

探討繪圖導向科學建模教學對國小六年級學童模型建立及系統思考能力影響之研究

莊秋蘭¹ 李文瑜^{2,*}

¹臺中市太平區長億國民小學

²國立臺灣師範大學 資訊教育研究所

摘要

科學教育中的重要目標之一是協助學生在科學學習中建立有系統的思維模式，並培養學生透過科學模型建立建構科學概念。本研究之目的為探討兩種建模教學活動對學生模型建立及系統思考能力之影響。研究對象為國小六年級兩個班級，共58位學生，採用「以建模為中心的教學序列」(model-centered instructional sequence)進行教學設計，並融入「促進繪圖教學介入」之方法。學生分為兩個實驗組，模型建立分別使用紙本概念圖建模及電腦動態概念圖建模兩種方式，教學時數各為16節。在學生模型的部分，以重複量數單因子變異數進行分析，結果顯示，兩組學生於教學前、中、後的三次模型，在「要素量」以及「要素間關係」都有顯著進步。再以初始模型為共變數進行單因子共變數分析比較兩組間的差異情形，結果顯示兩組在第二次模型「要素量」並無顯著差異，在「要素間關係」紙本概念圖建模組表現優於電腦動態概念圖建模組；兩組在最終模型的「要素量」及「要素間關係」表現上，紙本概念圖建模組皆優於電腦動態概念圖建模組。本研究要素是指科學模型中基本的部件，科學模型是由要素及要素間關係的連結形成。在系統思考能力進步情形方面，以 t 檢定進行分析，結果顯示兩組的系統思考能力在教學前後皆有顯著提升。兩組間差異的部分則進行單因子共變數分析，結果顯示電腦動態概念圖建模組在系統思考總體能力表現優於紙本概念圖建模。由研究結果顯示，本研究所設計的建模教學，有助於學生模型建立的完整性及系統思考能力的提升，在模型建立的完整性部分，以紙本概念圖建模方式較優，而在系統思考能力的提升上，電腦動態概念圖建模則具有較好的效果。本研究對於未來建模教學以及使用電腦輔助教學亦提出建議。

關鍵詞：系統思考、科學建模教學、電腦建模

*通訊作者：李文瑜，swylee@ntnu.edu.tw；ORCID：0000-0001-6111-2055

投稿：2023/5/29，修訂：2024/3/26，接受：2024/3/27，線上出版：2024/5/31

壹、緒論

十二年國民基本教育課程綱要總綱的核心素養中包含「系統思考與解決問題」能力的培養，而在自然領域的學習表現架構，為因應總綱，包含探究能力與科學的態度和本質，其中探究能力便包含思考智能及問題解決(教育部，2018)。科學學習並非線性的學習，往往需要學生建立具有系統的思維模式，透過全面性的考量，整體的思維，才能使學習具有意義，因此，透過課程的設計，在教學中進行系統思考能力的培養是必要的。

整體性、相互關係及動態是系統思考的三個核心要素，系統思考首要關注的是在系統的理解中是如何描繪複雜的因果關係、相互關係的複雜性質(Capra, 1996)，因此要培養學生系統思考的能力，必須準備可以促進系統理解的認知工具，這個認知工具可以幫助學習者將非感知的因果關係可視化，降低由複雜推理任務所引起的認知負荷。模型是人類有系統的建構，是一個系統的表徵或將一個系統簡化(Louca & Zacharia, 2008)，Vachliotis等(2014)提出建模是學生用來衡量自己的知識並闡述有關系統問題的工具，而系統的清晰模型不僅可以用於瞭解系統，還可以將其傳達給其他人(National Research Council [NRC], 2012)。因此，透過模型的建立，可以協助學生將非感知的現象、因果關係等可視化，可知模型是可以促進學生對系統理解的認知工具。從過去的文獻中得知，學生在建構模型的過程中，會著重於模型外在表徵的形成(Louca & Zacharia; Penner et al., 1998)，通常僅考慮一個要素或一個關係、過程，未將模型視為一個整體(Sins et al., 2005)，而在建構模型的過程中會感覺到困難

(de Jong & van Joolingen, 1998)、難以在模型中表達想法(Sung & Oh, 2018)，在建模的過程中亦會感到不確定性(Jackson et al., 2008)。

科學建模不僅是科學實作，透過科學建模過程可以引導學生建構科學概念，理解自然現象(Baumfalk et al., 2019)。在過去科學建模的相關研究中，有讓學生透過推理的方式建構模型(曾茂仁、邱美虹，2021)，也有讓學生透過探究來建構模型(蔡哲銘等，2019；Bielik et al., 2018)，因此學生在建構模型時，會從推理及探究等過程中所獲得的資訊，以視覺表徵的方式建構模型(例如概念圖)，藉由模型的創建來表達其對實際物體、現象或科學知識的瞭解，促進學習成效(曾茂仁、邱美虹；蔡哲銘等；Bielik et al.)，而王曉璿等(2010)也發現，透過概念圖學習，可以促進學生在知識概念的學習，提升學習成效(林素妃等，2008；賴慶三、倪啟堯，2014；Liu, 2013; Molinari, 2017; Rosen & Tager, 2014; Shin, 2016)。除概念圖的建模方式之外，也有研究以電腦建模工具作為建模方式，電腦建模工具是可以提供整合複雜系統現象的有意義的平臺(Bielik et al., 2021)，透過電腦建模工具進行建模活動，可以提升學生的建模能力，也能促進學生的學習參與(李文瑜、王亞喬，2024；Wang et al., 2021)，並能增強學生實踐模型建構、概念知識和系統思考(Saba et al., 2023)，Wagh與Wilensky (2018)發現，電腦建模可以促進學生對發展機制的瞭解，且能進行因果解釋。然從文獻中，多為單一建模方式的研究，尚未有研究比較紙本概念圖建模與電腦動態概念圖建模對學生學習的影響，因此本研究將探討以紙本概念圖及電腦動態概念圖作為建模方式，影響學生建立模型及系統思考能力的差異性。

有研究發現，以電腦輔助建模促進學生對於現象的理解，透過工具中的「動態模擬」，可以協助學生建立起複雜模型及培養系統性的思考(Spitulnik et al., 1999)，提升學生學習成效(林英傑、崔夢萍，2011)，並為學生提供有用的認知架構，學生隨後使用這些架構在知識整合活動中發展更高層次的系統思考(Kali et al., 2003)，但研究對象鮮少有國小學生。就本研究科學內容，研究者瀏覽國小自然領域的課程內容發現，「碳循環」是一個循環系統，且在三至六年級的課程之中，皆有相關二氧化碳的教學內容，卻未有單元將之整合。且在過去相關系統思考的研究主題中，大多以水循環(Assaraf & Orion, 2005)、地殼循環(Kali et al.)、生態系統循環(Evagorou et al., 2009)等，尚未有以碳循環進行系統思考之研究，因此，本研究以碳循環系統作為主題設計建模教學課程，讓學生透過對碳循環系統概念的理解，瞭解系統的要素、要素之間的關係、動態關係、循環等等，並經由建模的歷程，培養學生系統思考能力。此外，建模為一複雜之過程，學生需要有結構的引導，且使用電腦科技是否較紙本建模更為有效也是值得探討的研究問題。因此本研究使用概念圖輔助學生建模並融入建模教學架構，並且比較使用電腦動態概念圖建模組與紙本概念圖建模組學生在學習上的差異情形，另外系統思考相關的研究多以國中生及高中生為對象，也較少有研究指出建模教學對系統思考能力的影響，因此為瞭解小學教育階段，是否可以透過建模教學設計培養系統思考能力，亦值得進行探究。本研究以碳循環系統為主題設計建模課程，瞭解對學生的系統思考能力的影響。

貳、文獻探討

一、科學建模與系統思考

系統思考是一種可以解決社會面臨問題的有效方法，並被認為是一個跨教育與科學學科整合的跨域概念，然而，研究顯示促進學生系統思考是具有挑戰性的，特別是在隨著時間的推移而發生的變化和反饋等方面，使用電腦系統模型和系統動態方法，可以支持學生在理解複雜現象時克服這些挑戰(Eidin et al., 2023)。

系統思考是個大概念，透過將事物視為環狀、整體來緩和真實世界的複雜(Sherwood, 2002)，重點在於認識系統各個部分之間的相互聯繫，然後把它們綜合成一個統一的整體觀點(Senge, 1990)，且聚焦於所研究事物與系統其他部件的回饋關係(feedback relationship) (Aronson, 1997)。Senge指出心智模型與系統思考之間的連結，他將系統思考稱為知識、原則和工具的概念架構，以便在相互關係和必要的相互連結中進行觀察，以確定可變的模型和複述現象。綜言之，系統思考是透過深入理解系統底層的結構，對行為做出可靠推理判斷的思考模式，亦即，系統思考是一種思考方式，是描述和理解形成系統行為的力量和相互關係，幫助我們發現如何能更有效地解決問題。系統思考能力(即理解和解釋複雜系統的能力)不僅在教育領域而且在日常生活中受到越來越多的關注(Jacobson & Wilensky, 2006; Maani & Maharaj, 2004; Penner, 2000; Richmond, 2001; Stuntz et al., 2002; Wilensky & Reisman, 2006)。正如Hogan (2000)所言，系統思考是制定決策以及解決個人、社會和職業生活各個方面問題的一項重要技能。因此在教育現場，越來越多

教育工作者注意到系統思考的教學(Hmelo et al., 2000)，許多學者投入有系統思考的研究(Assaraf & Orion, 2010a, 2010b; Boersma et al., 2011; Evagorou et al., 2009; Hogan; Penner; Riess & Mischo, 2010; Sommer & Lücken, 2010)，而過去相關系統思考的研究，包含有透過情境故事、提問、實作，提供戶外學習環境，讓學生從中進行體驗、觀察、探索、整合知識，學習的焦點著重於整體而非部分，用以促進學生之系統思考能力(Assaraf & Orion; Assaraf & Orpaz, 2010; Hipkins et al., 2008; Keynan et al., 2014; Yoon, 2008)，但較少有研究透過建模教學促進系統思考(Hung, 2008)，而且儘管系統思考被認為是重要的，然融入於現場教學仍然有限(Jacobson & Wilensky; Plate, 2010)，尤其是在小學教育(Assaraf & Orion; Hmelo et al.; Resnick & Wilensky, 1993; Wilensky & Resnick, 1999)。

建模是科學家觀察現象、透過實驗證據而發展出科學理論以解釋現象的歷程，學生知識建構的歷程也需透過建立、修正與精緻模型，方能使其逐漸與科學模型相似(曾茂仁、邱美虹，2021)。建模歷程為發展、修正、使用、評價模型來預測現象並描述不可觀察的機制(NRC, 2012)，因此建模是指建立模型的歷程，科學家把模型當作思考的工具，作為對科學現象的理解(Cheng & Lin, 2015)，對於科學知識的進步至關重要，對於學生理解現象和分享他們的想法也很重要(Passmore, et al., 2014)。可見模型是開發科學思考方式的潛在有價值的學習和教學工具，建立模型除了可以幫助學生表達想法並將之外顯化，透過考驗他們自己所建立的理論或模型外，亦可提升學生理解概念、探究能力與系統思考(張志康、邱美虹，2009；蔡哲銘等，2019；Jackson et al., 2008; Jong et al., 2015)。而模型的表達方式因課程內容的

需求而有所不同，視覺(visual)的表徵便是其中一種，其對於科學的教學、學習和溝通至關重要(Ainsworth et al., 2011; Cook, 2006)，繪圖是模型表徵的一種方式，是外部視覺的表徵，有不同的表達方式，如繪畫、概念圖及電腦建模工具繪圖等。在過去的研究中，有研究以概念圖建模提升學生對動物繁殖概念的理解(賴慶三、倪啟堯，2014)，促進概念改變(林素妃等，2008)，以及協助學生理解學習內容並提供教師檢視學生的學習困難(Shin, 2016)；亦有使用電腦輔助建模來促進學生系統思考能力(Evagorou et al., 2009; Riess & Mischo, 2010)，以及促進學生對環境的概念、動態關係及複雜性的理解，提升環境素養(莊秋蘭、李文瑜，2020)，並降低高、低學習成就學生的學習差距(徐瑛黛、李文瑜，2020)。有研究指出電腦輔助建模在建模教學中扮演重要的角色，並已成為一種有效的方式來促進學生進行建模學習活動(Wagh & Wilensky, 2018; Wang et al., 2021)，然而從相關電腦建模文獻發現，大部分的研究設計是以國中生與高中生為對象，在小學生的部分少有研究(林英傑、崔夢萍，2011)。

綜上所述，模型可以作為促進學生對系統理解的認知工具，概念圖可以作為模型的表徵方式。從相關文獻可知，經由概念圖來建立模型，對學生的學習是有幫助的，但對系統思考能力少有研究，有研究顯示利用電腦建模可以培養學生系統性思考，較少研究探討對模型建立之影響，過去研究中有關概念圖建模及電腦建模的研究多為探究單一建模方式對學習的影響，未有研究比較概念圖建模及電腦動態概念圖建模對學生學習的影響。為培養學生系統思考的核心素養，提供更多教學方式於現場教學，本研究設計建模教學，以紙本概念圖建模及電腦動態概念圖建模兩種方式建立模型，探究對學生模型建

立及促進學生之系統思考能力之影響以及差異性。

二、繪圖導向建模教學

在十二年國民基本教育課程綱要中，強調在課程與教學中，要建立學生系統思考的能力，在自然科學領綱中的學生思考智能也包含了建立模型。許多研究指出，建模可以促進學習者的概念改變(Jonassen et al., 2005)，可以促進學生科學素養、如何思考及進行有意義的知識建構(Gilbert, 1993; Windschitl et al., 2008)。而系統思考相關的研究多以國中生及高中生為對象，較少有研究指出建模教學對系統思考能力的影響，且建模教學的研究中，多為使用單一模型建構方式的教學設計，因此為瞭解小學教育階段是否可以透過建模教學設計培養系統思考能力，本研究設計繪圖任務融入建模教學的碳循環系統課程，瞭解對學生系統思考能力的影響以及學生模型建立的情形。

從過去建模教學的研究中發現學生對繪製模型感到困難，而建模教學的流程中，包含模型的建構、評估與修正及修訂模型，共需繪製三次模型，為減少學生模型建立的困難，設計繪圖導向建模教學，研究參考並修改Quillin與Thomas (2015)之三階段教學，包含情意(affection)、視覺素養(visual literacy)及模型導向推理(model-oriented reasoning)，目的在於提升學生模型繪製時的興趣、態度及自我效能，引導學生瞭解模型建立的方向及注意事項，經由模型導向推理的過程，協助學生逐步完成模型的繪製。情意階段是以提升學生的學習興趣及態度為目標的教學，鼓勵學生在以繪圖進行學習的活動中運用更多的認知能力(Quillin & Thomas)，包含四個情意向度架構的教學：態度、價值、自我效能和興趣。視覺素養的教學是指明確的

引導學生將語言轉化為視覺訊息，和將視覺訊息轉化為語言以及學科內接受的符號的使用技能，使學生能夠將更多的認知能力用於重要的概念和原則上，而不是在繪畫的行為上(Quillin & Thomas)，引導學生在建模時專注於概念的呈現。此三階段之教學架構，可用於各類繪圖，包含本研究之建模繪製(紙本概念圖建模及電腦動態概念圖建模)，由於建模具有挑戰性，因為它需要投入認知能力(Uesaka & Manalo, 2012)和認知靈活性(DeHaan, 2009)，而這項技能則須通過第三階段模型導向推理指導和實踐得到改善(Quillin & Thomas)。模型導向推理可以分解為四個任務：構建、使用、評估和修訂(Schwarz et al., 2009)。Quillin與Thomas認為，為了成功地將模型繪製成理由，學生不僅必須能夠建立模型，還必須應用它來解決問題或進行預測，評估其功效，並在必要時進行修改。本計畫將以此三階段融入繪圖導向建模教學活動中，提升學生建模的自信，亦能順利將其認知概念於模型中呈現。

三、碳循環

Sibley等(2007)提出許多入門教科書中的碳循環圖提供了相對完整的儲層、通量和過程的說明，這些圖是碳的總質量和通量的很好的例子，還可能包括子循環中的反饋。在臺灣目前的課程中，「碳循環」的名詞出現在國一課程中，在國小課程，雖然碳循環的相關概念已在課程中逐漸呈現，但未呈現「碳循環」的名詞以及教學內容。研究者整理國小三至國小六年級自然與生活科技之中相關碳循環之概念，三年級到五年級的課程中，包含「空氣中含有二氧化碳，且其可溶於水，植物行光合作用所需，而呼吸作用會排出二氧化碳」、「岩石風化作用消耗二氧化碳，火山作用釋放二氧化碳」，這些要素

及過程整合後亦可設計「碳循環」課程教學，然在現有課程中，這些概念分散在各年級的課程中，在縱向的課程中，沒有一個單元的課程將這些概念進行連結。

國內外有研究顯示學生在碳相關的概念有不足的情形，如學生無法分辨自然界的二氧化碳含量和因人類過多使用化石燃料所造成的二氧化碳濃度上升的影響(Boyes & Stanisstreet, 1997)；全球暖化可以藉由減少使用無鉛汽油而降低(Francis et al., 1993)；認為增加二氧化碳的濃度可以導致食物中毒、心臟病和皮膚癌(Jeffries et al., 2001)。只有少部分學生瞭解二氧化碳是溫室氣體、更少部分學生可以描述二氧化碳濃度會影響地球表面溫度(林英傑、崔夢萍, 2011)。另外有一些研究也顯示學生認為二氧化碳濃度的增加會造成暖化現象加劇，但是根據學生的解釋是因為二氧化碳破壞臭氧層、臭氧層破洞造成紫外線增加，進而導致地表溫度上升(王亦欣, 2003；Boyes & Stanisstreet)。

全球暖化、節能減碳等環境議題是現行九年一貫課程重要的環境議題，其內容廣泛地分散於各學習領域。黃靖惠等(2012)在其研究中提出，「九年一貫教科書中有關『全球暖化概念』內容的單元數總計225個，占總單元數的16.5%」，能源教育概念在國小自然與生活科技領域的教科書中呈現「氣候變遷」相關內容比例最高(吳有為等, 2009)，有關節能減碳的觀點在國小自然與生活科技領域教科書中以環境變遷、資源與生態永續概念出現次數最多(古建國等, 2010)，而在高中教科書有關能源教育的內容，發現能源教育出現在物理、化學、地球科學、生物、地理、歷史等科，教學內容以知識為主，技能與情意偏低(李雅如, 1995)，然在這些全球暖化、節能減碳相關議題的課程內容中，卻未能連結碳循環概念。

Crawford-Brown與LaRocca (2006)，設計碳循環模組，用於地球系統科學或環境科學的高中或入門本科課程，研究發現，透過碳循環模組，學生能夠有系統地探索各種生物和地球化學過程之間的關係，以及它們與社會過程的相互作用，因為它們與大氣中碳的累積有關，該模組引導學生完成模型的建構，透過練習模擬環境過程或社會能源使用的變化，並透過使用模型來確定減少大氣二氧化碳的有效方法，經由使用這樣一個模組，學生可以理解地球系統和環境科學基礎學科之間的相互作用。綜合上述，小學課程有關氣候變遷及全球暖化的教學內容中，未有探討「碳循環」相關的內容，而有研究顯示透過教學設計，可以提升學生對碳循環的概念知識，碳循環本身為一個動態系統，因此本研究以碳循環為主題，進行繪圖任務融入建模教學的設計，建立碳循環模型，探討對學生系統思考能力的影響。

四、研究目的與待答問題

本研究的目的是以建模教學，探討學生系統思考能力及模型建立的情形，在過去的研究中，有研究使用模型進行教學(model-based instruction)，在科學課室中，教師可以透過模型的輔助設計教學活動促進學生的概念理解和推理技能，而學生可以透過模型的幫助以掌握探究的方法、理解抽象的概念和學習如何思考(Bielik et al., 2021; Blikstein et al., 2016; Eidin et al., 2023; Eshuis et al., 2022; Haensel, et al., 2023; Saba et al., 2023)。建模是一個複雜的過程，需要學生利用多種認知推理的過程(Mulder et al., 2016)，教師如何在過程中支持學生建模是重要的，本研究在學生建模的歷程中，加入繪圖任務，逐步引導學生將其對概念的認知於建模的過程中呈現。

概念圖是一種模型表徵的方式，建立概念圖被認為是一種有效的學習方法，它需要學生有系統的組織和整合他們的知識，這可以促進有意義的學習，然而，學生很少自發地參與有效知識整合所必需的認知過程(Eshuis et al., 2022)，另外概念圖可以作為學生理解因果關係、循環等的平臺，亦可作為老師評量學生系統思考的工具(林英杰等，2022；Khajeloo & Siegel, 2022)。不同模型建立方式有其優劣勢，綜合文獻，在過去建模教學的研究中有經由電腦建模促進學生學習成效，亦有以紙本建模的方式，增進學生概念學習，然未有研究進行比較建模方式對學生學習的影響，何者對建模能力、系統思考有較佳的影響有待討論。因此本研究以紙本概念圖建模、電腦動態概念圖建模進行建模教學設計，用以探討對學生模型建立及系統思考能力的影響。

依據研究目的，本研究的問題為：

- (一)在兩種建模教學前、中、後，各組學生模型建立的進步情形為何？
- (二)不同模型建立方式(紙本概念圖和電腦動態概念圖)對學生模型建立之影響差異情形為何？
- (三)在兩種建模教學前、後，各組學生系統思考能力的進步情形為何？
- (四)不同模型建立方式(紙本概念圖和電腦動態概念圖)對學生系統思考能力之影響差異情形為何？

參、研究方法

一、研究對象與研究設計

本研究的對象為臺中市某國小六年級的學生，共兩個班，紙本概念圖建模組男生14

人，女生15人，電腦動態概念圖建模組男生16人，女生13人，共58人，研究為便利取樣(convenience sampling)，以班級為單位，所有班級皆屬於男女合班的常態編班班級。本研究之六年級學生，在三年級開始修習自然與生活科技課程，課程內容中與碳循環相關的單元內容，主要在介紹二氧化碳的生成及其特性、功能，並未提及碳循環的概念知識，兩班學生皆未有使用概念圖及電腦輔助建模的學習經驗。本研究為瞭解繪圖任務融入建模教學對學生模型建立、系統思考能力的影響，研究採用準實驗研究法，以研究目的驅動設計模型，兩組學生皆採用相同的建模教學設計流程，唯在進行模型建立的繪圖任務教學介入不同。

二、教學設計

本研究係以建模教學的方式(modeling-based instruction)，採用Baek等(2011)所提出的以建模為中心的教學序列(Model-Centered Instructional Sequence, MIS)，此教學序列是為了促進學生參與科學建模而開發，以建模的實踐為教學的核心要素，包含：錨定現象及核心問題、建構初始模型、實徵探究、介紹科學知識、評估及修正初始模型、同儕評價、建立共識模型、使用模型預測或解釋；主題式課程設計，於彈性課程中進行12週，共16節課，如表1。研究中兩個班級的建模教學設計皆相同，兩者僅在繪圖任務的教學介入不同，如表2所述。

「紙本概念圖建模」的模型建立方式，是以紙本繪製概念圖的方法建立碳循環模型，以文字加上方框表示系統中的要素，要素間加上箭號連結來表達要素之間關係的方向，再寫下兩個要素之間關係的連接詞，是以「抽象」的文字及符號呈現，因要

表1：建模教學設計

建模教學序列	教學說明
錨定現象及核心問題	觀賞「自己的房子自己蓋」及「正負2度C」影片，提問：你覺得影片中有哪些部分和碳循環相關？引導確立核心問題：碳循環系統要素及過程。(2節課)
建構初始模型	以Quillin與Thomas (2015)提出的三階段教學介入，包含：情意、視覺素養以及模型導向的推理，用以提升學生在繪製模型的興趣及態度。(3節課)
實徵探究	進行「親親地球」桌上遊戲，本遊戲探討二氧化碳的排放問題，並閱讀氣溫、二氧化碳濃度變化的數據資料後引導進行分析，提供能幫助學生解決核心問題及修正模型的證據，讓學生在過程中透過遊戲體驗及數據探究進行系統思考。(2節課)
介紹科學知識	透過教學者講述、角色扮演活動(碳在生活環境中的移動)以及文本閱讀，加深學生對碳循環系統之科學概念的認識，進而促進學生進行系統思考。(2節課)
評估及修正初始模型	讓學生在經歷前面幾個流程的課程內容之後，能運用所學，與碳循環相關的知識概念，檢視自己所繪製的初始模型，再依據所學的內容修正模型，進行碳循環模型的第二次繪製。(1節課)
同儕評價	建立模型評估標準，並應用此評估標準進行對同儕模型的評估及建議。(2節課)
建立共識模型	共同討論建立完整的碳循環系統模型，以提問的方式，引導學生共同討論，逐漸凝聚對碳循環系統完整結構及完整的要素間關係的共識後，進行碳循環模型的第三次繪製。(2節課)
使用模型預測或解釋	學生操作「人與環境」電腦模擬遊戲，引導學生於電腦模擬遊戲中應用模型，請學生思考如何應用碳循環模型進行預測，並於模擬遊戲中解決問題，再透過模型進行解釋。(2節課)

表2：繪圖導向之教學介入

教學介入	紙本概念圖建模	電腦動態概念圖建模
情意	以指導語增加學生繪製模型的態度及認識模型的價值	1.以指導語增加學生繪製模型的態度及認識模型的價值 2.強化工具的模擬功能
視覺素養	引導學生以「抽象」的文字及符號建構要素及過程	引導學生以「抽象」的文字、符號建構要素及過程，並設定參數操作「動態模擬」
模型導向推理	引導學生以要素、關係、循環的繪製順序繪製模型	1.引導學生以要素、關係、循環的繪製順序繪製模型 2.強調使用動態模擬進行反思

素間的關係以文字或符號表示，無法進行動態模擬，為靜態的建模。電腦動態概念圖建模是使用SageModeler作為模型繪製的工具，SageModeler為免費的網路電腦建模工具，是美國密西根州立大學(Michigan State University)的CREATE for STEM Institute與非營利組織的Concord Consortium共同合作研發。SageModeler很適合學生們使用，讓他們可以建構出自己的動態模型。SageModeler是以學習者中心為設計理念，不需要熟練的

數學或操作技能，可以容易地建立動態的模型，對於國小六年級學生較容易操作。「電腦動態概念圖建模」是在SageModeler平臺上提供參考的要素及連接詞，讓學生在平臺上繪製概念圖來建立碳循環模型，模型建立的方式需先在平臺上建立系統要素的圖庫，從圖庫中選擇要素圖像移至平臺中並輔以文字說明圖像所表示的系統要素，要素間加上箭號連結來表達要素之間關係的方向，在箭號上寫下連接詞表示兩個要素之間的關係，

形成碳循環的概念圖，接著設定要素間關係的參數並進行動態模擬，模型的表達除「抽象」的文字及符號外，可以模擬要素間的關係，與紙本概念圖建模的差別是電腦動態概念圖建模可以進行「動態模擬」，屬於動態建模。教學設計如表1說明。

學生在建構模型的過程中，會著重於模型外在表徵的形成(Louca & Zacharia 2015; Penner et al., 1998)，通常僅考慮一個要素或一個關係、過程，未將模型視為一個整體(Sins et al., 2005)，而在建立模型的過程中是感覺到困難的(de Jong & van Joolingen, 1998)、難以在模型中表達想法(Sung & Oh, 2018)，在建模的過程中亦會感到不確定性(Jackson et al., 2008)。為了讓研究結果能有效呈現建模教學對學生模型建立及系統思考能力的影響，因此，本研究在建模教學活動中融入繪圖任務設計，透過教學介入降低學生建立模型、思考轉化的困難以及模型繪製的不確定性，提升模型建立的成效。繪圖任務的設計為在學生模型建立的過程中，進行三階段教學介

入——情意、視覺素養、模型導向的推理，讓學生能順利並完整地呈現模型。

Quillin與Thomas (2015)提出以繪圖進行學習，教師必須提供適當的支持以讓學生能掌握繪圖的技巧，以達到繪圖之教學目標，因此提出三個階段的介入，包含：情意、視覺素養以及模型導向的推理，用以提升學生在繪製模型的學習。本研究透過繪圖任務設計，包含紙本概念圖及電腦動態概念圖建模融入於建模教學序列，參考並修改自Quillin與Thomas之三階段介入，如表2及圖1，分別在兩個班級中進行繪圖任務。

三、資料蒐集與分析

本研究蒐集的資料包含「系統思考能力問答題」、「學生繪製的模型」。研究者使用「系統思考能力問答題」，以瞭解學生八項系統思考能力；使用「學生繪製的模型」，以瞭解學生在教學活動中模型的建立情形。

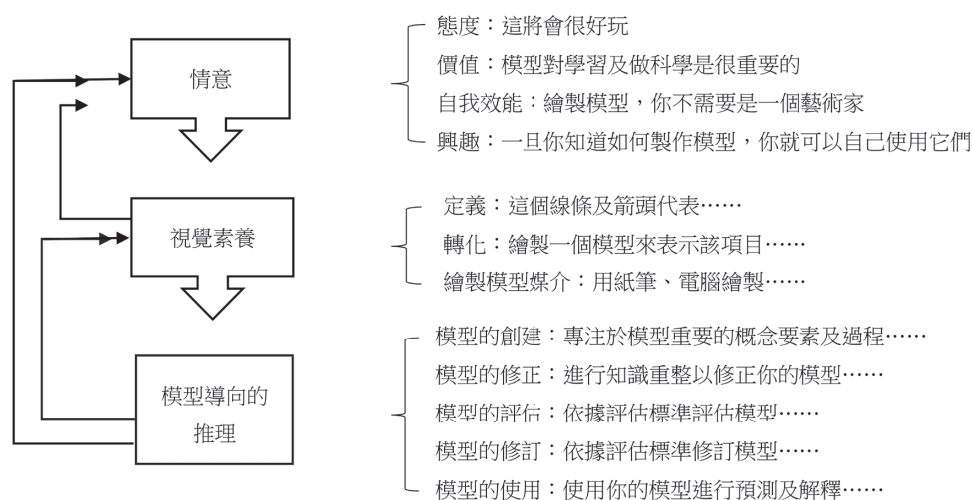


圖1：繪圖任務設計的三階段介入架構

資料來源：參考並修改自“Drawing-to-learn: A framework for using drawings to promote model-based reasoning in biology,” by K. Quillin & S. Thomas, 2015, *CBE—Life Sciences Education*, 14(1), 1-16.

本研究所蒐集的資料分析及處理方式如下。

(一)系統思考能力問答題

研究於教學過程開始及結束時讓學生填答「系統思考能力問答題」，計分方式是根據本研究所建立的系統思考命題，對學生的答案進行評分。根據Assaraf與Orion (2010b)提出的系統思考階層模式(System Thinking Hierarchical, STH)，八項系統思考能力可以分成三個階層，階層一為「分析系統要素」(analysis of system components)，包含「辨識系統中包含的要素及過程」的系統思考能力；階層二為「綜合系統要素」(synthesis of system components)，包含「辨識系統要素之間關係」、「辨識系統動態關係」、「理解系統循環本質」以及「在關係架構內組織系統的要素與過程」四項系統思考能力；階層三為「執行」(implementation)，包含「歸納」、「瞭解系統背後隱藏的面向」以及「時間性的思考－回顧與預測」三項系統思考能力。研究亦依這三階層進行統整分析。學生的答案中，依據系統思考各項能力之命題，能對應到一項能力之一個命題便給予一分，評分標準說明及題目如表3。系統思考能力問答題於教學過程前、後進行施測，進行相依樣本平均數考驗(成對樣本 t 檢定)，以瞭解教學前後之差異，並經由單因子共變數分析，瞭解不同建模方式對學生系統思考能力的影響。

(二)學生繪製的模型

本研究以學生模型建立的情形，作為教學設計的修正參考資料。因此根據學生所繪製的三次模型，分析其模型要素的完整性以

及模型中要素間關係的完整性。研究根據學生所繪製的模型，進行評分，評分方式參考並修正自McClure與Bell (1990)，學生所繪製的模型中，包含和碳循環相關的要素，一個要素給予1分，例如：二氧化碳、火山、水生植物、陸生植物、工廠等，此為相關要素概念，則給予分數，雲、食物等，則不給予分數，同一要素出現兩次以上則仍算1分。要素間的關係包含要素間的連接詞及方向，在模型中，兩個要素間的連接詞(過程)如果正確給予1分，而這兩個要素間連結的方向正確則再給予1分，例如：工廠和二氧化碳兩個要素，連接詞為排放，即為工廠排放二氧化碳，則給予1分，若連接詞為吸收，則不給分，在方向箭頭的連接為由工廠連至二氧化碳，則再給予1分，若方向錯誤則不給分，評分方式如圖2。三次模型繪製評分結果，進行重複量數單因子變異數分析，分析在教學前、中、後學生模型的進步情形，瞭解教學對模型建立的影響，以單因子共變數分析瞭解不同模型建立方式對模型建立的影響。

學生系統思考問答題及模型繪製的評分由兩位評分者進行，評分者間信度是採用交互觀察者一致性，一位評分者在科學教育研究所修習博士學位，一位則已取得科學教育博士學位，並為國小自然領域教師，有5年以上之自然領域教學經驗，兩位評分者進行評分之討論，透過試評建立共識，針對評分的差異再進行討論，評分者間信度的計算為一致百分比，以12份資料(21%)進行評分者間信度計算，系統思考共96題，模型繪製共36張模型圖，系統思考能力評分者間信度為.96，模型繪製為.95。

表3：系統思考能力問答题題目及評分說明

階層	項度	系統思考能力	評分說明	系統思考問答题
一	分析系統要素	辨識系統中包含的要素和過程之能力	碳循環相關的要素及過程之評分標準，依據系統思考能力命題，一個要素給予1分，一個過程便給予1分	請你描述碳循環系統中會有哪些要素和過程？(例如在水循環系統中，雲和河水都是要素；水蒸發為水蒸氣至大氣中，蒸發即為過程)
二	綜合系統要素	辨識系統要素之間關係的能力	學生的答案中可以呈現兩個要素間彼此的影響，或要素間一增一減的關係，一個影響或一個關係便給予1分	請問碳循環系統中，哪些要素之間是有關係的？(例如在水循環系統中，河流的污染會影響水質)
		辨識系統動態關係的能力	學生答案若可以呈現兩個要素間具有動態關係，亦即可以顯示出二氧化碳從一個要素移動至另一個要素，一個動態關係便給予1分	請問碳循環系統中，從哪些地方可以看出二氧化碳的移動？(例如在水循環系統中，地表水會滲入地底成為地下水)
		理解系統循環本質的能力	學生的答案若呈現要素之間的連結形成循環，亦即碳由起始點的要素，經過其他要素的歷程再回到起始點的要素，形成循環，一個循環便給予1分	請問碳循環系統中可以看到哪些循環？(例如在水循環系統中，海洋的水蒸發至大氣中冷凝形成雲，雲再降水至海洋中)
		在關係架構內組織系統的要素與過程的能力	學生的答案可以呈現在陸地發生的碳循環，與海洋中發生碳循環之間的交互作用，陸地和海洋的碳循環關係網彼此連結存在，便給予1分	請問碳循環在陸地發生的過程與在海洋中呈現的過程有關係嗎？請說明你的想法。(例如在水循環系統中，地表水會蒸發至大氣層中形成雲，再經由下雨落至地表，海洋中的水蒸發至大氣層中形成雲，再經由下雨落至海洋)
三	執行	歸納的能力	根據瞭解系統的機制(碳排放與碳固定)呈現外在現象對系統的影響，亦即學生的答案可以歸納出有、無外力介入時對碳循環系統的影響，一個答案給予1分	在有、無外力介入的因素下，請問地球上的碳循環會是什麼樣的情況？為什麼？
		瞭解系統背後隱藏的面向之能力	透過表面上看不到的模式和相互關係來瞭解系統現象，學生的答案可以看出碳循環系統對地球的影響為表面上看不到的面向，一個答案便給予1分	自然界中的碳循環維持平衡或失去平衡，對地球有什麼影響？請說明你的想法。
		時間性的思考回顧與預測的能力	理解系統中某些已呈現的交互作用是過去發生的，而未來的事件可能是當前交互作用的結果，學生可以從趨勢圖中看出歷年來二氧化碳濃度的變化，以及用以預測以前及未來二氧化碳的濃度並說出原因，分別給予1分	下圖為1960～2020年大氣中的二氧化碳濃度變化圖，請問在圖中你看到二氧化碳濃度如何變化？你覺得1950年及2030年的二氧化碳濃度應該會是如何？為什麼？

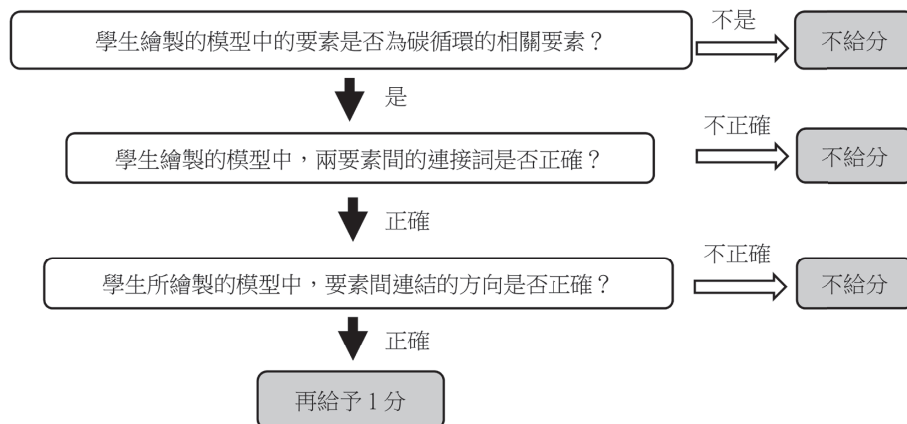


圖2：模型評分架構

資料來源：修改自McClure, J. R., & Bell, P. E. (1990). *Effects of an environmental educational related STS approach instruction on cognitive structures of pre-service teachers*. <https://bit.ly/3PN35DI>

肆、研究結果

一、建模教學對學生模型建立的影響

研究對學生所繪製的三次模型進行分析，本研究設計建模教學序列之課程，建模課程設計的教學介入是修改自Quillin與Thomas (2015)的三個面向，情意、視覺素養及模型導向推理。

依據模型評分標準，分別對學生在教學前、中、後所繪製之三張模型評分，以重複量數單因子變異數分析，瞭解在教學前、中、後所建立的三次模型進步情形，以單因子共變數分析，以瞭解不同建模方式對學生模型建立的影響。

(一)要素量在三次模型的進步情形

研究採用重複量數單因子變異數分析瞭解教學前、中、後模型的進步情形，在紙本概念圖組，先進行Mauchly球形檢定，由於結果達統計顯著($p < .05$)，顯示資料不符合球形檢定，自由度需要作校正，進而採用Greenhouse-Geisser進行校正後未達統計顯著水準($p > .05$)，符合球形檢定繼續進行

變異數分析(邱皓政，2010)。在三次模型間的要素量統計水準比較方面，達顯著水準($F = 84.786, p < .001$)，結果顯示以概念圖任務融入建模教學，會讓學生在碳循環模型上所呈現的要素量有所改變。再經事後比較發現(如表4)，最終模型在所繪製模型的要素量大於第二次模型($p < .001$)且大於初始模型($p < .001$)，又第二次模型大於初始模型($p < .001$)，表示在最終模型所呈現的要素量完整性顯著優於第二次模型及初始模型，而初始模型的要素量是最低的，亦即模型中所包含的要素最不完整。從結果可以得知，學生在經由以紙本概念圖為任務的建模教學之後，學生所繪製的模型中使用的要素量增加，模型完整性也提升。

在電腦動態概念圖組，進行Mauchly球形檢定，其結果未達顯著($p > .05$)，符合球形檢定因此可繼續進行變異數分析。在三次模型要素量比較方面，達顯著水準($F = 32.303, p < .001$)，表示電腦建模工具繪圖任務融入建模教學，會讓學生在碳循環模型要素量的呈現上有所進步。再經事後比較(如表4)，發現最終模型的平均數大於初始模型

表4：要素量與要素間關係的重複量數單因子變異數分析結果

建模方式	類別	人數	初始模型		第二次模型		最終模型		<i>F</i>	<i>p</i>	事後比較 ^a
			Mean	<i>SD</i>	Mean	<i>SD</i>	Mean	<i>SD</i>			
紙本概念	要素量	29	3.517	0.363	7.828	0.769	10.586	0.549	84.786	< .001	3 > 2 > 1
圖建模組	要素間關係	29	3.345	0.648	10.759	1.503	15.276	1.449	36.005	< .001	3 > 2 > 1
電腦動態	要素量	29	4.345	0.362	7.345	0.514	8.655	0.655	32.303	< .001	3 > 2 > 1
概念圖建 模組	要素間關係	29	0.138	0.096	6.000	0.919	10.310	1.287	45.044	< .001	3 > 2 > 1

註：^a1表示初始模型；2表示第二次模型；3表示最終模型。

的平均數($p < .001$)，亦大於第二次模型的平均數($p = .021$)，第二次模型的平均數大於初始模型的平均數($p < .001$)。亦即學生繪製的最終模型的要素量顯著高於初始模型及第二次模型，第二次模型亦顯著高於初始模型。由此可知，學生的最終模型要素量的完整性在三次模型中表現最優，第二次模型亦比初始模型佳，初始模型要素量的完整性在三次模型中為最差。從結果可以得知，學生在經由以電腦建模工具繪圖為任務的建模教學之後，學生所繪製的模型中使用的要素量增加，模型完整性也提升。

從上述結果，學生在經由以繪圖為任務的建模教學之後，學生可以使用較多的要素來建構模型，亦即學生經由對碳循環的瞭解，在其所繪製的模型中可以使用的要素量便增加，模型完整性也因而提升。

(二)要素間關係在三次模型的進步情形

要素間關係的分析為兩要素間過程(連接詞)及方向的量的分析，採用重複單因子變異數分析。在紙本概念圖組，首先進行Mauchly檢定，其結果未達顯著($p > .05$)，符合球形檢定因此可繼續進行變異數分析。在三次模型間的要素關係比較方面，達顯著水準($F = 36.005$, $p < .001$)，表示繪圖任務融入建模教學，會讓學生在碳循環模型上所呈現的要素間

連接詞的量有所轉變。再經事後比較發現(如表4)，最終模型的平均數大於第二次模型的平均數($p = .011$)，亦大於初始模型的平均數($p < .001$)，第二次模型的平均數大於初始模型的平均數($p < .001$)。亦即表示在最終模型及第二次模型中所呈現的模型要素間關係的完整性顯著優於初始模型，而最終模型中所呈現的模型要素間關係的完整性亦顯著優於第二次模型。由結果顯示，學生在以繪圖任務融入建模教學後，對要素間關係能更加瞭解，因此在關係間的連結正確性提升，能運用更多要素間關係的連結增加模型的完整性。

在電腦動態概念圖組，首先進行Mauchly球形檢定，其結果未達顯著($p > .05$)，符合球形檢定因此可繼續進行變異數分析。在三次模型要素間關係比較方面，達顯著水準($F = 45.044$, $p < .001$)，表示電腦建模工具繪圖任務融入建模教學活動，會讓學生在碳循環模型中要素間關係的呈現上有所轉變。再經事後比較(如表4)，發現最終模型的平均數大於第二次模型($p < .001$)，又大於初始模型的平均數($p < .001$)，亦即學生繪製的最終模型過程(連接詞)及方向的量顯著高於初始模型及第二次模型，第二次模型亦顯著高於初始模型。由此可知，學生的最終模型要素間關係的完整性比初始模型及第二次模型好，第二次模型亦比初始模型佳，初始模型要素間關

係的完整性在三次模型中為最差。從結果顯示，學生在以電腦建模工具繪圖任務融入建模教學後，對要素間關係能更加瞭解，因此在關係間的連結正確性提升，能運用更多的要素間關係的連結增加模型的完整性。

根據上述結果，學生在以繪圖任務融入建模教學後，採用紙本概念圖及電腦動態概念圖的建模方式，都能使學生對要素間關係能更加瞭解，因此在要素關係間連結的正確性提升，能運用更多要素間關係的連結，增加模型的完整性。

在上述要素量與要素間關係的統計結果分析中得知，紙本概念圖組在初始模型的要素量及要素間的關係顯著低於後面兩次的模型，最終模型的表現上優於初始及第二次模型，此研究結果與過去的研究一致(于富雲、陳玉欣，2007；邱喚文，2001；賴錦緣等，2015)，以紙本概念圖作為建模教學策略或學習者的學習策略，可以增進學習者進行思考、問題解決及概念的澄清，透過概念圖進行知識的統整與組織，促進學習者認知策略、後設認知策略的應用，以及因果關係的推理，並能使學生建構自我的學習。而電腦動態概念圖組在要素量及要素間關係的表現上，最終模型優於第二次模型，也優於初始模型，第二次模型優於初始模型，此結果與Spitulnik等(1999)的研究相同，電腦建模工具不但可以促進學生對於現象的理解，更可以協助學生建構出複雜模型及培養系統思考。

(三)不同建模方式在模型建立的差異情形

從表4的分析，顯示兩種建模方式融入建模教學的課程設計，都可以提升學生在繪製模型時所使用的要素量及要素間關係。為瞭解學生整體建模的進步情形，研究再進一步分析兩種建模方式的差異性，以瞭解在經歷相同的建模教學活動但不同模型建立方式後，模型完整性的表現情形。分析採用單因子共變數分析，以在教學前所繪製的第一次模型為共變數，學生在第二次模型及第三次模型，不同建模方式的差異情形。

在迴歸係數同質性檢定部分，在要素量方面，兩次建模之檢定結果，皆未達顯著(第二次模型， $F = 3.179$ ， $p > .05$ ；第三次模型， $F = 1.105$ ， $p > .05$)，在要素間關係方面，兩次建模之檢定結果，皆未達顯著(第二次模型， $F = 0.034$ ， $p > .05$ ；第三次模型， $F = 1.201$ ， $p > .05$)，因此可以進行共變數分析。從共變數分析結果可知，在要素量的第二次建模分析結果(如表5)，兩組建模方式並無顯著差異，但在平均數表現，紙本概念圖顯著優於電腦動態概念圖，而到教學完成的第三次建模(如表6)，兩組具有顯著差異，從成對比較得知，紙本概念圖表現優於電腦動態概念圖；在要素間關係的第二次建模以及第三次建模的分析結果，兩組都具有顯著差異，皆為紙本概念圖表現優於電腦動態概念圖。

綜合上述分析結果，在不同的建模方式下，紙本概念圖在要素量及要素間關係的

表5：以最初模型為共變數進行第二次模型單因子共變數分析結果

變項	調整後平均數(標準差)		F	p	η^2
	電腦動態概念圖建模	紙本概念圖			
要素量	6.983 (0.584)	8.190 (0.584)	0.350	.556	.006
要素間關係	7.928 (1.240)	8.831 (1.240)	8.948	.004	.140

表現優於電腦動態概念圖組，可知紙本概念圖組的學生所呈現的模型有較佳完整性。本研究設計兩種建模方式融入建模教學課程，「紙本概念圖建模組」的學生是在紙本上以概念圖的方式進行模型的繪製，「電腦動態概念圖建模組」的學生則是以電腦建模工具進行概念圖的繪製，兩組的最終模型中的表現皆為最佳，表示在教學後學生對於碳循環系統的認知能力有提升，建模教學可以促進學生對碳循環系統的認知，透過模型的推理，理解碳循環系統中要素之間的關係，可知以繪圖任務融入建模教學，不但可以促進學生對於現象的理解，更可以協助學生建構出複雜模型。因此，本研究所設計的建模教學活動及模型建置的教學介入，可以促進學生對碳循環的概念理解，增進學生透過模型的建立，將相關知識概念呈現於模型中，並促進同儕之間的互動及增加合作學習的機會，幫助學生建置更完整的碳循環模型。然從表5及表6結果可知，以紙本概念圖建模，在模型建立整體的表現優於電腦動態概念圖

建模組，推論「紙本概念圖」可以直接將想法表達於模型中，與學生學習的經驗較為相似，因此學生可以有比較多的時間進行思考，而電腦動態概念圖建模，須從平臺提供的圖像選擇系統中的要素，其思考需較長的時間經過轉化，因此，在模型建立的部分，學生使用紙本概念圖建模較能顯現其對碳循環的理解。

二、建模教學對系統思考能力的影響

系統思考能力之分析，是對於學生在教學前、後，進行系統思考能力問答題的前、後測，並進行評分，再依據評分結果進行成對樣本 t 檢定分析，以瞭解建模教學對學生系統思考能力的影響情形。分析結果如表7。從STH三階層分析的結果可以看出，學生在教學後，三個階層的系統思考能力皆有顯著的進步，可知本研究設計的建模教學，除了提升較初階的系統思考能力外，也可以培養學生高階的系統思考能力。本研究與Hung

表6：以最初模型為共變數進行最終模型單因子共變數分析結果

變項	調整後平均數(標準差)		F	p	η^2
	電腦動態概念圖建模	紙本概念圖			
要素量	8.255 (0.503)	10.986 (0.503)	7.551	.008	.121
要素間關係	12.130 (1.407)	13.456 (1.407)	7.564	.008	.121

表7：不同建模方式學生系統思考問答題成對樣本 t 檢定摘要表

建模方式	類別	人數	前測		後測		t	p	Cohen's d
			Mean	SD	Mean	SD			
紙本概念圖建模組	分析系統要素(階層一)	29	2.31	1.466	12.79	6.120	-9.555	<.001	1.774
	綜合系統要素(階層二)	29	1.38	1.399	3.83	2.765	-6.186	<.001	1.150
	執行(階層三)	29	1.59	0.867	3.55	1.378	-8.004	<.001	1.483
電腦動態概念圖建模組	分析系統要素(階層一)	29	1.83	1.692	13.38	6.657	-9.902	<.001	1.838
	綜合系統要素(階層二)	29	1.21	1.177	5.00	2.712	-7.376	<.001	1.369
	執行(階層三)	29	1.24	1.154	4.14	1.407	-9.817	<.001	1.820

(2008)研究結果相似，透過建模可以提升學生系統思考能力。

另外對於系統思考能力問答題的得分，以前測作為共變數，進行兩組的單因子共變數分析。在迴歸係數同質性檢定部分，各STH階層及全部試題之檢定結果，皆未達顯著(階層一， $F = 0.176$ ， $p > .05$ ；階層二， $F = 2.429$ ， $p > .05$ ；階層三， $F = 0.636$ ， $p > .05$)，因此可以進行共變數分析。共變數分析結果如表8顯示，在階層二，綜合系統要素的分析結果，電腦動態概念圖建模組顯著優於紙本概念圖建模組，亦即在要素間關係、系統動態關係、系統循環本質及關係架構內的組織能力面向，電腦動態概念圖建模組表現較優；階層一的系統分析要素及階層三的執行，兩種建模方式未達顯著差異，然以全部試題進行分析時，電腦動態概念圖建模組顯著優於紙本概念圖建模組，亦即在系統思考能力的提升部分，採用電腦動態建模較能促進學生系統思考能力。Evagorou等(2009)對國小高年級的學生進行電腦模擬的教學，提出在適當設計的學習環境的支持下，小學生至少可以培養一些系統思考技能，本研究結果與其一致，並更進一步比較不同建模方式對系統思考能力的影響，顯示電腦動態概念圖中所具有「動態模擬」的功能，有助於系統思考能力的提升。

伍、討論與建議

過去的研究顯示，透過建立模型可以幫助學生理解抽象的概念、和學習如何思考(Dörr et al., 1986; Mayer, 1989; Seel, 2000; Windschitl et al., 2008)，且對學生的批判性思考和探究技能是有幫助的(Hart, 2008; Hestenes, 1987; Khan, 2007; Lehrer & Schauble, 2005; Passmore & Stewart, 2002; Schwarz et al., 2009; Sell et al., 2006; Windschitl, et al.)。在本研究中，以建模教學的方式，設計碳循環課程，在教師的引導下，讓學生自行建立模型。碳循環系統是一個不易見的系統，對學生而言是一個抽象概念，從分析學生所建立的模型可以得知，兩組學生在碳循環最終模型中，呈現的要素完整性及要素間關係的完整性都有顯著進步，推論研究從課程的活動設計、教師的教學並透過建立模型引導思考，讓學生對碳循環的概念能有更完整的認識及理解，因此模型的建立在經由教學後可以更加地完整；且兩組學生在模型建立的過程中，學生因為經由模型導向的推理過程，引導學生對碳循環進行全面性的思考，將碳循環視為一個整體，而非單純兩個要素的關係，除此之外，教學介入的設計，引導學生在建立模型的過程中，透過推理過程幫助學生釐清、統整概念，對於碳循環系統中的要素、過程及關係有更整體的理解，且能降低學生

表8：兩組建模工具之系統思考單因子共變數分析摘要表

變項	調整後平均數(標準差)		F	p	η^2
	電腦動態建模	紙本概念圖			
分析系統要素(階層一)	13.38 (6.657)	12.79 (6.120)	1.385	.244	.025
綜合系統要素(階層二)	5.38 (2.597)	4.28 (2.671)	4.999	.029	.083
執行(階層三)	4.38 (1.237)	4.03 (1.085)	1.385	.244	.025
全部	22.52 (8.361)	20.17 (8.481)	4.079	.048	.069

在繪製過程的困難，因此兩組學生在模型建立上皆有顯著進步。另結果顯示，在模型建立的過程，紙本概念圖建模組的得分都優於電腦動態概念圖建模組，推測透過紙本繪製概念圖，與學生的學習經驗較為雷同，學生在平日的學習，仍以紙筆為主，因此學生繪製紙本概念圖比較快且比較直覺，所以在模型建立上表現較優，而電腦動態建模因為需要以半量化方式定義要素間關係，因此學生畫的要素數量較少，要素間關係也較少。

在過去的研究顯示，系統思考能力的相關研究主要集中在中學生和大學生(Assaraf & Orion, 2005; Assaraf et al., 2013; Batzri et al., 2015; Golan & Reiser, 2004; Kali et al., 2003; Vachliotis et al., 2014)，關於小學生的系統思考能力的研究則較少，本研究以MIS設計建模教學活動，透過教學介入讓學生建立碳循環系統的模型，透過模型推理過程，理解碳循環的概念知識，從研究結果可以發現，教學後學生在系統思考能力三個階層表現都有進步，從過去系統思考相關的研究中(Assaraf & Orpaz, 2010; Assaraf et al.; Evagorou et al., 2009)，透過適切的教學設計，在小學教育而言，是可以發展學生第一階層的系統思考能力，亦即分析系統要素的系統思考能力，在階層二及階層三在小學階段則較難達成，相較於過去的研究，本研究的結果發現，本研究的建模教學的設計，除了可以提升小學生比較初階的系統思考能力，亦即階層一的分析系統要素之外，在階層二的綜合系統要素的系統思考能力及階層三執行的系統思考能力也都有顯著提升。另外從結果也發現，電腦動態概念圖組學生在系統思考能力的表現優於紙本概念圖組，推論電腦動態概念圖在繪製的過程中，學生在可以進行「動態模擬」，藉由定義與測試要素關係的功能，

看到其他變因的變化，有助釐清整個系統中要素間的關係，這可以協助引導學生做整體性的思考，協助學生理解碳循環的動態系統，因此有助於其系統思考；而紙本概念圖為靜態繪圖，學生在建立模型過程較著重在兩兩要素間的關聯，並未進行要素間動態關係的檢核思考過程，因此電腦動態概念圖組的學生，在系統思考能力的表現較優。綜上，本研究所設計的建模教學活動，對學生模型的建立及系統思考能力之提升皆有幫助，教學目的若是要利用建模促進學生概念之理解，建議採用紙本概念圖建模方式進行模型建立，若需提升學生之系統思考能力，建議採用電腦動態概念圖建模方式進行模型的建立。

研究在電腦動態概念圖建模組，採用SageModeler平臺讓學生進行模型的繪製，研究發現，國小六年級的學生，對於平臺的使用可以理解，但課程設計需要安排充足的時間讓學生進行模型的繪製。電腦建模中的模擬功能，雖然對於系統思考能力的培養具有顯著的效果，但建議在教學過程中應強調並引導學生使用模擬的功能，透過模擬理解系統中要素關係及動態關係，發揮使用電腦建模工具的效能。而從文獻中可以得知，學者應用於教學中尚其他的電腦建模工具，例如Model-it、Stagecast Creator等，在未來的研究中可以進一步探討不同電腦建模工具對培養學生系統思考能力的影響。

誌謝

感謝國科會計畫補助支持，計畫編號MOST 104-2511-S-003-059-MY4以及NSTC 112-2410-H-003-039-MY3，使本研究得以順利完成。

參考文獻

- 于富雲、陳玉欣(2007)。不同知識表徵建構的學習策略對自然科學學習成效之影響。《科學教育學刊》，15(1)，99-118。https://doi.org/10.6173/CJSE.2007.1501.05
- [Yu, F.-Y., & Chen, Y.-S. (2007). Effects of learning strategies of different knowledge representation on science learning. *Contemporary Journal of Science Education*, 15(1), 99-118. https://doi.org/10.6173/CJSE.2007.1501.05]
- 王亦欣(2003)。探討國二學生閱讀漫畫表徵的文本對地球科學概念學習的影響——以天文和溫室效應為例。未出版之博士論文。國立臺灣師範大學。
- [Wang, Y.-S. (2003). *Exploring the impact of reading texts represented by comics on the learning of earth science concepts among student of second grade junior high school—Taking astronomy and the greenhouse effect as examples* [Unpublished doctoral dissertation]. National Taiwan Normal University.]
- 王曉璿、陳文鴻、邱宜箴(2010)。運用概念圖輔助國小學童主題式程式設計課程效益探究。收錄於荊溪昱(編著)，科技教育課程改革與發展學術研討會論文集(頁94-99)。國立高雄師範大學工業科技教育學系。https://doi.org/10.29495/CITE.201006.0094
- [Wang, H.-S., Chen, W.-H., & Chiu, Y.-C. (2010). The effects of applying concept maps in elementary school students' theme-based programming design course. In H.-Y. Ching (Ed.), *2010 International Conference Proceedings: Curriculum & Instruction in Technology Education* (pp. 94-99). Department of Industrial Technology Education, National Kaohsiung Normal University. https://doi.org/10.29495/CITE.201006.0094]
- 古建國、鄭善修、朱俊佑(2010，10月)。節能減碳概念在國小自然教科書內容分析。2010環境教育學術暨實務交流研討會，臺中縣，臺灣。
- [Ku, C.-K., Cheng, S.-H., & Jhu, J.-Y. (2010, October). *The content analysis of concepts of energy saving and carbon reduction in the elementary science textbooks*. 2010 Huanjing Jiaoyu Xue-shu ji Shiwu Jiaoliu Yantaohui, Taichung, Taiwan.]
- 李文瑜、王亞喬(2024)。電腦輔助科學建模教學：發展現況與研究。收錄於邱美虹(編著)，科學探究與實作之理念與實踐(頁149-176)。國立臺灣師範大學出版中心。
- [Lee, S. W.-Y., & Wang, Y.-C. (2024). Computer-assisted scientific modeling teaching: Current development and research. In M.-H. Chiu (Ed.), *Rationale and implementation of scientific inquiry and practice* (pp. 149-176). National Taiwan Normal University Press.]
- 李雅如(1995)。高中教科書內能源教育之內容分析。未出版之碩士論文。國立彰化師範大學。
- [Lee, Y.-R. (1995). *The content analysis of energy education within senior high school textbooks* [Unpublished master thesis]. National Changhua University of Education.]
- 吳有為、張自立、辛懷梓(2009，6月)。以KEEP教材能源教育概念為基礎之小學教科書能

源教育內容分析研究。華人地區社會變遷與科學師資培育國際學術研討會，臺北市，臺灣。

[Wu, Y.-W., Chang, T.-L., & Hsin, H.-T. (2009, June). *Analysis of coverage of energy education concepts in elementary school textbooks based on the concepts in KEEP instructional materials*. International Academic Conference of Chinese Social Change and Science Teacher Education, Taipei, Taiwan.]

林英杰、李文瑜、莊秋蘭(2022)。系統思考能力的分析架構、評量與教學：K-12科學教育相關實徵性研究之文獻回顧。師資培育與教師專業發展期刊，15(1)，57-90。https://doi.org/10.53106/207136492022041501003

[Lin, Y.-C., Lee, S. W.-Y., & Chuang, C.-L. (2022). A review of empirical studies about systems thinking in science education. *Journal of Teacher Education and Professional Development*, 15(1), 57-90. https://doi.org/10.53106/207136492022041501003]

林英傑、崔夢萍(2011)。電腦輔助建模學習活動對國小高年級學生溫室效應與全球暖化學習影響之研究。環境教育研究，9(1)，37-74。https://doi.org/10.6555/JEER.9.1.037

[Lin, Y.-C., & Tsuei, M.-P. (2011). Effects of computer-based modeling learning activities on elementary school students' learning outcomes about the greenhouse effect and global warming. *Journal of Environmental Education Research*, 9(1), 37-74. https://doi.org/10.6555/JEER.9.1.037]

林素妃、蘇明俊、周建和(2008)。運用概念圖教學探究國中生概念改變之研究——以「壓力」單元為例。物理教育學刊，9(1)，19-42。

[Lin, S.-F., Su, M.-J., & Chou, C.-H. (2008). Exploring conceptual change using concept map as strategy to teach physics. *Chinese Physics Education*, 9(1), 19-42.]

邱喚文(2001)。利用概念圖探究國中三年級學生「酸與鹼」的概念學習。未出版之碩士論文。國立臺北師範學院。

[Chiu, H.-W. (2001). *Liyong gainiantu tanjiu guozhong sannianji xuesheng "suan yu jian" de gainian xuexi* [Unpublished master thesis]. National Taipei University of Education.]

邱皓政(2010)。量化研究與統計分析：SPSS (PASW)資料分析範例(第五版)。五南。

[Chiou, H. (2010). *Lianghua yanjiu yu tongji fenxi: SPSS (PASW) ziliao fenxi fanli* (5th ed.). Wu-Nan.]

徐瑛黛、李文瑜(2020)。電腦輔助環境融入科學建模教學對學生模型建立之影響。數位學習科技期刊，12(2)，25-53。https://doi.org/10.3966/2071260X2020041202002

[Hsu, Y.-T., & Lee, S. W.-Y. (2020). The influence of integrating computer-supported environments into science modeling-based instructions on students' model construction. *International Journal on Digital Learning Technology*, 12(2), 25-53. https://doi.org/10.3966/2071260X2020041202002]

教育部(2018)。十二年國民基本教育課程綱要——國民中小學暨普通型高級中等學校：自然科學領域。http://bit.ly/3VFDBf1

[Ministry of Education. (2018). *Curriculum guidelines of 12-year basic education for elementary, junior high schools and general senior high schools—The domain of natural sciences*. http://bit.ly/3VFDBf1]

張志康、邱美虹(2009)。建模能力分析指標的發展與應用——以電化學為例。科學教育學刊，17(4)，319-342。https://doi.org/10.6173/CJSE.2009.1704.04

[Chang, C.-K., & Chiu, M.-H. (2009). The development and application of modeling ability analytic index-take electrochemistry as an example. *Contemporary Journal of Science Education*, 17(4), 319-342. https://doi.org/10.6173/CJSE.2009.1704.04]

莊秋蘭、李文瑜(2020)。探討建模教學對國小學童環境素養之影響。師資培育與教師專業發展期刊，13(2)，115-143。https://doi.org/10.3966/207136492020081302005

[Chuang, C.-L., & Lee, S. W.-Y. (2020). Exploring the impact of modeling-based instruction on elementary school students' environmental literacy. *Journal of Teacher Education and Professional Development*, 13(2), 115-143. https://doi.org/10.3966/207136492020081302005]

曾茂仁、邱美虹(2021)。透過建模教學提升學生在化學電池概念和建模能力上的表現。科學教育學刊，29(2)，137-165。https://doi.org/10.6173/CJSE.202106_29(2).0003

[Zeng, M.-R., & Chiu, M.-H. (2021). Eliciting students' understanding of chemical battery and modeling competence via modeling-based instruction. *Contemporary Journal of Science Education*, 29(2), 137-165. https://doi.org/10.6173/CJSE.202106_29(2).0003]

黃靖惠、洪志誠、許瑛珣(2012)。九年一貫教科書「全球暖化概念」內容分析。教科書研究，5(3)，27-57。https://doi.org/10.6481/JTR.201212.0027

[Huang, J.-H., Hong, C.-C., & Hsu, Y.-S. (2012). A content analysis of the concept of global warming in textbooks for grades 1-9 in Taiwan. *Journal of Textbook Research*, 5(3), 27-57. https://doi.org/10.6481/JTR.201212.0027]

蔡哲銘、邱美虹、曾茂仁、謝東霖(2019)。探討高中學生於建模導向科學探究之學習成效。科學教育學刊，27(4)，207-228。https://doi.org/10.6173/CJSE.201912_27(4).0001

[Tsai, C.-M., Chiu, M.-H., Zeng, M.-R., & Hsieh, T.-L. (2019). The study of investigating high school students' learning performance under the instruction of model-based inquiry. *Contemporary Journal of Science Education*, 27(4), 207-228. https://doi.org/10.6173/CJSE.201912_27(4).0001]

賴慶三、倪啟堯(2014)。運用概念構圖於國小六年級學生動物繁殖概念學習之研究。南臺人文社會學報，11，1-32。

[Lai, C.-S., & Ni, C.-Y. (2014). A study of using concept mapping strategies for 6th graders' science learning on the concept of animal reproduction. *STUST Journal of Humanities and Social Sciences*, 11, 1-32.]

賴錦緣、陳勝美、吳正己(2015)。概念圖表徵形式對護理學生批判思考的影響。《教育實踐與研究》，28(1)，1-32。

[Lai, C.-Y., Chen, S.-M., & Wu, C.-C. (2015). Effects of different forms of concept-map representation on nursing students' critical thinking performances. *Journal of Educational Practice and Research*, 28(1), 1-32.]

Ainsworth, S., Prain, V., & Tytler, R. (2011). Drawing to learn in science. *Science*, 333(6046), 1096-1097. <https://doi.org/10.1126/science.1204153>

Aronson, D. (1997). Applying the power of systems thinking to innovation. *R&D Innovator*, 6(2).

Assaraf, O. B.-Z., & Orion, N. (2005). Development of system thinking skills in the context of earth system education. *Journal of Research in Science Teaching*, 42(5), 518-560. <https://doi.org/10.1002/tea.20061>

Assaraf, O. B.-Z., & Orion, N. (2010a). Four case studies, six years later: Developing system thinking skills in junior high school and sustaining them over time. *Journal of Research in Science Teaching*, 47(10), 1253-1280. <https://doi.org/10.1002/tea.20383>

Assaraf, O. B.-Z., & Orion, N. (2010b). System thinking skills at the elementary school level. *Journal of Research in Science Teaching*, 47(5), 540-563. <https://doi.org/10.1002/tea.20351>

Assaraf, O. B.-Z., & Orpaz, I. (2010). The “life at the poles” study unit: Developing junior high school students' ability to recognize the relations between earth systems. *Research in Science Education*, 40(4), 525-549. <https://doi.org/10.1007/s11165-009-9132-2>

Assaraf, O. B.-Z., Dodick, J., & Tripto, J. (2013). High school students' understanding of the human body system. *Research in Science Education*, 43(1), 33-56. <https://doi.org/10.1007/s11165-011-9245-2>

Baek, H., Schwarz, C., Chen, J., Hokayem, H., & Zhan, L. (2011). Engaging elementary students in scientific modeling: The MoDeLS fifth-grade approach and findings. In M. Khine & I. Saleh (Eds.), *Models and Modeling* (pp. 195-218). Springer. https://doi.org/10.1007/978-94-007-0449-7_9

Batzri, O., Assaraf, O. B.-Z., Cohen, C., & Orion, N. (2015). Understanding the earth systems: Expressions of dynamic and cyclic thinking among university students. *Journal of Science Education and Technology*, 24(6), 761-775. <https://doi.org/10.1007/s10956-015-9562-8>

Baumfalk, B., Bhattacharya, D., Vo, T., Forbes, C., Zangori, L., & Schwarz, C. (2019). Impact of model-based science curriculum and instruction on elementary students' explanations for the hydrosphere. *Journal of Research in Science Teaching*, 56(5), 570-597. <https://doi.org/10.1002/tea.21514>

Bielik, T., Fonio, E., Feinerman, O., Duncan, R. G., & Levy, S. T. (2021). Working together: Integrating computational modeling approaches to investigate complex phenomena. *Journal of Science Education and Technology*, 30(1), 40-57. <https://doi.org/10.1007/s10956-020-09869-x>

- Bielik, T., Opitz, S. T., & Novak, A. M. (2018). Supporting students in building and using models: Development on the quality and complexity dimensions. *Education Science*, 8(3), Article 149. <https://doi.org/10.3390/educsci8030149>
- Blikstein, P., Fuhrmann, T., & Salehi, S. (2016). Using the bifocal modeling framework to resolve “discrepant events” between physical experiments and virtual models in biology. *Journal of Science Education and Technology*, 25(3), 513-526. <https://doi.org/10.1007/s10956-016-9623-7>
- Boersma, K., Waarlo, A. J., & Klaassen, K. (2011). The feasibility of systems thinking in biology education. *Journal of Biological Education*, 45(4), 190-197. <https://doi.org/10.1080/00219266.2011.627139>
- Boyes, E., & Stanisstreet, M. (1997). Children’s models of understanding of two major global environmental issues (ozone layer and greenhouse effect). *Research in Science & Technological Education*, 15(1), 19-28. <https://doi.org/10.1080/0263514970150102>
- Capra, F. (1996). *The web of life: A new synthesis of mind and matter*. Flamingo.
- Cheng, M.-F., & Lin, J.-L. (2015). Investigating the relationship between students’ views of scientific models and their development of models. *International Journal of Science Education*, 37(15), 2453-2475. <https://doi.org/10.1080/09500693.2015.1082671>
- Cook, M. P. (2006). Visual representations in science education: The influence of prior knowledge and cognitive load theory on instructional design principles. *Science Education*, 90(6), 1073-1091. <https://doi.org/10.1002/sce.20164>
- Crawford-Brown, D., & LaRocca, S. (2006). Teaching systems principles and policy applications using a reduced-scale carbon cycle model for global warming. *Journal of Geoscience Education*, 54(3), 301-311. <https://doi.org/10.5408/1089-9995-54.3.301>
- de Jong, T., & van Joolingen, W. R. (1998). Scientific discovery learning with computer simulations of conceptual domains. *Review of Educational Research*, 68(2), 179-201. <https://doi.org/10.3102/00346543068002179>
- DeHaan, R. L. (2009). Teaching creativity and inventive problem solving in science. *CBE—Life Sciences Education*, 8(3), 172-181. <https://doi.org/10.1187/cbe.08-12-0081>
- Dörr, G., Seel, N. M., & Strittmatter, P. (1986). Mentale modelle: Alter wein in neuen schläuchen? *Unterrichtswissenschaft*, 2, 168-189.
- Eidin, E., Bielik, T., Touitou, I., Bowers, J., McIntyre, C., Damelin, D., & Krajcik, J. (2023). Thinking in terms of change over time: Opportunities and challenges of using system dynamics models. *Journal of Science Education and Technology*, 33(1), 1-28. <https://doi.org/10.1007/s10956-023-10047-y>
- Eshuis, E. H., ter Vrugte, J., & de Jong, T. (2022). Supporting reflection to improve learning from self-generated concept maps. *Metacognition and Learning*, 17(3), 691-713. <https://doi.org/10.1007/s11464-022-10047-y>

org/10.1007/s11409-022-09299-7

- Evagorou, M., Korfiatis, K., Nicolaou, C., & Constantinou, C. (2009). An investigation of the potential of interactive simulations for developing system thinking skills in elementary school: A case study with fifth-graders and sixth-graders. *International Journal of Science Education*, 31(5), 655-674. <https://doi.org/10.1080/09500690701749313>
- Francis, C., Boyes, E., Qualter, A., & Stanisstreet, M. (1993). Ideas of elementary students about reducing the “greenhouse effect.” *Science Education*, 77(4), 375-392. <https://doi.org/10.1002/sce.3730770403>
- Gilbert, J. K. (1993). *Models and modeling in science education*. Association for Science Education.
- Golan, R., & Reiser, B. (2004, April). *Investigating students’ reasoning about the complexity manifested in molecular genetics phenomena*. Annual Meeting of the American Educational Research Association, San Diego, CA.
- Haensel, M., Schmitt, T. M., & Bogenreuther, J. (2023). Teaching the modeling of human-environment systems: Acknowledging complexity with an agent-based model. *Journal of Science Education and Technology*, 32(2), 256-266. <https://doi.org/10.1007/s10956-022-10022-z>
- Hart, C. (2008). Models in physics, models for physics learning, and why the distinction may matter in the case of electric circuits. *Research in Science Education*, 38(5), 529-544. <https://doi.org/10.1007/s11165-007-9060-y>
- Hestenes, D. (1987). Toward a modeling theory of physics instruction. *American Journal of Physics*, 55(5), 440-454. <https://doi.org/10.1119/1.15129>
- Hipkins, R., Bull, A., & Joyce, C. (2008). The interplay of context and concepts in primary school children’s systems thinking. *Journal of Biological Education*, 42(2), 73-77. <https://doi.org/10.1080/00219266.2008.9656114>
- Hmelo, C. E., Holton, D. L., & Kolodner, J. L. (2000). Designing to learn about complex systems. *Journal of the Learning Sciences*, 9(3), 247-298. https://doi.org/10.1207/S15327809JLS0903_2
- Hogan, K. (2000). Exploring a process view of students’ knowledge about the nature of science. *Science Education*, 84(1), 51-70. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1098-237X\(200001\)84:1<51::AID-SCE5>3.0.CO;2-H](https://doi.org/10.1002/(SICI)1098-237X(200001)84:1<51::AID-SCE5>3.0.CO;2-H)
- Hung, W. (2008). Enhancing systems-thinking skills with modelling. *British Journal of Educational Technology*, 39(6), 1099-1120. <https://doi.org/10.1111/j.1467-8535.2007.00791.x>
- Jackson, J., Dukerich, L., & Hestenes, D. (2008). Modeling instruction: An effective model for science education. *Science Educator*, 17(1), 10-17.
- Jacobson, M. J., & Wilensky, U. (2006). Complex systems in education: Scientific and educational importance and implications for the learning sciences. *Journal of the Learning Sciences*, 15(1), 11-34. https://doi.org/10.1207/s15327809jls1501_4

- Jeffries, H., Stanisstreet, M., & Boyes, E. (2001). Knowledge about the 'greenhouse effect': Have college students improved? *Research in Science & Technological Education*, 19(2), 205-221. <https://doi.org/10.1080/02635140120087731>
- Jonassen, D., Strobel, J., & Gottdenker, J. (2005). Model building for conceptual change. *Interactive Learning Environments*, 13(1-2), 15-37. <https://doi.org/10.1080/10494820500173292>
- Jong, J.-P., Chiu, M.-H., & Chung, S.-L. (2015). The use of modeling-based text to improve students' modeling competencies. *Science Education*, 99(5), 986-1018. <https://doi.org/10.1002/sce.21164>
- Kali, Y., Orion, N., & Eylon, B.-S. (2003). Effect of knowledge integration activities on students' perception of the earth's crust as a cyclic system. *Journal of Research in Science Teaching*, 40(6), 545-565. <https://doi.org/10.1002/tea.10096>
- Keynan, A., Assaraf, O. B.-Z., & Goldman, D. (2014). The repertory grid as a tool for evaluating the development of students' ecological system thinking abilities. *Studies in Educational Evaluation*, 41, 90-105. <https://doi.org/10.1016/j.stueduc.2013.09.012>
- Khajeloo, M., & Siegel, M. A. (2022). Concept map as a tool to assess and enhance students' system thinking skills. *Instructional Science*, 50(3), 571-597. <https://doi.org/10.1007/s11251-022-09586-5>
- Khan, S. (2007). Model-based inquiries in chemistry. *Science Education*, 91(6), 877-905. <https://doi.org/10.1002/sce.20226>
- Lehrer, R., & Schauble, L. (2005). Cultivating model-based reasoning in science education. In R. K. Sawyer (Ed.), *The Cambridge handbook of the learning sciences* (pp. 371-388). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511816833.023>
- Liu, J. (2013). The assessment agent system: Design, development, and evaluation. *Educational Technology Research and Development*, 61(2), 197-215. <https://doi.org/10.1007/s11423-013-9286-5>
- Louca, L. T., & Zacharia, Z. C. (2008). The use of computer-based programming environments as computer modelling tools in early science education: The cases of textual and graphical program languages. *International Journal of Science Education*, 30(3), 287-323. <https://doi.org/10.1080/09500690601188620>
- Louca, L. T., & Zacharia, Z. C. (2015). Examining learning through modeling in K-6 science education. *Journal of Science Education and Technology*, 24(2-3), 192-215. <https://doi.org/10.1007/s10956-014-9533-5>
- Maani, K. E., & Maharaj, V. (2004). Links between systems thinking and complex decision making. *System Dynamics Review*, 20(1), 21-48. <https://doi.org/10.1002/sdr.281>
- Mayer, R. E. (1989). Models for understanding. *Review of Educational Research*, 59(1), 43-64. <https://doi.org/10.3102/00346543059001043>

- McClure, J. R., & Bell, P. E. (1990). *Effects of an environmental educational related STS approach instruction on cognitive structures of pre-service teachers*. <https://bit.ly/3PN35DI>
- Molinari, G. (2017). From learners' concept maps of their similar or complementary prior knowledge to collaborative concept map: Dual eye-tracking and concept map analyses. *Psychologie Française*, 62(3), 293-311. <https://doi.org/10.1016/j.psfr.2015.11.001>
- Mulder, Y. G., Bollen, L., de Jong, T., & Lazonder, A. W. (2016). Scaffolding learning by modeling: The effects of partially worked-out models. *Journal of Research in Science Teaching*, 53(3), 502-523. <https://doi.org/10.1002/tea.21260>
- National Research Council. (2012). *Discipline-based education research: Understanding and improving learning in undergraduate science and engineering*. National Academies Press. <https://doi.org/10.17226/13362>
- Passmore, C., & Stewart, J. (2002). A modeling approach to teaching evolutionary biology in high schools. *Journal of Research in Science Teaching*, 39(3), 185-204. <https://doi.org/10.1002/tea.10020>
- Passmore, C., Gouvea, J. S., & Giere, R. (2014). Models in science and in learning science: Focusing scientific practice on sense-making. In M. R. Matthews (Ed.), *International handbook of research in history, philosophy and science teaching* (pp. 1171-1202). Springer.
- Penner, D. E. (2000). Explaining systems: Investigating middle school students' understanding of emergent phenomena. *Journal of Research in Science Teaching*, 37(8), 784-806. [https://doi.org/10.1002/1098-2736\(200010\)37:8<784::AID-TEA3>3.0.CO;2-E](https://doi.org/10.1002/1098-2736(200010)37:8<784::AID-TEA3>3.0.CO;2-E)
- Penner, D. E., Lehrer, R., & Schauble, L. (1998). From physical models to biomechanics: A design-based modeling approach. *Journal of the Learning Sciences*, 7(3-4), 429-449. <https://doi.org/10.1080/10508406.1998.9672060>
- Plate, R. (2010). Assessing individuals' understanding of nonlinear causal structures in complex systems. *System Dynamics Review*, 26(1), 19-33. <https://doi.org/10.1002/sdr.432>
- Quillin, K., & Thomas, S. (2015). Drawing-to-learn: A framework for using drawings to promote model-based reasoning in biology. *CBE—Life Sciences Education*, 14(1), 1-16. <https://doi.org/10.1187/cbe.14-08-0128>
- Resnick, M., & Wilensky, U. (1993, April). *Beyond the deterministic, centralized mindsets: New thinking for new sciences*. Annual Meeting of the American Educational Research Association, Atlanta, GA.
- Richmond, B. (2001). *An introduction to systems thinking: STELLA software*. High Performance Systems.
- Riess, W., & Mischo, C. (2010). Promoting systems thinking through biology lessons. *International Journal of Science Education*, 32(6), 705-725. <https://doi.org/10.1080/09500690902769946>
- Rosen, Y., & Tager, M. (2014). Making student thinking visible through a concept map in comput-

- er-based assessment of critical thinking. *Journal of Educational Computing Research*, 50(2), 249-270. <https://doi.org/10.2190/EC.50.2.f>
- Saba, J., Hel-Or, H., & Levy, S. T. (2023). Much.Matter.in.Motion: Learning by modeling systems in chemistry and physics with a universal programing platform. *Interactive Learning Environments*, 31(5), 3128-3147. <https://doi.org/10.1080/10494820.2021.1919905>
- Schwarz, C. V., Reiser, B. J., Davis, E. A., Kenyon, L., Achér, A., Fortus, D., Shwartz, Y., Hug, B., & Krajcik, J. (2009). Developing a learning progression for scientific modeling: Making scientific modeling accessible and meaningful for learners. *Journal of Research in Science Teaching*, 46(6), 632-654. <https://doi.org/10.1002/tea.20311>
- Seel, N. M. (2000). *Psychologie des lernens: Lehrbuch für pädagogen und psychologen*. Ernst Reinhardt.
- Sell, K. S., Herbert, B. E., Stuessy, C. L., & Schielack, J. (2006). Supporting student conceptual model development of complex Earth systems through the use of multiple representations and inquiry. *Journal of Geoscience Education*, 54(3), 396-407. <https://doi.org/10.5408/1089-9995-54.3.396>
- Senge, P. M. (1990). *The fifth discipline: The art and practice of the learning organization*. Doubleday/Currency.
- Sherwood, D. (2002). *Seeing the forest for the trees: A manager's guide to applying systems thinking*. Nicholas Brealey.
- Shin, S.-S. (2016). Concept maps as instructional tools for improving learning of phase transitions in object-oriented analysis and design. *IEEE Transactions on Education*, 59(1), 8-16. <https://doi.org/10.1109/TE.2015.2418176>
- Sibley, D. F., Anderson, C. W., Heidemann, M., Merrill, J. E., Parker, J. M., & Szymanski, D. W. (2007). Box diagrams to assess students' system thinking about the rock, water and carbon cycles. *Journal of Geoscience Education*, 55(2), 138-146. <https://doi.org/10.5408/1089-9995-55.2.138>
- Sins, P. H. M., Savelsbergh, E. R., & van Joolingen, W. R. (2005). The difficult process of scientific modelling: An analysis of novices' reasoning during computer-based modelling. *International Journal of Science Education*, 27(14), 1695-1721. <https://doi.org/10.1080/09500690500206408>
- Sommer, C., & Lücken, M. (2010). System competence—Are elementary students able to deal with a biological system? *NorDiNa*, 6(2), 125-143. <https://doi.org/10.5617/nordina.255>
- Spitulnik, M. W., Krajcik, J., & Soloway, E. (1999). Construction of models to promote scientific understanding. In W. Feurzeig & N. Roberts (Eds.), *Modeling and simulation in science and mathematics education* (pp. 70-94). Springer. https://doi.org/10.1007/978-1-4612-1414-4_3
- Stuntz, L. N., Lyneis, D. A., & Richardson, G. P. (2002, July). *The future of system dynamics and*

- learner-centered learning in K-12 education—Essex Report*. 20th International Conference of the System Dynamics Society, Palermo, Italy.
- Sung, J. Y., & Oh, P. S. (2018). Sixth grade students' content-specific competencies and challenges in learning the seasons through modeling. *Research in Science Education*, 48(4), 839-864. <https://doi.org/10.1007/s11165-016-9589-8>
- Uesaka, Y., & Manalo, E. (2012). Task-related factors that influence the spontaneous use of diagrams in math word problems. *Applied Cognitive Psychology*, 26(2), 251-260. <https://doi.org/10.1002/acp.1816>
- Vachliotis, T., Salta, K., & Tzougraki, C. (2014). Meaningful understanding and systems thinking in organic chemistry: Validating measurement and exploring relationships. *Research in Science Education*, 44, 239-266. <https://doi.org/10.1007/s11165-013-9382-x>
- Wagh, A., & Wilensky, U. (2018). EvoBuild: A quickstart toolkit for programming agent-based models of evolutionary processes. *Journal of Science Education and Technology*, 27(2), 131-146. <https://doi.org/10.1007/s10956-017-9713-1>
- Wang, Y.-J., Lee, S. W.-Y., Liu, C.-C., Lin, P.-C., & Wen, C.-T. (2021). Investigating the links between students' learning engagement and modeling competence in computer-supported modeling-based activities. *Journal of Science Education and Technology*, 30(6), 751-765. <https://doi.org/10.1007/s10956-021-09916-1>
- Wilensky, U., & Reisman, K. (2006). Thinking like a wolf, a sheep, or a firefly: Learning biology through constructing and testing computational theories—An embodied modeling approach. *Cognition and Instruction*, 24(2), 171-209. https://doi.org/10.1207/s1532690xci2402_1
- Wilensky, U., & Resnick, M. (1999). Thinking in levels: A dynamic systems approach to making sense of the world. *Journal of Science Education and Technology*, 8(1), 3-19. <https://doi.org/10.1023/A:1009421303064>
- Windschitl, M., Thompson, J., & Braaten, M. (2008). Beyond the scientific method: Model-based inquiry as a new paradigm of preference for school science investigations. *Science Education*, 92(5), 941-967. <https://doi.org/10.1002/sci.20259>
- Yoon, S. A. (2008). An evolutionary approach to harnessing complex systems thinking in the science and technology classroom. *International Journal of Science Education*, 30(1), 1-32. <https://doi.org/10.1080/09500690601101672>

Investigating the Impact of Drawing-Oriented Scientific Modeling-Based Instruction on Model Building and Systems Thinking Competence Among Sixth-Grade Elementary Students

Chiu-Lan Chuang¹ and Silvia Wen-Yu Lee^{2,*}

¹Chung-Yie Elementary School, Taiping District, Taichung City

²Graduate Institute of Information and Computer Education, National Taiwan Normal University

Abstract

One of the important objectives of science education is to assist students in developing systematic thinking patterns and to cultivate the construction of scientific concepts through scientific modeling. The purpose of this study is to explore the effects of two types of modeling-based instructional activities on students' model building and systems thinking competence. The subjects were two sixth-grade classes, totaling 58 students. The teaching units utilized a "model-centered instructional sequence" for teaching design, and integrated "drawing-to-learn instructional intervention" approaches. The students were divided into two experimental groups, with model building using either paper-based concept maps or computer-based dynamic concept maps. Each teaching unit lasted 16 teaching periods. In terms of student models, repeated measures of Analysis of Variance (ANOVA) was used for analysis, showing that both groups made significant progress in "element quantity" and "relationships between elements" in the three models before, during, and after teaching. A one-way Analysis of Covariance (ANCOVA) with the initial model as a covariate was conducted to compare differences between the two groups. The results showed no significant difference in "element quantity" in the second model between the two groups, but the paper-based conceptual map modeling group outperformed the computer-based dynamic conceptual map modeling group in "relationships between elements"; in the final model, the paper-based group was superior to the computer-based group in both "element quantity" and "relationships between elements." In this study, elements refer to the basic components of scientific models, which are formed by elements and the relationships among them. Regarding the promotion of systems thinking competence, a t-test analysis showed that the systems thinking competence of both groups significantly improved after teaching. A one-way ANCOVA was conducted to examine the differences between the two groups, showing that the computer-based dynamic concept map modeling group had a better overall performance

* Corresponding author: Silvia Wen-Yu Lee, swylee@ntnu.edu.tw; ORCID: 0000-0001-6111-2055

Received: 2023/5/29, Revised: 2024/3/26, Accepted: 2024/3/27, Available Online: 2024/5/31

in systems thinking competence than the paper-based concept map modeling group. The results indicate that the modeling teaching designed in this study helps enhance the comprehensiveness of student model building and their systems thinking abilities. In terms of the differences between the two groups, the paper-based concept map modeling method was superior, while for the systems thinking competence, the computer-based dynamic concept map modeling method showed better results. The study also provides suggestions for future modeling-based instruction and the use of computer-assisted teaching.

Key words: Systems Thinking, Scientific Modeling-Based Instruction, Computer-Supported Modeling