

探討高中生在探究取向的社會性科學議題 學習中之探究表現

張文馨 吳建源 許瑛珩

本研究旨在探討探究取向的社會性科學議題 (socioscientific inquiry-based learning, SSIBL) 課程對高中生探究能力的影響, 以「減碳」議題為例。研究採用單組前後測設計, 對臺北市某高中2年級的49名學生進行調查, 通過前後測與學習單內容分析來評估學生在「發現問題」、「規劃與研究」以及「論證與建模」3個探究子能力上的表現。研究結果顯示, SSIBL課程顯著提升了學生的整體探究能力。而先備探究能力較低的學生在所有探究子能力上的進步幅度均高於先備能力較高的學生, 表明SSIBL課程對於不同背景的學生具有普遍適用性。研究建議未來的課程設計可以進一步優化鷹架系統, 以滿足不同學習需求, 並探討如何在教學中有效融入新興科技來支持個別化教學。

關鍵詞: 探究能力、社會性科學議題、探究導向的社會性科學議題學習、
SSI 教材設計

收件: 2024年8月30日; 修改: 2024年11月18日; 接受: 2025年3月5日

張文馨, 國立臺灣師範大學科學教育研究所博士後研究員
吳建源, 國立員林高級中學代理教師
許瑛珩, 國立臺灣師範大學科學教育研究所教授, E-mail: yshsu@ntnu.edu.tw

Inquiry Performance of High School Students in Socioscientific Inquiry-Based Learning

Wen-Xin Zhang Jian-Yuan Wu Ying-Shao Hsu

This study analyzed the effects of socioscientific inquiry-based learning (SSIBL) on high school students' inquiry abilities, with a focus on the topic of carbon reduction. Under a single-group pretest-posttest design, 49 11th-grade students from a high school in Taipei City, Taiwan, were evaluated. Pretest, posttest, and worksheet results were used to assess student performance across three inquiry subskills: identifying questions, planning and research, and argumentation and modeling. The SSIBL curriculum significantly improved the students' overall inquiry abilities. Additionally, the students with lower pretest inquiry abilities demonstrated greater improvement across all inquiry subskills than did those with higher pretest abilities, underscoring the broad applicability of the SSIBL curriculum. Future curriculum designs can further optimize scaffolding systems to meet diverse learning needs and integrate technological tools to support individualized instruction.

Keywords: inquiry abilities, socioscientific topics, socioscientific inquiry-based learning (SSIBL), SSI-based teaching material design

Received: August 30, 2024; Revised: November 18, 2024; Accepted: March 5, 2025

Wen-Xin Zhang, Postdoctoral Fellow, Graduate Institute of Science Education, National Taiwan Normal University.

Jian-Yuan Wu, Substitute Teacher, National Yuanlin Senior High School.

Ying-Shao Hsu, Professor, Graduate Institute of Science Education, National Taiwan Normal University, E-mail: yshsu@ntnu.edu.tw

壹、緒論

探究取向的教材設計愈來愈受到教育研究者與教師的關注，尤其在各國教育改革強調培養學生具備批判性思維和解決問題能力的背景下，這種教材設計的意義顯得尤為重要。在當今科技飛速發展的社會中，隨著科技與環境等複雜議題的日益凸顯，學生不僅需要掌握學科知識，更需具備運用探究能力來解決實際問題的能力。因此，本研究的動機在於探索如何設計以培養學生探究能力為核心的教材，幫助學生有效應對現代社會中出現的各類社會性科學議題（socioscientific issue, SSI）（Sadler, 2004），如氣候變遷調適（Zhang & Hsu, 2021）、能源（Nida et al., 2021）、環境永續（Cha et al., 2021）、基因工程（Archila et al., 2022）、傳染病傳播（Puig et al., 2021）等問題，上述這些議題更強調社會、倫理與科學的交織性。本研究發展的課程即聚焦於當代的「減碳」議題，以回應全球對於環境保護和永續發展的需求。

在全球教育改革的推動下，許多國家已將探究能力作為核心教育目標之一。探究能力不僅是提升學生科學素養的重要途徑，更是幫助他們理解科學本質和社會中複雜議題的關鍵工具。芬蘭自 2016 年實施的課綱中強調探究學習，認為這是提高學生問題解決能力的有效途徑（洪詠善，2016）；美國科學促進學會（American Association for the Advancement of Science, 1990）也指出，探究學習能夠使學生更深入地理解科學知識與科學過程。我國的《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》（2018）同樣強調學生應具備發現問題、分析問題及解決問題的探究能力，並提出學生應在實際情境中運用這些能力來應對各類科學議題。

本研究的核心在於設計一套探究取向的教材，以有效培養高中生的探究能力。研究者在教育現場的觀察發現，傳統以「食譜式」實驗為主

的教學方式，往往無法充分培養學生的自主探究能力與批判性思維。學生在面對社會性科學議題時，由於缺乏進行自主探究的經驗，難以在解決問題的過程中發揮其探究潛力。因此，本研究旨在發展一套以探究取向為核心的社會性科學議題課程（課程名稱：減碳產電小大師），透過探究取向的社會性科學議題教學（socioscientific inquiry-based learning, SSIBL），幫助學生提升其探究能力，特別是在問題發現、解決方案規劃及結果論證等方面（Zeidler, 2014; Zeidler & Nichols, 2009）。研究將探討此課程對於高中生探究能力的影響，特別是學生在課程前後的探究能力進步情形。具體而言，本研究將評估不同探究能力起點的學生在 SSIBL 課程中的表現情況，以及探討不同背景與能力的學生在接受 SSIBL 課程後，其探究能力提升的差異。進一步瞭解 SSIBL 課程是否能有效提升學生的探究能力，為後續的教學設計與課程開發提供依據。

本研究的重要性在於填補國內探究取向教材設計研究的空白，特別是針對跨學科學習情境中的探究能力發展。國內過往的相關研究大多集中於單一學科的探究能力或教師專業發展，而較少直接探討如何透過教材設計提升學生跨科情境中的探究能力。因此，本研究所發展的 SSIBL 課程不僅符合國內教育政策的需求，還能提供未來探究取向課程設計的實證依據。此外，本研究也將以數位化平臺 CWISE 進行課程展示，增強教學靈活性與可操作性，適用於實體與遠距教學模式，有助於推動未來的探究取向教學實務。這項研究的結果將對未來課程設計與教學實務提供寶貴參考，促進探究取向教材在教育現場的廣泛應用，進一步提升學生面對現實問題的能力與科學素養。

基此，本研究提出兩個研究問題，分述如下：一、SSIBL 課程對學生學習探究能力的影響為何？二、SSIBL 課程對不同先備探究能力學生在學習探究能力的影響為何？

貳、文獻探討

一、科學探究能力

科學探究能力是現代科學教育中不可或缺的核心能力之一，它反映了學生在科學學習過程中，如何發現並解決問題。根據美國國家研究委員會（National Research Council (U.S.), NRC）於 2000 年出版《探究與國家科學教育標準》（NRC, 2000）一書中對於科學探究的定義，科學探究包括多個階段的實務活動，從觀察現象、提出研究問題與假設，到規劃實驗、分析數據、詮釋結果等。由此可知，科學探究涉及複雜且多元的實務活動，在這些實務活動中，學生需要結合知識概念與技能展現多樣化的認知能力，才能有效解決問題並建構對真實世界的理解（Kuo et al., 2015）。許多政策文件（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，2018；NRC, 2000）、相關研究（Krajcik et al., 1998; Krajcik et al., 2007; Vo & Simmie, 2024; Wu et al., 2015）已指出學生需具備一些基礎認知能力，才能進行有意義的探究實務活動並建構科學知識，包括提問、產生假說、設計研究流程、分析與詮釋資料等。這些能力是學生進行科學探究的基石，不僅能幫助學生更好地理解科學概念，還能協助他們在真實情境中解決問題（Abd-El-Khalick et al., 2004; Alcaraz-Dominguez et al., 2024），提升學生的科學素養使其成為可獨立解決問題的決策者。在臺灣 2018 年頒布的《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》（2018）中，科學探究能力被正式納入高中階段的核心學習目標之一，並提出具體定義，例如「規劃與研究」中，學生須具備根據探究問題，擬定完整計畫的能力，包含變因的設計、整合適當研究器材、提出詳細的步驟與產出有效的數據等。Vo 與 Simmie（2024）回顧在科技導入的學習環境中，學生的科學探究能力如何被評量。他們彙整過去相關研究的探究框架來分析學生的科學探究能

力組成，包含了提出問題或假設、設計實驗、分析資料、產生研究結論與解釋。他們發現隨著科技的進步，能夠評量學生更複雜且全面的探究能力，也更加強調要在真實情境中評量學生的科學探究，這與強調培養解決學生解決真實問題的訴求不謀而合。

科學探究能力的培養不僅限於科學教育本身，還有助於學生在未來面對複雜社會問題時具備批判性思維與解決問題的能力。實證研究表明，具備良好探究能力的學生往往在高等教育階段表現出更高的創造力與自主學習能力，並且能更好地應對跨學科挑戰（Furtak et al., 2012）。因此，通過持續的科學探究培養，學生可以發展出面對不確定性和挑戰的韌性，這對他們的職業生涯和社會責任感的形成具有深遠意義。

二、探究取向的教學模式與教材設計

為培養科學探究能力，探究取向的教學被提出。探究取向的教學並非一種特定的教學技術或策略（Grangeat, 2016），其訴求是讓學生投入一系列的探究實務活動，讓他們除了習得知識，也瞭解知識建構的過程與方法（陳素秋，2024）。因此，探討探究取向的教學將學生置於學習的中心，強調學生在解決問題過程中的積極參與，而非單純接受知識，最終目的是協助學生應對未來挑戰。基於這個理念，眾多學者提出探究取向的學習或教學模式。例如，美國生物科學課程研究會（Biological Sciences Curriculum Study, BSCS）於 20 世紀 80 年代提出的 5E 模型，旨在促進學生對科學概念的深刻理解和探究能力的培養。5E 模型所型塑的探究學習歷程包括參與、探索、解釋、延伸與評估 5 個階段，提供了一個結構化的框架，能夠幫助教師有效地設計探究式教學活動（Bybee et al., 2006）。

眾多研究結果顯示，當學生參與探究導向的學習過程時，不僅有助於提升他們的科學素養，還能更好地應對現實中的複雜問題（Lazonder & Harmsen, 2016），例如處理社會性科學議題（Sadler, 2004; Zeidler & Nichols, 2009）。Antonio 與 Prudente（2023）利用後設分析方法探討 20

篇實徵研究中的探究式教學成效，其結果發現探究式教學能有效提升學生的高層次思考技能（higher-order thinking skill），例如論證（effect size = 1.98）、創造思考（effect size = 1.87）、批判性思考（effect size = 1.47）、探究技能（effect size = 1.01）、後設認知（effect size = 0.32）等。這些能力與 21 世紀關鍵能力相對應，能協助學生應對全球化及技術快速變遷的挑戰（Binkley et al., 2012; DiBenedetto, 2019）。

探究取向教材設計的核心在於創造一個能激發學生積極思考與自主探索的學習環境。實務上，這類教材的設計著重於通過提出開放性問題、提供多樣化的實務機會，以及營造協作學習的氛圍，以促進學生的深度學習（Mang et al., 2021）。因此，探究取向的教材設計原則通常涵蓋以下幾個方面：設計具挑戰性的開放式問題（Krajcik & Delen, 2017），提供鷹架支持（Reiser & Tabak, 2014; Tabak & Kyza, 2018; van de Pol et al., 2010），以及創造鼓勵學生討論與協作的學習環境（Gillies, 2016; Johnson & Johnson, 2002）。然而，儘管探究取向教學理論和教材設計已廣泛應用，實際操作中仍存在挑戰。例如，學生若缺乏足夠的背景知識，可能會在探究過程中感到困惑，而教師也可能因為時間與資源的限制而難以有效地引導。

為了應對這些挑戰，教材中的鷹架設計可以採用分層策略（Santangelo & Tomlinson, 2012; Tomlinson, 2012），根據學生的先備知識與認知發展階段，提供不同難度和形式的學習支持。研究者曾經基於分散認知觀點、Kim 等人（2018）觀點綜整出以學習者為中心的鷹架學習系統（learner-centered scaffolding system, LSS）形貌，用來協助學生進行科學探究數位學習。在 LSS 中，鷹架可由教師、同儕、電腦／數位工具提供。提供的鷹架按照目的可區分成概念型（conceptual）、策略型（strategic）、動機型（motivational）、後設認知型鷹架（metacognitive）。概念型鷹架主要協助學生建構基礎知識概念；策略型幫助學生對學習任務流程、步驟等程序性知識的理解；動機型鷹架旨在提升學生的學習興趣與投入等情意面向的學習支持；後設認知型鷹架

則著重於引導學生反思並綜觀自己的學習歷程，對於學習過程中的困難與缺失進行檢討、評估與調整。LSS 中的多層次鷹架類似 Tabak (2004) 提出的混成鷹架 (synergistic scaffolds) 概念，期望透過多元鷹架間的互補關係，由教師、同儕與電腦／數位工具相互分擔教學責任，達到提升學生學習的目標。

三、社會性科學議題與探究學習

SSI 是涉及科學、社會、倫理及環境等多個層面的綜合問題，這些議題通常涉及高度不確定性的問題，例如基因工程 (Archila et al., 2022)、氣候變遷調適 (Zhang & Hsu, 2021) 等。SSI 的複雜性和跨學科性質使其成為現代教育中一個重要的教學內容，因為它不僅挑戰了學生的科學知識，也挑戰了他們的道德判斷與批判性思維 (Sadler, 2004)。由此可知，解決 SSI 這類爭議問題，不僅要求學生具備科學知識，還需要他們整合其他學科知識並基於不同社會文化做出證據導向的推理、道德判斷和決策。

SSI 的開放性與複雜性使探究取向的學習成為有效的教學模式之一，因為探究式學習可以幫助學生在面對這些複雜問題時，透過科學探究來發展批判性思維與論證能力 (Zeidler & Nichols, 2009)。當 SSI 與探究學習結合，學生被鼓勵通過觀察、實驗和推理等實務活動來探索 SSI 問題，從而提升他們的科學素養與社會責任感。這種結合不僅能讓學生在面對複雜社會問題時具備更全面的視角，也能幫助他們發展出批判性分析和決策能力。例如，通過探討全球變暖等議題，學生不僅學習到科學數據的蒐集與分析，還學會如何將這些知識應用於現實生活中的決策過程 (Tomas & Ritchie, 2011)。

然而 SSI 教學雖然具有促進學生高階思考能力的巨大潛力，但也面臨一些挑戰。研究顯示，學生在 SSI 教學中可能會因缺乏相關的背景知識而無法充分參與討論，或者在面對高度複雜的問題時感到不知所措 (Zeidler, 2014)。這些挑戰都需仰賴教師提供適當的學習支持，幫助

學生在面對 SSI 問題時逐步提升其批判性思維與問題解決能力（Pratiwi et al., 2016）。

四、探究取向的社會性科學議題教學

探究取向的社會性科學議題教學是歐洲教育領域中一種新興的教學模式，結合了科學探究、社會性科學議題和公民行動，旨在培養學生面對現實問題的批判性思維與行動力。SSIBL 的理論基礎源自於負責任的研究與創新（responsible research and innovation, RRI）理念，這一理念強調學生不僅應具備解決科學問題的能力，還應該在社會中履行他們的公民責任，積極參與社會相關的科學議題討論（Amos & Levinson, 2019）。SSIBL 的教學框架包括 3 個核心部分：社會性科學議題、基於探究的科學教育（IBSE）和行動（action），這 3 個部分互為支持，形成一個循環的教學過程（Levinson, 2017）。

考量 SSIBL 教學框架的複雜性，Amos 與 Levinson（2019）提出一個精簡的模式，包含 3 階段：提問（ask）、執行（enact）、行動（action）。在這個精簡模式中，學生首先接觸到一個具爭議性和開放性的 SSI 問題，教師可以透過各種鷹架協助學生釐清 SSI 情境與爭議，並由學生親自提出一個可研究且與情境相關的問題（ask），這個問題也可由教師引導或指定，視學生的認知能力發展而定。接著，學生規劃並投入探究實務活動，蒐集並分析數據（enact），最終透過與他人溝通互動，考量倫理道德、永續等社會期待，制定出具體且可行的行動方案來解決問題（action）。可知，SSIBL 不僅強調學生對科學知識的理解，還強調科學探究實務需與社會、經濟、環境等連結，強調學生在投入科學實務時，也須履行公民責任。這種教學方式能夠有效促進學生的探究能力、社會責任感和科學素養，並且讓他們能夠積極參與當代社會的各類重大議題（Levinson, 2018）。

事實上過去有眾多學者提出許多探究教學模式，嘗試培養學生的科學素養。除了前文所提到的 5E 探究學習，還有問題本位（problem-

based）、專題本位（project-based）兩種教學模式與 SSIBL 類似。與 SSIBL 類似，此兩種教學模式同樣起始於一個真實問題，學生透過一系列的探究活動（提出問題、規劃調查或實驗、分析與解釋調查結果等）來回應這個真實問題。不過，兩者在教學結構、學習目標等方面有些許差異（陳毓凱、洪振方，2007；Saputra et al., 2024）。在教學目標上，問題本位著重學生能從問題解決過程中培養批判性思維、問題解決能力等，強調理解和探索問題的根源；專題本位更側重最終能創造出一個具體的產品（專案、作品、方案等），注重學生如何將學習成果體現在具體的專案中。在教學結構上，問題本位重視問題的解構進而提出解決方法，因此學習過程較彈性，學生可能因為選擇問題的差異產生不同的學習成果；專題本位則利用驅動問題（driven questions），讓探究活動聚焦在一個特定問題或議題上。

研究者認為 SSIBL 更像是問題本位與專題本位的結合。SSIBL 以一個真實問題（SSI）作為學習情境，要求學生解構釐清 SSI 並訂定一個與 SSI 相關、可被探究的、契合自身興趣的研究問題（Levinson, 2018），透過探究實務蒐集相關資料與數據，基於數據進行證據導向的推理，最終產生一個具體的行動方案。這個方案可以是規劃倡議活動、製作宣傳海報、行動小手冊等，主要目的是能促進社會改革。然而，相較問題本位或專題本位的內涵在提升問題解決或科學探究，SSIBL 的內涵是有責任的研究與創新，強調科學研究與創新的成果或產品必須與人合作、服務於人（working with and for people），因此更強調學生在整個學習過程中必須察覺並理解任何科學活動與成果終將對社會與環境造成影響，也就是需要評估跟衡量整個探究活動中的任何決策在個人、社會甚至全球層級是否符合道德倫理、永續、社會期待等（Amos & Levinson, 2019; Levinson, 2018）。

根據 Högström 等人（2024）的回顧性文章指出，過去不乏許多結合 SSI 與探究式教學的實徵研究，例如 Kusumawati 等人（2022）的研究將 SSI 作為情境（水污染與空氣污染議題），檢視 32 位國中生接受

網路探究學習 (web-based inquiry) 課程後, SSI 相關知識與技能 (評估訊息、做決策等能力) 的進展, 結果顯示學生在這兩面向均有顯著提升。但這些結合 SSI 與探究式教學的相關研究並沒有跳脫傳統探究教學的框架, 主要目的還是透過讓學生投入探究實務活動, 使學生能夠批判性地分析訊息, 促進更深入的理解和學習參與, 鮮少關注 SSI 教學更核心的理念, 如社會倫理、道德推理、永續等面向。

SSIBL 的興起與科學教育領域對於科學素養 (scientific literacy) 的定義轉變有關 (Viehmann et al., 2024)。Roberts 與 Bybee (2014) 將科學素養分成兩類: 願景一著重科學知識的建構, 強調理解科學事實、原理、理論和過程, 經常與傳統科學教育聯繫在一起。願景二強調應用知識到真實生活中能力。這個願景在願景一的基礎上進行了擴展, 強調了理解科學如何與個人和社會問題連結的重要性。它提倡面對社會科學困境時的批判性思維、知情決策和負責任的公民意識。一些學者認為應該重視科學素養中的社會政治參與 (socio-political action), 透過參與公眾討論與採取行動來解決影響全球福祉的問題 (Bencze et al., 2012; Mang et al., 2021)。SSIBL 的內涵呼應這種科學素養願景二的訴求, 相較過去僅將 SSI 作為教學情境的探究式教學、傳統式教學更符合近期科學教育的趨勢, 這也是本研究之所以選擇 SSIBL 模式發展探究取向課程的理由。

由於 SSIBL 是個新興的教學模式, 且歐盟提出 SSIBL 的本意是提升教師 SSI 教學的專業知能, 雖然在歐盟計畫中的教師已經基於 SSIBL 發展許多課程, 但鮮少有實徵研究檢視 SSIBL 對學生探究能力的影響 (Baek et al., 2022; Christodoulou & Grace, 2024; Georgiou & Kyza, 2023; Maryam & Suwono, 2023)。例如 Maryam 與 Suwono (2023) 的準實驗研究比較 SSIBL 課程與引導式探究課程對高中學生的社會性科學議題決策能力的影響, 結果顯示接受 SSIBL 課程的學生, 其決策能力顯著優於對照組, 不過 Maryam 與 Suwono 的研究並沒有列出具體的 SSIBL 課程規劃與教材設計。研究者認為既然 SSIB 更符應新的科學素養願景, 應該增加更多實徵研究檢視 SSIBL 教學模式對培養學生科學素養、高階思考技能或

公民素養，甚至應該檢視課程 SSIBL 教學模式在課程發展與教材設計上的應用與原則，才能提供未來研究者與教學實務工作者參考。

綜合上述文獻探討，探究取向的教材設計在培養學生探究能力和應對社會性科學議題方面應該具有成效。SSIBL 作為一種結合探究學習與 SSI 教學的模式，為學生提供了多元化的學習途徑，除了提升他們的科學探究能力，亦能幫助他們發展批判性思維、公民責任感和問題解決能力。基於這些理論基礎，本研究將發展一套具體的探究取向教材：SSIBL 課程，並檢視其對高中生探究能力的影響，為未來的教育實踐提供新的啟示與支持。如圖 1 所示，課程架構主要按照 SSIBL 精簡模式發展，教材設計則按照探究取向的教材設計原則且結合研究者綜整出的 LSS 學習觀點，課程中的鷹架分成固定性（不變動）、彈性鷹架（隨學習者需求調整），各別由教材／電腦、或教師／同儕提供。研究者考量到學習過程中的鷹架類型的設計（概念型、策略型、動機型、後設認知型）與任務情境、教學目標、學生先備能力等因素有關，因此圖中未標示鷹架類型。圖 1 中的藍色字呈現 3 個探究取向的設計原則：（一）提供開放性問題、（二）提供多層次、以學習者為中心的鷹架學習系統、（三）建構多元協作學習的環境。

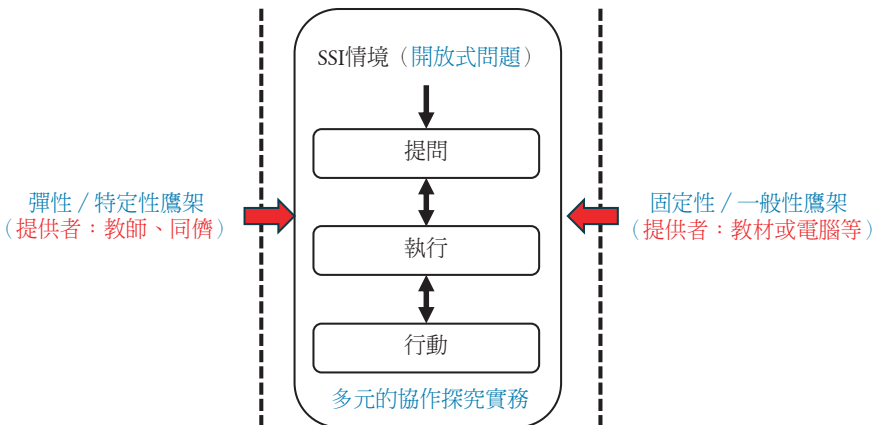


圖 1 結合 SSIBL 模式與 LSS 觀點的探究取向課程設計

註：藍色字標示探究取向教材的設計原則；紅色字體標示鷹架提供者。

參、研究方法

欲探討 SSIBL 課程對學生探究能力的影響，本研究採用準實驗研究法（quasi-experimental research）之單組前、後測的研究設計（the one-group pretest and posttest design）。透過深入分析學生在前後測、課程學習單之表現情形，探討 SSIBL 課程如何影響學生探究能力的學習。以下詳述本研究的研究方法。

一、研究參與者

本研究以便利取樣（convenience sampling）的方式，在授課教師的學校班級實施 SSIBL 課程，學生來自臺北市某高中女校 2 年級，共 3 個班，105 人。本研究發展的 SSIBL 課程涉及氣候變遷議題，這些學生雖具備與議題相關的基本概念，如溫室氣體、全球暖化的原因、再生能源相關發電原理等，但所有學生均無參與 SSI 相關課程或探究導向課程的經驗。由於研究實施時遇 COVID-19 疫情大爆發，實際全程參與研究的學生人數為 49 人，本研究之資料分析僅以 49 位學生的學習單、前後測資料進行分析。

授課教師為本文作者之一，於該校擔任地球科學兼任教師，有 1 年探究能力課程的相關授課經驗（自然科學探究與實作課程）。其授課方式多以學生為中心的教學方式。授課教師亦參與本研究的 SSIBL 課程研發，對於課程內容與教學方式具備相當程度的理解。

二、研究情境

本研究於臺北市某高中女校實施，該校會考入學各科成績落點約為「基礎」等級，為升學導向的學校，採常態性分班，同班級的學生學習落差小。

SSIBL 課程在該校的一般教室實施，學生使用平版，登入數位學習平臺 CWISE 完成學習任務。教學採異質分組，每組 5~6 人，根據學生

的地球科學的成績分為高、中、低三組，並將低分組學生平均分配到各組。課堂中進行小組討論，但學生可以使用個人平板撰寫想法和答案，以確保資料蒐集的全面性。

三、研究工具

本研究使用的研究工具有兩種：教學工具與評量工具。「教學工具」是一套與一位地球科學教師共同設計的 SSIBL 課程（減碳產電小大師），旨在解決減碳與電量供需平衡的 SSI 問題，並培養學生的探究能力。課程提供閱讀文本、圖表、影片、模擬軟體等多元的教材，幫助學生投入探究實務活動，規劃解決 SSI 議題的方案。SSIBL 課程經過兩位科學教育專家和兩位高中地球科學教師的審查與修訂。詳細內容如下：

（一）教學工具：SSIBL 課程（減碳產電小大師）

本研究發展的 SSIBL 課程聚焦在「碳排」議題。「碳排」所造成的環境議題已存在多年，也造成地球上許多生態系統、生命財產受到威脅，多國簽訂許多協議都為「減碳」訂定目標，但最終離達成目標都具相當程度的困難，造成其結果之因素不只因當代科學、科技的問題，更多存在著社會性的原因，如影響經濟發展的因素或個人、社會間存在不同的價值觀等。基此，碳排議題屬於 SSI，且議題涉及的多元面向之問題，仰賴學生透過探究實務活動進行釐清。

本研究發展一個虛擬情境「艾藍國」，學生在這個虛擬情境的主要目標是為艾藍國制訂一個適當的減碳策略。課程利用文本、圖表、影片等素材設計閱讀資料與模擬動畫，供學生探索情境資訊，規劃並測試各種減碳策略、分析減碳策略成效，最終制訂出適合艾藍國的減碳策略。整個課程為時 270 分鐘，學生透過異質分組全程進行協作學習，與組員討論任務，但是學習單必須個人單獨完成。

課程架構參考 SSIBL 的精簡模式，涵蓋三階段：建構 SSI 問題、探究實務活動、產生行動方案（見表 1）。考量個別學生對於碳排議題的

知識概念差異，在課程之初先建構學生情境相關的基礎概念，利用文本與影片等素材設計閱讀資料，並使用開放性問題引導學生建構基礎知識，以利後續探究實務活動的進行。進入建構 SSI 問題階段，這個階段主要培養學生發現問題的能力。課程透過開放性的引導問題，協助學生釐清並思考「艾藍國」在不同情境條件下會遭遇的問題，引導問題如圖 2 所示。

表 1 減碳 SSIBL 課程架構

階段	課程單元	學習目標	教材設計與教學策略
	建構基礎知識概念（90 分鐘）	認識溫室氣體、碳循環、再生能源、減碳政策等基礎知識	O、C、S-C
建構 SSI 問題（ask）	島國 CO ₂ 減排大作戰（90 分鐘）	探究虛擬情境「艾藍國」，釐清當前環境資訊、國家目標、用電與碳排情形。	O、C、S-C、S-P
探究實務活動（enact）		操作模擬軟體，訂定適合艾藍國的減碳策略。	O、C、S-P
		檢視並提出證據說明減碳策略成效。	O、C、S-P
產生行動方案（action）	別再紙上談兵（90 分鐘）	分析真實個案，提出符合「2050 淨零碳排」願景的減碳策略並進行組間分享與互評。	C、S-P

註：教材設計 O 代表提供開放性問題；C 代表協作學習；S-C 代表提供概念型鷹架、S-P 代表提供策略型鷹架。

假如艾藍國只透過減少「火力發電廠」的方式達到「目標碳排量」，如下表。試問，艾藍國會遇到什麼問題呢？				
火力發電廠數目（座）	碳排量（萬公噸二氧化碳當量）	目標碳排量（萬公噸二氧化碳當量）	發電量（度/年）	用電量需求（度/年）
6	190	108	15.6億	15.5億
3	95		7.8億	

圖 2 建構 SSI 問題階段的引導問題示例

探究實務活動階段涉及兩個任務。首先，學生需規劃並操作模擬軟體，檢視各種再生能源場（太陽能、風力、地熱）的興建廠址。模擬軟體會根據學生選擇的廠址，提供各項數據（月均溫、雲量、風速、發電廠年發電量、逐年用電量、總發電量等，見圖 3）給學生進行分析。課程則提供開放性引導問題，協助學生深入思考選址過程及影響選址的各項因素。接著，課程提供 5 種減碳策略供學生選取。模擬軟體會提供 5 種減碳策略的模擬結果。學生需根據模擬結果，分析並詮釋其原因，整合科學、社會、經濟、環境等多層面知識闡述 5 種減碳策略的成效。

最後，課程讓學生回到真實世界中，提供一影片（<https://www.youtube.com/watch?v=aM31RyxSSCw>）自主學習，先瞭解目前全球對於減碳的願景與目標後，再透過組內討論一減碳的政策並繪製成海報，其內容須包含「減碳政策」、「政策內容」、「兩項實施的困難處」，以及針對困難處分別提出「可能的解決方法」，進行組內的分享與回饋。除了學習如何針對問題提出解決方案外，並能透過組內與組間的方式，練習表達己見、說服他人與接納他人的建議。

（二）評量工具：探究能力測驗

本研究使用的「探究能力測驗」試題挑選自吳心楷、許瑛珧、黃福

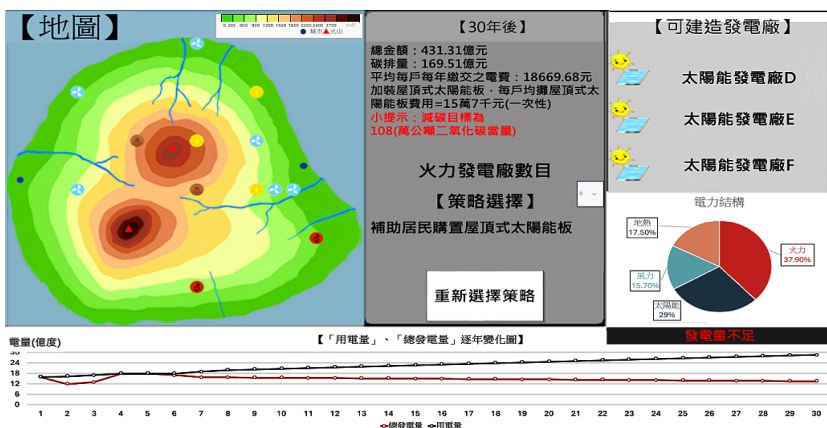
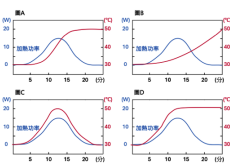


圖 3 減碳策略的模擬結果示例

坤與任宗浩於 2014 年的「總計畫：科學探究能力的數位評量——以模擬為導向的線上系統之研發」所發展的探究能力測驗題庫（吳心楷等人，2014）。本研究挑選的試題經由 1 位科學教育專家學者與 1 位高中地球科學教師共同審查與修訂，完成內容效度，並進行前導測試。如表 2 所示，本研究發展的「探究能力測驗」涵蓋 3 個探究子能力：發現問題、規劃與研究、論證與建模，各 5 題，每題包含 1 題選擇題與 1 題論述題，學生於選擇題挑選選項，需於論述題說明挑選該選項的理由。本研究的前後測使用同 1 份「探究能力測驗」。學生需於 70 分鐘內完成測驗。前導測試經試題分析後顯示，本研究使用的「探究能力測驗」試題難度平均 .58，平均鑑別度 .28。

表 2 探究能力測驗試題

探究子能力	定義	題數	試題範例																																										
發現問題	能正確蒐集資訊或察覺與情境最相關的待解決問題。	5	※主題二 金屬加熱【試回答第2題】 利用加熱器加熱一塊金屬，觀察加熱功率、金屬散熱功率（單位時間金屬散失的熱量）與金屬溫度隨時間的變化關係。 2. 使用加熱器對金屬加熱一段時間，根據下列假設，下列哪張圖最可能是加熱功率與金屬溫度隨時間的變化趨勢圖？（單選） 以下有三個假設： 假設一：加熱器提供的熱量，有一定比率被金屬吸收； 假設二：金屬所吸收的熱量愈多，溫度愈高； 假設三：金屬完全不會散熱。 (2A) 圖A。 (2B) 圖B。 (2C) 圖C。 (2D) 圖D。 																																										
規劃與研究	能判斷與研究問題相關的變因，或計畫適當次數的測試或提出最佳實驗規劃的方案。	5	※主題一 下沉快慢【試回答第1題】 1. 小意認為：「物體下沉速度應該與液體黏稠的程度有關」。因此，她應該要選擇哪些液體進行實驗補做，來驗證自己的看法？（複選，如有2種或以上答案，擇1種即可） <table border="1"><thead><tr><th>編號</th><th>(1A)</th><th>(1B)</th><th>(1C)</th><th>(1D)</th><th>(1E)</th><th>(1F)</th><th>(1G)</th><th>(1H)</th></tr></thead><tbody><tr><td>液體種類</td><td>海水</td><td>純醋酸</td><td>植物油</td><td>牛奶</td><td>酒精</td><td>水(4℃)</td><td>氨水</td><td>蓖麻油</td></tr><tr><td>密度(公克/立方公分)</td><td>1.030</td><td>1.049</td><td>0.930</td><td>1.049</td><td>0.790</td><td>1.000</td><td>0.930</td><td>0.980</td></tr><tr><td>黏稠程度</td><td>小</td><td>大</td><td>大</td><td>小</td><td>小</td><td>小</td><td>小</td><td>大</td></tr></tbody></table> 1.1 承第1題，請說明理由。（說明時，盡量描述清楚）	編號	(1A)	(1B)	(1C)	(1D)	(1E)	(1F)	(1G)	(1H)	液體種類	海水	純醋酸	植物油	牛奶	酒精	水(4℃)	氨水	蓖麻油	密度(公克/立方公分)	1.030	1.049	0.930	1.049	0.790	1.000	0.930	0.980	黏稠程度	小	大	大	小	小	小	小	大						
編號	(1A)	(1B)	(1C)	(1D)	(1E)	(1F)	(1G)	(1H)																																					
液體種類	海水	純醋酸	植物油	牛奶	酒精	水(4℃)	氨水	蓖麻油																																					
密度(公克/立方公分)	1.030	1.049	0.930	1.049	0.790	1.000	0.930	0.980																																					
黏稠程度	小	大	大	小	小	小	小	大																																					
論證與建模	能提出適當數據或科學證據詮釋探究結果，建立適當的模型或進一步運用科學原理、概念、數據等進行推理提出結論。	5	※主題十 蔬果579【試回答11~12題】 為了探討「不同酸鹼度的水對植物的生長情形為何？」，以pH5（酸性）、pH7（中性）、pH9（鹼性）及水溶液A四種水溶液，分別對綠豆、萵苣澆5毫升的水，總共澆水6次，並記錄綠豆與萵苣的生長高度。 11. 下表是綠豆的生長高度記錄表，根據下表，水溶液A的pH值可能落在下列哪個範圍內？（單選） <table border="1"><thead><tr><th>綠豆</th><th>3月2日</th><th>3月4日</th><th>3月6日</th><th>3月8日</th><th>3月10日</th><th>3月12日</th></tr></thead><tbody><tr><td></td><td colspan="6">生長總高度(單位：公分)</td></tr><tr><td>pH5</td><td>0.0</td><td>3.2</td><td>5.0</td><td>9.9</td><td>8.5</td><td>12.2</td></tr><tr><td>pH7</td><td>0.0</td><td>2.5</td><td>3.8</td><td>2.7</td><td>6.2</td><td>7.2</td></tr><tr><td>pH9</td><td>0.0</td><td>1.0</td><td>1.5</td><td>9.4</td><td>5.4</td><td>6.1</td></tr><tr><td>水溶液A</td><td>0.0</td><td>3.1</td><td>4.3</td><td>2.7</td><td>8.0</td><td>11.0</td></tr></tbody></table> (X)：表示植物枯死 (11A) pH5.0~pH6.5。 (11B) pH6.5~pH7.5。 (11C) pH7.5~pH9.5。 11.1 承第11題，請說明理由。（說明時，盡量描述清楚）	綠豆	3月2日	3月4日	3月6日	3月8日	3月10日	3月12日		生長總高度(單位：公分)						pH5	0.0	3.2	5.0	9.9	8.5	12.2	pH7	0.0	2.5	3.8	2.7	6.2	7.2	pH9	0.0	1.0	1.5	9.4	5.4	6.1	水溶液A	0.0	3.1	4.3	2.7	8.0	11.0
綠豆	3月2日	3月4日	3月6日	3月8日	3月10日	3月12日																																							
	生長總高度(單位：公分)																																												
pH5	0.0	3.2	5.0	9.9	8.5	12.2																																							
pH7	0.0	2.5	3.8	2.7	6.2	7.2																																							
pH9	0.0	1.0	1.5	9.4	5.4	6.1																																							
水溶液A	0.0	3.1	4.3	2.7	8.0	11.0																																							

四、資料蒐集與分析

爲檢視 SSIBL 課程對學生探究能力的影響，本研究蒐集學生在前、後測、學習單的填答內容進行內容分析、描述性統計、推論性統計（包括：魏氏考驗、U 考驗）等以回答兩個研究問題。

學生在前後測、學習單的填答內容先以同一份探究能力評分規準進行探究能力表現的等級評定。表 3 是本研究使用的評分規準。此份評分規準彙整自過去文獻，由於時間因素，研究難以在短時間內評量所有的探究能力表現。基此，本研究聚焦探討學生的發現問題、規劃與研究、論證與建模 3 個探究子能力。所有子能力涵蓋 3 個等級：精熟、基礎、待加強。爲進行描述性統計與推論性統計，學生在每題獲得的等第會被轉爲對應的分數（見表 3）。

爲建立此份評分規準的穩定度，本研究邀請一位高中地球科學教師協助檢視互評者一致性。經研究者向該位教師說明並解釋評分規準後，隨機挑選 30 位有效樣本的學習單、探究能力測驗填答，由研究者與該位教師獨各自評分。結果顯示，無論是學習單或探究能力測驗，兩位評分者在各題的 Kappa 值皆大於 .80，表示兩位評分者具有高度的評分一致性。

肆、研究結果

本研究欲探討經 SSIBL 課程後，高中生的探究能力改變情形及其於課程期間的探究能力表現。本段將兩個研究問題呈現研究發現。

一、SSIBL 課程對學生學習探究能力的影響為何？

經過魏氏考驗，學生課程前後的探究能力差異彙整如表 4。結果顯示，學生在「探究能力測驗」的前、後測中的分數有顯著差異。由此可知，「減碳產電小大師」SSIBL 課程對於提升學生的整體探究能力的顯著幫助，包含「發現問題」、「規劃與研究」以及「論證與建模」等探究子能力。

表 3 探究能力評分規準

探究子能力	表現等級	分數	表現等級描述	填答範例
發現問題	精熟	2	能「正確」蒐集資訊或提出與情境最相關的待解決問題。	【N21】利用減少火力發電廠數量來達到目標碳排放，人民所需的用電量會不足。
	基礎	1	「無法完整」正確蒐集資訊或「無法」察覺與情境最相關的待解決問題。	【N2】艾藍國是主要以火力發電為主，如果減少火力發電廠發電量也會隨之減少。
	待加強	0	蒐集「錯誤」資訊或提出與情境「無關」之待解決問題。	【N1】煤礦產能減少。
規劃與研究	精熟	2	能「正確」提出與研究問題相關的變因，或「能」計畫適當次數的測試或提出最佳實驗規劃的方案。	【N9】 1. 過程敘述：在過程中一直的拖移尋找雲量比例最少的地區。 2. 影響廠址的變因有：雲量。
	基礎	1	「無法完整」正確提出與研究問題相關的變因，或「無法完整提出」最佳實驗規劃的方案。	【N24】 1. 過程敘述：因為移到兩火山之間時太陽能發電量最多。 2. 影響廠址的變因有：地勢高峻，鄰近火山，所以地熱處於背風側，因此溫度高。
	待加強	0	「無法辨認與提出」與研究問題相關的任一變因，或「無法提出」實驗規劃的方案。	【N1】 1. 過程敘述：選擇變因，去放置地點。 2. 影響廠址的變因有：風力、地形、地熱。
論證與建模	精熟	2	能提出「正確」的數據作為證據支持主張，或「能明確」說明主張與證據之間的關係。	【N23】導致發電量不足可能是因為政策的關係，透過居民購買太陽能版，政府以此來購買和補助，但得到的電量少之又少，也不一定每個居民都願意，所以看來此政策是不會成功的。
	基礎	1	提出數據作為證據支持主張時，或說明主張與證據之間關係時有「部份錯誤」。	【N3】用電量大於總發電量，策略忽略的細節太多，導致最後成果不佳。
	待加強	0	提出「不適當」的數據作為證據，或說明主張與證據之間關係時「完全錯誤」。	【N2】無法先預知突發的天然災害。

註：填答範例欄，括號內代碼為學生編號，例如【N21】代表編號 21 學生。

表 5 呈現各探究子能力前測與後測的表現之人數比例變化。由表 5 可知，有 75.1%（原 52.3%）的學生已能根據探究情境蒐集資訊或察覺與情境最相關的待解決問題；進一步有 73.8%（原 56.3%）的學生能辨識與探究問題相關的變因，或能針對探究問題規劃最佳的解決方案；最後有 64.5%（原 47.4%）的學生能針對探究問題提出正確數據作為證據支持主張，或明確說明主張與證據之間的關係。

另外，本研究分析「減碳產電小大師」SSIBL 課程每個步驟中試題的得分情況（分數以權重方式呈現）。如表 6 所示，整體表現平均得分最高的是「發現問題」（1.52 分），其次為「規劃與研究」（1.02 分），最低分為「論證與建模」（.86 分）。

表 4 學生探究能力的前、後測之魏氏考驗摘要表

<i>n</i> = 49	前測		後測		<i>Z</i>
	<i>M</i>	<i>SD</i>	<i>M</i>	<i>SD</i>	
發現問題	.61	.38	1.02	.41	-5.00***
規劃與研究	.80	.47	1.11	.46	-3.95***
論證與建模	.66	.44	.91	.45	-4.18***
探究能力總分	2.07	1.04	3.03	1.07	-5.56***

*** *p* <.001.

表 5 各探究子能力前測與後測的等級表現之人數比例變化對照表

<i>n</i> = 49 比例		精熟比例	基礎比例	待加強比例
發現問題	前測	8.6%	43.7%	47.8%
	後測	26.5%	48.6%	24.9%
規劃與研究	前測	24.1%	32.2%	43.7%
	後測	36.7%	37.1%	26.1%
論證與建模	前測	19.2%	28.2%	52.7%
	後測	26.5%	38.0%	35.5%

表 6 學生在 SSIBL 課程中各探究子能力表現統計

<i>n</i> = 49	最低分	最高分	<i>M</i>	<i>SD</i>
發現問題	.3	2.0	1.52	.46
規劃與研究	.0	2.0	1.02	.55
論證與建模	.0	2.0	.86	.65
整體探究能力表現	1.0	5.7	3.40	1.15

二、SSIBL 課程對不同先備探究能力學生在學習探究能力的影響為何？

爲了探討不同先備探究能力的學生在課程中的學習表現，以及課程後探究能力的改變情形。首先，以前測分數作爲依據並進行分組，高分組即前測分數前 27% 的學生，樣本數 13 人，下限爲 10 分；低分組爲後 27% 的學生，樣本數 15 人，上限 4 分。高、低分組的各探究子能力之統計與分數請參閱表 7。由表 7 可知，高低先備探究能力的學生在 SSIBL 課程後的探究能力的進步情形有差異。雖然高、低分組學生經課程後，在探究能力總分皆有顯著進步（高分組： $Z = -2.49, p < .05$ ；低分組： $Z = -2.94, p < .01$ ）。但進一步比較兩組學生在探究子能力的分數則發現高分組學生僅在發現問題這個能力有顯著進步（ $Z = -2.22, p < .05$ ）。低分組學生則在發現問題（ $Z = -2.59, p < .05$ ）、規劃與研究（ $Z = -2.51, p < .05$ ）、論證與建模（ $Z = -2.41, p < .05$ ）3 個子能力均顯著提升。此結果顯示，本研究發展的 SSIBL 課程對於不同先備探究能力學生在探究能力的提升上有所差異。

爲瞭解課程之後，探究能力的進步程度是否受到先備探究能力的影響，研究者對高、低分組學生的「探究能力前、後測的進步分數（前後測差值）」進行考驗，結果呈現於表 8。結果顯示，高分組 13 位學生在課程後平均進步 0.54 分，低分組的 15 位學生在課程後平均進步 1.08 分，兩組學生的前、後測進步分數達顯著差異（ $U = 7.5, Z = -4.16, p < .001$ ）。

整體而言，先備探究能力會影響課程後探究能力的進步程度，而先備探究能力較低的學生，其探究能力進步程度明顯優於較高的學生。

為瞭解不同的先備探究能力是否影響課程中的探究能力表現，本研究對高、低分組學生的「學習單分數」進行考驗。表9為先備探究能力高、低分組的學生在課程學習單中各項探究子能力與總分的表現情形。結果顯示，高分組學生在整體表現上顯著優於低分組（ $U = 34.5$ ， $Z = -2.93$ ， $p < .001$ ）。進一步比較兩組學生在探究子能力的表現差異指出，兩組學生於「論證與建模」達到顯著差異（ $U = 39$ ， $Z = -2.97$ ， $p < .01$ ）。而「發現問題」與「規劃與研究」兩項探究子能力未達顯著差異（發現問題 $U = 69$ ， $Z = -1.37$ ， $p = .17$ ；規劃與研究 $U = 64$ ， $Z = -1.57$ ， $p = .12$ ）。

表 7 先備探究能力高、低分組在前後測表現的敘述統計量表

探究子能力		發現問題		規劃與研究		論證與建模		探究能力總分	
		前測	後測	前測	後測	前測	後測	前測	後測
高分組 ($n = 13$)	M	.94	1.29	1.34	1.35	1.11	1.28	3.38	3.92
	SD	.30	.39	.37	.40	.28	.33	.48	.77
	Z	-2.22*		-.21		-1.56		-2.49*	
	進步分數	.35		.01		.17		.54	
低分組 ($n = 15$)	M	.27	.68	.37	.76	.24	.52	.88	1.96
	SD	.25	.34	.31	.44	.20	.37	.45	.97
	Z	-2.59*		-2.51*		-2.41*		-2.94**	
	進步分數	.41		.39		.28		1.08	

* $p < .05$. ** $p < .01$.

表 8 先備探究能力高、低分組在探究能力前、後測的進步分數 U 考驗摘要表

先備探究能力	人數	滿分	前測	後測	進步分數	SD	U 值	Z
高分組	13	6	3.38	3.92	.54	.60	7.5	-4.16***
低分組	15	6	0.88	1.96	1.08	.97		

*** $p < .001$.

表 9 先備探究能力高、低分組在課程學習單 U 考驗摘要表

探究子能力	先備探究能力	人數	滿分	M	U 值	Z
發現問題	低分組	15	2	1.42	69	-1.37
	高分組	13	2	1.69		
規劃與研究	低分組	15	2	.91	64	-1.57
	高分組	13	2	1.21		
論證與建模	低分組	15	2	.60	39	-2.97**
	高分組	13	2	1.38		
整體探究能力表現	低分組	15	6	2.93	34.5	-2.93***
	高分組	13	6	4.28		

** $p < .01$. *** $p < .001$.

伍、討論與結論

本研究的結果指出，學生經 SSIBL 課程後，其探究能力有顯著進步。進一步檢視 SSIBL 課程對不同先備探究能力學生之影響發現，高先備探究能力的學生經課程後，「發現問題」子能力上表現出顯著差異；低先備探究能力學生則在所有子能力均有顯著進步。不過，不同先備探究能力的學生在課程中的探究能力表現也有差異，高先備探究能力的學生在「論證與建模」的表現顯著優於低先備探究能力的學生。本研究根據上述主要研究發現進行深入討論。

一、SSIBL 課程顯著提升學生的探究能力

本研究結果顯示，經過 SSIBL 課程後，學生的探究能力，包括「發現問題」、「規劃與研究」及「論證與建模」等各子能力均有顯著提升。這表明 SSIBL 課程的設計在提升學生探究能力方面具有明顯的成效。檢視本研究的課程設計，研究者認為有 3 點可能是有效提升學生探究能力的關鍵：融入開放性問題、多層次的鷹架設計、協作的學習環境。

本研究發展的 SSIBL 課程中融入了開放式問題，引導學生深入探索如「減碳」這類複雜的社會科學議題，並要求學生制定出切實可行的解決方案。這些問題的設計主要協助學生深入思考如議題涉及的因素、這些因素與碳排的關係、減碳策略對社會大眾的影響等問題，進而提高其探究能力。正如 Lazonder 與 Harmsen（2016）的研究顯示，這類開放式問題設計不僅有助於學生自主探索，還能促進其批判性思維和問題解決能力的發展。

本研究提供多層次鷹架在支持學生建構知識、理解探究過程等方面均發揮了關鍵作用。許瑛珪與張文馨（2024）指出，鷹架式教學有助於在學生解決複雜問題的過程中提供必要的支持，並逐步培養他們的自主學習能力。Osborne 等人（2003）也強調，多層次的鷹架支持不僅能激發學生的學習興趣，還能引導他們進行更深入的思考和分析。特別是對於那些學習基礎較弱的學生，多層次的鷹架設計能夠提供他們在學習過程中所需的支援，從而有效提升其探究能力。因為完全開放的探究學習任務對不熟悉探究學習模式的學生而言是一大挑戰，放任生手學生獨自摸索完全開放的探究學習，不僅達不到預期成效，更可能降低這些學生的自信心與學習興趣。本研究提供知識性與過程性鷹架，透過知識性鷹架，協助那些缺乏背景知識學生建構與 SSI 議題相關的基礎概念。而過程性鷹架透過拆解 SSIBL 的關鍵步驟，協助生手學生投入探究實務，最終制訂符合需求的減碳行動方案。透過這種多層次的鷹架引導，讓學生投入自主學習，瞭解並發展其探究能力。

此外，本研究採用異質分組的方式，讓不同能力的學生能夠在 SSIBL 課程中互動交流以提升彼此的能力。Bell 等人（2010）的研究強調，協作學習環境能夠促進學生之間的知識分享和能力互補，有助於整體學習成效的提升。根據過去研究，不同觀點間的有效交流是影響 SSI 教學成效的因素之一（Lee & Grace, 2012; Newton & Zeidler, 2020），然而過去研究者的經驗顯示觀點相同或能力相仿的學生，在意見交流的活動參與度不高。相關研究亦指出異質分組在協作學習上，對低先備能

力學生的參與度與學習成效（Gillies, 2016）。這與本研究的結果類似，亦即本研究所發展的 SSIBL 課程對「低分組」學生的進步幅度較大，這可能與他們在小組中進行的知識交流和互助有關。透過與高分組學生協作學習，低分組學生不僅能從課程設計中獲得教學引導，針對一些特殊的及個別性的學習需求，亦可能透過高分組學生的引導，使其探究能力獲得進度。

二、不同先備探究能力學生的學習差異

研究結果進一步顯示，先備探究能力較低的學生在課程後的進步幅度顯著高於先備探究能力較高的學生，尤其在「規劃與研究」及「論證與建模」2 個方面的提升更為明顯。這一發現與 Furtak 等人（2012）的研究一致，他們指出探究取向教材對於基礎較弱的學生能夠提供更大的學習支持，使這些學生在科學探究能力上獲得顯著進展。

研究者認為對於低先備能力的學生，多層次的鷹架設計能有效支援其學習進程。Tabak 與 Kyza（2018）指出，動態且靈活的鷹架設計能夠根據學生的學習需求進行即時調整，這對於促進學生的持續學習和能力提升至關重要。在 SSIBL 課程中，多層次鷹架有助於確保每位學生都能在適當的支持下取得進步，尤其是在複雜的探究任務中。不過，由於 SSIBL 課程提供的鷹架屬於固定鷹架，無法在學生的學習過程中動態調整以符合學生的認知能力發展。本研究猜測，低先備探究能力的學生受固定鷹架的影響有限，原因在於本研究使用的異質性分組進行協作教學。即便 SSIBL 提供的固定鷹架不完全吻合學生當下的認知能力程度，低先備探究能力的學生透過與高先備探究能力學生協作學習，在高先備能力學生提供適性的引導下，低先備探究能力的學生就能獲得更多協助，進而提升其探究能力。課程對於高先備能力的學生探究能力的提升有限原因可能來自天花板效應影響，因為參與本研究的高先備能力學生在前測的各項分數已趨近滿分，顯示本研究發展的探究能力測驗未能有效診斷這些學生的探究能力進展。從鷹架理論的觀點看，也可能是因為

本研究設計的課程任務過於簡單，如何設計更具挑戰性的問題和任務以促進他們的進一步發展也是一個重要議題（Kim et al., 2018）。

Kirschner 等人（2006）指出，缺乏挑戰的任務可能會導致這些學生在學習過程中遭遇瓶頸，無法進一步提升其探究能力。鷹架教學的核心是可以根據學生的學習進度進行調整，從而確保每個學生都能在適當的挑戰下取得進步（許瑛珩、張文馨，2024；Kim et al., 2018）。對於高先備能力的學生，本研究提供的引導可能不足，建議未來需要設計更具挑戰性的問題和任務，來進一步促進他們的學習和發展（Sotiriou et al., 2020）。

結合科技技術提供個別化教學可能是未來研究能夠著墨之處。因為學生的學習需求和能力程度各不相同（Sotiriou et al., 2020），若教材結合新興科技技術（如人工智能），教學就能夠根據學生的需求和能力進行即時診斷並提供動態和靈活的鷹架，這對於促進學生的自主學習非常重要（van de Pol et al., 2010）。例如有研究者結合人工智慧（artificial intelligence, AI）、自然語言處理（natural language processing, NLP）等技術發展自動評分與回饋系統（Dilkli, 2006）。Käser 與 Schwartz（2020）則應用 AI，自動偵測學生的探究策略與表現，並用來預測學生的學習成就。在這些新興科技的協助下，教師就可以根據每個學生的學習進度和能力來調整教材的難度和內容，以確保每個學生都能夠獲得最大程度的學習成效（van de Pol et al., 2010）。

三、探究取向教材設計的挑戰與後續研究建議

儘管探究取向教材設計在提升學生探究能力方面顯示出顯著效果，但在實施過程中仍面臨諸多挑戰。例如前文所述，為了提供個別化教學，未來研究應繼續探索如何結合新興科技，在探究取向教材中有效應用動態鷹架設計，以適應不同能力學生的需求。正如 Kim 等人（2018）的研究指出，動態調整鷹架能夠在學生的學習過程中提供即時且適當的

支持，這對於提升學生的自主學習能力尤為重要。過去礙於科技限制，提供動態鷹架有難度。但近年來新興科技的突破，如生成式人工智能，讓即時診斷學生的認知能力成為可能。建議未來研究可以著重在如何結合新興科技協助教師診斷整班學生的認知程度並提供適當的教學鷹架。

此外，協作學習在異質分組情境下對於學生探究能力的提升有著積極的作用。van Uum 等人（2016）的研究表明，異質分組能夠促進學生之間的知識交流，並幫助不同能力的學生相互學習、共同進步。儘管本研究的研究發現確實展現異質分組的協作學習有助於提升低先備能力學生的探究技能，對於如何激發高先備能力學生的潛能還是有所限制。建議未來研究可以針對異質分組學生在協作學習中的互動交流進行探討，藉此釐清高先備能力學生的探究能力發展受限的因素，以便進一步提供適當的學習支持。

最後，考量學生的受教權、教師授課時間與意願，本研究採單組前後測的設計存在內部效度的挑戰，因為研究結果可能受到非研究操弄因素的影響（如成熟效應）。加上 COVID-19 影響，有效樣本僅有 49 人，且為女性，因此受限於樣本數不大、受試者性別單一等因素影響，導致本研究的研究結果在推論上有其限制。雖然未有研究表明 SSIBL 課程的學習成效受性別影響，但研究者猜測男女在這類極度需要同儕合作的學習活動中，可能有不同的教學需求（張文馨等人，2023），這個推論需要透過實徵研究，來釐清不同性別在 SSIBL 的需求，以進一步提升並精緻化課程的設計。在單組前後測的研究設計與樣本數過少的影響上，建議未來研究能從多元的研究資料來進行三角校正，這有助於排除各種非研究操弄因素干擾的可能性。透過訪談有經驗的專家教師來瞭解學生的認知發展變化、記錄課程實施過程中可能影響結果的重大事件亦能在資料分析中進行校正。

參考文獻

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（2018）。

[Curriculum guidelines of 12-year basic education: Natural science domain for elementary, junior high school and upper secondary school education. (2018).]

吳心楷、許瑛珪、黃福坤、任宗浩（2014）。總計畫：科學探究能力的數位評量——以模擬為導向的線上系統之研發。行政院國家科學委員會專題研究報告（NSC 100-2511-S003-041-MY）。國立臺灣師範大學科學教育研究所。

[Wu, H.-K., Hsu, Y.-S., Hung, F.-K., & Jen, T.-H. (2014). *The development of a system of simulation-based assessments to evaluate students' inquiry abilities*. The research project report of National Science and Technology Council, Executive Yuan (NSC 100-2511-S003-041-MY). Graduate Institute of Science Education, National Taiwan Normal University.

洪詠善（2016，4月15日）。學習趨勢：跨領域、現象為本的統整學習。國家教育研究院電子報，134。https://epaper.naer.edu.tw/edm.php?grp_no=2&edm_no=134&content_no=2671

[Hung, Y.-S. (2016, April 15). Learning trends: Interdisciplinary, phenomenon-based integrated learning. *National Academy for Educational Research Newsletter*, 134. https://epaper.naer.edu.tw/edm.php?grp_no=2&edm_no=134&content_no=2671]

張文馨、許瑛珪、何玉婷、劉承珏（2023）。社會性科學議題決策教學模組的成效。教育科學研究期刊，68（1），167-198。https://doi.org/10.6209/JORIES.202301_68(1).0006

[Zhang, W.-X., Hsu, Y.-S., Ho, Y.-T., & Liu, C.-C. (2023). Effects of a SSI-based learning module on students' decision-making abilities. *Journal of Research in Education Science*, 68(1), 167-198. https://doi.org/10.6209/JORIES.202301_68(1).0006]

許瑛珪、張文馨（2024）。支持科學探究數位學習的鷹架系統設計。載於邱美虹（主編），科學探究與實作之理念與實踐（頁125-148）。國立臺灣師範大學。

[Hsu, Y.-S., & Zhang, W.-X. (2024). The design of scaffolding system for scientific inquiry digital learning. In M.-H. Chiu (Ed.), *Rationale and implementation of scientific inquiry and practice* (pp. 125-148). National Taiwan Normal University Press.]

陳素秋（2024）。提問？還是探究？檢視問句式課綱下的公民與社會教科書。教科書研究，17（1），1-34。https://doi.org/10.6481/JTR.202404_17(1).01

[Chen, S.-C. (2024). Questions or inquiries? A review on civics and society textbooks developed on the basis of question-based course guidelines. *Journal of Textbook Research*, 17(1), 1-34. https://doi.org/10.6481/JTR.202404_17(1).01]

- 陳毓凱、洪振方（2007）。兩種探究取向教學模式之分析與比較。科學教育月刊，305，4-19。https://doi.org/https://doi.org/10.6216/SEM.200712_(305).0003
- [Chen, Y.-K., & Hung, J.-F. (2007). The comparison and analysis of two inquiry-oriented teaching models. *Science Education Monthly*, 305, 4-19. https://doi.org/10.6216/SEM.200712_(305).0003]
- Abd-El-Khalick, F., BouJaoude, S., Duschl, R., Lederman, N. G., Mamlok-Naaman, R., Hofstein, A., Niaz, M., Treagust, D., & Tuan, H.-L. (2004). Inquiry in science education: International perspectives. *Science Education*, 88(3), 397-419. https://doi.org/10.1002/sce.10118
- Alcaraz-Dominguez, S., Shwartz, Y., & Barajas, M. (2024). SSI-based instruction by secondary school teachers: What really happens in class? *International Journal of Science Education*, 46(18), 1944-1962. https://doi.org/10.1080/09500693.2024.2303779
- American Association for the Advancement of Science. (1990). Science for all americans: A project 2061 report on literacy goals in science, mathematics, and technology american association for the advancement of science 1989. *Bulletin of Science, Technology & Society*, 10(2), 93-101. https://doi.org/10.1177/027046769001000206
- Amos, R. I. J., & Levinson, R. (2019). Socio-scientific inquiry-based learning: An approach for engaging with the 2030 sustainable development goals through school science. *International Journal of Development Education and Global Learning*, 11(1), 29-49. https://doi.org/10.18546/ijdegl.11.1.03
- Antonio, R. P., & Prudente, M. S. (2023). Effects of inquiry-based approaches on students' higher-order thinking skills in science: A meta-analysis. *International Journal of Education in Mathematics, Science and Technology*, 12(1), 251-281. https://doi.org/10.46328/ijemst.3216
- Archila, P. A., Truscott de Mejía, A. M., & Restrepo, S. (2022). Using drama to enrich students' argumentation about genetically modified foods. *Science and Education*, 32, 635-668. https://doi.org/10.1007/s11191-022-00346-y
- Baek, S., Shin, H., & Kim, C. J. (2022). Development of a climate change SSIBL-STEAM program aligned to the national curriculum for SSI elementary school in Korea. *Asia-Pacific Science Education*, 8(1), 109-148. https://doi.org/10.1163/23641177-bja10047
- Bell, T., Urhahne, D., Schanze, S., & Ploetzner, R. (2010). Collaborative inquiry learning: Models, tools, and challenges. *International Journal of Science Education*, 32(3), 349-377. https://doi.org/10.1080/09500690802582241
- Bencze, L., Sperling, E., & Carter, L. (2012). Students' research-informed socio-scientific activism: Re/Visions for a sustainable future. *Research in Science Education*, 42(1), 129-148. https://doi.org/10.1007/s11165-011-9260-3
- Binkley, M., Erstad, O., Herman, J., Raizen, S., Ripley, M., Miller-Ricci, M., & Rumble,

- M. (2012). Defining twenty-first century skills. In P. Griffin, B. McGaw, & E. Care (Eds.), *Assessment and teaching of 21st century skills* (pp. 17-66). Springer. https://doi.org/10.1007/978-94-007-2324-5_2
- Bybee, R. W., Taylor, J. A., Gardner, A., Scotter, P. V., Powell, J. C., Westbrook, A., & Landes, N. (2006, June). *The BSCS se instructional model: Origins and effectiveness*. BSCS. https://bscs.org/wp-content/uploads/2022/01/bscs_5e_full_report-1.pdf
- Cha, J., Kim, H. B., Kan, S.-Y., Foo, W. Y., Low, X. Y., Ow, J. Y., Bala Chandran, P. D., Lee, G. E., Yong, J. W. H., & Chia, P. W. (2021). Integrating organic chemical-based socio-scientific issues comics into chemistry classroom: Expanding chemists' toolbox. *Green Chemistry Letters and Reviews*, 14(4), 689-699. <https://doi.org/10.1080/17518253.2021.2005153>
- Christodoulou, A., & Grace, M. (2024). Becoming 'wild citizens': Children's articulation of environmental citizenship in the context of biodiversity loss. *Science & Education*. Advance online publication. <https://doi.org/10.1007/s11191-024-00558-4>
- DiBenedetto, C. A. (2019). Twenty-first century skills. In S. McGrath, M. Mulder, J. Papier, & R. Stuart (Eds.), *Handbook of vocational education and training: Developments in the changing world of work* (pp. 1267-1281). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-94532-3_72
- Dilkli, S. (2006). An overview of automated scoring of essays. *The Journal of Technology, Learning and Assessment*, 5(1), 5-35.
- Furtak, E. M., Seidel, T., Iverson, H., & Briggs, D. C. (2012). Experimental and quasi-experimental studies of inquiry-based science teaching: A meta-analysis. *Review of Educational Research*, 82(3), 300-329. <https://doi.org/10.3102/0034654312457206>
- Georgiou, Y., & Kyza, E. A. (2023). Fostering chemistry students' scientific literacy for responsible citizenship through socio-scientific inquiry-based learning (SSIBL). *Sustainability*, 15(8), 6442. <https://doi.org/10.3390/su15086442>
- Gillies, R. (2016). Cooperative learning: Review of research and practice. *Australian Journal of Teacher Education*, 41(3), 39-54. <https://doi.org/10.14221/ajte.2016v41n3.3>
- Grangeat, M. (2016). Dimensions and modalities of inquiry-based teaching: Understanding the variety of practices. *Education Inquiry*, 7(4), 421-442. <https://doi.org/10.3402/edui.v7.29863>
- Högström, P., Gericke, N., Wallin, J., & Bergman, E. (2024). Teaching socioscientific issues: A systematic review. *Science & Education*. Advance online publication. <https://doi.org/10.1007/s11191-024-00542-y>
- Johnson, D. W., & Johnson, R. T. (2002). Learning together and alone: Overview and meta-analysis. *Asia Pacific Journal of Education*, 22(1), 95-105. https://doi.org/10.1007/978-94-007-2324-5_2

org/10.1080/0218879020220110

- Käser, T., & Schwartz, D. L. (2020). Modeling and analyzing inquiry strategies in open-ended learning environments. *International Journal of Artificial Intelligence in Education*, 30(3), 504-535. <https://doi.org/10.1007/s40593-020-00199-y>
- Kim, N. J., Belland, B. R., & Axelrod, D. (2018). Scaffolding for optimal challenge in K-12 problem-based learning. *Interdisciplinary Journal of Problem-Based Learning*, 13(1). <https://doi.org/10.7771/1541-5015.1712>
- Kirschner, P. A., Sweller, J., & Clark, R. E. (2006). Why minimal guidance during instruction does not work: An analysis of the failure of constructivist, discovery, problem-based, experiential, and inquiry-based teaching. *Educational Psychologist*, 41(2), 75-86. https://doi.org/10.1207/s15326985ep4102_1
- Krajcik, J., Blumenfeld, P. C., Marx, R. W., Bass, K. M., Fredricks, J., & Soloway, E. (1998). Inquiry in project-based science classrooms: Initial attempts by middle school students. *Journal of the Learning Sciences*, 7(3-4), 313-350. <https://doi.org/10.1080/10508406.1998.9672057>
- Krajcik, J., Czerniak, C. M., & Czerniak, C. L. (2007). *Teaching science in elementary and middle school: A project-based approach*. Routledge.
- Krajcik, J., & Delen, İ. (2017). Engaging learners in STEM education. *Estonian Journal of Education*, 5(1), 35-58. <https://doi.org/10.12697/eha.2017.5.1.02b>
- Kuo, C.-Y., Wu, H.-K., Jen, T.-H., & Hsu, Y.-S. (2015). Development and validation of a multimedia-based assessment of scientific inquiry abilities. *International Journal of Science Education*, 37(14), 2326-2357. <https://doi.org/10.1080/09500693.2015.1078521>
- Kusumawati, L., Rochintaniawati, D., & Riandi, R. (2022). Effectiveness of learning using web-based inquiry based on socioscientific issues to improve students' understanding of socioscientific issues. *Jurnal Penelitian Pendidikan IPA*, 8(3), 1569-1574. <https://doi.org/10.29303/jppipa.v8i3.1734>
- Lazonder, A. W., & Harmsen, R. (2016). Meta-analysis of inquiry-based learning. *Review of Educational Research*, 86(3), 681-718. <https://doi.org/10.3102/0034654315627366>
- Lee, Y. C., & Grace, M. (2012). Students' reasoning and decision making about a socioscientific issue: A cross-context comparison. *Science Education*, 96(5), 787-807. <https://doi.org/10.1002/sce.21021>
- Levinson, R. (2017). Socio-scientific inquiry-based learning: Taking off from STEPWISE. In L. Bencze (Ed.), *Science and technology education promoting wellbeing for individuals, societies and environments* (pp. 477-502). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-55505-8_22
- Levinson, R. (2018). Introducing socio-scientific inquiry-based learning (SSIBL). *School Science Review*, 100(371), 31-35.
- Mang, H. M. A., Chu, H.-E., Martin, S. N., & Kim, C.-J. (2021). An SSI-based STEAM

- approach to developing science programs. *Asia-Pacific Science Education*, 7(2), 549-585. <https://doi.org/10.1163/23641177-bja10036>
- Maryam, & Suwono, H. (2023). Assessing the effect of socio-scientific inquiry-based learning on socio-scientific decision-making skill among senior high school students. *Jurnal Penelitian Pendidikan IPA*, 9(11), 10083-10090. <https://doi.org/10.29303/jppipa.v9i11.5067>
- National Research Council (U.S.). (2000). *Inquiry and the national science education standards: A guide for teaching and learning*. The National Academies Press. <https://doi.org/10.17226/9596>
- Newton, M. H., & Zeidler, D. L. (2020). Developing socioscientific perspective taking. *International Journal of Science Education*, 42(8), 1302-1319. <https://doi.org/10.1080/09500693.2020.1756515>
- Nida, S., Pratiwi, N., & Eilks, I. (2021). A case study on the use of contexts and socio-scientific issues-based science education by pre-service junior high school science teachers in Indonesia during their final year teaching internship. *Frontiers in Education*, 5, Article 592870. <https://doi.org/10.3389/feduc.2020.592870>
- Osborne, J., Simon, S., & Collins, S. (2003). Attitudes towards science: A review of the literature and its implications. *International Journal of Science Education*, 25(9), 1049-1079. <https://doi.org/10.1080/0950069032000032199>
- Pratiwi, Y. N., Rahayu, S., & Fajaroh, F. (2016). Socioscientific issues (SSI) in reaction rates topic and its effect on the critical thinking skills of high school students. *Jurnal Pendidikan IPA Indonesia*, 5(2), 164-170. <https://doi.org/10.15294/jpii.v5i2.7676>
- Puig, B., Blanco-Anaya, P., & Pérez-Maceira, J. J. (2021). “Fake news” or real science? Critical thinking to assess information on COVID-19. *Frontiers in Education*, 6, Article 646909. <https://doi.org/10.3389/feduc.2021.646909>
- Reiser, B. J., & Tabak, I. (2014). Scaffolding. In R. K. Sawyer (Ed.), *The Cambridge handbook of the learning sciences* (2nd ed., pp. 44-62). Cambridge University. <https://doi.org/10.1017/CBO9781139519526.005>
- Roberts, D. A., & Bybee, R. W. (2014). Scientific literacy, science literacy, and science education. In N. G. Lederman & S. K. Abell (Eds.), *Handbook of research on science education* (Vol. 2, pp. 545-558). Routledge.
- Sadler, T. D. (2004). Informal reasoning regarding socioscientific issues: A critical review of research. *Journal of Research in Science Teaching*, 41(5), 513-536. <https://doi.org/10.1002/tea.20009>
- Santangelo, T., & Tomlinson, C. A. (2012). Teacher educators’ perceptions and use of differentiated instruction practices: An exploratory investigation. *Action in Teacher Education*, 34(4), 309-327. <https://doi.org/10.1080/01626620.2012.717032>

- Saputra, J., Rusman, T., Suroto, S., & Rahmawati, F. (2024). Comparative study of economic learning outcomes using problem based learning and project based learning models by considering student learning activities. *Economic Education and Entrepreneurship Journal*, 7(1), 63-71. <https://doi.org/10.23960/E3J/v7i1.63-71>
- Sotiriou, S. A., Lazoudis, A., & Bogner, F. X. (2020). Inquiry-based learning and e-learning: How to serve high and low achievers. *Smart Learning Environments*, 7(1), Article 29. <https://doi.org/10.1186/s40561-020-00130-x>
- Tabak, I. (2004). Synergy: A complement to emerging patterns of distributed scaffolding. *The Journal of the Learning Sciences*, 13(3), 305-335. https://doi.org/10.1207/s15327809jls1303_3
- Tabak, I., & Kyza, E. A. (2018). Research on scaffolding in the learning sciences: A methodology perspective. In F. Fischer, C. E. Hmelo-Silver, S. R. Goldman, & P. Reimann (Eds.), *International handbook of the learning sciences* (pp. 191-200). Routledge.
- Tomas, L., & Ritchie, S. M. (2011). Positive emotional responses to hybridised writing about a socio-scientific issue. *Research in Science Education*, 42(1), 25-49. <https://doi.org/10.1007/s11165-011-9255-0>
- Tomlinson, C. A. (2012). *How to differentiate instruction in mixed ability classrooms* (2nd ed.). Association for Supervision and Curriculum Development.
- van de Pol, J., Volman, M., & Beishuizen, J. (2010). Scaffolding in teacher-student interaction: A decade of research. *Educational Psychology Review*, 22(3), 271-296. <https://doi.org/10.1007/s10648-010-9127-6>
- van Uum, M. S. J., Verhoeff, R. P., & Peeters, M. (2016). Inquiry-based science education: Towards a pedagogical framework for primary school teachers. *International Journal of Science Education*, 38(3), 450-469. <https://doi.org/10.1080/09500693.2016.1147660>
- Viehmann, C., Fernández Cárdenas, J. M., & Reynaga Peña, C. G. (2024). The use of socioscientific issues in science lessons: A scoping review. *Sustainability*, 16(14), 5827. <https://doi.org/10.3390/su16145827>
- Vo, D. V., & Simmie, G. M. (2024). Assessing scientific inquiry: A systematic literature review of tasks, tools and techniques. *International Journal of Science and Mathematics Education*, 23(4), 871-906. <https://doi.org/10.1007/s10763-024-10498-8>
- Wu, H.-K., Kuo, C.-Y., Jen, T.-H., & Hsu, Y.-S. (2015). What makes an item more difficult? Effects of modality and type of visual information in a computer-based assessment of scientific inquiry abilities. *Computers & Education*, 85, 35-48. <https://doi.org/10.1016/j.compedu.2015.01.007>
- Zeidler, D. L. (2014). Socioscientific issues as a curriculum emphasis: Theory, research, and practice. In N. G. Lederman & S. K. Abell (Eds.), *Handbook of research on science education* (Vol. 12, pp. 697-726). Routledge.

- Zeidler, D. L., & Nichols, B. H. (2009). Socioscientific issues: Theory and practice. *Journal of Elementary Science Education*, 21(2), 49-58. <https://doi.org/10.1007/BF03173684>
- Zhang, W.-X., & Hsu, Y.-S. (2021). The interplay of students' regulation learning and their collective decision-making performance in a SSI context. *International Journal of Science Education*, 43(11), 1746-1778. <https://doi.org/10.1080/09500693.2021.1933250>