持和遷移測試中的表現。因此，作者建議僅當沉浸感是教學的重點時才使用高沉浸式虛擬實境技術，而不要為了沉浸感本身而將其作為一種誘導身體臨場感的方式。

在本次文獻回顧中，Mitnik 等人 (2009)的研究是唯一一項將使用電腦模擬的學生組作為對照組的研究。研究著重探討了機器人輔助教學活動對提升學生繪製和解讀折線圖能力的影響。學生需要繪製移動機器人執行的不同線性運動的曲線圖。實驗組學生則在面對面的電腦輔助協作學習環境中進行這項活動，他們使用無線連接的手持設備和機器人。結果表明，機器人輔助活動在提高學生解讀折線圖的能力方面，效果幾乎是電腦模擬活動的兩倍 ($d = 1.14$ ，效應量非常大)。機器人輔助活動被認為更具激勵性，並促進了學生之間的合作。作者認為，與對照組不同，實驗組學生的動機並非源自於新鮮感，而是源自於對活動的沉浸感，而沉浸感激發了學生在整個實驗過程中的投入與參與。

SMALLab 是摒棄電腦螢幕作為模擬媒介的另一個例子：它是一個半沉浸式混合實境學習環境，將電腦產生的資料與現實世界的元素結合。Birchfield 和 Megowan-Romanowicz (2009) 在研究 SMALLab 在地球科學領域對學生主導的協作學習的潛在影響時發現，混合現實技術可以促進學生之間的討論交流，並提高學習成果。

3.2.3. 總結與討論

資訊通信技術的不斷發展促進了視覺化品質的提高，但這並不一定能轉化為更好的學習效果。

儘管視覺化確實產生了一些效果，最大效應量為 1.14，但大多數研究表明其效果並不顯著。關於不同表徵類型的比較，研究表明，具體表徵在模擬情境中能提供最佳支持，而理想化圖形則能最有效地促進向抽象相關模擬情境的遷移 (Goldstone & Son, 2005)。不僅建議結合不同類型的表徵，而且必須將表徵與輔助措施結合，因為輔助措施不足會降低效果 (Ploetzner et al., 2009)。需要注意的是，這些建議可能取決於所研究的領域以及參與者的特定任務。

一些研究者更進一步，對不同呈現方式進行了比較。他們不再局限於電腦螢幕作為唯一的呈現媒介，而是採用了多種不同的技術，從而能夠探討沉浸感的影響。例如，使用立體視覺來營造沉浸感，對測試表現的貢獻甚微 (Trindade et al., 2002)，甚至毫無貢獻 (Moreno & Mayer, 2004)。Moreno 和 Mayer 的研究發現，教學方式才是影響學習效果的更重要因素。

在三維虛擬環境中，較高的空間能力似乎有助於理解概念 (Trindade et al., 2002)。使用機器人不僅能有效讓學生沉浸在學習活動中，還能提升學習效果。

結果表明，混合現實技術能夠提高學生解讀折線圖的能力（Mitnik 等人，2009）。混合實境技術有潛力支持學生之間的討論交流和學習成果（Birchfield & Megowan-Romanowicz，2009）。

總的來說，與讓學生沉浸在虛擬實境中（例如，使用頭戴式顯示器或立體眼鏡）相比，將技術與現實相結合（例如，使用機器人或 SMALLab）似乎更能促進沉浸感，從而提高學習成果。

3.3 不同類型教學支援的比較

在對模擬環境下的發現式學習進行綜述時，de Jong 和 van Joolingen（1998）建議將學習問題分析和學習支持方法評估作為研究議程的主要內容。在本篇綜述中，教學支持顯然是研究最多的主題，本節收錄的19項研究便印證了這一點。我們首先回顧那些明確將其理論背景與科學發現式學習連結起來的研究，接著討論基於其他理論的研究。表3提供了本節所回顧研究的具體資訊。

3.3.1. 支持科學發現學習

Fund（2007）將四種不同的支架式教學要素（結構性要素、反思性要素、學科內容要素和拓展性要素）以四種不同的配置（從低支持到高支持）組合在一起，研究了這些支持項目對學生知識和理解的影響。研究發現，為解決問題提供通用框架的結構性要素產生了顯著差異，對學習成果產生了持續且強大的影響。然而，結構性要素和反思性要素的結合對於提升學習成果至關重要。反思性要素和學科內容要素均具有長期累積的益處。反思性要素似乎能夠激發後設認知過程，這可能是因為學生需要記錄解決方案，引發了內在對話。Zhang、Chen、Sun 和 Reid（2004）的研究也比較了不同類型的探究式學習支持測量。他們提出了一種支持科學發現式學習的三重方法：學習過程應以有意義的、系統性的和反思的方式進行。

Lindgren 和 Schwartz（2009）從感知和空間學習的研究角度出發，回顧了電腦模擬，並提出了四種學習效應來闡明模擬設計的各個方面：圖像優勢、注意力、結構化和調整。作者得出結論：模擬有助於學生更好地學習和適應非模擬環境。

然而，他們警告說，試圖使模擬環境和非模擬環境之間的相似度盡可能高，可能會削弱模擬的教學特性，例如精心選擇的圖像、對比鮮明的案例以及對事物的識別。

結構。

在相關研究的回顧中，Blake 和 Scanlon（2007）提出了一系列在遠距學習中有效利用模擬進行科學教學的特徵。他們總結道，為了在科學上發揮作用，模擬應基於真實的事件和數據。其他有用的特徵包括使用多種表徵和圖表，以及在實驗過程中即時觀察圖表變化。作者建議，所有模擬都應提供根據學生能力等級客製化活動的方法，並為學生提供敘述性說明，說明可以包含在模擬本身中，也可以透過附帶的註釋來實現。

Veermans等人（2006）比較了透過隱性啟發式和顯性啟發式進行支架式教學的效果（見圖3）。在隱性啟發式學習環境中，啟發式方法用於提供支持，但不直接提供啟發式方法本身；而在顯性啟發式學習環境中，啟發式方法本身也被明確地告知學生。結果表明，兩種情況下學生的領域知識均有所提高。過程分析表明，提供顯性啟發式方法有助於學生更好地進行自我調節。

為了檢驗整合和/或關聯多個動態表徵對學習效果的影響，van der Meij 和 de Jong（2006）在以「瞬間」這個物理主題為學習物件的實驗環境中設定了三種不同的條件：分離且未關聯的表徵（S-NL）、分離但動態關聯的表徵（S-DL）以及整合且未關聯的表徵（S-NL）、分離但動態關聯的表徵（S-DL）以及整合且動態關聯的表徵（I-DL）。結果表明，在表徵整合且動態關聯的條件下，參與者的學習效果普遍最佳。

處於該條件的參與者也認為學習環境最容易使用。整體而言，參與者透過使用該學習環境有所收穫。然而，與不進行關聯相比，簡單地動態關聯表徵並沒有帶來更好的學習效果。作者認為，在不同表徵之間進行心理轉換是獲得某一領域更深層知識的有效途徑。

Lazonder、Wilhelm 和 van Lieburg（2009）將學生分配到三個未知領域的探究式學習任務中，旨在探究學生僅僅掌握模擬情境中變數的知識是否足夠，還是也需要對這些變數之間的相互關係有基本的理解。具體任務包含已知變量，學生可以從中推斷出關於變量間關係的假設。中間任務也使用已知變量，但無法推斷變量間的相互關係。抽象任務包含未知變量，學生無法推論變數間關係的假設。結果表明，特定任務組的參與者表現更出色（ $d_{\text{具體}} > d_{\text{中間}} = 0.82$ ），效率更高，而中間任務組和抽象任務組的參與者在成績上沒有顯著差異。作者得出結論：對變數間相互關係的基本理解對於支持探究式學習的過程和成果至關重要。

Manlove等人（2006）研究了為協作探究式學習提供線上支援的可能性。學生以小組形式使用電腦模擬軟體，在流體動力學這一物理學科領域進行科學探究。對照組和實驗組都可以使用規劃支援工具。實驗組使用的工具包含額外的指導原則，包括目標和子目標的層級結構、提示和解釋，以及最終報告的範本。功能齊全的工具似乎更能支持學生的學習成果（ $d = 0.98$ ）和初始規劃（ $d = 3.5$ ，效果顯著）。儘管在協作科學發現式學習中提供指導原則能夠改善規劃活動，但對監控活動的影響尚無定論。Manlove、Lazonder 和 de Jong（2009）在最近的一項研究中也關注了科學探究式學習中的指導性軟體支架，研究人員特別關注是否存在差異。

表3

不同類型教學支援的比較。

第一作者 (出版年份)	科學 紀律	認知主題	N	幹預措施	結果/結論	效應量 (科恩d值)
支持科學發現學習 基金 (2007)	普通科學	各種科學 問題	473	支援計劃 :包含結構組件 與不含結構成分的相比 支援計劃 :結構組件 反射組件與結構組件 不含反射組件	更有效的工作模式 ,更好的 知識建構與理解 更注重建構主義的知識獲取 以及更深入的理解	*
Lazonder等人 (2009)		含義和 彼此之間的關係 變數	57	具體任務與中間任務 ;中間任務與抽象任務	更成功的表現 同樣成功的表現	0.82 納
張等 (2004)	物理	浮與沉	研究1:80 研究2:30	實驗支持和解釋 支持和反思性支持 vs. 無支持 啟發式方法 :隱式與顯式對比 沒有明確說明	更好 (有意義的、系統的、 反思性)發現式學習 加強自我監管	*
Veermans等人 (2006)		碰撞	30			
范德梅伊和 德容 (2006)		瞬間	72	表示形式 :整合 -動態鏈接 與分離的 '非關聯的'	低複雜度部分 :沒有差別 領域知識學習成果 高複雜度部分 :更好的學習 領域知識的結果 學習成果沒有差異	納 *
				表示形式 :分離的、動態連結的 與分離的 '非關聯的'	最輕鬆的工作體驗	納
				表示形式 :整合 -動態鏈接 與單獨的、動態連結的或單獨的相比 , 非關聯	0.99 (I,DL 與 S,DL 對比) 0.96 (I,DL 對 S,NL)	
Manlove等人 (2006)		流體動力學	17	支援工具與監管指南對比 缺乏監管指南的支援工具	更好的學習成果 更好的前期規劃	0.98 3.50
Manlove等人 (2009)			30	監理軟體的協作使用 支架式結構與個體對調控的使用 軟體鷹架	更高的學習成果 ,且無 頻率和持續時間的差異 調整支架的使用	0.23 (報告結構) 0.83 (報告內容)
Saab 等人 (2007)		碰撞	38對	RIDE協作指導與控制	更有效率的探索式學習 活動和更具建設性 溝通方面沒有差別 探索性學習成果	1.16 (模型品質) 納
從其他角度提供教學支持						
Ketelhut 和 Nelson , Ketelhut等 (2010)	生物學	流行病學 (2010)	500	實驗 :虛擬與物理	參與度或學習方面沒有差異 結果	納
			2000	課程變化 :專家建模和 指導或合法的邊緣參與 與引導式社會建構主義或控制 課程變化 :引導式社交 建構主義建模與專家建模 指導或合法的邊緣參與 或控制	多項選擇題測驗 :更好地理解 科學探究	*
Gonzalez-Cruz等人 (2003)	化學	酶動力學	119	指導 :中級指導與詳細指導 說明或最簡說明 額外課程或控制 指導 :中級指導 與最少的說明相比	短期目標 :更好地準備報告	*
李 (2007)		波以耳定律和 查理定律	257	視覺處理 :空間鄰近性以及 視覺線索支架與對照組	長期來看 :表現無差異	*
帕帕斯特吉烏 (2009)	電腦 科學	電腦記憶體	88	遊戲與非遊戲	高空間能力 :無差異 理解能力和表現 轉移測試 空間能力低 :表現較好 理解和遷移測試 在促進概念方面更有效 知識 更具激勵性 (樂趣、參與度) 。 以及利息)	0.32 (理解) 0.17 (轉移) 0.64 0.76

Barab 等人 (2009)	一般的科學	水質	51	沉浸式世界二元組或沉浸式世界 單一使用者與說明性教科書二元組 沉浸式世界互動與說明性教科書 二元組 沉浸式世界二元組與簡單框架 二元組或說明性教科書二元組 電腦模擬（前測-後測）	近端項目表現較佳 遠端項目表現更佳 開放式問題表現更佳 轉移任務 更深入的科學理解	1.39** (IW,D 對 ET,D) 1.25** (IW,S 對 ET,D) 1.51**
貝爾和特倫德爾 (2008)	物理	月相	50			1.09** (IW,Dvs.SF,D) 1.60** (IW,D 對 ET,D)
特倫德爾和貝爾 (2010)			157	觀察結果 :計算機模擬與 電腦模擬和來自自然界的對比 來自大自然 觀察結果 :計算機模擬以及來自 自然與電腦模擬 ,或來自自然 觀察結果 :電腦模擬與實際實驗 自然	在知識獲取方面沒有差異 月球形狀或解釋能力 月相成因 在知識獲取方面沒有差異 月序 更深入了解月球 序列	納 納 *
Gazit等人 (2005)	天文現象	天文	10	電腦模擬（前測-後測）	更深入的科學理解	*
克拉克和喬德 (2004)	熱力學	熱力學	120	整合觸覺模型的可視化 與沒有整合觸覺的可視化相比 模型	更好的解釋 更準確的預測	0.94 0.51
Kester等人 (2004)	電路	電路	88	資訊發布時機 :在 AND 之前提供支持 實踐過程中的程序性措施與實務前的支持性措施。 以及實踐前的程序 資訊發布時機 :在 AND 之前提供支持 實務中的程序性操作與支援性操作 以及實踐前的程序	資訊搜尋行為減少 資訊搜尋行為減少	1.18 1.35

註：Bell-Urhahne-Schanze 和 Ploetzner (2010)、Blake 和 Scanlon (2007) 以及 Lindgren 和 Schwartz (2009) 的綜述未包含在內。所有研究均按本綜述的討論順序呈現，並依科學領域分組。

學科。Cohen's d 的計算：na ¼ 不適用；* ¼ 不可能，基於 Thalheimer 和 Cook (2002) 的方法；** ¼ 假設組大小相等。

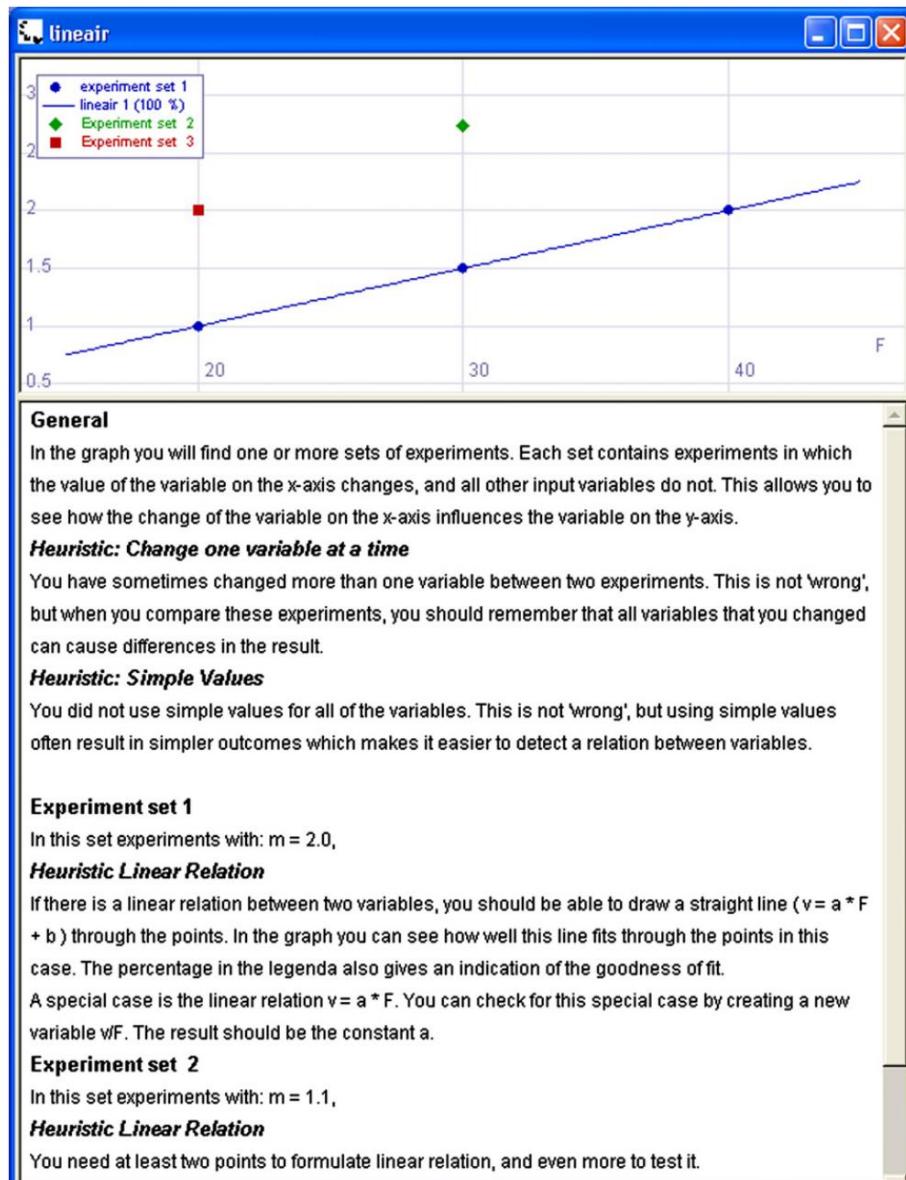


圖 3. Veermans 等人 (2006)研究的由隱式和顯式啟發式方法支持的科學發現學習。經許可轉載。

就調節支架的使用而言，結對學習和單獨學習之間存在差異。結果表明，結對學習在學習成果方面明顯優於單獨學習（dreport structure ¼ 0.23， dreport content ¼ 0.83， dmodel quality ¼ 1.16，效果非常顯著）。

與研究人員的預期相反，合作似乎並未對調節支架的使用產生任何影響，無論是兩人合作還是單人合作，調節支架的使用率都相當低。作者認為，這可能與一個長期存在的問題有關：工具的可用性並不意味著學生一定會使用它，也不意味著他們使用該工具是有效的。

Saab等人 (2007)研究了基於RIDE規則的指導語對協作發現式學習的影響。RIDE規則源自於他們從協作過程文獻中總結出的四個原則：尊重（Respect）、智慧協作（Intelligent collaboration）、共同決策（Deciding together）和鼓勵（Encouraging）。分析表明，RIDE指導語能夠促進更具建設性的溝通，並改善發現式學習活動。然而，研究並未發現其對科學發現式學習成果的直接影響。

3.3.2. 從其他角度提供教學支持

為了探討在學生進行酶動力學電腦模擬時應提供多少指導，Gonzalez-Cruz、Rodriguez-Sotres 和 Rodriguez-Penagos (2003)將接受三種不同程度指導（詳細、中等和極簡）指導的學生組與課堂上解決問題的學生組以及未接受額外指導的學生組進行了比較。結果表明，使用指導支援程序的學生比未使用該程序的學生獲益顯著。短期來看，中等指導更有利於學生撰寫報告；而長期來看，中等指導和極簡指導的效果相當。作者指出，在學生使用電腦模擬時給予一定的自由度更有益，前提是導師在之後仍能對他們的工作進行審查和點評。

因此，他們推薦的策略是中等程度的教學，既提供自由，也提供結構。

梅耶的空間鄰近性原理是李 (Lee, 2007)研究視覺處理對學生化學知識理解和遷移效果的基礎。此原理應用於螢幕上影像的距離，並透過在模擬中添加視覺線索支架來實現。實驗條件下改變了圖示的數量和相互關聯的圖示之間的距離，並增加了一個監控工具。研究也檢視了視覺處理與學生空間能力之間的交互作用。視覺處理顯著提高了學生在理解和遷移測驗中的成績 ($d_{comprehension} = 0.32$, $d_{transfer} = 0.17$; 均為小效應量)。研究也發現有交互作用：空間能力較弱的學生在處理組的表現優於對照組，而空間能力較強的學生無論在何種條件下均取得了相同的成績。

貝爾和特倫德爾 (2008)研究了電腦模擬在促進科學理解方面的有效性，他們將天文館軟體程式「星夜後院」(Starry Night Backyard)與月相教學相結合。電腦模擬作為一種可靠的資料收集方式，而非作為教學重點，發揮主導作用。因此，作者認為這項研究的結果支持了這樣一種假設：教育科技應該輔助現有的有效教學材料，而不是取代它們。後續研究 (特倫德爾和貝爾，2010)表明，無論是透過電腦模擬、自然觀察，還是兩者結合，都能有效地幫助學生學習月球形狀並解釋月相變化的原因。

然而，與僅基於自然觀察的學習相比，僅使用電腦模擬進行學習能使學生獲得更高的月球運行序列知識。Gazit、Yair 和 Chen (2005)也進行了關於學生天文現象概念理解發展的研究，重點關注學生使用「虛擬太陽系」的即時學習過程。儘管他們得出結論，他們的模擬可以支持科學理解的發展，但他們強調，如果缺乏足夠的定向和導航工具，學生的高互動表現可能不足以促進概念的形成。

克拉克和喬德 (2004)透過比較兩組在「探索周遭環境」課程中使用電腦模擬的學生，研究了在視覺化過程中整合實體模型對學生熱平衡概念修正的促進作用。在試圖理解物體觸感的原因時，實驗組的學生除了可以使用熱平衡視覺化模型外，還可以使用實體模型。這個實體模型包含一個不同的問題表徵，以及一個帶有箭頭的手的圖像。當點擊物體時，箭頭會根據手與物體之間的溫度梯度顯示手與物體之間的熱流。實驗組的學生似乎更了解熱平衡，他們不僅能更好地解釋物體觸感的原因 ($d = 0.94$)，還能更好地預測不同環境中物體的溫度 ($d = 0.51$)。

為了探討利用電腦模擬向學生提供不同類型資訊的最佳時機，Kester、Kirschner 和 van Merriënboer (2004)比較了四種資訊呈現方式。這些方式在兩個方面有所不同：一是輔助資訊的呈現時間（任務練習之前或期間），二是程序性資訊的呈現時間（任務練習之前或期間）。學生的資訊搜尋行為表明，他們最需要的是任務前的輔助資訊和任務練習期間的程序性資訊。作者認為，可以根據模擬過程中的具體任務要求，確定這些不同類型資訊的最佳呈現時機。

接下來的兩項研究透過引入遊戲元素來探討提供支援的方式。儘管我們將這兩項研究納入本次綜述是因為它們符合我們對電腦模擬的納入標準，但我們也意識到，這兩項研究的重點已經與遊戲這一獨立的研究領域有所交集。

Papastergiou (2009)的一項研究旨在確定一款關於電腦記憶概念學習的教育遊戲的學習效果和激勵作用。該研究比較了兩款教育應用程序，一款採用了遊戲化方法，另一款則沒有。遊戲化教學方法似乎能有效提升學生對電腦記憶的認知 ($d = 0.64$)，並且比非遊戲化教學方法更具激勵性 ($d = 0.76$)。儘管在樂趣、體驗和領域知識方面，男生比女生更積極參與電腦遊戲，但男生和女生透過遊戲學習的程度並無顯著差異。男生和女生對遊戲的激勵作用也相同。基於本研究結果，作者得出結論：數位遊戲化學習可以作為高中教育的一種教學環境，因為教育遊戲既能增加學生對學科知識的掌握，又能提高學生對學習過程的樂趣、參與度和興趣。

Barab等人 (2009)也研究了遊戲作為課程支架的應用，他們設計了一個基於3D遊戲的課程來教授水質概念。他們比較了四種不同的教學條件：講解式教科書雙人組、簡單框架雙人組、沉浸式世界雙人組和沈浸式世界單人組。這些條件使得我們可以將他們的研究結果與我們迄今為止綜述中已涵蓋的幾個主題聯繫起來。

在視覺化方面，兩種沉浸式世界條件在近端項目的表現均顯著優於非沉浸式說明文教科書條件 ($d_{IW,D}$ vs. $ET,D = 1.39$ 和 $d_{IW,S}$ vs. $ET,D = 1.25$ ，皆為非常顯著的效果)。本研究也與Moreno和Mayer (2004)的研究相關，因為Barab等人 (2009)比較了資訊以第一人稱撰寫的沉浸式世界條件和資訊以第三人稱撰寫的簡單框架條件。如同3.2.2小節所述，Moreno和Mayer (2004)發現，表達方式對學習有顯著影響，對話式表達方式比正式表達方式更能促進深度學習。Barab等人 (2009)的研究結果與這些發現一致。(2009)年的研究發現，在開放式遷移任務中，沉浸式世界二元組的表現優於簡單框架二元組 ($d_{IW,D}$ vs. $SF,D = 1.09$)和說明性教科書二元組 ($d_{IW,D}$ vs. $ET,D = 1.60$ ，效應量非常大)。然而，由於不同條件下沉浸感和敘事語調同時存在差異，因此無法精確地確定敘事語調。

「河城」(River City)是另一個3D沉浸式虛擬環境的例子。在這個多人環境中，學生可以在虛擬城鎮中自由移動，並進行協作探究，以找出居民生病的原因。大量研究表明，該環境能夠顯著提高學生的參與度和學習成果，其效果可與實體實驗相媲美 (Ketelhut & Nelson, 2010)。然而，不同課程方案的比較顯示，探究式學習的支持程度取決於學習成果的測試方式：是用選擇題還是給「河城」市長寫信 (Ketelhut, Nelson, Clarke, & Dede, 2010)。作者認為，後者方法可能更適合科學探究評估，因為它比選擇題測驗更具真實性。

3.3.3 總結與討論

以上研究出版物彙編展示了提供教學支援的多種可能性。
關於如何支持科學發現學習，人們採用了多種方法。Zhang等人 (2004) 提出了三種視角（有意義的、系統性和反思性），並建議從這三個方面着手發展模擬環境中的學習支援。
視角。根據Fund (2007) 的研究，他比較了四個支架式教學要素（結構性要素、反思性要素、學科內容要素和拓展要素），結構性因素對學習成果的影響最為顯著。儘管如此，一些研究人員建議同時提供結構性和創造性兩種學習方式。
結構和自由，因為過度限制自由會削弱學習效果 (Chang et al., 2008; Gonzalez-Cruz et al., 2003)。

對支持電腦模擬學習過程的基本條件的研究表明，支持具有積極作用。
尺寸最大可達 3.50。以下建議可供參考：透過明確提供啟發式方法，可以最好地促進學生的自我調節。
而不是隱式地 (Veermans等人, 2006)，提供資訊的最佳時機是在任務練習之前，就支持性而言。
資訊涉及程序性資訊的任務練習 (Kester, Kirschner 和 van Merriënboer, 2004)。這是必要的。
為了讓學習者對所涉及的變數有基本的了解 (Lazonder et al., 2009)。其中不同的表徵是
使用它們時，需要進行心理轉換，這有助於獲得更深層的領域知識 (van der Meij & de Jong, 2006)。
關於利用電腦模擬進行協作學習的研究表明，協作學習過程與…之間的關係。
個人學習成果並非一目了然。儘管Saab等人 (2007) 提出的RIDE教學法改進了發現式學習。
在這些活動中，學生的學業成績並沒有提升。與單獨進行探索式學習活動相比，兩人一組的合作評價確實可以顯著提高學習成績 (Manlove et al., 2009)。為學生小組提供合作學習資源。
額外的監管指導方針也可以改善學習效果 (Manlove 等人, 2006)。
教學支持研究的一個反覆發現是，為學生提供學習機會至關重要。
創造一個自由與結構化支持平衡的環境，這與最低限度教育無效的研究結果相符。
指導式教學 (Kirschner, Sweller 和 Clark, 2006)。儘管關於提供教學支援的研究已取得豐碩成果，並且雖然這使我們能夠得出有用的建議，但大多數研究僅從模擬內部尋求提供支援：
例如，透過增加類似人類教師的支持系統 (Fund, 2007)。這就引出了一個問題：教師如何提供最佳的教學支援？
指導或課程嵌入方面可能大多沒有得到解答。

3.4 課堂設置與教學場景

迄今為止，大多數已審查的干預措施都集中在電腦模擬本身的使用。當將其應用於教育領域時，電腦模擬在課堂教學中的作用有幾個值得關注的面向。首先，我們將重點放在以下方面的影響：
學生學習參與度。隨後，我們將討論如何透過在課堂上設計多樣化的活動來支持學習。
情景。表 4 提供了本節回顧的研究的具體細節。

3.4.1. 參與程度的差異

Wu 和 Huang (2007) 的研究透過比較學生的行為、情緒和認知投入度，調查了學生的行為、情緒和認知投入度。
課堂採用不同的教學方法。在以學生為中心的課堂中，力量和運動這個主題是由老師引入的。
隨後，師生們一起進行電腦模擬，並兩人一組完成作業。儘管科學方面…
在以教師為中心的課堂上，教師會講解各種概念，學生沒有電腦可以使用。相反…
教師使用連接筆記型電腦的投影機來示範模擬過程，並指導學生完成學習活動。
研究人員發現，學生先前的學業水平可能會與教學方法產生相互作用，因為學業成績較差的學生學生從以教師為中心的教學方法中獲益更多 ($d = 1.07$)。儘管以學生為中心的課堂中學生的情感投入度更高，但情感投入度似乎並未對學生的學業成績產生影響。

然而，Laakso, Myller 和 Korhonen (2009) 的研究結果似乎與此相矛盾。他們比較了多組學生。

他們參與了模擬演算法練習，使用了不同層次的「擴展參與分類法」。這些級別包括：
將視覺化內容展示給其他學生（作為最高級別的參與）到僅僅查看可視化內容或根本不查看（作為（最低級別）。僅僅觀看演算法動畫似乎不足以達到學習效果，即使有可能…

表4
課堂設置和教學場景。

第一作者 (出版年份)	科學 紀律	認知主題	N	幹預措施	結果/結論	效應量 (科恩d值)
參與程度各不相同						
Laakso等人 (2009) 吳和黃 (2007)	電腦 科學 物理	二元堆 力和運動	75 54	參與度：變化 與觀看 課程：以學生為中心 vs. 以教師為中心 交互作用效應：以教師為中心 以及成績較差的學生	更好的學習表現 更投入的情感 但學習方面沒有差別 成就 從中獲得更多益處 以教師為中心的教學方法	0.68 納 1.07
教師指導與協作的作用						
Limniou等人 (2009) 多莉和貝爾徹 (2005) Shieh等人 (2010)	化學 酸鹼滴定 物理 電磁學 機械 電磁學	研究1：80 研究2：80 811 研究1：113 研究2：386	研究1：80 研究2：80 811 研究1：113 研究2：386	虛擬模擬與傳統方法 實驗室 技術賦能的主動 學習型教學與傳統教學	學習方面沒有差別 結果 更好的概念理解 學習成果 學習收益方面沒有差異 更高的學習效益	納 ★ 納 0.39

註：所有研究均依本綜述的討論順序呈現，並依科學學科分組。Cohen's d 的計算：na 1/4 不適用；* 1/4 不可能，基於… Thalheimer 和 Cook (2002) 的方法。

在觀看視覺化影片的同時，與夥伴分享理解和誤解。作者認為，學習環境的設計應著重於提升參與度，因為這樣的學習環境能夠激發更積極主動、更以學生為中心的學習活動。

由於這兩項關於參與度的研究不僅在概念操作化方面採用了不同的方法，而且測量程序也不同，因此很難推測造成結果衝突的原因。Wu和Huang (2007)認為參與度是一個多維概念，包含學習過程中的行為、情感和認知參與，而Laakso等人 (2009)則基於學生活動的螢幕錄影和錄音來衡量參與度水準。此外，Wu和Huang (2007)的研究詳細描述了教師的指導過程，而Laakso等人 (2009)的研究則缺乏對教師如何支持學習過程的具體說明。

3.4.2 教師指導與協作的作用

Dori 和 Belcher (2005)的研究積極運用教師指導，旨在透過採用包含同儕協作和個人回饋系統 (PRS) 的教學方法，使學習過程更具社交性。他們研究了在名為 TEAL (技術賦能主動學習環境) 的專案中，小組學習並使用電腦模擬工具對學生社交、認知和情感方面的影響。在課堂上進行電磁學小講解後，學生需要即時回答多項選擇題，之後學生的答案分佈以長條圖的形式顯示在教室螢幕上。當學生意見不一致時，教師會要求學生以三人為一組進行小組討論，嘗試達成共識。之後，教師再次向全班提出同樣的選擇題，往往能讓學生對正確答案有更多共識。與傳統教學相比，TEAL 計畫的學生在概念理解方面取得了顯著進步。在小規模實驗中，大多數參與者也向同學推薦了這門課程，這顯示互動性、視覺化和實踐操作等教學方式具有優勢。作者得出結論，TEAL 環境能夠對學生的學習成果產生顯著的正面影響，因為這項技術支持主動學習。同樣，台灣某大學 (Shieh, Chang 和 Tang, 2010) 在兩個學期中實施 TEAL 環境的研究表明，與傳統教學相比，第二學期的學習效果顯著提升 ($d = 0.39$)。

在Duran等人 (2007)的研究中，他們描述了一種基於軟體的方法，不僅將模擬作為演示手段，還將其融入到一種能夠促進學生理解和參與的教學方法中（如本文前文所述）。在呈現一個真實場景並對章節主要概念進行理論解釋後，學生需要預測該場景的演變。在隨後的腦力激盪環節，學生可以分組討論場景的演變。在這個階段，教師可以與學生互動，解答他們的問題並引導討論。討論結束後，收集各小組的想法。隨後執行模擬程序，以檢驗學生的預測是否正確，而不是由教師給出正確答案。最後，在討論和理論解釋之後，將收集到的想法與模擬階段所展示的現象結果進行比較。

在一項著重研究交流場所差異的研究中，Limniou, Papadopoulos 和 Whitehead (2009) 對比了兩種課程：一種是學生進行同步面對面交流的課程，另一種是師生透過「WebCT 環境」進行非同步交流的課程。在這兩個環境中，教師的角色有所不同。在同步教學中，教師扮演著更積極的角色，透過面對面的討論和互動來引導學生達成學習目標；而在虛擬環境中，教師的角色則更為輔助，主要負責提出問題和收集資源以支持學生的自主學習。由於兩種方法最終都達到了相同的學習目標，作者認為，這使得教師能夠根據大學的設施、教職員的時間以及學生對虛擬學習環境的熟悉程度，更自由地選擇合適的教學方法。

3.4.3 總結與討論

由於研究者對「參與」這一概念的定義各不相同，其影響仍不明確，儘管已有研究發現其效應量高達 1.07。Laakso, Myller 和 Korhonen (2009) 強調，學習活動應盡可能積極主動、以學生為中心，並提倡使用能提升學生參與度的學習環境。然而，Wu 和 Huang (2007) 的研究表明，學生的學業成績並未受到情感投入的影響。將電腦模擬融入教學環境，除了影響學習過程和結果外，還會影響教師的角色和課堂溝通。合作使用電腦模擬可以促進更積極的學習，進而提升學生的概念理解 (Dori & Belcher, 2005; Shieh 等, 2010)。即使不同的教學方法導致相同的學習結果，選擇特定的方法仍然會對教師在指導學生方面的角色產生影響 (Limniou 等人, 2009)。

為了了解如何在科學教育中最佳應用電腦模擬，研究應從兩個角度展開：一方面是聚焦於模擬情境，透過操縱模擬中的變數進行深入分析；另一方面是放眼全局，將更廣泛的教學背景納入考量。然而，放眼全局的研究寥寥無幾，這顯示多數研究者在探討電腦模擬的有效性時，並未考慮教師指導、課堂教學場景或課程特徵等影響因素。

4. 結論

本次綜述以兩個主要問題展開。第一個問題是：電腦模擬能在多大程度上提升傳統科學教育？第二個問題是：如何才能更好地設計和實施模擬及其教學支持，從而優化模擬本身的應用？本文所回顧的文章均從實驗角度提供了相關資訊。

本節我們將討論主要趨勢和發現的結果。

關於模擬作為傳統測驗手段的增強或替代，結果毋庸置疑：模擬已成為課堂教學中不可或缺的有力補充，既可作為現有測驗手段的補充，也可作為其他測驗手段的替代。

無論是傳統教學方法，或是部分課程的替代，所有比較有無模擬教學條件的研究都表明，在模擬教學替代或增強傳統講授的研究中，模擬教學的效果更佳。在這種情況下，後測成績的效應量高達 1.5，而與動機和態度相關的得分的效應量則超過 2。以模擬教學取代實驗活動或將其用作實驗準備活動是其中的一個特例。在這種情況下，學習效率顯著提高。基於模擬教學的教學方法在任務完成時間方面也表現出顯著優勢。另一種有效的模擬教學方法是將其作為實際實驗活動的準備活動。研究發現，這種方法對理解實驗任務以及在實際實驗活動中的實踐技能都有積極作用。

後一項發現引出了一個重要問題。實驗室技能的習得本身通常就是一個學習目標，無法完全被模擬取代。然而，顯而易見的是，正如在飛行模擬等已被廣泛接受為訓練工具的領域一樣，模擬可以作為實驗前的預習，從而在提高實驗室活動的有效性方面發揮重要作用。

第二個研究問題包含兩個部分：為了提高模擬的成功率，研究人員從哪些方面改進了模擬，以及這些改進產生了哪些效果？在我們回顧的研究中，主要探討了兩個主題：模擬結果的視覺呈現方式，以及在模擬過程中為學習者提供的教學支援。

在視覺化方面，大多數已回顧的研究都關注了模擬輸出資料的呈現方式。由於相關研究數量相對較少，且研究中使用的呈現方式各不相同，因此這些研究並未得出明確的結論。其中一項研究成果特別突出：[Trey 和 Khan \(2008\)](#) 研究了不可見現象的可視化。他們發現，對於這些不可觀察的現象，學習效果顯著，這與 [de Jong](#) 及其同事提出的電腦模擬主要優勢之一相符 ([van Berkum & de Jong, 1991; van Joolingen & de Jong, 1991](#))。關於 3D 模擬中的沉浸感，沒有研究發現沉浸感本身會產生顯著影響。[Mitnik 等人 \(2009\)](#) 發現，額外的指導以及使用機器人進行學習可以提高圖表的使用效果。沉浸式學習本身對學習效果的貢獻並不明顯，這可能是由於沉浸式學習缺乏明確的功能所致；抽象概念的具身化或許能夠提供這種功能 ([Tall, 2008](#))，值得在未來的研究中加以關注。

在教學支持層面，已回顧的研究中探討了多種支持措施。其中約一半的研究關注科學發現式學習及其所需過程。[Alfieri, Brooks, Aldrich 和 Tenenbaum \(2011\)](#) 的一項綜述表明，在發現式學習環境中（儘管不一定需要模擬），為學習者提供教學支援是必要的。這些支持類型仍可根據 [de Jong](#) 和 [van Joolingen \(1998\)](#) 的分類進行劃分：支持傳遞性學習過程（例如，假設生成和實驗設計）以及旨在規劃和監控學習活動的調節性過程。該類別中的八項研究報告了在各種變數上的正面結果。雖然很少有研究報告效應量或提供足夠的數據來計算效應量，但總體印像是效果中等。值得注意的是，這些研究大多報告了對學習過程及其直接結果的影響，這意味著在後測中無法達到顯著效果。這並不能否定這些研究，但指出了發現式學習長期存在的一個問題，即發現式學習方法本質上需要一些時間才能產生效果，因為它追求的是雙重學習目標：學習領域知識以及學習發現技能。

其他並非以發現式學習為目標的教學介入措施也顯示出正面效果，但由於介入領域和類型各異，無法從中推斷出普遍趨勢。由此可見，介入措施的選擇空間以及模擬設計本身的空間都非常龐大，因此難以提取普遍趨勢。透過改變設計和教學支援可以獲得相當大的效果，這一事實表明謹慎使用模擬和進行教學設計至關重要。一般性指導原則在此價值有限，使得以模擬為基礎的教學設計成為一門工程科學。已回顧的研究表明，精心設計的基於模擬的教學可能產生顯著效果。需要考慮的主要因素包括：如何與學習者互動和參與，如何呈現和整合來自模擬的訊息，呈現哪些補充訊息，以及呈現資訊的時機。

電腦模擬在科學教育中的作用取決於模擬本身、內容性質、學生和教師之間的相互作用。如同 [de Jong](#) 和 [van Joolingen \(1998\)](#) 在其綜述中所述，該領域的研究重點之一是探討電腦模擬在課程中的地位。然而，我們回顧的大多數研究都只關注在其他條件不變的情況下電腦模擬對學習的影響，因此忽略了教師、課程和其他教學因素的影響。為了使電腦模擬等教育創新成功，教師需要具備實施這些創新所需的技能和知識 ([Pelgrum, 2001](#))。如果教師缺乏相應的技能，模擬的全部潛力，例如其在培養探究技能方面的適用性，可能無法充分發揮。相反，它們可能被用作演示實驗，或完全由教師控制 ([Lindgren & Schwartz, 2009](#))。將電腦模擬的使用簡化為一步一步的烹飪書式方法，會削弱其潛力，使學生有機會在更豐富的情境環境中自由地創建、測試和評估自己的假設 ([Windschitl & Andre, 1998](#))。

儘管 [德容和範朱林根 \(1998\)](#) 回顧的研究結果並非一致支持模擬教學，但我們回顧的大多數研究表明，過去十年中模擬教學的有效性有所提高。我們認為這主要是由於技術進步與教學支持改進之間的持續協同作用。雖然近年來（準）實驗研究無疑取得了豐碩成果，但我們建議將焦點從不同類型的視覺化和輔助措施擴展到更全面的視角，例如將教學場景和電腦模擬在課程中的位置納入考量。此外，將教師的角色融入其中，將是建立電腦模擬在科學教育中應用教學框架的一個有希望的進步。

致謝

作者衷心感謝審稿者提出的寶貴意見。

參考

- Ainsworth, S., & VanLabeke, N. (2004). 動態表徵的多種形式：學習與教學，14(3), 241–255。
- Akpan, JP (2001). 將電腦模擬引入生物學教學的相關問題：文獻綜述。《電子科學教育雜誌》，5(3)，取自：<http://ejse.southwestern.edu/article/viewArticle/7656/5423>。
- Alfieri, L., Brooks, PJ, Aldrich, NJ, & Tenenbaum, HR (2011). 基於發現的教學能否促進學習？教育心理學雜誌，103(1), 1–18。
- Baltzis, KB 與 Koukias, KD (2009). 在本科模擬電子學課程中使用實驗室實驗和電路模擬資訊科技工具。《科學雜誌》。教育與技術，18(6), 546–555。
- Barab, SA, Scott, B., Siyahhan, S., Goldstone, R., Ingram-Goble, A. 等人 (2009). 變革性遊戲作為課程支架：利用電子遊戲支持科學教育。科學教育與技術雜誌，18(4), 305–320。
- Bell, RL 與 Trundle, KC (2008). 利用電腦模擬促進對月相的科學概念。《科學教學研究期刊》，45(3), 346–372。
- Bell, T., Urhahne, D., Schanzel, S., & Ploetzner, R. (2010). 合作探究學習：模式、工具與挑戰。國際科學教育雜誌，32(3), 349–377。
- Birchfield, D., & Megowan-Romanowicz, C. (2009). SMALLab 中的地球科學學習：混合現實的設計實驗。國際電腦支援協作學習雜誌，4(4), 403–421。
- Blake, C., & Scanlon, E. (2007). 重新思考遠距科學教育中的模擬：有效使用的特徵。電腦輔助學習雜誌，23(6), 491–502。
- Chang, KE, Chen, YL, Lin, HY, & Sung, YT (2008). 模擬物理學習中學習支援的效果。電腦與教育，51(4), 1486–1498。
- Clark, D. 與 Jorde, D. (2004). 幫助學生修正關於熱力學的顛覆性體驗式支持觀念：電腦視覺化和觸覺模型。《期刊》科學教學研究，41(1), 1–23。
- Dalgarno, B., Bishop, AG, Adlong, W., & Bedgood, DR (2009). 虛擬實驗室作為遠距教育化學學生預備資源的有效性。Computers & Education, 53(3), 853–865.
- Jong, T., & van Joolingen, WR (1998). Scientific discovery learning with computer simulations of conceptual domains. Review of Educational Research, 68(2), 179–201.
- Dillenbourg, P. (2008). 將科技融入教育生態系：遠距教育，29(2), 127–140。
- Dori, YJ 與 Belcher, J. (2005). 技術賦能的主動學習如何影響大學部學生對電磁學概念的理解？《電磁學雜誌》學習科學，14(2), 243–279。
- Duran, MJ, Gallardo, S., Toral, SL, Martinez-Torres, R., & Barrero, FJ (2007). 一種使用 Matlab/Simulink 的本科生電機工程學習方法：關注學習者滿意度結果的課程。《國際技術與設計教育期刊》，17(1), 55–73。
- 教育資訊資源中心。(2011)。檢索日期：2011年4月14日。網址：<http://www.eric.ed.gov>
- Finkelstein, ND, Adams, WK, Keller, CJ, Perkins, KK, & Wieman, CE (2006). 物理教學的高科技工具：物理教育科技計畫：物理學教育，2(3), 110–120。
- Fund, Z. (2007). 支架式電腦科學問題解決對成績的影響：支持計畫的比較研究。《計算機科學雜誌》輔助學習，23(5), 410–424。
- Gazit, E., Yair, Y., & Chen, D. (2005). 利用虛擬太陽系培養對複雜天文現象的概念性理解。《科學教育與研究期刊》技術，14(5), 459–470。
- Gebhart, H., Brill, G., & Yarden, A. (2009). 以網路為基礎的生物資訊研究模擬對學生理解遺傳學的影響。《科學研究》教育，39(5), 725–751。
- Gibbons, NJ, Evans, C., Payne, A., Shah, K., & Griffin, DK (2004). 電腦模擬改進大學教學實驗室：細胞生物學教育，3(4), 263–269。
- Gick, ML 與 Holyoak, KJ (1980). 類比問題解決：認知心理學，12(3), 306–355。
- Gick, ML 與 Holyoak, KJ (1983). 圖式歸納和類比遷移：認知心理學，15(1), 1–38。
- Goldstone, RL 與 Son, JY (2005). 利用具體和理想化的模擬進行科學原理的遷移。《學習科學期刊》，14(1), 69–110。
- Gonzalez-Cruz, J., Rodriguez-Sotres, R., & Rodriguez-Penagos, M. (2003). 利用電腦模擬教導本科生酵素動力學的便利性：具有生物化學相關課程的學生。生物化學和分子生物學教育，31(2), 93–101。
- Höffler, TN, & Leutmer, D. (2007). 教學動畫與靜態圖片：一項統合分析。學習與教學，17(6), 722–738。
- ISI Web of Knowledge. (2011)。檢索日期：2011年3月18日。網址：<http://www.isiknowledge.com>
- Jimoyiannis, A., & Komis, V. (2001年)。電腦模擬在物理教學中的應用：學生對軌跡運動理解的案例研究。《電腦與物理》教育，36(2), 183–204。
- Kester, L., Kirschner, P., & van Merriënboer, J. (2004). 電路中資訊的呈現與故障排除。國際科學教育雜誌，26(2), 239–256 研究報告。
- Ketelhut, DJ, & Nelson, BC (2010). Designing for real-world scientific inquiry in virtual environments. Educational Research, 52(2), 151–167.
- Ketelhut, DJ, Nelson, BC, Clarke, J., & Dede, C. (2010). 用於建構和評估科學領域高階探究技能的多用戶虛擬環境。英國科學雜誌：教育技術，41(1), 56–68。
- Kiboss, JK, Ndirangu, M., & Wekesa, EW (2004). 電腦輔助模擬程式在學校生物學中對學生細胞理論學習成果的有效性。科學教育與技術雜誌，13(2), 207–213。
- Kirschner, PA, Sweller, J., & Clark, RE (2006). 為什麼教學中最少的指導不起作用：對建構主義、發現式、問題導向式、體驗式和探究式教學失敗的分析。教育心理學家，41(2), 75–86。
- Laakso, MJ, Myller, N., & Korhonen, A. (2009). 比較不同參與程度下學生使用演算法視覺化進行協同學習的表現。教育科技與社會，12(2), 267–282。
- Lazonder, AW, Wilhelm, P., & van Lieburg, E. (2009). 揭示領域知識在基於模擬的探究式學習中的影響。教學科學，37(5), 437–451。
- Lee, H. (2007). 針對不同空間能力水準學習者的基於網路的模擬教學設計。教學科學，35(6), 467–479。
- Limniou, M., Papadopoulos, N., Giannakoudakis, A., Roberts, D., & Otto, O. (2007). 黏度模擬器在化學實驗室的應用：化學教育研究與實踐，8(2), 220–231。
- Limniou, M., Papadopoulos, N., & Whitehead, C. (2009). 將模擬技術融入實驗前化學課程：電腦集群與 WebCT 的比較。計算機與教育，52(1), 45–52。
- Lindgren, R., & Schwartz, D. (2009). 科學中的太空學習與電腦模擬。國際科學教育雜誌，31(3), 419–438。
- Manlove, S., Lazonder, AW, & de Jong, T. (2006). 協同科學探究學習的調節支持。電腦輔助學習雜誌，22(2), 87–98。
- Manlove, S., Lazonder, AW, & de Jong, T. (2009). 科學探究學習中協作式與個體式使用規範軟體支架的比較：互動式學習環境，17(2), 105–117。
- Martinez-Jimenez, P., Pontes-Pedrajas, A., Polo, J., & Climent-Bellido, MS (2003). 利用虛擬實驗室進行化學學習。化學教育雜誌，80(3), 346–352。
- McKagan, SB, Handley, W., Perkins, KK, & Wieman, CE (2009). 以研究為基礎的光電效應教學課程。美國物理學雜誌，77(1), 87–94。
- Meir, E., Perry, J., Stal, D., Maruca, S., & Klopfer, E. (2005). 模擬分子層次實驗在導教擴散與滲透方面有多有效？細胞生物學教育，4(3), 235–248。
- Mitnik, R., Recabarren, M., Nussbaum, M., & Soto, A. (2009). 協作機器人教學：圖教學經驗。電腦與教育，53(2), 330–342。
- Moreno, R., & Mayer, RE (2004). 個人化資訊促進虛擬環境中的科學學習。教育心理學雜誌，96(1), 165–173。
- Pallant, A., & Tinker, R. (2004). 利用原子尺度分子動力學模型進行推理。科學教育與技術雜誌，13(1), 51–66。
- Papastergiou, M. (2009). 高中電腦科學教育中的數位遊戲化學習：對教育效果和學生動機的影響。計算機與教育，52(1), 1–12。
- Pelgrum, WJ (2001). 資訊通信科技融入教育的障礙：一項全球教育評估的結果。電腦與教育，37(2), 163–178。
- 物理教育科技網站。(2011)。檢索日期：2011年4月14日。網址：<http://phet.colorado.edu>
- Ploetzner, R., Lippitsch, S., Galmbacher, M., Heuer, D., & Scherrer, S. (2009). 學生在從動態視覺化中學習時遇到的困難以及如何克服這些困難。人機交互，25(1), 56–65。

- Riess, W., & Mischo, C. (2010). 透過生物學課程促進系統思考。國際科學教育雜誌, 32(6), 705–725。
- Saab, N., van Joolingen, WR 與 van Hout-Wolters, B. (2007). 支持協作發現學習環境中的溝通：教學的效果。 教育科學, 35(1), 73–98。
- Scopus。 (2011)。檢索日期：2011年4月14日。：<http://www.scopus.com>。
- 謝瑞生、張文傑、唐俊 (2010)。技術賦能型主動學習 (TEAL) 在台灣大學物理教學的影響。《亞太教育》研究者, 19(3), 401–415。
- Stern, L., Barnea, N., & Shauli, S. (2008). 電腦模擬對中學生理解分子運動論的影響。《科學雜誌》教育與技術, 17(4), 305–315。
- Tall, D. (2008). 數學中向形式思考的過渡。數學教育研究雜誌, 20(2), 5–24。
- Thalheimer, W., & Cook, S. (2002). 如何從已發表的研究文章中計算效應量：一種簡化的方法。檢索日期：2010年6月8日：http://work-learning.com/effect_sizes.htm。
- Tinker, RF 與 Xie, Q. (2008)。將計算科學應用於教育：分子工作台範式。科學與工程計算, 10(5), 24–27。
- Trey, L., & Khan, S. (2008). 如何利用電腦類比讓理科學生了解不可觀察的現象。電腦與教育, 51(2), 519–529。
- Trindade, J., Fiolhais, C., & Almeida, L. (2002). 虛擬環境中的科學學習：一項描述性研究。英國教育科技雜誌, 33(4), 471–488。
- Trundle, KC 與 Bell, RL (2010)。利用電腦模擬促進概念轉變：一項準實驗研究。《電腦與教育》, 54(4), 1078–1088。van Berkum, JJA 與 de Jong, T. (1991)。模擬教學環境。《教育與計算》, 6, 305–358。van der Meij, J. 與 de Jong, T. (2006)。在動態的模擬為基礎的學習環境中，利用多種表徵來支持學生的學習。《學習與指導》, 16(3), 199–212。
- van Joolingen, WR 和 de Jong, T. (1991)。教學環境中模擬的特徵。教育與計算, 6(3–4), 241–262。
- Veermans, K., van Joolingen, W., & de Jong, T. (2006)。在物理領域的模擬學習環境中，利用啟發式方法促進科學發現學習。 國際科學教育雜誌, 28(4), 341–361。
- White, B., Kahriman, A., Luberice, L., & Idleh, F. (2010). 蛋白質結構視覺化與模擬軟體評估。生物化學與分子生物學。 生物學教育, 38(5), 284–289。
- Wieman, CE 與 Perkins, KK (2005)。變革物理教育。《今日物理學》, 58(11), 26–41。
- Wieman, CE 與 Perkins, KK (2006)。一種強大的科學教學工具。自然物理學, 2(5), 290–292。
- Winberg, TM 與 Berg, CAR (2007)。學生在化學實驗練習中的認知注意力：電腦模擬預習的影響。《科學研究雜誌》。 教學, 44(8), 1108–1133。
- Windschitl, M. 與 Andre, T. (1998)。利用電腦模擬來增強概念轉變：建構主義教學與學生認識論信念的作用。 科學教學研究雜誌, 35(2), 145–160。
- 吳鴻凱、黃永亮 (2007)。九年級學生在以教師為中心和以學生為中心的技術增強學習環境中的參與。《科學教育》, 91(5), 727–749。
- Zacharia, ZC (2007)。比較和結合真實實驗和虛擬實驗：旨在提高學生對電路概念的理解。《電子學雜誌》。 電腦輔助學習, 23(2), 120–132。
- 張建偉、陳強、孫永強、Reid, DJ (2004)。基於電腦模擬的科學發現學習的三重學習支援設計：實驗研究研究。《電腦輔助學習雜誌》, 20(4), 269–282。