

以科學建模歷程探索臺灣國中教科書中 化學平衡概念模型的建構

鐘建坪

教科書在科學學習與教學中扮演重要的角色。目前研究顯示科學建模歷程能促進學生進行科學模型的建構，因此若是科學教科書能夠呈現科學建模歷程，則能更全面協助學生學習與教師教學。本研究主要採用內容分析法針對 1968 年至 2019 年間 15 本國民中學科學教科書，以四階段的科學建模歷程進行化學平衡概念模型的分析。研究發現多數版本內容著重在模型發展與模型精緻階段，少數版本才會呈現模型遷移與模型重建歷程。基於研究結果，作者認為教科書應該盡可能提供學生完整的科學建構歷程，並強化情境的學習，作為課堂科學概念與生活情境的連結。

關鍵詞：科學建模、化學平衡、教科書、橫斷式研究

收件：2020年4月10日；修改：2020年10月6日；接受：2021年1月14日

Exploring the Construction of a Conceptual Model of Chemical Equilibrium in Taiwanese Junior High School Science Textbooks Through a Scientific Modeling Process

Jing-Ping Jong

Textbooks play a crucial role in science learning and teaching. Research has demonstrated that students' construction of scientific models would be facilitated via scientific modeling. If science textbooks present the complete process of scientific modeling, students would understand scientific modeling considerably more easily. This study employed the content analysis method to examine the conceptual model of chemical equilibrium that is based on a four-stage scientific modeling process—with the four stages being model development, model validity, model deployment, and model reconstruction—for 15 versions of science textbooks used between 1968 and 2019. Results highlighted that most versions focus on the model development and model validity stages; only a few versions presented detail on the model deployment and model reconstruction stages. On the basis of the findings, the author suggests that textbooks should not only provide students with the complete process of scientific modeling but should also anchor a context as a link between science and daily life.

Keywords: scientific modeling, chemical equilibrium, textbook, cross-sectional study

Received: April 10, 2020; Revised: October 6, 2020; Accepted: January 14, 2021

壹、研究背景與動機

臺灣科學課程的制定深遠地影響教科書的編撰內容，而其內容是目前臺灣教師教學與學生學習評量的主要依據。在課程標準時期，¹教科書是由國家統一編輯審定，而課程綱要時期，開始開放民間撰寫教科書，再經審定通過後作為各校選用。教科書根據課程標準或綱要，規劃不同科學模型的建構歷程與成果，編撰出適合不同階段學生學習的科學實踐內容（Jong et al., 2015）。

臺灣已於 2019 年實施新的課綱（以下簡稱 2019 年課綱），自然領綱認為各學習階段應該重視探究與實作的精神與方法，以培養學生具備科學的核心概念、探究能力以及科學態度與本質（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）。科學建模強調模型的建構歷程，不僅讓學生從中獲得科學模型的結果，亦讓學生學習相關的科學建模能力，體會科學模型修正與轉換的過程，以及從中領略知識建構是暫時性、可錯的以及可變動的科學本質觀（Schwarz & White, 2005），此與自然領綱的期待相符合的。

化學平衡是化學領域一項重要的科學概念模型（Chiu et al., 2002），²它涵蓋可逆反應、動態平衡、因素影響平衡移動等次概念。研究發現學生對於化學平衡的理解與學習是有困難的（Chiu et al., 2002; Van Driel & Gräber, 2002），學生會產生迷思的概念往往來自於將動態的過程視為靜態的結果，並且無法體認自己想法錯誤之處。因此，有學者建議教科書等教材的設計需要考量學生概念建構的歷程，協助學生監控自己建構

¹ 本文所稱課程文件泛指國家制定的課程標準或是課程綱要。本文作者並依據課程文件名稱，區分出課程標準與課程綱要時期。課程標準時期為 2000 年之前，而課程綱要時期為 2000 年之後。

² 概念並非單純只是一個指稱或是表徵，而是一個網狀的體系。模型的意義是指物件與物件之間的關聯，因此研究科學模型的科教學者，會將具有網絡的概念稱為概念模型。本研究將概念視為概念模型。

模型的正確性與思索微觀動態粒子的變動情形（劉俊庚、邱美虹，2010；Jong et al., 2015）。

由於九年義務教育的實施影響我國教育與經濟層面甚巨（黃芳玫，2001），期間有多次課程標準與課程綱要的修訂，教科書的編撰亦從國家統一編輯審定轉向民間撰寫審查發行。在十二年國教實施初期，若能分析九年義務教育階段教科書的內容，可得知九年義務教育時期特定科學模型編寫的模式與脈絡，其結果可作為十二年國教之教科書寫作參考。同時研究發現教科書作者編撰新版內容時，會參酌先前已出版的教科書（劉俊庚、邱美虹，2010），因此在2019年課綱實施的同時，我們需要鑑往知來，藉由探討過往臺灣教科書編寫的科學概念模型如何促進學生進行概念建構，條理出適切的模式與脈絡，以作為未來教科書實際寫作之參考。

貳、文獻探討與理念架構

文獻回顧說明模型與科學模型、科學建模歷程、化學平衡概念的呈現與本研究的理念與目標，敘述如下：

一、模型與科學模型

模型是指物件之間的連接關係，它可以呈現出具體的實體，亦可以表示實體背後的抽象想法，例如，一個汽車玩具模型，可以呈現出實體汽車的縮小模樣，同時亦呈現出汽車玩具模型設計者的心智想法。科學模型是指科學概念與概念之間的關聯，例如，化學計量具備莫耳、重量、分子量、粒子數目以及反應方程式之間的關係。因此，科學發展的歷程即是建構科學模型的歷程（Jong, 2016）。

二、科學建模歷程

模型與建模是科學實務的中心工作（Giere, 1988）。科學建構模型的歷程即指科學家們如何經由觀察、測試、檢驗、提出結果的歷程，而

此歷程不單單只是操作步驟，同時亦是科學家針對特定科學理論進行的心智模型（mental model）建構。學生進行科學模型的建構過程，即希望學生能夠經歷類似科學家進行探究的歷程，從建立初始模型開始，進而逐漸轉變為混合模型，再經過不斷修正與轉變而成為科學模型。本質上，「培養科學家與工程師」以及「養成具有科學素養的國民」皆須理解科學模型與其科學建模歷程。許多學者基於心智建構提出科學建模的相關教學步驟，以協助學生建構正確的科學概念模型（Chiu & Lin, 2019; Halloun, 1996; Schwarz et al., 2009）。Schwarz 等人（2009）強調模型建立、修正以及運用的歷程，包括：教學時須要確認欲學習的概念，接著協助學習者形成初始模型，進而檢驗、測試與評價模型，最後使用修正後的模型預測或解釋。Halloun（1996）提出基模式建模（schematic modeling），首先，針對欲學習的科學模型進行檢索，並且依據情境選擇適用的模型，協助學生建構出解題情境所需要的心智模型，緊接著學生利用所建構的模型進行分析與檢驗，並嘗試遷移至不同情境等步驟。Chiu 與 Lin（2019）以 Halloun 提出的科學建模為基礎，增加模型重建的歷程，作為學習者概念改變時其心智模型修正與轉變的重要歷程，其歷程涵蓋模型發展、模型精緻、模型遷移以及模型重建階段。雖然目前已有建模教學的相關研究，然而不同階段的科學建模歷程如何引導學生進行文本編寫，以進一步作為學習的輔助鷹架，是值得深入探討的主題（Jong et al., 2015）。

三、科學建模的重要性

科學模型是科學家進行科學建構的成果，而其建構科學模型的過程即可稱為科學建模。科學建模教學與學習嘗試經由產生、鞏固、修正、重建，以及轉換學生心智模型的過程，讓學生學習科學家建構科學模型與其歷程（Jong, 2016; Jong et al., 2015; Schwarz et al., 2009）。學生學習的科學模型是專家學者挑選後，經由教科書與其他形式，轉化過後形成適合不同階段學生學習的科學模型（Justi & Gilbert, 2000）。由於科學知識進展迅速，學生無法吸收與記憶所有知識，因此科學學習不應該只

著重學生學習到什麼科學事實，而是要留意如何讓學生學習重要的科學模型與其發展脈絡與創建的歷程（Maia & Justi, 2009）。研究證實科學建模能夠促進學生以建構的科學模型解釋現象（Bamberger & Elizabeth, 2013）、在建模歷程中培養探究與建模能力（鐘建坪，2013；Jong et al., 2015）、在檢驗與效化已建構模型的正確性進行論證（鐘建坪，2013；Passmore & Svoboda, 2012），以及透過修正與轉變的過程體驗正確的科學態度與科學模型轉變的本質觀（Prins et al., 2011），這與經濟合作暨發展組織（Organisation for Economic Co-operation and Development, OECD）聚焦培養學生具備解釋科學現象、進行科學探究，以及運用證據產生結論能力的科學素養相符（OECD, 2016），也與自然領綱強調培養學生學習核心概念、探究能力與科學態度及本質相呼應（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）。

四、化學平衡概念模型的呈現

化學平衡是化學中一項重要的概念模型（Chiu et al., 2002）。許多化學反應即屬於可逆反應，且都會牽涉化學平衡變動的關係，例如，酸鹼反應或是酯化反應等。科學家哈伯（Fritz Haber）製造氨氣的方式亦是藉由化學平衡動態變化的情形，增進氨氣的產量，而氨氣的大量製造提供人類生產糧食作物重要且便宜的氮肥來源。

化學平衡含有許多次概念內容：正、逆反應、動態平衡、平衡移動等，而這些概念內容往往是反直觀，容易造成學生的迷思概念，例如，學生認為正反應完全結束之後，逆反應才開始進行（Van Driel & Gräber, 2002）、化學平衡時，其平衡係數代表最終反應物與產物的數量比而非動態過程的數量變化（Gussarsky & Gorodetsky, 1990），以及錯誤使用勒沙特列原理（Le Chatelier's principle）（Wheeler & Kass, 1978）等。

教學上有時會使用類比方式協助學生建構正確的心智模型，讓學生藉由角色扮演的動態表徵模擬微觀粒子碰撞情形（Harrison & De Jong, 2005; Thiele & Treagust, 1994），雖然學生能夠藉由將自己類比為微觀

粒子模擬化學平衡時的動態過程，可惜類比只針對特定迷思概念，缺少完整一套的動態建模歷程。Maia 與 Justi (2009) 進一步利用建模取向 (modeling-based) 的教學方式，搭配建立、測試與精緻心智模型的歷程，協助 14 至 15 歲的中學生進行質性化學平衡概念的建構，強調可藉由教師提問、與全班分享所建構模型，以及提供機會讓學生改變他們原先心智模型的方式，較能夠促進學生獲得正確的化學平衡觀念。然而 Maia 與 Justi (2009) 的研究並未探討教學中如何搭配使用科學文本協助建模教學的進行。

作者曾設計建模取向的科學文本協助學生進行微觀粒子在壓力、體積、溫度與粒子數目間的關係連結 (Jong et al., 2015)，以市售的教科書內容為基礎，輔以適切的科學建模歷程，修改為科學建模文本，再與原先市售教科書文本進行文本閱讀比較。結果發現閱讀建模文本的學生在概念測驗的微觀粒子行為面向表現較佳，且其在修正、檢驗與重建模型面向的建模能力表現優於閱讀一般教科書文本的組別。結果顯示科學建模文本不僅能夠協助學生建構科學概念，亦能促進學生相關能力的培養 (鐘建坪，2013；Jong et al., 2015)。

五、理念與目標——教科書的建模分析

目前教科書分析的研究類別相當多元，但是利用科學建模分析教科書的內容呈現方式卻是少見 (劉俊庚、邱美虹，2010)。由於教科書作為教師教學的重要參考依據，同時亦呈現科學家科學建構的成果，因此，如果教科書能呈現完整的科學建模歷程，學生可從中直接獲得科學建構的思考歷程與對模型本質認知觀點的提升，久而久之內化成為學生自身有效地思考模式。同時，教科書的功能不應該只是提供科學事實或理論，應該從學生學習的角度出發，思考如何讓學生能夠從教科書的學習中體會科學模型的內容與其建構歷程，同時反思與修正自身可能錯誤的觀點與想法。因此，不管教育目標是希望培養科學家、工程師或是養成具有科學素養的國民，皆須理解科學模型與其科學建模歷程。雖然目前已有研究嘗試撰寫建模文本，作為協助學生閱讀以及提供教科書寫作

的參考依據 (Jong et al., 2015)，但是截至目前為止，專門針對教科書進行建模歷程分析的研究仍然非常少 (劉俊庚、邱美虹，2010)。有鑑於此，本文嘗試採用 Chiu 與 Lin (2019) 提出的科學建模歷程作為分析架構 (見圖 1)，分析跨年代的教科書內容。說明如下：

模型發展：確認模型內部物件之間的關聯性，以建構初始的科學概念模型。模型精緻：思考已經建構的概念模型之正確性，進行相關的結果分析，確認其適用範圍以及限制條件。模型遷移：將已經確認與檢驗過後的概念模型遷移至相關情境，以強化所建構概念模型的正確性。模型重建：當所建構的心智模型與科學概念相互衝突時，需要進行修正與轉變，適切地轉化為正確的科學模型。可藉由情境介紹，讓學生思索差異，協助學生進行心智模型的轉變。

本研究基於科學建模歷程架構，探討臺灣九年義務教育期間的國民中學教科書「化學平衡」概念模型的呈現模式，藉由縱向探索不同年代時期的教科書內容，以期作為未來教科書編撰者寫作的參考依據。因此，研究問題為九年義務教育期間，臺灣國民中學科學教科書如何呈現化學平衡的概念模型？



圖 1 科學建模歷程架構

資料來源：修改自 Chiu 與 Lin (2019, Figure 3)。

參、研究方法

教科書是第一線教師時常運用的教學資源之一，自然科的教科書內容常以模型來呈現科學理論或是相關概念的發展。本研究嘗試以橫斷面（cross-sectional research）及內容分析法（content analysis method）針對臺灣國民中學教科書進行化學平衡概念模型的內容分析，針對建模歷程（模型發展、模型精緻、模型遷移與模型重建）探索不同年代課程標準或課程綱要公布之後，教科書編寫內容如何協助學生進行概念模型的建構。

一、臺灣課程文件中關於化學平衡的教材大綱

科學教材的制定來自符應科學課程內容的要求，其內容在臺灣是作為學習階段評量與入學測驗的依據。從 1968 年臺灣開始實施九年國民義務教育開始，國民中學的自然課程經歷過 7 次的修訂，表 1 標示臺灣不同年代之課程文件對於化學平衡概念的教材大綱。除了 1994 年的課程標準未納入化學平衡之外，自 1968 年起之臺灣課程標準或綱要的教材大綱、教材內容要項與細目皆明確標示化學平衡。

二、分析的文本

為了探索九年國民義務教育階段，不同年代版本教科書針對化學平衡的呈現方式，本研究蒐集不同課程標準或課程綱要所設計的教科書進行分析。由於時間長達 50 多年，本研究篩選原則：（一）每個課程標準或課程綱要皆需要蒐集 1 本對應的教科書；從 1968 年開始實施九年義務教育之後至九年一貫課程結束，總共公布 5 個課程標準與 3 個課程綱要，因此需要對應選出 8 個版本教科書。（二）再考量教科書內容的穩定性，篩選時皆不選擇各階段實施的第一個版本。（三）若同一標準或綱要時間內，教科書有重大修正，則增加分析的版本；因 1985 年課標的教科書有大幅修訂一次，因此對應此課程標準再增加一個分析的教科書版本。（四）民間撰寫之教科書，選擇同一時間主要的出版社版本；

表 1 課程文件標示之化學平衡相關教材大綱與所分析教科書的出版年代

課程年代	化學平衡之相關教材大綱內容	所選教科書出版年代
1968 年	標示在教材大綱「反應速率及催化劑」，其細項「反應的平衡」。	1972 年 (T01)
1972 年	標示在教材大綱「可逆反應」，說明需要具備1.可逆反應的認識、2.化學平衡與3.平衡的改變。	1978 年 (T02)
1983 年	標示在選修科目教材大綱「反應速率與化學平衡」，其細項「逆反應與化學平衡」。	1987 年 (T03)
1985 年	標示在教材大綱「反應速率與化學平衡」，其細項「化學平衡」。	1989 年 (T04) 1995 年 (T05)
1994 年	必修與選修教材綱要皆未標示「化學平衡」，但理化選修中標示相關概念「反應速率」。	2000 年 (T06)
2000 年	標示在教材內容要項「改變與平衡」，細目為「化學的平衡與移動」，說明「經由實驗了解化學平衡的概念，認識影響化學平衡的因素」。	2005 年 (T07、T08、T09)
2003 年	標示在教材內容要項「改變與平衡」，教材細目「化學平衡」中「化學的平衡與移動」。說明「經由實驗了解化學平衡的概念，認識影響化學平衡的因素」；在「化學平衡」中尚有「平衡係數」與「質量守恆定律」。	2008 年 (T10、T11、T12)
2008 年	標示在教材細目「化學反應」中「化學平衡與可逆反應」，說明「經由實驗了解可逆反應的概念，認識影響化學平衡的因素，如濃度、溫度」。	2019 年 (T13、T14、T15)

因為 2000 年課程綱要開始開放民間撰寫教科書，同一時間主要有 3 間出版社出版，為求觀察教科書內容的發展，分別以 2000 年課綱、2003 年課綱與 2008 年課綱作為依據，同時分析相同年分坊間 3 間主要出版社之教科書。依據上述原則，最後共選出 15 個版本，依照時間先後順序分別編碼為 T01 至 T15（見表 1），其中 T01 至 T06 屬於國立編譯館編輯的教科書，而 T07 至 T15 是由民間出版社編撰而成。本文資料引用時將標示版本與頁數，例如，T01，頁 18，指引用自分析的第一個版本第 18 頁內容。

三、建模歷程分析架構

本研究之內容分析架構主要參考 Chiu 與 Lin（2019）提出之科學建模歷程，區分為模型發展、模型精緻、模型遷移以及模型重建等階段（見表 2）。模型發展階段指稱教科書中的內容能夠呈現化學平衡需要可逆反應的發生，以及能夠說明平衡時化學反應方程式的意義。例如，說明什麼是可逆反應？化學平衡時，正反應與逆反應如何進行？其中微觀粒子變動的情形為何等。模型精緻階段是指教科書能夠呈現出影響平衡的條件，並且說明當外在條件改變時，如何影響平衡的進行。例如，說明外在環境條件改變，如濃度、溫度或壓力如何影響平衡的進行。在模型遷移階段是指教科書應能夠利用先前已經建立的平衡概念遷移至其他可逆的化學反應方程式，同時介紹平衡反應在生活上或是相關領域上的運用，例如，運用已經學會的化學平衡概念解釋自然界鐘乳石形成的原由，或是認識科學家哈伯藉由改變壓力與溫度製造氨氣。在模型重建階段是指教科書能夠針對學生可能常見的化學平衡迷思概念進行修正，例如，化學平衡時，同時存在速率相同的正反應與逆反應，因此當環境變動達到新的平衡時，仍具有正、逆反應，不會只有單獨反應物或生成物存在，或是二氧化氮（ NO_2 ）與四氧化二氮（ N_2O_4 ）混合的密閉系統，當環境變動達成新的平衡，顏色不會完全透明無色。

表 2 教科書建模歷程分析架構與舉例

建模步驟	定義	以平衡舉例
模型發展	陳述模型內部物件或物件間的關聯	說明可逆現象、平衡時粒子的巨、微觀現象
	陳述欲建構之模型的意義或關係式	說明平衡時反應方程式的意義
模型精緻	陳述建構之模型的限制條件	說明影響化學平衡的條件
	利用建構之模型進行數據分析	當條件改變時，分析平衡如何改變
模型遷移	在相似情境使用精緻後的模型	利用平衡概念說明新的反應
	在相關情境使用精緻後的模型	利用平衡概念說明生活實例或相關科技的應用
模型重建	修正模型內部物件或關係	利用情境協助修正學生可能形成的迷思概念
	重新建立新的模型取代原始模型	利用情境協助建立正、逆反應速率與平衡的關係

不同版本之教科書在不同建模階段的呈現情形的評分規準，主要修改自劉俊庚與邱美虹（2010）分析教科書呈現之科學建模歷程，並依照國際學生能力評量計畫（Programme for International Student Assessment, PISA）試題評量區分出 2、1 與 0 分。其中，2 分為能夠完整呈現特定建模歷程，例如，模型發展階段呈現出平衡具有巨觀、微觀現象以及說明平衡時化學反應方程式的意義。1 分為只說明特定建模歷程的其中一項，例如，模型精緻階段只說明影響化學平衡的條件，但未說明當條件改變時，平衡如何改變。若是 0 分則是完全未呈現在教科書中（見表 3）。

四、評分者一致性

建模歷程分析架構與規準完成之後，先由 2 位科教專家進行內容審查及修正，再依據完成之分析架構，由本文作者與 1 位科學教育博士共同進行編碼，其一致性為 0.95（57/60），不一致部分經由討論後確認評分內容。

表 3 不同年代版本教科書科學建模獲得分數

建模階段	版本														
	T01	T02	T03	T04	T05	T06	T07	T08	T09	T10	T11	T12	T13	T14	T15
模型發展	2	2	2	2	2	0	2	2	2	2	2	2	2	2	2
模型精緻	1	1	2	2	2	0	2	2	2	2	2	2	2	2	2
模型遷移	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	2	2	2	0
模型重建	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1
總分	3	3	4	4	5	0	4	4	4	4	4	6	7	7	5

註：1.T06 版本對應之課程標準未有化學平衡概念。2.T07、T10、T13 為同一家民間出版社；T08、T11、T14 為同一家民間出版社；T09、T12、T15 為同一家民間出版社。

肆、研究結果

一、教科書科學建模呈現模式

國中範圍的化學平衡單元主要呈現三個次概念，其一是可逆反應，有些版本會先利用封閉系統水分子平衡的物理變化過程說明可逆反應的意義，再以其他化學變化的例子說明化學中的可逆反應。其二是化學平衡的意義，各個版本主要介紹鉻酸鉀溶液在酸性與鹼性溶液的變化，同時以粒子微觀的角度說明可逆反應與平衡時，粒子移動與變化的情形。其三是說明有哪些因素會影響化學平衡的移動，較早年代的版本只簡要從化學反應方程式中說明影響的因素，晚近的版本即很明確地告知濃度、溫度與壓力會影響平衡的變動，並舉化學上的實例說明。在實際模型應用部分只有 4 個版本實際將自然界平衡的變動納入教科書。在最新的版本中，有嘗試將學生可能產生的迷思概念或是容易混淆的概念，藉由書中額外的提問方式，協助學生轉換迷思概念（見表 3）。

二、不同階段呈現的內容

依照課程標準與課程綱要的版本順序，介紹不同版本如何呈現化學平衡概念：

(一) 1968 年與 1972 年課程標準版本

T01 植基於 1968 年國民中學暫行課程標準，分別以實驗呈現出三個平衡的主要概念，包括：可逆、平衡以及如何改變平衡。在實驗之後皆有討論與說明相對應的概念，但是如何改變則未有明確與系統性地說明其他可能影響平衡的因素，例如：

加入鹽酸或多或少，沉澱物氯化氧鉍 (BiOCl) 就有一部分被鹽酸溶解，那麼依照所加鹽酸的多少，改變原先的平衡狀況，而達成新的平衡。(T01, 頁 15)

文本中雖然有說明以平衡實驗作為萃取技術的原理應用，但主要是作為溶質在相互不溶的液體中如何達到溶解平衡。

T02 植基於 1972 年修訂的國民中學課程標準，先說明化學平衡的意涵再藉由蹺蹺板的類比說明可逆反應的意義，再以溴水與鉻酸鉀溶液的實驗說明平衡的意義，並歸納出氫離子 (H^+) 濃度會影響反應的方向。接著探索如何藉由外在條件的改變影響平衡的進行。雖然在此能夠呼應文本一開始歸納氫離子濃度會影響平衡的反應方向，但卻再額外提出加入水亦會影響平衡的進行，例如：

在平衡達到時再加水，即反應又向右邊移動，增加了氯化氧鉍的沉澱，直到新的平衡狀況而停止。(T02, 頁 19)

與 T01 相似，文本中雖然有說明以平衡實驗作為萃取技術的原理應用，但主要是作為溶質在相互不溶的液體中如何達到溶解平衡。

(二) 1983 年與 1985 年課程標準版本

T03 植基於 1983 年修訂之課程標準，先以示意圖說明密閉系統中液態水與水蒸氣以及飽和溶液中有未溶解鉻酸鉀溶液的可逆與平衡情

形，取代先前版本碘在不互溶溶液中的溶解平衡，接著陳述溴水與鉻酸鉀溶液加入酸或鹼性溶液如何造成平衡的改變，並同時說明平衡時微觀粒子的運動情形。此版本已不再以氯仿與碘化鉀實驗進行不同分層溶液的萃取實驗，雖較 T02 增加說明哪些情況會影響平衡的改變，但仍未明確顯示哪些因素影響化學平衡的改變，例如：

在鉻酸根的平衡中，增加 H^+ 的結果是使 $Cr_2O_7^{2-}$ 增加， CrO_4^{2-} 減少；減少 H^+ 又會改變平衡使 $Cr_2O_7^{2-}$ 減少而 CrO_4^{2-} 增加。(T03, 頁 83-84)

整個文本中未說明實際平衡在其他生活或是科技上的運用。

因為 1983 年與 1985 年分別各修訂一次國中課程標準，對應本研究選版本教科書 T03 出版時間 1987 年，與 1989 年出版之 T04 只間隔 2 年。雖然參照不同時期修訂的課程標準，但兩個版本 T03 與 T04 教科書在化學平衡概念模型呈現的內容是相同。

在 1994 年修訂課程標準之前，有大幅度地修訂教科書版本。T05 為 T04 的修訂版，文本建模歷程的內容與實驗部分與 T04 相同，但是 T05 將原先是示意圖的部分轉化為實體照片呈現，藉以搭配內文文字的說明，包括：密閉系統中，液態水蒸發為氣態水，同時氣態水冷凝為液態水、溴水加酸或加鹼性溶液的實際顏色照片、鉻酸鉀加酸與重鉻酸鉀加鹼之溶液顏色照片、密閉瓶中大理石和鹽酸照片與開蓋後冒泡以及自然界中的鐘乳石照片。同時 T05 額外以鐘乳石的變化說明自然界平衡改變的應用。

(三) 1994 年課程標準版本

T06 版本是基於 1994 年修訂之課程標準，但因課程標準的教材大綱未提及化學平衡概念，因此教科書未說明逆反應與化學平衡。

(四) 2000 年課程綱要版本

T07 化學平衡概念設定在反應速率單元之後，主要談及可逆反應、化學平衡以及影響化學平衡的因素。相較於 T06 版本，T07 因課綱文件而重新加入化學平衡概念，而與 T05 比較時發現，T07 除了先介紹物理與化學的可逆反應之外，亦以微觀粒子的運動情形解釋平衡現象：

可逆反應進行時，反應物的粒子相互碰撞變成生成物；隨著生成物的粒子增多生成物的粒子一有機會碰撞變成反應物。因此，正、逆反應同時在進行。(T07, 頁 18)

T07 明確地說明「是否所有化學反應都能進行正、逆反應呢？」(T07, 頁 18)，並且將 T05 版本中呈現化學平衡的實際範例整合作為影響化學平衡的因素，藉由說明平衡的改變歸類出濃度、壓力與溫度會影響化學平衡。但是缺少化學平衡在生活或科技上的運用實例。

T08 先說明水分子在密閉系統中之平衡狀態，引導出可逆反應，再以硝酸鉀飽和狀態的溶解與析出過程說明平衡動態歷程。接著以鉻酸鉀、二鉻酸鉀與溴水、溴離子及次溴酸說明酸、鹼的環境變化如何影響平衡的移動。但缺少化學平衡在生活或科技上的運用實例。

T09 以密閉系統中水分子氣態與液態的示意說明可逆的平衡狀態。接著以實驗活動嘗試讓學生觀察溫度的改變將影響平衡的移動，再以大理石與鹽酸反應說明壓力變化影響平衡的移動，形成動態而非靜止的平衡狀態。雖然提及哈伯法製氨，但在編排上是作為介紹正、逆反應可達成平衡的反應項目之一。

(五) 2003 年課程綱要版本

T10 增加 T07 的內容，額外說明針筒內放置大理石與鹽酸溶液，嘗試以針筒推拉的方式改變針筒內的壓力，作為影響平衡的因素。但是缺少化學平衡在生活與科技上的運用實例。

T11 與 T08 文字內容相似，主要進行圖片的增加與排版的修正，嘗試說明環境改變時，平衡變動的顏色改變。例如，T08 以兩張照片分別呈現溴水為紅棕色，在加入鹼之後呈無色，而 T11 藉由 3 張圖片呈現溴水先加入鹼再加入酸之後的顏色變化，視覺化平衡的動態過程。但仍缺少化學平衡在生活或科技上的運用實例。

T12 以密閉系統中水分子氣態與液態的說明嘗試定義平衡、正反應與逆反應，接著舉飽和硝酸鉀溶液析出與溶解速率相同說明平衡狀態，並以氯化亞鈷加水與加熱反應說明化學反應亦具有可逆反應的情形。再

以鉻酸鉀與二鉻酸鉀的酸、鹼環境改變和大理石與鹽酸反應的壓力變化說明平衡如何改變之後再次形成新的平衡，接著以化學平衡概念介紹自然界石灰岩洞中的石柱等地形造成的成因。

(六) 2008 年課程綱要版本

T13 在說明可逆反應時即區分出物理變化與化學變化的平衡反應。接著以鉻酸鉀依序加入硫酸與氫氧化鈉的顏色變化並以粒子增減與移動的情形說明平衡的改變與新平衡的產生。再以四氧化二氮與二氧化氮、大理石與鹽酸溶液的平衡改變分別說明溫度與壓力的因素如何影響平衡。與先前版本差異在於將反思問題嵌入圖片，嘗試讓學生觀看圖片說明時，同時思索相關的原理並同時解釋可能產生的迷思概念，例如：

將容器置入冰水中，反應有利於產生無色的 N_2O_4 ，但為什麼達成新平衡時，氣體不是呈現無色？(T13，頁 113)

最後，再以自然界中可逆反應與化學平衡介紹實際範例。

T14 先說明水分子在密閉系統中的平衡狀態，引導出可逆反應，再以硝酸鉀飽和狀態溶解與析出說明平衡的動態歷程。不同的是，此版本更著重以示意圖展現微觀粒子分布情形，亦呈現出達平衡時正、逆反應速率的情形。接著說明平衡的移動與影響平衡移動的因素，同時分別增加例題精緻學生平衡移動的概念。且藉由反思問題結合先前章節概念強化學生的概念結構。雖然主文至此告一段落，但此版本利用科普閱讀的方式說明化學平衡概念在哈伯法製氨的運用。

T15 先以可逆反應水分子在密閉系統水量未改變下說明正反應與逆反應，再以氯化亞鈷說明化學變化亦具可逆反應。接著以密閉系統的水分子、飽和硝酸鉀溶液、密閉系統的大理石與鹽酸反應說明平衡狀態時正、逆反應速率的情形與微觀動態過程。接著藉由鉻酸鉀與二鉻酸鉀溶液說明濃度影響平衡改變，二氧化氮與四氧化二氮混合氣體說明溫度影響平衡改變。此版本將 T12 版本中介紹自然界石灰岩洞中的石柱等地形的成因修改為反思問題讓學生嘗試解釋。

三、小結

本研究主要探索九年義務教育時期，國中教科書如何呈現化學平衡，其所具備的建模歷程元素為何。綜合上述內容，在所分析的教科書中，其建模歷程元素皆包含模型發展與模型精緻，較少涵蓋模型遷移與模型重建。不同版本整體建模元素呈現結果如下：

（一）所有版本皆能完整呈現模型發展元素

所有版本教科書在說明化學平衡時皆能涵蓋可逆反應與化學平衡的意義。而此階段即說明化學平衡概念模型的內容與意義。

（二）模型精緻元素在九年義務教育初期的版本仍有待補強

依據 1968 年與 1972 年課程標準所編撰的教科書內容（T01 與 T02），強調如何藉由實驗操作讓學生理解可逆、平衡以及如何改變平衡，在模型精緻階段缺少以不同範例說明如何改變化學平衡的移動。

（三）1983 年課程標準之後版本皆完整呈現模型發展與模型精緻元素

1983 年課程標準之後版本的教科書在「模型發展」與「模型精緻」階段皆獲得滿分（除 T06），其內容主要先呈現逆反應與化學平衡時的意義，再以鉻酸鉀與二鉻酸鉀、一氧化氮與二氧化氮之間化學平衡，在濃度、溫度或壓力的影響下，探討化學平衡移動的變化情形。顯示國民中學化學平衡的學習內容即以讓學生理解可逆反應、化學平衡時的意義以及條件變動時如何改變化學平衡為主。

（四）部分版本增加生活經驗或學術情境應用的說明

國家統一編輯審定本除了 T05 之外，皆未提及化學平衡在生活經驗或是學術情境應用的說明。2003 年課綱之後，開始較多的版本內容（T12、T13、T14）接續 T05 版本內容，有提及鐘乳石的形成與化學平衡的關係，或是哈伯法製造氨氣過程如何藉由改變化學平衡條件增加產量。

（五）2008 年課綱之後的版本具備所有建模元素

在 2008 年課綱之後的版本（T13、T14、T15），保留先前的內容，另外有較多的小提問出現，有些是針對課文的理解反思，而有些是針對學生可能會有的迷思概念，企圖進行澄清。所分析的教科書，至 2008 年課綱版本，才逐漸發展為具有完備的模型發展、模型精緻、模型遷移與模型重建的科學建模歷程。而此階段分析的版本為 2019 年出版，可能因十二年國教總綱與自然領綱草案頒布前後，針對素養導向與科學建模等議題的推廣而促進版本內容的修訂。

綜合分析的結果顯示多數教科書未能明確提供完整的建模歷程，如此可能無法協助學生完全理解科學本質，同時學生發展相關的科學建模能力亦可能受到阻礙（Schwarz & White, 2005）。

伍、討論

本研究從科學建模歷程分析九年國民義務教育階段的臺灣國民中學教科書內容。在課程標準時期，國家統一制定學習教材內容的教材大綱，即設定國民中學學習化學概念的所有範圍，主要為可逆反應、化學平衡時的意義以及不同因素如何改變化學平衡。其中化學平衡單元往往與化學反應速率連結在一起，主要是因其平衡概念牽涉正反應速率與逆反應速率相同的緣故。另外，值得一提的是 1994 年課程標準未提化學平衡，私下詢問當時參與制定的一位課程專家，回顧原因認為主要考量化學平衡概念對國中學生而言實屬困難而未放入。從已分析的 15 本國民中學教科書發現化學平衡概念模型呈現的趨勢與討論如下：

一、化學平衡概念的呈現主要為可逆反應、化學平衡的意義以及影響化學平衡的因素

國民中學階段化學平衡單元均未涉及量化計算，而是著重在質性觀點的現象描述，同時藉由實驗呈現來作為概念的表達。化學平衡單元一

開始會呈現某些反應會進行逆反應，若是逆反應速率與正反應速率相同時，則達到平衡，因此具備化學反應平衡，接著介紹化學反應平衡的實例，並藉由改變反應平衡式中特定物質，評估化學反應的移動方向。此學習階段的設計與許多國家在相同年紀化學課程的安排相似，化學平衡的學習主要以質性概念為主，並未涉及平衡的計算（Maia & Justi, 2009）。與相關建模教學研究不同的是，建模教學的研究是以教師教學或是學生學習歷程出發，探討學生的學習成效（Harrison & De Jong, 2005; Maia & Justi, 2009; Thiele & Treagust, 1994），但是本研究主要探索教科書是否呈現出完整的科學建模歷程以協助學生進行完整的概念建構。

二、多數版本強調模型發展與精緻

教材細目或教材大綱明確訂定化學平衡是國民中學需要的學習內容。雖然標準或是綱要中會介紹教學策略，但是教科書內容呈現的樣態多是以化學反應概念的呈現為主，以隱含的方式（implicitly）呈現概念建構的歷程，其中多數版本忽略科學建模的整體歷程。此結果與學者的研究結果相似（劉俊庚、邱美虹，2010；Gericke & Hagberg, 2010），教科書多呈現不完整的建模歷程，只強調初始的概念建構，忽略精緻與重建歷程，而完整呈現建模歷程的教科書才能協助教師進行建模教學，亦可以讓學生從中學習相關的科學建模知識與能力。

三、少數版本強調模型遷移與模型重建

分析的化學平衡單元只有 4 個版本的教科書呈現化學平衡的實際應用，如此將缺乏學生學習完化學平衡概念之後如何遷移至生活情境或是相關科技產業，容易讓學生只學習化學概念而忽略應用。同時，大多數的版本皆未能以學生迷思概念出發協助學生進行概念重建。如此一來缺乏生活情境遷移與錯誤迷思概念的重建學習對於學生概念建構是有其阻礙（Jong, 2016; Jong et al., 2015）。稍微複雜的遷移內容，實際運用時可以藉由科普閱讀等方式，協助學生連結生活經驗或是學術情境，促使學生建構課堂科學概念與實際運用的相關性。

四、從特訂版本開始強調圖示與文字的連結，以及化學平衡時微觀粒子的變動情形

化學平衡的概念內容在本研究所分析的各版本教科書中，對應 1983 年課程標準的教科書版本（T03）已經大致底定。之後教科書的修改與增訂範圍主要落在實際範例照片的增加、微觀粒子示意圖的呈現、化學平衡生活應用的說明，以及相關迷思概念的呈現等內容。而 T03 版本之後開始增加巨觀現象與微觀粒子之間的交互作用，亦符合國際化學教育文獻強調微觀粒子、化學符號、反應方程式之間的關係（Johnstone, 1982）。

五、從 2008 年課綱後，開始有版本提供反思問題作為修正學生可能發生的迷思概念

迷思概念的偵測與消除是教學的重要目的之一，若教科書能夠協助學生在概念建構之後，重新反思自身概念模型的合理性，則能更加強化學生概念模型的穩定性（Jong, 2016）。實務上可將實證研究上常見的學生迷思概念放在相關教材之中，協助學生進行概念的轉變。

陸、結語、建議與研究限制

一、結語和建議

本研究主要縱向分析臺灣國民中學教科書「化學平衡」概念的呈現是否具有建模歷程所需的要素。研究結果顯示，大部分教科書並未具備完整的建模歷程。多數版本教科書內容偏重「模型發展」與「模型精緻」，對於「模型遷移」與「模型重建」之比例偏低。這樣的呈現方式將使學生不易藉由完整地科學建模歷程精煉化學平衡概念，並獲得相關的科學建模知識與能力。基於結果，相關研究與實務面向建議如下：

（一）教科書科學模型建構的歷程分析模式

過往的教科書研究著重的面向曾有概念詞彙的意義與其之間的關係，或是教科書中圖片的呈現模式，較少著重在教科書是否具有完整的科學模型建構歷程。先前的研究（劉俊庚、邱美虹，2010；Jong et al., 2015）與本文結果皆發現教科書對於科學模型的闡述側重在模型發展階段。一般教學主要在讓學生理解科學模型之後，輔以習題進行練習作為確認學生學習的成果，其中缺少的建模歷程元素需以教科書提供的內容進行補足才行，因此教科書提供完整的建模歷程是需要且必須的。未來研究不僅可針對教科書中特定科學模型發展歷程進行相同年級、不同版本的分析，亦可針對不同學習階段教科書學習徑路進行探討，以及具有完備建模歷程的科學文本輔助教師教學的關聯性，作為教科書科學模型如何建構與發展面向的探討。

（二）國中化學單元教科書的寫作需要參酌科學建構的歷程

科學模型的發展雖然無法循序單一步驟，但是仍可萃取並簡化為發展、精緻、遷移與重建階段。本文所分析的教科書單元主要著重在發展化學平衡的概念模型，並且精緻呈現影響平衡的因素，同時說明這些因素改變時，化學反應變動的情形。未來，教科書針對特定單元不僅呈現概念模型的內容，尚應思考學生學習的困難以及概念可能應用的範圍，讓學生能夠藉由教科書即整備完整的科學建構歷程。

（三）在模型重建部分納入學生可能的迷思概念或是科學史中理論模型的轉換

教科書一般只會呈現正確的科學知識，但是學生閱讀與學習時卻會開始產生錯誤的迷思概念，因此，可以藉由特定問題安插在不同的建模階段，讓學生思索其發展特定模型的正確性，若是不正確可以立即修正或轉變。同時，為了讓學生思索完整的科學建構歷程，在模型重建階段除了提供可能迷思概念的轉變之外，尚可提供學生完整的科學模型建構歷程，讓學生知悉當下學習的科學概念是許多科學家經過不同思索與修正而獲得，並非一蹴可幾。

(四) 從科學建模歷程中整合相關的思考智能與問題解決能力

科學建構歷程涵蓋模型發展、模型精緻、模型遷移以及模型重建歷程，而其歷程即為科學家建構科學模型的歷程。在建構歷程中或有思索問題、進行實驗、驗證假說、提出暫時模型、持續不斷地檢驗等步驟，而這些步驟即與探究能力、思考智能與科學本質息息相關。因此，未來可藉由教科書呈現完整科學建模的機會，同時整合相關的思考智能與問題解決能力，達到培養具有科學素養國民的教育目標。

(五) 針對容易產生迷思概念的微觀粒子行為，可嵌入相關的數位教材

教科書目前主要仍以文字與圖片方式呈現科學學習的內容，對於微觀粒子行為雖能呈現，但是卻缺少動態的過程。對於類似化學平衡之相關概念，需要讓學生理解微觀動態歷程仍有欠缺，未來可著重數位科技的輔助協助教科書概念的呈現，例如，可藉由 QR 碼呈現探索活動的相關內容或是以 GIF 動態圖檔呈現微觀粒子行為，讓學生閱讀同時，可藉由行動載具掃描或是數位文本直接呈現而更加理解相關內容。

二、研究限制

本研究相關研究限制說明如下：

(一) 有限的篩選與分析教科書版本

本研究主要以橫斷面式分析臺灣國民中學化學平衡概念模型的呈現模式，雖然本文作者致力呈現教科書縱向的趨勢，找出每一個教改文件對應的教科書，但仍然會因為所篩選的教科書是否能夠完整貼切 50 多年的臺灣教科書發展而有所差異。同時，也可能因為概念模型上的差異，而使教科書呈現方式有所不同，此為本研究作為更廣推論上的侷限。

(二) 尚未分析教科書搭配的習題與相關的自編教材內容

科學建模歷程建立與教師在教學上如何使用教科書、習題與相關輔助教材有關。本研究主要分析不同版本的教科書，探討所篩選的教科書

內容是否具備完整的科學建模歷程，未能觸及教科書搭配的習作或是教師自編教材的內容規劃。

(三) 尙未針對不同年代、不同建模元素的教科書內容，比較其學習成效

本研究基於先前針對建模文本的研究（劉俊庚、邱美虹，2010；鐘建坪，2013，2016；Jong et al., 2015），認為具有完備的科學建模元素較能提供學生完整的學習面向，因此建議教科書的內容規劃以科學建模歷程為依據。雖然本研究分析的多數版本缺少完整科學建模歷程，少數版本具有稍微完整的建模歷程要素，但若要觀察不同年代較具有完整建模元素的教科書（如T14）與先前只著重模型選擇與模型精緻的版本（如T02）進行學習成效比較，則需要額外再進行不同版本教科書的閱讀或教學研究，較能實質探索學生在不同建模元素的教科書學習情境下獲得的學習表現。

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).]

黃芳玫（2001）。九年國民義務教育之回顧與其教育面、經濟面之影響。臺灣經濟預測與政策，31（2），91-118。https://doi.org/10.29629/TEFP.200110.0005

[Huang, F.-M. (2001). The educational and economic impacts of nine-year compulsory education in Taiwan. *Taiwan Economic Forecast and Policy*, 31(2), 91-118. https://doi.org/10.29629/TEFP.200110.0005]

劉俊庚、邱美虹（2010）。從建模觀點分析高中化學教科書中原子理論之建模歷程及其意涵。科學教育研究與發展季刊，59，23-54。

[Liu, C.-K., & Chiu, M.-H. (2010). From modeling perspectives to analyze modeling processes of atomic theory in senior high school chemistry textbooks and their implications. *Research and Development in Science Education Quarterly*, 59, 23-54.]

鐘建坪（2013）。模型本位探究策略在不同場域學習成效之研究（未出版之博士論文）。國立臺灣師範大學科學教育研究所。

- [Jong, J.-P. (2013). *The effects of model-based inquiry strategy in different learning scenarios* [Unpublished doctoral dissertation]. National Taiwan Normal University.]
- 鐘建坪 (2016)。科學模型與建模：科學建模文本與其學習成效。臺灣化學教育，11。http://chemed.chemistry.org.tw/?p=13944
- [Jong, J.-P. (2016). Scientific models and modeling: The modeling-based text and their learning outcomes. *Chemistry Education in Taiwan*, 11. http://chemed.chemistry.org.tw/?p=13944]
- Bamberger, Y. M., & Elizabeth, A. D. (2013). Middle-school science students' scientific modelling performances across content areas and within a learning progression. *International Journal of Science Education*, 35(2), 213-238. http://doi.org/10.1080/09500693.2011.624133
- Chiu, M.-H., Chou, C.-C., & Liu, C.-J. (2002). Dynamic processes of conceptual change: Analysis of constructing mental models of chemical equilibrium. *Journal of Research in Science Teaching*, 39(8), 688-712. http://doi.org/10.1002/tea.10041
- Chiu, M.-H., & Lin, J.-W. (2019). Modeling competence in science education. *Disciplinary and Interdisciplinary Science Education Research*, 1(12). https://doi.org/10.1186/s43031-019-0012-y
- Gericke, N. M., & Hagberg, M. (2010). Conceptual incoherence as a result of the use of multiple historical models in school textbooks. *Research in Science Education*, 40, 605-623. http://doi.org/10.1007/s11165-009-9136-y
- Giere, R. N. (1988). *Explaining science: A cognitive approach*. University of Chicago Press.
- Gussarsky, E., & Gorodetsky, M. (1990). On the concept "chemical equilibrium": The associative framework. *Journal of Research in Science Teaching*, 27(3), 197-204. https://doi.org/10.1002/tea.3660270303
- Halloun, I. (1996). Schematic modeling for meaningful learning of physics. *Journal of Research in Science Teaching*, 33(9), 1019-1041. http://doi.org/10.1002/(SICI)1098-2736(199611)33:9<1019::AID-TEA4>3.0.CO;2-I
- Harrison, A. G., & De Jong, O. (2005). Exploring the use of multiple analogical models when teaching and learning chemical equilibrium. *Journal of Research in Science Teaching*, 42(10), 1135-1159. http://doi.org/10.1002/tea.20090
- Johnstone, A. H. (1982). Macro- and micro-chemistry. *The School Science Review*, 64(227), 377-379.
- Jong, J.-P. (2016). The effect of a blended collaborative learning environment in a Small Private Online Course (SPOC): A comparison with a lecture course. *Journal of Baltic Science Education*, 15(2), 194-203. http://www.scientiasocialis.lt/jbse/?q=node/494
- Jong, J.-P., Chiu, M.-H., & Chung, S.-L. (2015). The use of modeling-based text of ideal gas law to improve students' modeling competencies. *Science Education*, 99(5), 986-1018. http://doi.org/10.1002/scs.21164
- Justi, R., & Gilbert, J. (2000). History and philosophy of science through models: Some challenges in the case of 'the atom'. *International Journal of Science Education*, 22(9), 993-1009. http://doi.org/10.1080/095006900416875
- Maia, P. F., & Justi, R. (2009). Learning of chemical equilibrium through modelling-based teaching. *International Journal of Science Education*, 31(5), 603-630. http://doi.org/10.1080/09500690802538045

- Organisation for Economic Co-operation and Development. (2016). *PISA 2015 assessment and analytical framework: Science, reading, mathematics and financial literacy*. <https://doi.org/10.1787/9789264255425-en>
- Passmore, C. M., & Svoboda, J. (2012). Exploring opportunities for argumentation in modelling classrooms. *International Journal of Science Education*, *34*(10), 1535-1554. <http://doi.org/10.1080/09500693.2011.577842>
- Prins, G. T., Bulte, A. M. W., & Pilot, A. (2011). Evaluation of a design principle for fostering students' epistemological views on models and modelling using authentic practices as contexts for learning in chemistry education. *International Journal of Science Education*, *33*(11), 1539-1569. <http://doi.org/10.1080/09500693.2010.519405>
- 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. <http://doi.org/10.1002/tea.20311>
- Schwarz, C. V., & White, B. Y. (2005). Metamodeling knowledge: Developing students' understanding of scientific modeling. *Cognition and Instruction*, *23*(2), 165-205. http://doi.org/10.1207/s1532690xci2302_1
- Thiele, R. B., & Treagust, D. F. (1994). An interpretive examination of high school chemistry teachers' analogical explanations. *Journal of Research in Science Teaching*, *31*(3), 227-242. <http://doi.org/10.1002/tea.3660310304>
- Van Driel, J. H., & Gräber, W. (2002). The teaching and learning of chemical equilibrium. In J. K. Gilbert, O. De Jong, R. Justi, D. F. Treagust, & J. H. Van Driel (Eds.), *Chemical education: Towards research-based practice* (pp. 271-292). Kluwer Academic. https://doi.org/10.1007/0-306-47977-X_12
- Wheeler, A. E., & Kass, H. (1978). Student misconceptions in chemical equilibrium. *Science Education*, *62*(2), 223-232. <http://doi.org/10.1002/sce.3730620212>