科學教育學刊
2013, 第二十一卷第二期, 135-162
DOI: 10.6173/CJSE.2013.2102.01

Chinese Journal of Science Education
2013, 21(2), 135-162

以概念演化樹探討跨年級學生理想氣體心智模式之發展歷程

邱美虹[1、*]　吳文龍[1]　鍾曉蘭[1、2]　李雪碧[1]

[1]國立臺灣師範大學　科學教育研究所
[2]新北市立新北高級中學

摘要

本研究以問卷調查跨年級學生理想氣體概念發展狀況，並利用系統發育分類學(或支序學)方法建立學生概念演化樹，以探討學生理想氣體概念發展的可能歷程。本研究之研究對象為大臺北地區七到十二年級國、高中學生，總人數為646人。本研究有三項研究目的：一、調查跨年級學生理想氣體概念分布；二、透過文獻分析將學生常見之心智模式進行分類及編碼，以系統分類學方法找出概念演化樹；三、比較前述兩項研究結果，建立可能的概念發展路徑。本研究計有三項研究工具，分別為「理想氣體概念編碼工具」：包含13個認知特徵及8種的認知狀態；「理想氣體測驗」：目的為找出跨年級學生認知特徵分布比例；「系統分類學統計軟體PAUP 4.0」：為廣泛運用於系統演化學的統計分析軟體。研究結果顯示概念演化樹43中有兩個發展階段包含粒子本身的特性及粒子間的交互作用，所呈現的概念演化歷程符合相關氣體粒子文獻的發展研究，且對實徵的跨年級概念調查結果也具有相當的解釋力。由概念發展的歷程來看有許多關鍵的概念發展點(包含粒子觀、剛性粒子、隨機運動與分布及粒子間交互作用)，其概念容易被學生誤解而發展成不正確的概念。藉由本研究之概念演化樹可提供教師瞭解學生概念發展的歷程，以作為教學和撰寫教科書之參考。

關鍵詞：心智模式、支序學、系統發育分類學、理想氣體定律、概念演化樹

壹、前言

由Posner, Strike, Hewson與Gertzog (1982)討論概念改變條件之文章發表至今已近30年，對各年段學生及各領域的科學概念方面，研究成果呈現出多樣性的學生另有概念(Barke, Hazari, & Yitbarek, 2009; Benson, Wittrock, & Baur, 1993)。特別是在物質粒子概念的發展方面，對學生各種素樸(naïve)的物質概念，如物質反應時性質與數量的直觀改變等，均提供教學的參考依據(Adadan, Trundle, & Irving, 2010; Johnson, 1998; Margel, Eylon, & Scherz, 2008; Novick & Nussbaum,

*通訊作者：邱美虹
(投稿日期：民國100年12月5日，修訂日期：民國101年10月11日，接受日期：民國101年10月22日)

04-邱美虹.indd 135　2013/7/12 上午 11:37:21

1981; Stavy, 1990; Treagust, Chandrasegaran, Crowley, Yung, Cheong, & Othman, 2010)。由於氣體粒子並不能直接觀察，需透過巨觀的氣體性質間接推論氣體粒子的行為，造成學生容易誤以為氣體的巨觀現象來自於粒子本身的性質(Chiu, 2007; Johnson & Papageorgiou, 2010)，因而產生許多難以改變的氣體另有概念，因此本研究特以新的研究方法對氣體粒子概念進行系統性的分析，以獲得更深入的研究結論。

本研究以理想氣體定律作為探討學生氣體粒子概念發展的主要面向。所謂理想氣體定律為描述理想氣體在平衡狀態時，氣壓、體積、分子數量及溫度之間的相互關係，又稱為理想氣體方程式，其公式可藉由波以耳定律、查理—給呂薩克定律及亞佛加厥定律共同推導而成。氣體動力論以氣體粒子運動的觀點解釋氣體的性質，從十七世紀中牛頓力學開始，便有科學家認為粒子的運動也應遵守牛頓的三大運動定律，但一直到十九世紀中焦耳的熱功當量實驗，確立熱為能量型式後分子運動理論再度快速發展，而在十九世紀後半氣體動力論便已建構完成，此一發展的歷程約經二百多年後才漸趨完備(Kotz, Treichel, & Townsend, 2009)。可知科學上對於理想氣體粒子的概念是經過長期的研究與討論才形成，也因此氣體粒子運動的概念是高度抽象且屬於高層次的概念，是相當不容易學習的複雜概念，需要長時間的發展歷程。

據此為進一步探討學生如何從素樸的想法發展到完整的理想氣體科學理論，本研究將調查跨年級學生的理想氣體概念，並以概念演化的觀點探討學生理想氣體心智模式發展的情況，透過系統演化學軟體(Phylogenetic Analysis Using Parsimony, PAUP 4.0，見網站：http://paup.csit.fsu.edu/)排除人為的主觀看法，建立系統性的客觀研究分析架構，提供理想氣體概念的完整認知特徵發展脈絡。

貳、研究目的

本研究以理想氣體相關概念及氣體粒子相關研究之文獻作為基礎，定義出學生常見的理想氣體心智模式及認知特徵，再透過跨年級學生理想氣體概念調查，找出學生的分布類型與比例。為整體性地探討理想氣體概念之發展歷程，本研究將文獻中常見的心智模式及認知特徵編碼的結果輸入系統發育分類學的分析軟體——PAUP 4.0，建立合適之假說樹型，並以理想氣體測驗的結果進行驗證，共同探討理想氣體概念演化樹的整體發展歷程。根據上述研究目的，本研究之研究問題有：

一、跨年級學生理想氣體心智模式之認知特徵分布比例為何？

二、理想氣體心智模式之概念演化樹假說為何？

三、跨年級學生認知特徵分布與理想氣體概念演化樹發展的關係為何？

參、理論基礎

一、概念發展與改變

概念改變理論最早的發展為Posner等(1982)基於Kuhn (1962)科學革命的結構及Lakatos (1970)的科學研究綱領，建立了科學教育上的概念改變理論基礎，進而引發許多概念改變的討論與研究。Posner等認為學習是一種理性探究的過程，學生基於已有的證據進行判斷決定是否發生概念改變、是否要將原有的概念作重置或重組。因此概念改變發生的條件有：(一)個人的不滿意

(足)感(dissatisfaction)；(二)知識的可理解性(intelligible)；(三)知識的合理性(plausible)；(四)知識的豐富性(fruitful)。由於此模式太過強調理性與線性的發展過程，因此Strike與Posner (1992)修正其1982年之觀點而認為概念改變是概念系統動態且持續性的交互作用，同時他們也提出動機對概念改變的影響。

Chiu, Chou與Liu (2002)進一步指出Posner等(1982)所提出的理論是概念改變發生的條件，非針對概念難以改變的原因加以闡明，未認知到科學概念的本質才是造成科學學習困難的原因，因此Chiu等提出科學學習的相關研究應進一步採用Chi等人提出重視科學概念的本體論觀點(如Chi, 1992, 1997; Chi, Slotta, & De Leeuw, 1994)。Chi等依知識本體類別屬性(ontological category)提出三棵相互獨立的本體樹，分別為「物質」(matter)：含特定屬性者；「過程」(process)：事件的發生；「心智狀態」(mental status)：與情意相關的概念。概念改變的難度就在於既有概念遷移的方式，因此概念遷移發生在樹間支節的遠近將反應在概念改變的難度上。Chi (2005)將本體樹的組織架構多次修正後，在過程屬性中訂下直接過程(direct process)與突現過程(emergence process)，直接過程以直接因果關係解釋科學現象，而非突現過程中組成因子相互產生的群體作用，研究者認為Chi對於概念錯置所造成的迷思概念及概念改變的困難提出更具解釋力的理論基礎。

Vosniadou (1994)提出素樸架構理論(naïve framework)，她認為學生的概念架構來自於自身的生活經驗，其可分為特殊理論(specific theory)與架構理論(framework theory)。特殊理論來自於個體觀察所獲致的新資訊，並形成自身的信念，而在架構理論下有本體論及認識論兩個預設，會限制特殊理論形成學生解決問題時的心智模式。Vosniadou認為概念改變的是一種漸進的過程，可分為豐富(enrich)和修正(revision)兩種，前者為新增資訊至原有的概念中，而後者則為修正原有的架構理論或特殊理論，在難度的差異上修正架構理論會較特殊理論來的困難。此理論與Chi (1992, 1997)從概念本體類別的解釋架構有不同的出發點，Vosniadou從個體認識自然所擁有的個人預設，再到經由觀察與文化影響後信念的產生及心智模式的建立到改變，從認識論角度及本體論的預設來解釋學生的概念改變，對概念改變理論提供漸進式到根本改變的理論基礎。

在氣體粒子的研究中提到許多關於微觀表徵與巨觀表徵間的差異，因為許多氣體性質由氣體動力論來看，需要Chi本體樹中突現的概念(邱美虹，2000；Chi, 2005)，由不相關(disjoint)、獨立的(independent)、連續性(continuous)的氣體粒子運動累積成各種巨觀的氣體性質，但學生容易錯置為直接過程，認為氣體粒子的性質是有目的性的(intentional)、有界限的(boundary)、有序列的(sequential)，學生在錯置本體樹位置後，則會產生各種不同於科學模式的心智模式。Vosniadou (1994)則將概念改變的歷程視為一種漸進的過程，與本研究找出學生長期概念發展的理念相符，綜合兩位學者對於概念改變的歷程可作為本研究解釋概念發展的重要理論基礎。早期的概念改變理論著重學生理性與線性的發展及革命性的概念改變，但對於氣體動力論這類複雜的科學概念早已無法滿足研究的需求，對於教與學的長期歷程也需要更具全面性的研究架構。

二、概念演化與系統發育分類學

演化理論模型的跨學科運用十分廣泛，達爾文在《人類起源》*The Descent of Man*中除針對生物演化的歷程進行立論外，亦提及非有機體的演化觀點(Atkinson & Gray, 2005; Croft, 2008)。Atkinson與Gray進一步對達爾文在語系演變關係與有機體演化兩者兼具的高度平行關係感到十分地興趣，認為可藉由相似或相異的特徵建立語系起源與發展的演化關係。而在文化演化學(cultural evolution)方面，其理論也是類比到生物演化的理論(Tehrani & Collard, 2002)，在於聯結人種誌與考古記錄的遺傳和語言學的資料方面，近年來已受到廣泛的討論，透過對部落紡織品(Tehrani & Collard)或籃子結構的裝飾進行編碼(Shennan & Collard, 2005)找出樹狀的文化發展歷程。可見即使在非有機體的範圍內，演化觀點亦可以提供新的研究與分析角度，此跨學科運用的優點與限制值得深入的探討。

哲學家時常內隱或外顯地類比有機體的演化與科學知識的演化之關係，其中最簡單的類比為：「較好」的理論就是那些比舊理論存留較久的理論，如同「較好」的物種比先前的物種存活較久(Renzi, 2009)。但Renzi指出這並未在兩者間建立合適的答案，反而引起更大的討論空間，何謂「較好」或選擇「較好」的過程便產生許多不同門派的論述。其中演化認識論是指動機直接來自於演化論的認識論，是指使用生物學概念的哲學門派，代表人物有Campbell (1988)、Hull (1988, 2001)及Toulmin (1972)等，各派對於認識論的基礎不同，但皆用於論述人智發生的起源與方法，因此本研究嘗試由演化的角度分析學生概念的發展，建立學生可能的概念演化歷程。

在生物演化方面，個別生物體出現祖先特徵稱為「返祖現象」，在許多有關迷思概念的研究中顯示心智模式也會出現調整修正的狀況。Futuyma (2005)指出族群是指在一定時間內居住在同一地區中的所有生物集合，而演化過程就是族群中個體基因頻率從一個世代到另一個世代的變化過程，因此由族群生態系的角度來看，祖先所具有特徵並未消失在族群中而是比例降低，因此「返祖現象」並非發生可逆的演化過程。由族群的觀點看來，整個「基因分布頻率的改變」仍是不可逆的過程。本研究概念生態系以族群生態系的理念進行研究討論，主要的原因是從單獨心智模式來看可能會出現「返祖現象」，但整體的學生概念生態系統會經由教學活動而不斷的演變，進而趨向特定的心智模式類型，此一過程仍是不可逆的過程，如：高中階段學生已有粒子持續運動的概念，個別學生的概念可能會回到無粒子概念，但因不符合當時的環境所以這些概念會是很低的比例，整體的學生概念生態系仍會不斷改變，而與先前的概念生態系不同。因此本研究中將概念演化的過程定義為整個概念群體分布比例的變化。

本研究採用系統發育分類法(phylogenetic classification)進行概念演化之分析，此研究方式又稱為支序學(cladistics)，此種分類方式依賴生物演化原理，通常以系統發育樹(phylogenetic tree，或稱支序圖cladogram)的方式加以表徵(Wiley, Siegel-Causey, Brooks, & Funk, 1991／陳星玉、陳小平譯，1995)。目前已有科學教育研究使用此技術分析學生概念發展的歷程，將學生的心智模式類型以多種認知特徵及特徵狀態作定義，藉此找出學生特定概念的概念演化樹，如：林靜雯(2006)以概念演化觀點探討學生電學學習及演化概念；辛怡瑩與邱美虹(2010)演化概念的發展

次序，綜合上述兩個研究的結果均能看出學生概念發展的不同演化路徑，不同於以往對單一概念發展的追蹤，而是透過心智模式的方式探討各個概念間的交互作用，建立完整的演化路徑後再分別探討學生可能的發展過程。綜合上述，本研究以概念演化為理論基礎，由概念生態系看學生整體的概念發展方向，彌補以往由單一概念改變歷程分析學生概念發展的缺點。而在研究限制方面，族群演化的概念並非研究單一物種特徵演化，而是特定族群內物種的各種特徵比例會因為環境壓力而出現變化，因此分析的主軸集中在各種認知特徵的比例分布，而非單一心智模式之間的改變。

三、理想氣體的相關概念

理想氣體方程式結合波以耳定律、查理—給呂薩克定律及亞佛加厥定律，合併後可以導出氣體體積(V)、壓力(P)、絕對溫度(T)及莫耳數(n)的關係(Halliday, Resnick, Walker, & Christman, 2010)：

$$PV = nRT$$

此又稱為理想氣體方程式，其中的比例常數(R)稱為理想氣體常數，數值為0.082 atm · L/mol · K。

在波以耳提出氣體壓力與體積的觀念後，即有科學家嘗試以粒子運動的觀點解釋壓力的形成，但因為當時對於物質熱現象的解釋多以熱質說作解釋，並未使用粒子運動的觀念，因此未獲得重視。直到1828年布朗運動的發現，而出現分子熱運動的理論，氣體動力論才逐漸被接受，而成為解釋氣體性質的最佳方式。本研究參考相關研究(Chiu & Chung, 2009; De Vos & Verdonk, 1996; Johnson & Papageorgiou, 2010; Treagust et al., 2010)擬出理想氣體粒子模型的六個主概念：

(一)氣體結構——氣體粒子體積為零，且粒子間為真空狀態可作為運動的空間；
(二)粒子性質——氣體粒子視為剛性粒子，而具有完全彈性碰撞；
(三)粒子運動——朝向各方向運動的粒子數相同，為隨機運動與分布；
(四)溫度因素——溫度是分子動能平均的結果，溫度上升氣體粒子速度加快；
(五)氣體體積——氣體體積是氣體粒子活動的空間；
(六)氣體壓力——氣壓是因為氣體粒子不斷地撞擊器壁。

本研究的研究主軸在於透過理想氣體粒子模型的六個主要概念找出學生相對應的錯誤想法類型，以科學理論作為前提與假設，有系統地歸納出學生的認知特徵與心智模式。氣體粒子是由許多不可直接觀察到的前提及假設形成，因此不同於牛頓力學解釋實際物體的運動，學生必須更抽象地「想像」理想氣體粒子的運動情形，如：因為完全彈性碰撞，所以氣體粒子不會有能量耗損；只要在絕對零度之上，氣體粒子能不斷快速地運動而不會液化；粒子間沒有引力且不受重力的影響，此假設與學生在日常生活中巨觀世界物質運動狀態的經驗不一致，因此也造成學生學習上的困難，下一段將針對相關的理想氣體的研究進行討論，以找出學生學習上的另有概念。

四、理想氣體的相關研究

微觀粒子一直是科學教育中重要的研究方向，從許多研究(Novick & Nussbaum, 1981; Nussbaum, 1985; Stavy, 1990; Treagust et al., 2010)均能看出微觀氣體粒子的部分相較於固體及液體的狀態，學生更容易出現另有概念。以氣體組成中的粒子觀為例，不具有此

概念的學生容易以連續觀推論氣體的組成和性質，造成學生認為氣體與液體有相似的移動方法，上方抽氣時會留下底部的空氣等，而無法理解氣體平均分布的概念。本研究的主心智模式類型包含科學模式及另有概念所組成的另外三種主心智模式，咨將此三種另有概念的主心智模式進行說明如下：

(一)初始模式——物質本因

物質本因模型為學生最初以直觀方式闡釋現象的發生，如同中世紀亞里斯多德反對物質是由不可分割的最小粒子構成，認為是由土、氣、水、火四元素組成所有物質，因此以乾、濕、冷、暖的四元素性質解釋各種物質的表面特性(Suchocki, 2011)。Johnson與Papageorgiou (2010)指出許多氣體性質的科學性解釋都需要由物質的粒子觀進行解釋，許多學生並不認為氣體是由微觀粒子所組成，因此造成學習上的困難。Benson等(1993)指出四種學生對空氣結構與分布的心智模式：1. 連續／集中分布；2. 連續／分散分布；3. 粒子／集中分布；4. 粒子／分散分布。

Gómez, Benarroch與Marín (2006)、Gustafson, Shanahan與Gentilini (2010)及Stamovlasis, Tsitsipis與Papageorgiou (2010)更進一步指出兩種不同觀點會影響到學生物質結構的理解。早期學生解釋氣體現象傾向以連續觀而非粒子觀，而會出現以液體或雲狀的巨觀現象來解釋氣體的性質，如：氣體壓力與液體壓力相同，皆來自於本身重量下壓的結果；又或空瓶內的氣體會集中於下半部分，就像半滿的水瓶一樣。因此本研究第一種主心智模式初始模式——物質本因，為學生最早出現以直觀方式解釋巨觀現象的心智模式。

(二)綜合模式——粒子本性

粒子本性為學生誤認氣體粒子和物質在巨觀觀察下具有相同的特徵。Johnson (1998)針對七至九年級學生進行三年的長期研究，定義出學生思考粒子的四種粒子模式，分別為：

1.模式X：連續觀物質。
2.模式A：連續物質中的粒子。
3.模式B：粒子就是物質，但有巨觀的特徵。
4.模式C：粒子就是物質，狀態的性質是集體的(collective)。

Johnson (1998)的心智模式分類是依據物質的組成及性質的成因，其中模式X相似於物質本因模式，模式A及B均認為氣體性質來自於粒子本身，如氣體的膨脹即是來自於氣體粒子的膨脹，此類型與Barke等(2009)指出學生無法想像粒子間真空且能不斷運動的論點相近。本類型的學生並不具有剛性粒子及完全彈性碰撞的概念，而以巨觀氣體的性質直接解釋粒子本性，或以氣體粒子本性(如：活性、粒子體積及重量等)直接推論出氣體巨觀的現象(同上述的模式B)。根據此類誤認巨觀與微觀間差異，本研究歸納出第二種主心智模式為粒子本性模式。

(三)綜合模式二——外在變因

外在變因模式為學生具備正確粒子觀後仍以外在施壓、容器形狀或大小等解釋氣體性質。因氣體性質的教學中經常使用巨觀現象進行教學，因此Adbo與Taber (2009)及Chiu與Chung (2009)指出學生即使具備剛性粒子的概念，但仍會認為粒子運動方式的改變是因為外在變因所致，會因情境(外在變因)的不同改變隨機運動與分布的突現概念，因此學生會認為氣體壓力是由於外在施壓的結果，又或只認為容器大小會影響到氣體壓力等，據此本研究第三種主心智模式定義為外在變

因模式，學生以不相關的外在變因解釋氣體性質。

綜合上述，可知學生對於氣體的組成和性質持有相當多的另有概念，再加上符合科學模式的類型後，本研究將理想氣體心智模式分為四個主要的類別：物質本因模式、粒子本性模式、外在變因模式及正確的理想氣體模式，以下根據前述所擬出的四種主心智模式及六項理想氣體主概念進行說明(見表1)。

表1為理想氣體模式與其他三種相互競爭的主心智模式，分述如下：1. 物質本因模式為學生最初對氣體組成與性質的心智模式，與Benson等(1993)及Johnson (1998)所指出的連續物質觀相似；2. 粒子本性的部分為學生初步學習到粒子觀的想法，但是對粒子行為與氣體的巨觀現象產生混淆，認為氣體的性質來自於粒子表現出來的性質，與Johnson的模式B出現相似的另有概念；3. 而外在變因模式為學生已具有科學的氣體粒子概念，但是受到外在變因的影響時仍會認為是外在變因造成氣體的性質，如：壓縮針筒內的空氣後，學生會認為氣體壓力來自於施力者；4. 此三類主要模式再加上科學觀點的理想氣體模式共有四大類，將作為本研究分析學生心智模型的基模。

肆、研究方法

一、研究對象

本研究之跨年級調查為大臺北地區國、高中學生，國中部分三個年級(七、八及九年級)皆取樣，因高中理想氣體概念為十一年級課程，因此高中部分取樣以十一年級教學前

表1：學生所持有的理想氣體四種主心智模式與六項主概念一覽表

主心智模式 / 六大主概念	初始模式：物質本因模式	綜合模式一：粒子本性模式	綜合模式二：外在變因模式	科學／類科學模式：理想氣體模式
(1)氣體結構	物質為連續的	氣體粒子體積不為零，彼此之間有引力存在	氣體粒子體積為零，且粒子間為真空狀態可作為運動的空間	同左欄
(2)粒子性質	無粒子概念	氣體粒子非剛性粒子，且非彈性碰撞	氣體粒子視為剛性粒子，而具有完全彈性碰撞	同左欄
(3)粒子運動	氣體會上飄、對流或因能量耗盡而靜止	粒子本性會影響氣體運動及分布，非隨機運動與分布	氣體粒子向外擠壓、散布在容器邊緣	朝向各方向運動的粒子數相同，為隨機運動與分布
(4)溫度因素	整體氣體會隨溫度改變而熱脹冷縮	氣體粒子會隨溫度改變而熱脹冷縮	溫度是分子動能平均的結果，溫度越高粒子運動速率愈快	溫度是分子動能平均的結果，溫度越高粒子運動速率愈快
(5)氣體體積	氣體體積就像是液體體積	氣體體積就是氣體粒子體積的總和	氣體體積是容器的體積	同左欄
(6)氣體壓力	氣體的重量壓在容器底部形成氣壓	粒子互相擠壓或互相碰撞造成氣體壓力	外在壓力造成氣壓	氣壓是因為氣體粒子不斷地撞擊器壁

註：主心智模式類型為學生誤解理想氣體概念，而產生各類的氣體心智模式。

及十二年級教學後的學生為主，人數分布為七年級：97人、八年級：104人、九年級：101人、十一年級：169人、十二年級：175人，總人數達646人。

二、研究工具

(一)理想氣體概念之編碼工具與13種次心智模式

根據理想氣體的相關概念與文獻，本研究將理想氣體概念分為認知特徵及認知狀態兩層的類別。認知特徵為本研究理想氣體六個主概念的細項，而認知狀態為該認知特徵不同表現，將包括科學概念或另有概念等不同的狀態。認知特徵是指學生的某種概念，而認知狀態則是學生對某種概念有不同的理解，如物質組成的概念，此物質概念為認知特徵，學生可能會有連續觀及粒子觀，此不同的理解則為認知狀態。如果只有認知特徵並無法表示學生實際的概念，因此會進一步標出學生的認知狀態，以代表學生概念理解的類型。據此本研究建立理想氣體概念發展的基本分析單位，依以下兩方面探討跨年級學生的理想氣體概念學習狀況：1. 概念類型：調查跨年級學生已具備那些認知特徵；2. 學習進展：進一步確認學生目前的概念是否到達科學概念，或存有另有概念(詳見表2)。

表2之編碼內容共有13種認知特徵及最多到8種的認知狀態，此認知狀態之編號無上下位概念或演化次序的關係，須經系統發育分類學的特徵論證後才能找出演化的次序。認

表2：理想氣體模型之認知狀態編碼表

理想氣體概念	認知特徵(C)	認知狀態與編碼
(1)氣體結構	C1.氣體組成	1連續觀；2粒子觀
	C2.氣體粒子體積	1無粒子概念；2粒子會改變；3粒子不變
	C3.粒子間的空間	1非真空；2真空
(2)粒子性質	C4.氣體運動狀態	1全部靜止；2部分靜止；3全部持續運動
	C5.氣體動能	1完全耗盡；2部分耗盡；3全部能量守恆
(3)粒子運動	C6.氣體運動方向	1靜止；2往上飄；3對流；4向內擠壓；5向外擠壓；6隨機運動
	C7.氣體運動方向因素	1物質本因；2能量耗損；3活性；4重量；5引力；6外在變因；7無因素影響
	C8.氣體分布位置	1靜置底部；2如液體；3向下集中；4往上集中；5散佈邊緣；6集中中間；7隨機
	C9.氣體分布因素	1物質本因；2活性；3重量；4引力；5外在變因；6無因素影響
(4)溫度因素	C10.溫度對氣體的影響	1整體氣體膨脹；2粒子體積膨脹；3運動速率改變
(5)氣體體積	C11.氣體體積定義	1整體的體積；2粒子體積的總和；3容器體積；4粒子活動空間
	C12.影響氣體體積的因素	1氣體原本性質；2活性；3重量；4引力；5外壓；6溫度；7容器體積；8分子數
(6)氣體壓力	C13.氣體壓力來源	1整體重量下壓；2粒子互擠；3粒子擠壓器壁；4粒子互撞；5外壓；6粒子撞擊器壁

註：認知狀態之編碼為類別變項，所呈現的次序為流水號，並非代表演化的方向性。

知特徵及狀態的表示法如下：認知特徵及狀態的表示法以編碼組合1-2為例，第一碼表示為認知特徵C1，而第二碼為特徵的狀態編碼2，代表此次心智模式具有物質粒子觀，將作為跨年級學生理想氣體調查後分類學生認知特徵與狀態的依據，並計算各年級學生認知狀態的比例。為進一步建構理想氣體之概念演化樹，提供整體的概念發展分析架構，本研究將以此認知特徵及狀態進行13種氣體次心智模式(於表3)的編碼，並將此編碼結果輸入PAUP 4.0計算出理想氣體概念演化樹。

根據文獻探討，本研究之氣體心智模式有四種主心智模式，其下各再細分出二至四類的次心智模式，但粒子本性模式中的重量模式在實際的調查中有部分學生已具有剛性粒子的概念，因此將重量模式再細分為具剛性粒子與無剛性粒子兩種；而在外在變因模式中的溫度模式，因學生對於溫度造成粒子熱脹冷縮的另有概念相當不易消失，因此在實際調查中即使學生已進入外在變因模式在面對溫度改變時，仍然以粒子熱脹冷縮解釋氣壓成因，因此將溫度模式再細分為具剛性粒子與不具剛性粒子兩種。茲將此13種常見的次心智模式羅列並說明於表3。

表3：本研究之13種氣體次心智模式

主心智模式	次心智模式	特徵描述
初始模式：物質本因模式	能量耗盡模式(E)	視氣體為連續的整體，氣體最後會因動能完全耗盡而靜置底部
	氣體上飄模式(B)	視氣體為連續的整體，氣體較輕會向上飄
	流體模式(L)	視氣體為連續的流體，認為氣體的運動方式、分布、氣體體積、壓力皆類似流體的性質
綜合模式一：粒子本性模式	活性模式(A)	無剛性粒子的想法，認為氣體粒子的活性影響粒子運動方式及分布，同類氣體粒子相聚合
	重量模式1 (W1)	無剛性粒子的想法，認為氣體粒子的重量影響粒子運動方式及分布，造成氣體粒子輕的在上重的在下
	重量模式2 (W2)	具剛性粒子的想法，認為氣體粒子的重量影響粒子運動方式及分布，造成氣體粒子輕的在上重的在下
	引力模式(G)	無剛性粒子的想法，認為氣體粒子間的引力造成氣體粒子集中中間
綜合模式二：外在變因模式	外壓模式(P)	具剛性粒子的想法，且粒子間為真空，認為外在壓力造成氣壓，改變氣體的體積及分布
	溫度模式1 (T1)	不具剛性粒子的想法，認為溫度會改變粒子運動速率及粒子體積，兩個因素共同決定氣體體積與壓力，且溫度會影響氣體分布與運動
	溫度模式2 (T2)	具剛性粒子的想法，認為溫度會改變粒子運動速率，進而改變氣體體積與壓力，但仍認為溫度影響會氣體分布與運動
	容器模式(V)	具剛性粒子的想法，認為容器體積決定氣體體積或壓力，且容器會影響氣體分布與運動
科學／類科學：理想氣體模式	類科學模式(S1)	具理想氣體模型的概念：剛性粒子、彈性碰撞、粒子間無引力且體積為零、溫度會影響粒子運動速度、粒子隨機運動與分布，但對理想氣體方程式(PV = nRT)連結關係不完整
	科學模式(S)	具理想氣體粒子模型的概念，瞭解理想氣體方程式之變因相互關係

註：13種次心智模式為4種主心智模式根據文獻及概念調查結果進行細分。

(二)理想氣體概念測驗(the Test of Ideal Gas, TIG)與認知特徵標定

理想氣體概念測驗為邱美虹(2008)國科會計畫所開發之測驗，試題架構概念圖由二名科學教育相關之大學教授進行審訂，而題目描述與選項皆由資深科學教師進行修正，以建立專家效度。而在預試的部分，由臺北縣二班不同年級學生進行施測，分別為37位十年級學生及43位十二年級學生，結果顯示TIG具有高信度(Cronbach's α = .89)。試題內容包含五個題組：1. 密封罐內的氣體；2. 砝碼加壓之密閉容器；3. 氦氣球與乾冰；4. 電解水之混合氣體；5. 氦氣球與氧氣球之比較，在五種不同情境因素下對前述理想氣體的六大概念設計不同的問題，題數共45題，目的為測出學生在不同情境下對氣體粒子的概念。本研究將以TIG進行跨年級施測，將學生的答題結果作為分析概念發展歷程的實證資料。以下列舉範例試題(C1、C6及C3)及相對應之認知狀態如圖1所示(其他試題見附錄一)：

(三)概念演化樹分析工具——PAUP 4.0

系統分類學利用儉約性原理(parsimony)計算出最符合的演化樹型，本研究以Wagner

1.1 如果你有一支超級放大鏡可以看到罐中的微觀現象，你覺得在抽氣之前，密封罐裡的氣體應該是怎樣的形式。

（A）像液體一樣（B）氣體粒子整齊排列（C）氣體粒子隨機排列（D）氣體粒子緊密堆積



選項(A)標定為「C1-1 連續觀」	選項(B)、(C)、(D)標定為「C2-1 粒子觀」

1.3 承 1.2，你覺得密封罐裡的氣體的運動方向為何?

A:_____。

（A）靜止　（B）原處振動　（C）往上飄　（D）對流

（E）向內擠壓　（F）向外擠壓　（G）隨機運動　（H）其他:_____

選項(A)標定為「C6-1 靜止」	選項(B)標定為「C6-2 往上飄」
選項(C)標定為「C6-3 對流」	選項(E)標定為「C6-4 向內擠壓」
選項(F)標定為「C6-5 向外擠壓」	選項(G)標定為「C6-6 隨機運動」

1.7 你覺得完全填入純氮氣後，密封罐中最近距離的氮氣之間空隙充滿著什麼?

A:_____。

（A）氣體粒子　（B）分子之間引力　（C）電子　（D）真空　（E）灰塵

（F）其他:_____

選項(A)、(E)標定為「C3-1 非真空」	選項(B)、(C)、(D)標定為「C3-2 真空」

圖1：範例試題選項與認知狀態

algorithm介紹運算的基本原理(Wiley et al., 1991／陳星玉、陳小平譯，1995)，將範例列於表4並以圖2表示之。

在表4中，A、B、C代表待分類的三種物種，各自具有不同的特徵，其中0及1分別代表無或有此特徵，Wagner algorithm將藉由此特徵矩陣找出三者間的親源遠近。圖2-1表示A與祖先之間存有演化的關係，在加入B後，因系統分類學主要在尋找共同祖先，且基於儉約性原理，可推論出A、B間可能的假想祖先X之特徵編碼應為(100000)，由ANC至X時特徵轉換次數為1，由X至A時特徵轉換次數為1，而由X至B特徵轉換次數為2，相較於其他特徵編碼組合更能符合儉約性原理，因此圖2-2表示為A、B間的演化樹型圖。

當在A、B間的演化樹型圖再加入分類單元C時，則出現更多需考慮的演化樹型，如圖3-1所示，A、B、C之親源遠近可以有三種可能的演化樹型(虛線表示)，藉以找出不同的共同祖先，如演化樹型為第一種方式，即C連於A及X之節上，假設祖先Y (110000)為運算過程中作為可能祖先，方便在不同位置找出最儉約的特徵轉變，則整體樹型的轉變次數為8 (ANC to X = 1, X to Y = 1, Y to A = 0, Y to C = 4, X to B = 2)，同理第三種方式轉變次數至少為7。但如果演化樹型為第二種方式，假設祖先Y (101000)，整體樹型轉變次數為6 (ANC to X = 1, X to A = 1, X to Y = 1, Y to C = 2, Y to B = 1)，因此圖3-2的演化樹型圖更符合儉約性原理，圖中Y (101000)則為分類單元B及C的共同祖先。

因進行分析的特徵編碼資料龐大，可計算出大量具有相同儉約性的假設演化樹型，因此系統發育分類學家目前通常會以電

表4：系統分類學樹型運算範例——分類單元與特徵

特徵編號 / 分類單元	特徵(Characters) C1	C2	C3	C4	C5	C6
ANC	0	0	0	0	0	0
A	1	1	0	0	0	0
B	1	0	1	0	1	0
C	1	0	1	1	0	1

註：ANC代表祖先，A、B、C為待分類的物種，C1到C6為特徵類型，如長短羽毛。

資料來源：Wiley et al. (1995)。支序學派大全(*The compleat cladist : A primer of phylogenetic procedures*；陳星玉、陳小平譯，頁63)。基隆：水產。(原作出版於1991年)

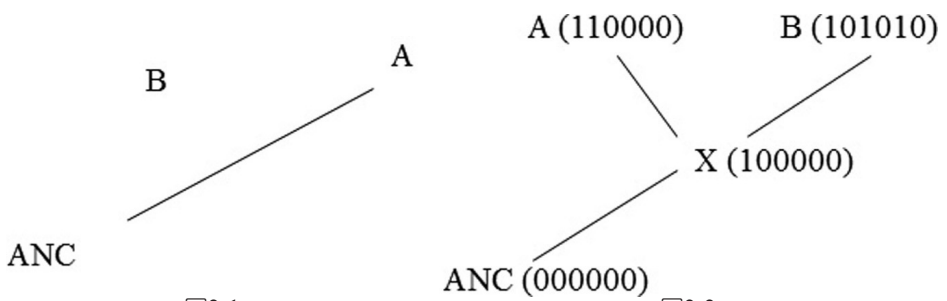


圖2-1　　圖2-2

圖2：分類單元A與B之親源關係

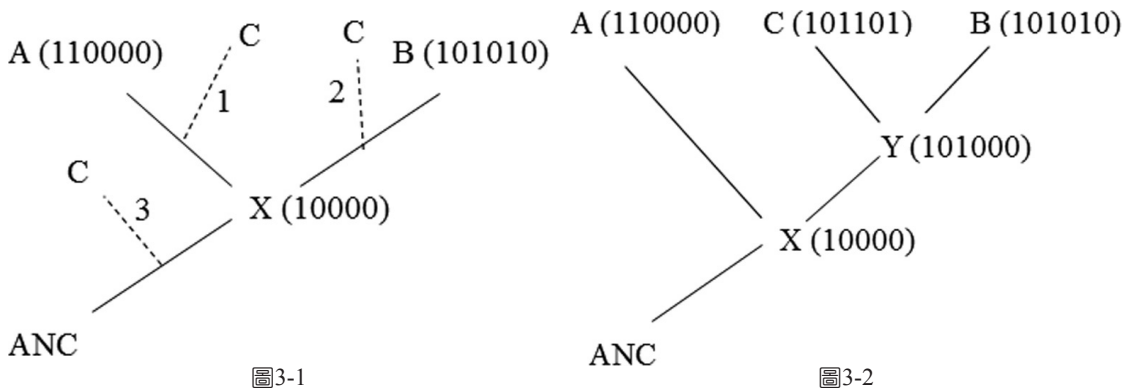


圖3-1　　圖3-2

圖3：分類單元A、B與C之親源關係

腦輔助特徵論證及樹型計算。目前最常運用的分析軟體為PAUP 4.0，在分類單位較少的情況下使用窮盡搜尋將所有可能的樹型皆進行評估，找出最短樹長及一致性指數最高的樹型，作為研究者後續驗證的假說樹型。但分類在超過12種後，必須改用如分枝—界限搜尋或啟發式搜尋，因為不需計算所有可能的樹型，所以可以節省運算的時間及資源。PAUP 4.0所提供的概念演化樹為最短樹長，且應包含最少特徵狀態轉換的情況，而具有較高的一致性(Consistency Index, CI)，代表特徵與樹型符合的程度。本研究進行概念研究的方法與先前研究有所差異，因此再藉由跨年級之概念調查找出跨年級學生認知特徵分布比例，進一步驗證理想氣體概念演化樹之概念發展歷程，利用PAUP 4.0可得知此認知特徵與狀態與演化樹樹型的一致度獲得研究工具的信度，而效度的部分再透過跨年級施測結果及課程進度安排進行三角校正。

三、研究方法

本研究之研究方法可分為三個部分作說明，分別為：描述性統計、系統分類學分析工具PAUP 4.0、概念演化歷程圖，茲分別說明如下：(一)描述性統計：本研究的跨年級調查結果以柱狀圖的方式呈現，藉以說明各年級認知特徵的分布比例，比較演化樹上的各認知特徵與概念調查的結果，進而進行資料的三角校正；(二)系統分類學分析工具PAUP 4.0：在理想氣體概念演化方面，研究者將文獻中的理想氣體心智模式類型進行編碼(詳見後續研究結果之表5)，藉由PAUP 4.0軟體分析找出合適的假說樹型；(三)資料彙整圖：結合跨年級概念調查的結果與演化樹的演化歷程，此圖示上的特徵比例及演化樹演化歷程看出兩者間的相似度，研究者可據此探討學生由初始概念發展到科學概念的可能演化歷程。

伍、研究結果

一、理想氣體概念之認知特徵跨年級分布

本研究以理想氣體測驗收集跨年級學生理想氣體概念之分布頻率，結果呈現如下：

(一)氣體結構——正確的粒子觀逐年上升，真空概念出現起伏

氣體組成(C1)之認知狀態分為：1. 連續觀；2. 粒子觀。研究結果顯示七年級以後的學生約九成以上都具有粒子觀的想法，可知

學生對於粒子觀的接受度高，但未必具備正確的微觀粒子概念。因此在氣體粒子體積(C2)方面，可分為：1. 無粒子概念；2. 粒子會改變；3. 粒子不變。由圖4看來，粒子大小不變的概念在十一年級時認知特徵頻率首次超過一半的學生(61%)，對微觀粒子概念具有更接近科學概念的想法。在真空概念(C3)方面，學生認為粒子間真空的比例反而因年級增加而下降，直到十二年級時具真空概念的學生比例才又上升，約47%具有真空的概念(見圖5)。在非真空的答題中，十一年級及十二年級各有46%及27%的選擇為分子間有引力，因引力存在所以為非真空。氣體粒子間真空狀態的概念主要為提供粒子運動的空間(Novick & Nussbaum, 1981)，此空間必須無其他物質存在，粒子才能不斷地進行運動，如單從氣體粒子間有無其他粒子來看，在七年級到九年級還有超過三成的學生認為有其他粒子存在，但在十一年級及十二年級則降到15%以下，可知高中學生對於氣體粒子運動空間概念較接近科學的觀點。

(二)粒子性質——正確概念逐年上升

氣體運動狀態(C4)分為：1. 全部靜止；2. 部分靜止；3. 全部持續運動。根據氣體運動狀態，氣體動能(C5)的狀態分為：1. 完全耗盡；2. 部分耗盡；3. 全部能量守恆。研究結果顯示，自七年級以後已有超過一半的學生具有氣體粒子全部持續運動的概念(見圖6)，但學生並未與粒子運動的能量守恆作連結，氣體動能守恆的概念發展較氣體運動

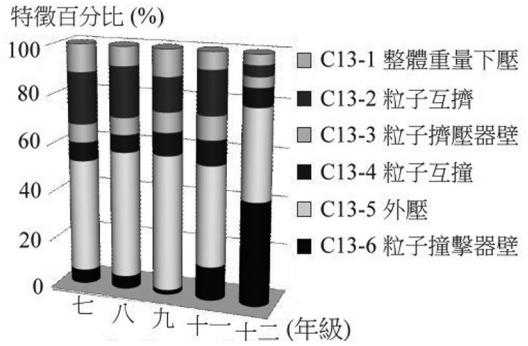


圖4：氣體粒子體積之認知頻率

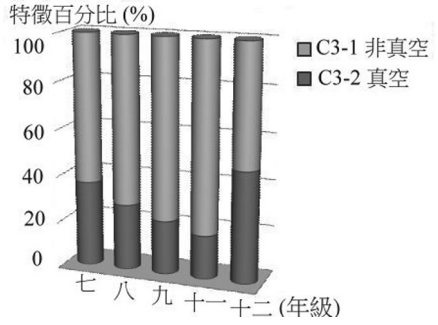


圖5：氣體粒子間真空狀態之認知頻率

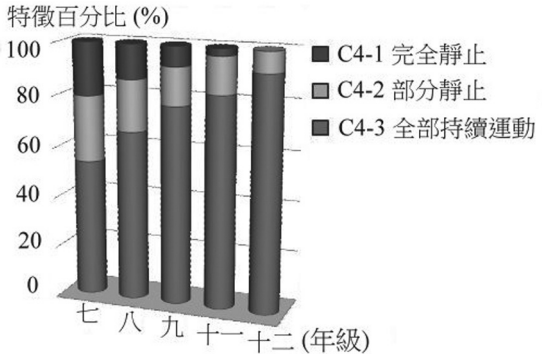


圖6：氣體運動狀態之認知頻率

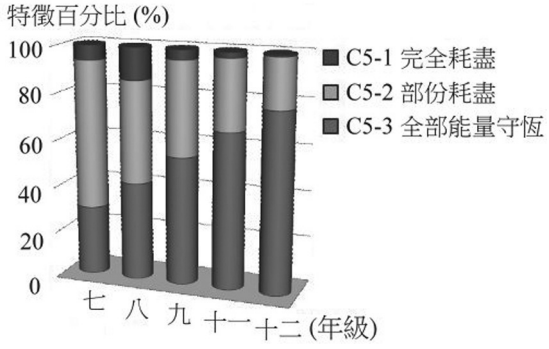


圖7：氣體動能之認知頻率

狀態晚，直到九年級以後才有一半的學生(55%，見圖7)達到全部氣體粒子能量守恆的認知狀態。此二種認知特徵均呈現逐漸獲得科學概念的趨勢，正確的認知狀態比例由七年級至十二年級穩定上升。

(三)粒子運動——九年級後正確概念大幅上升

氣體運動方向(C6)之認知狀態分為：1. 靜止；2. 往上飄；3. 對流；4. 向內擠壓；5. 向外擠壓；6. 隨機運動，而氣體分布位置(C8)分為：1. 靜置底部；2. 如液體；3. 向下集中；4. 向上集中；5. 散布邊緣；6. 集中中間；7. 隨機分布。根據學生的選答，氣體運動方式與分布位置具相關性，此兩種認知特徵在發展頻率上具有相似的過程，均在九年級後才逐漸上升，一直到十二年級時達到最高而接近於九成(見圖8及圖9)。

在影響因素方面，影響運動方向因素(C7)之認知狀態分為：1. 物質本因；2. 能量耗損；3. 活性；4. 重量；5. 引力；6. 外在變因；7. 無因素影響，分布因素(C9)之認知狀態分為：1. 物質本因；2. 活性；3. 重量；4. 引力；5. 外在變因；6. 無因素影響。C7及C9在無因素影響的概念上表現出相似的趨勢，都是在十二年級達到最高，且超過一半學生具有科學概念，分別為C7：64%及C9：76%。在圖10與圖11中，學生均在八年

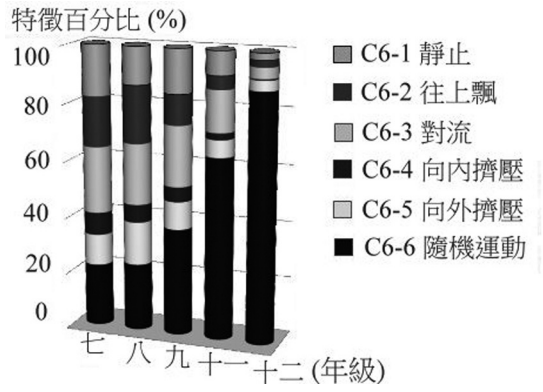


圖8：氣體運動方向之認知狀態頻率

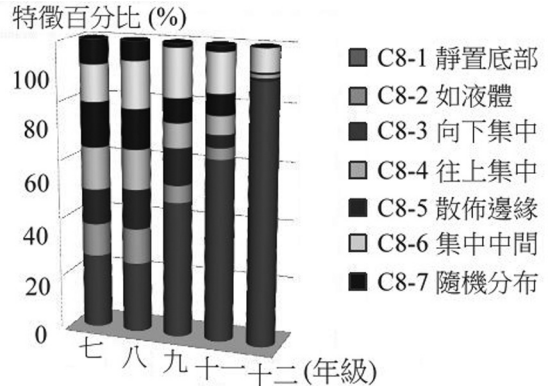


圖9：氣體分布位置之認知狀態頻率

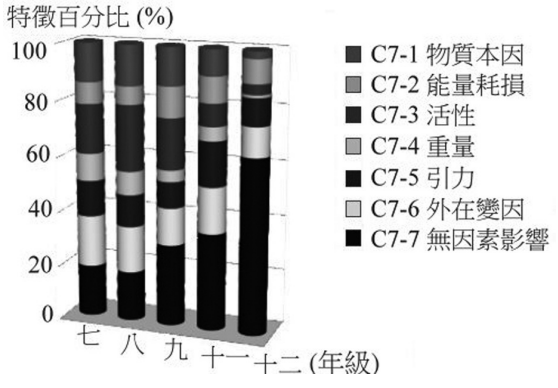


圖10：氣體運動因素之認知狀態頻率

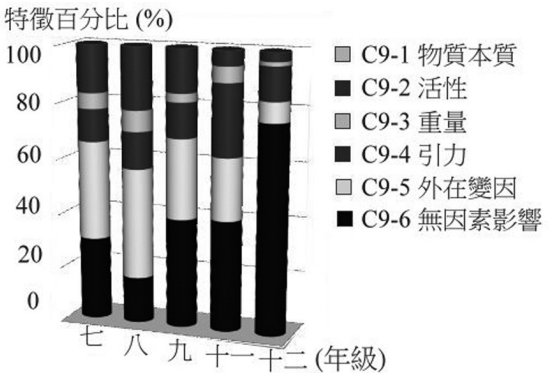


圖11：氣體分布因素之認知狀態頻率

級時有較高百分比認為活性會影響氣體性質的表現，受到同類氣體聚集的影響，其中認為此因素會影響運動占24%，而會影響分布占22%，因此可能造成無因素影響的比例下降。此外在圖11中，可看出部分十一年級學生(26%)認為引力對氣體分布產生影響，因物質活性與萬有引力在教學的時間上分別為八年級及十一年級，兩者可能都是因為教學後所產生的錯誤推論，而造成另有概念的比例上升。

(四)溫度影響——各年級錯誤概念均占相當比例

溫度對氣體的影響(C10)之認知狀態分為：1. 整體氣體膨脹；2. 粒子體積膨脹；3. 運動速率改變。溫度對氣體的影響在七、八、九年級時以粒子體積膨脹為主，分別為65%、63%及59%(參考圖12)。十一年級及十二年級時運動速率改變的比例才逐漸上升，達到50%。可知溫度影響粒子體積大小的另有概念並不容易改變，在各年級均占有相當的比例。

(五)氣體體積——正確概念逐年上升

C11及C12分別說明氣體體積的定義及影響因子。學生將氣體體積的定義為粒子活動的空間，在七、八、九、十一及十二年級的比例分為23%、24%、32%、44%及59%，穩定上升而且在十二年級時超過一半的學生達到科學概念。而影響氣體體積的因素方面，學生對於定溫定壓下，氣體體積只和分子數有關的概念，在跨年級學生的分布比率分別為20%、31%、24%、35%及61%。此兩項認知特徵與C10之發展比例結果相似，要到十二年級時才達到最高，而有超過一半的學生達到科學概念。

(六)氣體壓力——正確概念逐年上升，但錯誤概念仍占相當比例

氣體壓力來源(C13)之認知狀態分別為：1. 整體重量下壓；2. 粒子互擠；3. 粒子擠壓器壁；4. 粒子互撞；5. 外壓；6. 粒子撞擊器壁。由圖13分布的比例來看，學生認為外壓造成氣體壓力的比例一直相當高，七、八、九、十一及十二年級的比例分為47%、52%、56%、42%及37%，且即使到十二年級具備有粒子撞擊器壁的學生比例為43%，仍未超過半數學生，可知粒子運動的微觀運動不易與氣體壓力的巨觀性質作連結。

綜合上述的分析結果進行探討，認知特徵的發展基本上可分為七年級即有一定的比例，並且在八、九、十一、十二年級中逐

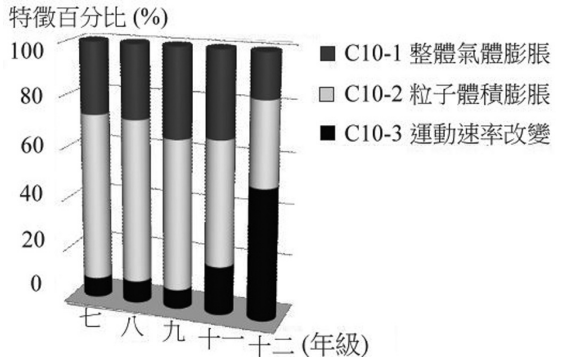


圖12：溫度對氣體的影響之認知狀態頻率

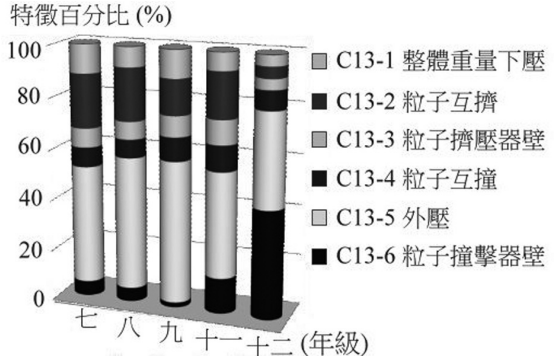


圖13：氣體壓力來源之認知狀態頻率

年增加；另一種類型為七至九年級的分布比例均不高，而在十一年級或十二年級時比例才會上升。據此本研究將學生理想氣體概念的發展分為穩定成長(七至九年級)及後期成長(十一及十二年級)兩種趨勢進行討論。首先，穩定成長的理想氣體概念多為氣體粒子本身的性質，如：C1、C2、C6、C7及C8，除C9氣體分布因素在八年級出現下降的情況外，亦出現逐漸發展的趨勢；其次，在後期成長的理想氣體概念方面，如果是由微觀氣體粒子累積而成的巨觀現象，或是理想氣體公式的轉換，則會延至後期高中課程時才會發展，如：C10、C11、C12及C13。下一節本研究將建立理想氣體心智模式概念演化樹假說，並說明其與認知特徵頻率調查結果之關係，進一步探討兩種不同的發展趨勢。

二、學生理想氣體概念演化樹43之發展歷程

在理想氣體模型認知狀態編碼表中針對氣體的次心智模式共定義出13種認知特徵及最多達八種不同的認知狀態，可區別出13種次心智模式的不同本質與表現，茲將此13種理想氣體的次心智模式之編碼組合呈現於表5，同時參見表2理想氣體模型之認知狀態編碼表。

本研究將表5中的數據輸入PAUP 4.0軟體，並以所有特徵為最初發展狀態的初始模式(N1)進行計算分析。因次心智模式數量超過窮盡搜尋的上限，故改以啟發式搜尋進行計算，得到291、560棵樹，其中最佳樹型樹長為49，有320棵為最佳樹形，其一致性指數(CI)為 .9592。本研究根據文獻發現C6-2氣體向上飄為學生初期常見之認知狀態，但有108棵的概念演化樹視為氣體上飄模式(B)獨自發生的認知特徵，因此不考慮此類樹型；再由次心智模式共同的影響因子來看，某幾類的模式具有相同的影響因子，因此應該被視為親源較相近的次心智模式，如粒子本性模型為I、W1、W2及A模式，而外在因素模型V、T1、T2及P模式，據此選取同時將此兩類模

表5：理想氣體之次心智模式與認知組合

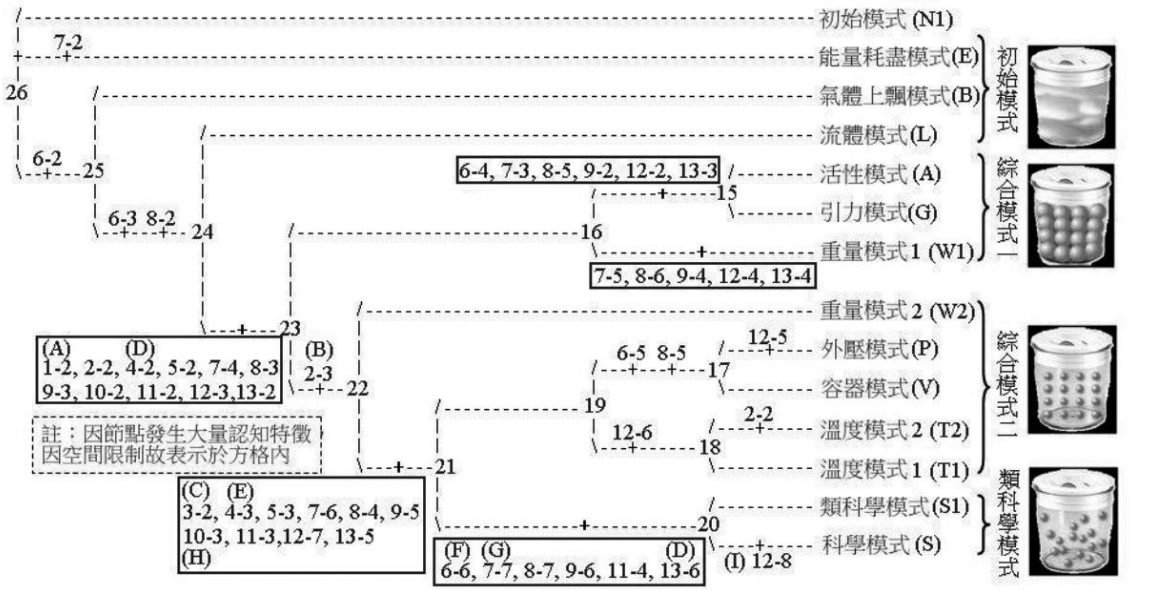
主心智模式	次心智模式	認知組合
初始模式 物質本因模式	能量耗盡模式(E)	1-1, 2-1, 3-1, 4-1, 5-1, 6-1, 7-2, 8-1, 9-1, 10-1, 11-1, 12-1, 13-1
	氣體上飄模式(B)	1-1, 2-1, 3-1, 4-1, 5-1, 6-2, 7-1, 8-1, 9-1, 10-1, 11-1, 12-1, 13-1
	流體模式(L)	1-1, 2-1, 3-1, 4-1, 5-1, 6-3, 7-1, 8-2, 9-1, 10-1, 11-1, 12-1, 13-1
綜合模式一： 粒子本性模式	活性模式(A)	1-2, 2-2, 3-1, 4-2, 5-2, 6-4, 7-3, 8-5, 9-2, 10-2, 11-2, 12-2, 13-3
	重量模式1 (W1)	1-2, 2-2, 3-1, 4-2, 5-2, 6-3, 7-4, 8-3, 9-3, 10-2, 11-2, 12-3, 13-2
	重量模式2 (W2)	1-2, 2-3, 3-1, 4-2, 5-2, 6-3, 7-4, 8-3, 9-3, 10-2, 11-2, 12-3, 13-2
	引力模式(I)	1-2, 2-2, 3-1, 4-2, 5-2, 6-4, 7-5, 8-6, 9-4, 10-2, 11-2, 12-4, 13-4
綜合模式二： 外在變因模式	外壓模式(P)	1-2, 2-3, 3-2, 4-3, 5-3, 6-5, 7-6, 8-5, 9-5, 10-3, 11-3, 12-5, 13-5
	溫度模式1 (T1)	1-2, 2-2, 3-2, 4-3, 5-3, 6-3, 7-6, 8-4, 9-5, 10-3, 11-3, 12-6, 13-5
	溫度模式2 (T2)	1-2, 2-3, 3-2, 4-3, 5-3, 6-3, 7-6, 8-4, 9-5, 10-3, 11-3, 12-6, 13-5
	容器體積模式(V)	1-2, 2-3, 3-2, 4-3, 5-3, 6-5, 7-6, 8-5, 9-5, 10-3, 11-3, 12-7, 13-5
科學／類科學： 理想氣體模式	類科學模式(S_1)	1-2, 2-3, 3-2, 4-3, 5-3, 6-6, 7-7, 8-7, 9-6, 10-3, 11-4, 12-7, 13-6
	科學模式(S)	1-2, 2-3, 3-2, 4-3, 5-3, 6-6, 7-7, 8-7, 9-6, 10-3, 11-4, 12-8, 13-6

註：認知組合表示各次心智模式的組成內容，透過不同的狀態區別出心智模式的差異。

式歸為同類之概念演化假說樹43作為本研究之概念演化樹假說(詳見圖14)。

圖14為本研究之理想氣體概念演化假說樹43，在各分叉點上的節點編號代表概念發生的位置(編號由15至26號節點，未顯示編號1到14為13種分類單元及N1)，概念會在此發生分化而發展成不同的心智模式。虛線上標上許多認知特徵發生或改變的位置，在兩節點間的認知特徵應視為同時發生，圖14下方列出重要的認知特徵與狀態。圖14右側的圖片由上至下分別代表物質連續觀點的初始模式、綜合模式一：認為粒子的大小會改變、綜合模式二：粒子大小不變但運動和分布會受到外在因素的影響，最後的圖示代表類科學模式已具有粒子隨機運動的概念。

由圖14可看出在整個的發展過程有兩處概念大量發展的位置，第一處為23號節點而第二處為21號節點。由兩處發展的概念進行分析，可看出23號節點為學生由氣體連續觀轉變為粒子觀，如1-1連續觀變為1-2粒子觀，且由1-1無粒子概念轉變為2-2粒子會改變，而22號節點為學生再進一步修正為2-3粒子不變，但仍認為外在變因會影響到氣體粒子的性質，對於氣體粒子運動方向或分布的隨機因素，並未完全發展。在進入20號節點，也就是科學模式(S)及類科學模式(S_1)的共同節點後，學生才會發展出無因素影響氣體運動及分布的概念，而達到科學模式(S)。若以Chi (1997, 2005)的本體論觀點看來，這樣的概念發展隱含著由物質、直接過程到突現過程的本體移動。以下再將針對概念演化樹43之認知特徵演化歷程進行說明：



重要認知特徵與狀態說明：

(A) 1-2 粒子觀	(B) 2-3 粒子體積不變	(C) 3-2 粒子間為真空	(D) 4-2 氣體部份靜止	(E) 4-3 氣體全部持續運動
(F) 6-6 氣體隨機運動	(G) 7-7 氣體運動方向無因素影響	(H) 10-3 溫度造成粒子運動速率改變	(I) C12-8 同溫同壓下氣體體積與分子數相關	(J) C13-6 氣體壓力來自粒子撞擊器壁

圖14：理想氣體粒子模型概念演化假說樹

(一)氣體組成概念在早期發生

在23號節點出現(A) C1-2粒子觀，在發展的次序上較早發生，參考前述圖4的跨年級調查結果與此結果相符，七年級後的學生已有約九成以上具有粒子觀。粒子不變概念由不具有C2-1粒子的觀念，轉變為C2-2氣體粒子會發生體積上的改變，一直等到以外在變因來解釋氣體性質後，才能在22號節點修正為(B) C2-3粒子大小不變的概念，此結果與圖四的跨年級調查結果相符，雖然七年級時超過一半的學生已具備粒子觀，但粒子不變的概念仍未完全建立，要在八年級時才會達到42%，而且到十一年級時一半以上學生才會具有粒子不變的概念。

(二)粒子運動概念在後期發生

學生最初具有的想法為氣體連續觀的靜止(C6-1)，到往上飄(C6-2)及對流(C6-3)，後二種的認知特徵的發展以Vosniadou (1994)的架構理論看來，應屬於概念的豐富而非修正，學生對於氣體的流動除原先加熱向上，還再加上對流的想法。此三種認知特徵在24號節點前早已發展完成，而在23號節點後，分為三個主要的發展方向。向內擠壓(C6-4)及向外擠壓(C6-5)的發展方向在認知調查的比例上所占的比例較少，應為學生學習時對概念的誤解而形成，如粒子間引力造成氣體粒子向內靠近。而(F) C6-6隨機運動的部分在概念調查結果呈現出十一年級時才超過一半學生具有此概念，十二年級時接近九成(參考前述圖8)，因此與概念演化樹的預測相符，為後期發生的概念。

(三)粒子分布與粒子運動有相似的發展

概念發生為氣體連續觀的靜置底部(C8-1)，而後認為氣體粒子的分布如同液體(C8-2)，這兩種特徵還停留於連續觀的想法，在進入粒子觀後學生會因為要給予各現象合理的解釋，而產生許多不同的另有概念，如粒子的重量會影響到氣體粒子的分布，因此大部分粒子向下集中在容器下方(C8-3)；或往上集中(C8-4)，認為氣體粒子較輕會向上集中，排除重量為唯一決定氣體分布的因子。

爾後的發展中散佈邊緣(C8-5)認為氣體粒子散佈在容器邊緣，因此造成器壁的壓力。氣體粒子集中(C8-6)認為粒子間引力將影響粒子的分布，認為氣體將集中在容器中間。最後，氣體粒子呈現隨機分布(C8-7)直到16號節點時才會發生，此認知特徵的發展與氣體粒子的隨機運動為相似的發展歷程。

(四)溫度影響粒子體積發展較預期慢

概念發展為氣體的連續觀(C10-1)，認為整體的擠壓變嚴重，而C10-2為學生進入粒子觀後的另有概念，仍認為粒子會因為溫度而體積膨脹，在21號節點上出現(H) C10-3持有正確的科學觀點，認為溫度只會改變粒子的運動速率。根據前述圖12的跨年級概念調查結果，C10-3要到十二年級時才會超過一半的學生具備此概念(50%)，學生發展的情況較概念演化假說樹43的預測慢，可能的原因之一為氣體動力論的課程安排為十二年級，本研究認為此結果應與教學上的安排有關。

(五)氣體體積概念在後期發生

概念發展初期持氣體連續觀的學生會認為氣體體積與氣體的性質有關(C12-1)，而在進入粒子觀後，學生會以氣體粒子的重量來解釋氣體的體積(C12-3)，重的粒子有較大的體積。但在後續的學習中，因為對於氣體粒子模型的不熟悉反而產生更多的另有概念，如：C12-2認為氣體體積與粒子活性有關，其後還會再產生C12-4認為氣體體積與粒子引力有關；C12-5認為與外在壓力有關及C12-6認

04-邱美虹.indd 152 2013/7/12 上午 11:37:24

為與溫度有關，學生初期學到不完整氣體概念，在發展後反而產生更多另有概念。

氣體體積與容器體積相關(C12-7)發展後，學生不再認為粒子本性與外在變因會影響到定溫定壓下氣體的體積。一直到20號節點後，(I) C12-8氣體體積與分子數相關建立後，才會形成科學模式(S)的觀點。此認知特徵也是較後期才發生，與前述影響氣體體積因素的跨年級概念調查結果相符。

(六)氣體壓力概念在後期發生

概念發展初期因持有氣體的連續觀，因此認為是整體重量下壓造成壓力(C13-1)。在建立不完整的粒子觀後，便會以粒子互擠(C13-2)及粒子擠壓器壁(C13-3)作解釋。爾後發展中，粒子互撞(C13-4)認為粒子彼此引力互吸，進而相互碰撞，並以此作為壓力形成的因素。學生在建立以外壓造成壓力的概念(C13-5)後，會改以外在變因來解釋壓力的形成。而正確的(J) C13-6粒子撞擊器壁形成壓力的概念直到20號節點時才會發生，此認知特徵也是較後期才發生，與前述圖13的跨年級概念調查結果相符。

本研究嘗試以系統分類學的角度進行心智模式的分類及演化路徑，將原本線性概念特徵的發展轉變為模組型的發展。綜合上述的分析結果可知各認知特徵的發展有相互關係存在，在特定節點上發展會受限於學生原有氣體相關概念的影響，如連續觀的學生，在氣體性質或運動時多會由雲狀的氣體進行解釋，而無法理解粒子對器壁施力的情況。下一段將進一步探討理想氣體概念演化樹與學生認知特徵分布的關係。

三、跨年級學生認知特徵分布與理想氣體粒子概念演化樹發展之關係

為進一步探討理想氣體概念發展與演化假說樹43的關係，本研究將以研究結果一的認知特徵發展頻率檢驗及效化演化假說樹43，詳細說明如下。

(一)理想氣體粒子模型概念演化樹43之認知特徵發展

為探討理想氣體心智模式之發展過程，本研究以認知特徵頻率一半以上達到科學概念視為概念發展的時間，將結果呈現於圖15。其中粒子不變的概念(C2-3)雖然在八年級還未達50%，但因為由七年級至八年級粒子不變的概念由21%變為42%，九年級(43%)後便逐漸上升(詳細數據見圖4)，因此仍以八年級學生作為粒子不變概念的發生點。而在真空概念方面，以學生認為氣體粒子間具有自由運動空間作為此認知特徵的標準，因此將選擇灰塵或其他氣體粒子的學生扣除後，學生在九年級(58%)後便有超過半數學生具有粒子間無其他粒子的概念。

由圖15可看出科學模式的發展歷程，粒子持續運動(C4-3)雖較概念演化樹43的預測早，在七年級即達52%。根據現行課程綱要安排，在國小階段已提到空氣移動形成風的概念(教育部，2006)，學生在此所認為的持續運動可能為外力引起的巨觀現象，與粒子自身運動(intrinsic movement)並非直接的關係，是故粒子運動能量守恆(C5-3)的部分並未在七年級時發展，而延至九年級時才達到55%(數據詳見前述圖7)。溫度造成粒子體積改變的另有概念不易改變，在各年級的比例均十分高(數據詳見前述圖12)，造成粒子速度改變的跨年級比例較演化樹預測的發展慢。綜

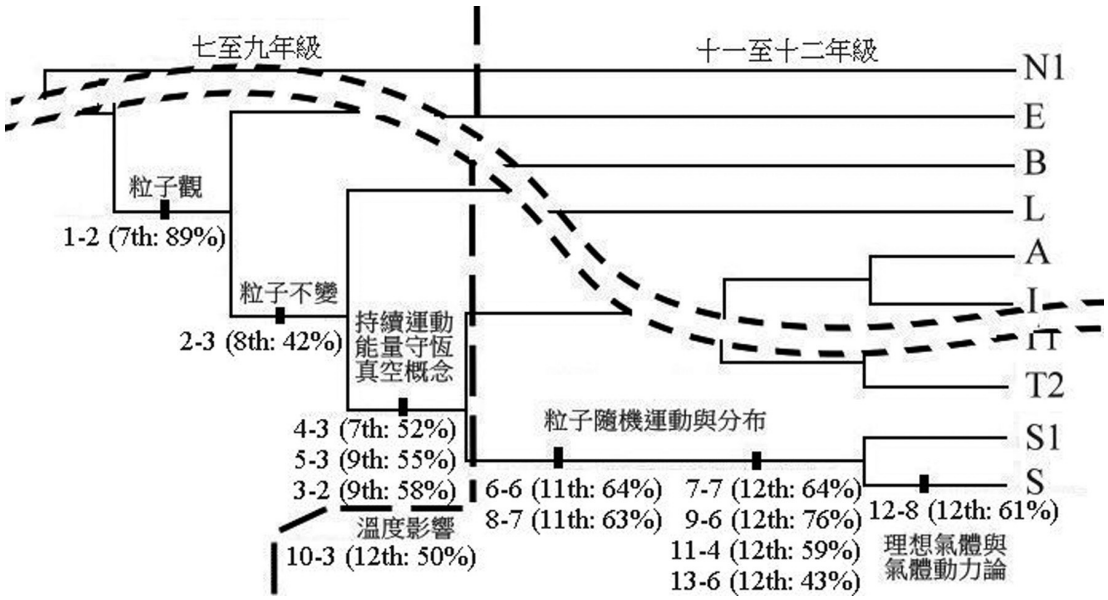


圖15：理想氣體粒子模型之認知特徵發展圖(虛線表示省略)

註：圖15為概念演化樹43上標上跨年級施測結果，省略部分為另有概念的發展路徑。

合整個發展的歷程可看出學生理想氣體的發展歷程在七到九年級與十一到十二年級間有明顯的分別，可分為概念前期及概念後期作說明：前期的認知特徵發展以粒子觀作為最早的發生點，但粒子大小不變的概念則要到八年級後才會發展完成，而持續運動、能量守恆及真空概念則要到九年級，前期主要發展的概念多為粒子本身的性質及持續運動與能量守恆方面。後期的發展又可分為兩個大部分，分別為隨機運動與分布及氣體動力論的部分，十一年級時就具備隨機運動與分布的概念，但影響的因素則要到十二年級才發展完成；氣體動力論的部分，需要學生瞭解氣體的巨觀現象是由於氣體粒子運動速率改變，而非氣體粒子本身的性質，且能指出溫度、體積及壓力的三者交互關係，此概念的發展在十二年級才發展完成，此結果與概念演化樹43的預測結果大致相符。

陸、結論、討論與建議

以下將研究結論、建議與未來研究方向進行詳細說明：

一、結論與討論

(一)理想氣體概念之認知特徵跨年級分布

本研究對跨年級學生進行理想氣體之概念調查，並透過13種認知特徵及認知狀態進一步分析學生的認知特徵頻率。其中，氣體粒子大小不變、氣體粒子觀、氣體粒子持續運動與能量守恆、氣體運動和分布等為穩定成長的概念，而溫度對氣體的影響、氣體體積及氣體壓力來源等則為後期才會發生的概念。穩定成長的概念其特性多為粒子本身的性質，因此隨著學生的學習經驗而逐漸改變為科學的狀態。但後期才發生的概念則更包含粒子間的交互作用，且氣體表現出的巨觀現象不易由直接的關係作解釋，而要由整體氣體粒子運動的結果來看，因此在概

念複雜度及教學次序的影響下，這些概念的發展在後期才會呈現高度發展，與Johnson (1998)對於粒子概念的調查結果相符，指出中學學生粒子概念的理解缺乏，其中的關鍵點可能為粒子概念的教學是在課程的後期進行(Harrison & Treagust, 2002; Johnson & Papageorgiou, 2010)。同時也呼應Adbo與Taber (2009)及Chiu與Chung (2009)對於已具備剛性粒子概念的學生，仍不甚瞭解粒子運動方式的現象。本研究的發現以實證結果指出跨年級學生概念的發展，可提供課程標準與教材研發專家學者參考。

其次，學生粒子間的真空概念並未呈現出上述的兩種成長方式，在調查中發現相當高比例的高中學生選擇非真空的原因為粒子間存有萬有引力，因此反而隨年級增加而出現持真空概念的比例有下降的情況。最後，值得注意的是學生對於隨機運動及分布的概念，獲得此概念的時間點早於理解影響因素的時間點，原因也與教科書內容有相當大的關係，99年版教科書在十一年級上學期的選修化學(一)中先進行理想氣體方程式的教學，在十一年級下學期的選修物理(二)中再進行氣體動力論的教學，可更進一步幫助學生建立氣體粒子與巨觀現象的連結，因此在概念發展上，學生對於將氣體粒子微觀運動連結到巨觀的氣體性質發展較慢。

(二)學生理想氣體粒子模型概念演化假說樹43之發展歷程

為進一步分析跨年級學生的認知特徵分布頻率，本研究以系統發育學的概念建立學生理想氣體粒子模型概念演化樹，將13種理想氣體相關的次心智模式進行編碼，以此資料輸入PAUP 4.0，而建立理想氣體粒子模型概念演化樹43作為本研究的概念發展分析架構。此概念演化樹有二處概念大量發展的情況，分別代表進入粒子觀及建立粒子不變的概念，Vosniadou (1994)認為學生的預設會限制解決問題時的心智模式類型，由概念大量發展所出現的概念組合可看出學生認知上的預設，如連續觀的學生會以液體的性質描述氣體而出現特定的另有概念：靜止(C6-1)及靜置底部(C8-1)等等。此外本研究之概念演化樹發展的歷程與跨年級學生理想氣體概念調查大致相符，發展歷程如圖16所示為概念前期(粒子觀、粒子不變、粒子持續運動與能量守恆)及概念後期(溫度造成粒子運動速度改變、粒子隨機運動與分布、氣體來自粒子撞擊器壁、氣體體積與分子數量有關)，應可作為探討概念發展的整體架構，將原本單一的概念改變研究轉換為更全面性的概念發展歷程。

(三)跨年級學生認知特徵分布與理想氣體粒子模型概念演化樹發展的關係

根據理想氣體粒子模型概念演化假說樹43呈現兩個不同的階段，分別是24號節點與21號節點之間及21號節點與20號節點之間，概念發生的時間點對應到七到九年級及十一到十二年級。七到九年級的認知特徵為氣體粒子大小不變、氣體粒子觀及氣體粒子持續運動與能量守恆三種重要概念。根據課綱安排此三種概念在中學時段都有提到，因此在此早期階段便已有相當高的頻率，而且逐年成長，但此階段學生對於氣體概念仍存有許多的另有概念，Chi (2005)認為學生容易錯置本體樹上突現過程的概念，本研究亦發現中學生對於氣體的概念多以直接過程作解釋，因此無法理解氣體粒子間各自獨立的隨機運動。直到十一年級上學期的教學後，隨機的概念才會出現，而溫度對氣體的影響、氣體體積及氣體壓力來源這三種概念的交互關係更是要在十一年級下學期學過氣體動力論後，概念才會於趨於完備。

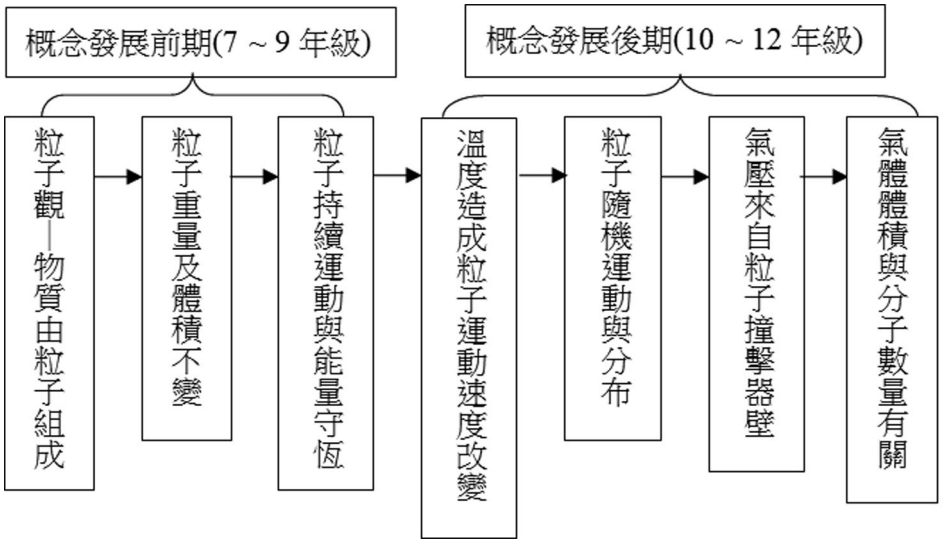


圖16：學生的理想氣體粒子模型概念發展示意圖

二、建議

(一)概念學習方面

本研究指出概念演化樹上的關鍵概念，如：概念前期的粒子觀、粒子不變、粒子持續運動；概念後期的粒子隨機運動與分布、溫度對粒子運動的影響及氣體壓力來源等，Johnson與Papageorgiou (2010)亦指出學生容易在這些概念上產生另有概念，而出現不同類型的心智模式，因此研究者認為應提供學生的符合概念發展的學習次序及內容，課程內容的安排可參考圖16所示，在初期先建立學生完整的微觀粒子概念，以利學生瞭解後續氣體粒子的隨機運動、氣壓大小及分子數量的關係。

(二)在教學與教科書方面

Treagust et al. (2010)指出物質的粒子運動理論對於中小學學生科學學習扮演重要的角色，根據本研究之跨年級概念調查及概念演化樹所示，研究者認為在概念教學的安排上可以從巨觀的現象逐漸引進微觀的氣體粒子概念，在國中階段以文字與圖形方式描述氣體粒子為剛性粒子、隨機運動、運動速率的改變與受溫度的影響等，建立學生對氣體粒子本質的次微觀理解與對巨觀現象的正確解釋，幫助學生進一步在高中階段理解氣體粒子間的交互作用，建立學生氣體粒子運動論的理論基礎，避免學生因粒子本質概念的錯誤反而產生更多的另有概念。在現行九年一貫的教學中國中階段並無特別針對微觀粒子的教學活動，主要概念還是在高中階段進行教學，但微觀粒子概念為學生學習時氣體性質的重要基礎，如能在國中階段安排微觀粒子概念的教學，將有助於引導學生從具體現象的認識到微觀粒子行為與活動機制概念的建立。

三、未來研究方向

(一)在研究方面

理想氣體概念在本研究中分為粒子本身概念及粒子間交互作用，兩者會有發展次序上的歷程，因為研究的需要主要集中在七

年級後，如果要針對粒子本身概念再作詳細的研究，可以再向下進行氣體粒子概念的調查，以獲得更多關於氣體粒子的相關研究資料。

(二)在教學方面

由概念發展的歷程來看，學習的過程必然會經歷過概念的豐富及另有概念的修正，而且有多條不同的發展路徑，出現多樣的心智模式。因此教學序列的安排應從更長遠的面向來看，在各個重要的發展關鍵點提供合適的概念，因此未來的研究可再針對教學面進行探討，瞭解學生因教學所發生的心智模式轉移。

誌謝

本研究承蒙行政院國家科學委員會經費補助(計畫編號：NSC 97-2511-S-003-025-MY2; NSC 99-2511-S-003-024-MY3; NSC 100-2511-S-003-033-MY2)。本研究團隊鐘建坪博士候選人提供試題修訂之意見及蘇雅鈺老師協助資料收集及林靜雯教授提供卓見，在此一併致謝。

參考文獻

1. 辛怡瑩、邱美虹(2010)。以概念演化樹探討跨年級學生演化概念之發展。**科學教育學刊**，**18**(2)，131-153。
2. 邱美虹(2000)。概念改變研究的省思與啟示。**科學教育學刊**，**8**(1)，1-34。
3. 邱美虹(2008)。**以研究與教學為基礎之跨國研究——探討學生粒子概念本體、發展、演化、改變的歷程**。臺北市：行政院國家科學委員會。
4. 林靜雯(2006)。**由概念演化觀點探究不同教科書教——學序列對不同心智模式學生電學學習之影響**。未出版之博士論文，國立臺灣師範大學科學教育研究所，臺北市。
5. 教育部(2006)。**九年一貫課程自然與生活科技學習領域課程綱要**(中英對照)。臺北市：作者。
6. Wiley, E. O., Siegel-Causey, D., Brooks, D. R., & Funk, V. A. (1995)。**支序學派大全**(*The compleat cladist : A primer of phylogenetic procedures*；陳星玉、陳小平譯)。基隆：水產。(原作出版於1991年)
7. Adadan, E., Trundle, K. C., & Irving, K. E. (2010). Exploring grade 11 students' conceptual pathways of the particulate nature of matter in the context of multirepresentational instruction. *Journal of Research in Science Teaching*, *47*(8), 1004-1035.
8. Adbo, K., & Taber, K. S. (2009). Learners' mental models of the particle nature of matter: A study of 16-year-old Swedish science students. *International Journal of Science Education*, *31*(6), 757-786.
9. Atkinson, Q. D., & Gray, R. D. (2005). Curious parallels and curious connections - Phylogenetic thinking in biology and historical linguistics. *Systematic Biology*, *54*(4), 513-526.

10. Barke, H. D., Hazari, A., & Yitbarek, S. (2009). Particle concept of matter. In H. D. Barke, A. Hazari, & S. Yitabarek (Eds.), *Misconceptions in chemistry: Addressing perceptions in chemical education* (pp. 67-102). Berlin, German: Springer.
11. Benson, D. L., Wittrock, M. C., & Baur, M. E. (1993). Students' preconceptions of the nature of gases. *Journal of Research in Science Teaching*, *30*(6), 587-597.
12. Campbell, D. T. (1988). *Methodology and epistemology for social science: Selected papers*. Chicago, IL: University of Chicago Press.
13. Chi, M. T. H. (1992). Conceptual change within and across ontological categories: Examples from learning and discovery in science. In R. Giere (Ed.), *Cognitive models of science: Minnesota studies in the philosophy of science* (pp. 129-186). Minneapolis, MN: University of Minnesota Press.
14. Chi, M. T. H. (1997). Creativity: Shifting across ontological categories flexibly. In T. B. Ward, S. M. Smith, & J. Vaid (Eds.), *Creative thought: An investigation of conceptual structures and processes* (pp. 209-234). Washington, DC : American Psychological Association.
15. Chi, M. T. H. (2005). Common sense conceptions of emergent processes: Why some misconceptions are robust. *Journal of the Learning Sciences*, *14*(2), 161-199.
16. Chi, M. T. H., Slotta, J. D., & De Leeuw, N. (1994). From things to processes: A theory of conceptual change for learning science concepts. *Learning and Instruction*, *4*, 27-43.
17. Chiu, M. H. (2007). A national survey of students' conceptions of chemistry in Taiwan. *International Journal of Science Education*, *29*(4), 421-452.
18. 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.
19. Chiu, M. H., & Chung, S. L. (2009, August & September). *Investigating students' ontological change in their mental models of gas particles*. Paper presented at the 2009 European Science Education Research Association Conference. Istanbul, Turkey.
20. Croft, W. (2008). Evolutionary linguistics. *Annual Review of Anthropology*, *37*, 219-234.
21. De Vos, W., & Verdonk, A. H. (1996). The particulate nature of matter in science education and in science. *Journal of Research in Science Teaching*, *33*(6), 657-664.
22. Futuyma, D. J. (2005). *Evolution*. Sunderland, MA: Sinauer Associations.
23. Gómez, E. J., Benarroch, A., & Marín, N. (2006). Evaluation of the degree of coherence found in students' conceptions concerning the particulate nature of matter. *Journal of Research in Science Teaching*, *43*(6), 577-598.
24. Halliday, D., Resnick, R., Walker, J., & Christman, J. R. (2010). *Student Study Guide for Fundamentals of Physics* (9th ed.). New York: John Wiley & Sons.

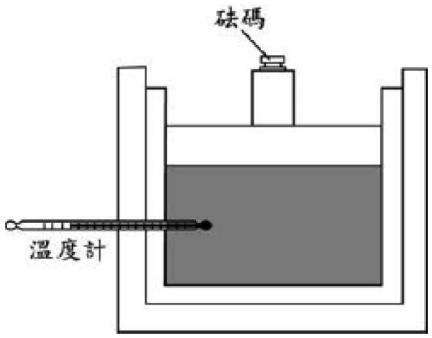
25. Harrison, A. G., & Treagust, D. F. (2002). The particular nature of matter: Challenges in understanding the submicroscopic world. In J. K. Gilbert, O. D. Jong, R. Justi, D. F. Treagust, & J. H. V. Driel (Eds.), *Chemical education: Towards a research-based practice* (pp. 189-212). Dordrecht, The Netherlands: Kluwer Academic.
26. Hull, D. L. (1988). *Science as a process: An evolutionary account of the social and conceptual development of science*. Chicago, IL: University of Chicago Press.
27. Hull, D. L. (2001). *Science and selection: Essays on biological evolution and philosophy of science*. Cambridge, UK: Cambridge University Press.
28. Gustafson, B. J., Shanahan, M. C., & Gentilini, S. (2010). Elementary children's shifting views of models and the nature of matter. *Canadian Journal of Science, Mathematics and Technology Education*, *10*(2), 103-122.
29. Johnson, P. (1998). Progression in children's understanding of a 'basic' particle theory: A longitudinal study. *International Journal of Science Education*, *20*(4), 393-412.
30. Johnson, P., & Papageorgiou, G. (2010). Rethinking the introduction of particle theory: A substance-based framework. *Journal of Research in Science Teaching*, *47*(2), 130-150.
31. Kotz, J. C., Treichel, P. M., & Townsend, J. (2009). *Chemistry and chemical reactivity* (7th ed.). Belmont, CA: Thomson-Brooks/Cole.
32. Kuhn, T. S. (1962). *The structure of scientific revolution*. Chicago, IL: University of Chicago Press.
33. Lakatos, I. (1970). Falsification and the methodology of scientific research programmes. In I. Lakatos & A. Musgrave (Eds.), *Criticism and the growth of knowledge* (pp. 91-195). Cambridge, UK: Cambridge University Press.
34. Margel, H., Eylon, B. S., & Scherz, Z. (2008). A longitudinal study of junior high school students' conceptions of the structure of materials. *Journal of Research in Science Teaching*, *45*(1), 132-152.
35. Novick, S., & Nussbaum, J. (1981). Pupils' understanding of the particulate nature of matter: A cross-age study. *Science Education*, *65*(2), 187-196.
36. Nussbaum, J. (1985). The particulate nature of matter in the gaseous phrase. In R. Driver, E. Guesne, & A. Tiberghien (Eds.), *Children's ideas in scinece* (pp. 124-144). Milton Keynes, UK: Open University Press.
37. Posner, G. J., Strike, K. A., Hewson, P. W., & Gertzog, W. A. (1982). Accommodation of a scientific conception: Toward a theory of conceptual change. *Science Education*, *66*(2), 211-227.
38. Renzi, B. G. (2009). A type hierarchy of selection processes for the evaluation of evolutionary analogies. *Journal for General Philosophy of Science*, *40*(2), 311-336.

04-邱美虹.indd 159 2013/7/12 下午 12:09:16

39. Shennan, S., & Collard, M. (2005). Investigating processes of cultural evolution on the North Coast of New Guinea with multivariate and cladistic analyses. In R. Mace, C. J. Holden, & S. Shennan (Eds.), *The evolution of cultural diversity: A phylogenetic approach* (pp. 133-164). London: University College London Press.
40. Stamovlasis, D., Tsitsipis, G., & Papageorgiou, G. (2010). The effect of logical thinking and two cognitive styles on understanding the structure of matter: An analysis with the random walk method. *Chemistry Education Research and Practice*, *11*(3), 173-181.
41. Stavy, R. (1990). Children's conceptions of changes in the state of matter: From liquid (or solid) to gas. *Journal of Researching in Science Teaching*, *27*(3), 247-266.
42. Strike, K. A., & Posner, G. J. (1992). A revisionist theory of conceptual change. In R. Duschl & R. Hamilton (Eds.), *Philosophy of science, cognitive science and educational theory and practice* (pp. 147-176). Albany, NY: SUNY Press.
43. Suchocki, J. (2011). Conceptual chemistry: Understanding our world of atoms and molecules (4th ed.). San Francisco: Pearson Education.
44. Tehrani, J., & Collard, M. (2002). Investigating cultural evolution through biological phylogenetic analyses of Turkmen textiles. *Journal of Anthropological Archaeology*, *21*(4), 443-463.
45. Toulmin, S. (1972). *Human understanding: The collective use and evolution of concepts*. Princeton, NJ: Princeton University Press.
46. Treagust, D. F., Chandrasegaran, A. L., Crowley, J., Yung, B. H. W., Cheong, I. P. A., & Othman, J. (2010). Evaluating students' understanding of kinetic particle theory concepts relating to the states of matter, changes of state and diffusion: A cross-national study. *International Journal of Science and Mathematics Education*, *8*(1), 141-164.
47. Vosniadou, S. (1994). Capturing and modeling the process of conceptual change. *Learning and Instruction*, *4*(1), 45-69.

附錄一：TIG試題範例與認知特徵標定

右圖中的密閉容器內裝了適量的氮氣，容器上方的活塞是可移動的。我們可以利用砝碼的重量來控制容器體積的大小，並且利用均勻的加熱裝置來調整溫度，使容器內的氣體升溫或降溫。請根據題目的描述與你的日常生活中的經驗，回答下面的題組：



■範例一：你認為右上圖中密閉容器內氣體壓力的成因為何？

A:_____。

(A)砝碼下壓的重量　(B)砝碼下壓的重量+大氣壓力

(C)容器內氣體之間互相擠壓　(D)容器內全體氣體擠壓器壁

(E)容器內快速運動的氣體互相碰撞

(F)容器內快速運動的氣體不斷碰撞容器壁。

(G)其他:_____

氣體壓力來源(C13)

選項(A) (B)標定為「C13-5外壓」	選項(C)標定為「C13-2粒子互擠」
選項(D)標定為「C13-3粒子擠壓器壁」	選項(E)標定為「C13-4粒子互撞」
選項(F)標定為「C13-6粒子撞擊器壁」	

■範例二：你覺得加熱後密閉容器後，氣體粒子本身的體積會如何變化？A:_____。

(A)整體氣體熱漲冷縮　(B)氣體粒子體積熱漲冷縮

(C)氣體粒子體積不變　(D)無法判斷　(E)其他：_____

溫度對氣體的影響(C10)

選項(A)標定為「C10-1整體氣體膨脹」	選項(B)標定為「C10-2粒子體積膨脹」

科學教育學刊
2013, 第二十一卷第二期, 135-162
DOI: 10.6173/CJSE.2013.2102.01

Chinese Journal of Science Education
2013, 21(2), 135-162

Investigating Students' Mental Models of Ideal Gas across Grade Levels via the Conceptual Evolutionary Approach

Mei-Hung Chiu[1,*], Wen-Lung Wu[1], Shiao-Lan Chung[1,2] and Hsueh-Pi Li[1]

[1]Graduate Institute of Science Education, National Taiwan Normal University
[2]New Taipei Municipal New Taipei Senior High School

Abstract

This study investigated the conceptual evolution of students' mental models of ideal gas across grades. Via a systematic and scientific methodology entitled, phylogenetic classification, this study integrated two approaches to uncover students' conceptual evolution pathways. The participants were students from 7th to 12th grades (N = 646) in Taipei, Taiwan. The study had three purposes: (1) To investigate the frequencies of students' conceptions of ideal gas across grade levels, (2) to propose different mental models based upon the literature and to construct the evolutionary tree, and (3) to compare the evolutionary tree with students' conceptual investigations and then conclude possible pathways of conceptual development. Three instruments were utilized: (1) Coding Tool of Ideal Gas - including 13 cognitive characters and different cognitive states, (2) Test of Ideal Gas (TIG) - for investigating the students' conceptions of ideal gas (Cronbach's α = .89); and (3) PAUP 4.0 - popularly adapted for analyzing the evolutionary tree in the phylogenetic classification. The results showed that Evolutionary Tree 43 could be separated into two developmental stages: nature of particles and interaction between particles. Tree 43 was not only in accordance with the findings from the literature but was also supported by the empirical survey data. According to the pathways of Tree 43, there were several key points of conceptual development; for example, particulate view of matter, unchangeable sizes of particles, randomness of particle motion and distribution, and interactions among particles. These concepts are often misunderstood by students. Such faulty conceptions then contribute to the development of students' incorrect mental pathways. Finally, this study provides an evidence-based framework for science education in practice.

Key words: Mental Model, Cladistics, Phylogenetic Classification, Ideal Gas Law, Conceptual Evolutionary Tree

* Corresponding author: Mei-Hung Chiu

04-邱美虹.indd 162 2013/7/12 上午 11:37:25