

---

# 生物學細胞分裂主題之資訊 融入教學設計原則

楊凱悌<sup>1,3\*</sup> 王子華<sup>2</sup> 邱美虹<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 國立臺灣師範大學 科學教育研究所

<sup>2</sup> 國立新竹教育大學 教育學系

<sup>3</sup> 臺中市立育英國民中學

## 壹、前言

細胞分裂、光合作用、呼吸作用、食物網與食物鏈以及演化，是中學生物裡難以教學的主題，而教師與學生也一致地認為細胞分裂是當中最困難的主題(Brown, 1995; Oztap, Ozay, & Oztap, 2003)。從研究中也發現各年齡與各階段的學生對於細胞分裂的過程理解不佳(Lewis, Leach, Wood-Robinson, 2000a, b; Lewis & Wood-Robinson, 2000; Smith, 1991)。Lewis et al.(2000a, b)指出，學生之所以對於細胞分裂的主題理解不佳，是源於其對基本結構(basic structure)－細胞、染色體、基因、遺傳訊息(genetic information)之間的關係不瞭解，以及容易對於這些遺傳學的術語感到困惑所致。因此，若能在教學的過程中，清楚地呈現出這些基本結構間的關係，將有助於協助學生發展融貫的理解。Brown(1995)與 Oztap et al. (2003)則指出，如果在教學中透過各種教學輔具，例如染色體在細胞分裂中各階段的圖片與影片，特別是有時間呈現之相位差顯微鏡來

強調細胞分裂過程之動態本質，並建立染色體的模型(chromosome model)，將有助於克服學生的學習困難。

然而，近年來隨著資訊科技的快速發展，整合多媒體呈現來協助學生建立遺傳學之基本結構與這些基本結構之間關係的模型，或強調細胞分裂過程之動態本質，較以往傳統課室環境來得容易。例如：2D 或 3D 圖型與動畫、影片、模擬(simulation)等優勢，對於輔助學生建構一個融貫的遺傳學概念架構(conceptual framework)，並釐清遺傳學之基本結構與這些基本結構間的關係是相當有幫助的。此外，動畫、影片等多媒體動態呈現的特質，對於理解「細胞分裂」過程之動態本質亦相當有助益(Brown, 1995; Browning & Lehman, 1988; Oztap et al.; 2003)。因此，本文以生物學細胞分裂為主題，提出細胞分裂之資訊融入教學的設計原則，並提出可以達成該原則之相關多媒體的優勢或相關軟體的範例，以作為教學活動與軟體設計者之參考。

---

\*為本文通訊作者

## 貳、細胞分裂主題之資訊融入教學的設計原則

細胞分裂是學生與教師公認最難以教學的主題(Oztap et al., 2003)，而其中尤以減數分裂為最。從許多研究顯示，不同年級或年齡學生對此概念普遍具有學習困難與迷思概念(Lewis et al., 2000a, b; Lewis & Wood-Robinson, 2000; Smith, 1991)，為了應用資訊科技之潛能來輔助學生對此主題之學習，本文先分析學生對於細胞分裂主題之學習困難，並提出解決學生學習困難的教學原則，再據此配合資訊科技的特性與優勢，來提出可以輔助學生學習該主題之資訊融入教學的設計原則。

### 一、細胞分裂與學生的學習困難

細胞分裂(cell division)是遺傳學所涵蓋的重要概念之一，包含有絲分裂(mitosis)與減數分裂(meiosis)兩種，兩者對於生物體的意義不同。有絲分裂主要的功能在於細胞增殖，而減數分裂的功能則在於形成生殖細胞(Campbell, Reece, Urry, Cain,

Wasserman, Minorsky, & Jackson, 2008)；其中，減數分裂又是學生學習遺傳學知識與解決其相關問題必備的基礎(Kindfield, 1994)。然而，細胞、染色體、基因這些遺傳學上的專有名詞，與這些基本結構之間的關係又是學生瞭解細胞分裂的基本概念(Smith, 1991)。從 Lewis et al.(2000a, b)、Lewis 和 Wood-Robinson(2000)一系列關於中學生對於遺傳學相關概念之研究，以及楊坤原和張賴妙理(2004)整理 1970—2000 年學生對於遺傳學相關概念之學習困難的研究，可以知道學生無法釐清細胞、染色體、基因、對偶基因的物理性連結與關係，特別是染色體的本質與角色，並對於染色體與基因之間的關係感到困惑；學生無法區分有絲分裂與減數分裂的差異，無法理解染色體在細胞分裂過程中的行為與一連串遺傳訊息之間的關係；學生甚至認為動物才有有性生殖、植物缺乏有性生殖僅有無性生殖等。由於本文的目的在於提出資訊融入細胞分裂主題之設計原則，因此，將上述文獻中有關細胞分裂學習之相關概念與學生的學習困難整理如下：

表 1、學生對於細胞分裂主題之相關概念存有的迷思概念及其可能來源

主概念	概念內容	學生的迷思概念	迷思概念的來源
基因	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 基因是一段 DNA，位於染色體的特定位置上。</li> <li>2. 對偶基因即為一基因的複本(alternative form)，位於同源染色體的相同基因座(locus)上。</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 基因等於 DNA。</li> <li>2. 將對偶基因標示於同一條染色體上、非同源染色體上、同源染色體的非相對基因座上。</li> </ol>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 學生不具有形式操作期的認知能力。</li> <li>● 教科書的詞彙不適切、不清楚。</li> <li>● 教學方法不適切</li> </ul>

## 染色體

- |                                                                                                                                                                                                            |                                                                                                                                                                                                                                                     |                                                                                                               |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <ol style="list-style-type: none"> <li>1. 染色體由 DNA 與蛋白質構成，位於細胞核內。</li> <li>2. 染色體的組數即為套數(polidy)。</li> <li>3. 大小、形狀相同的染色體稱為同源染色體(homologous chromosomes)。</li> <li>4. 決定性別的染色體稱為性染色體，反之則稱為體染色體。</li> </ol> | <ol style="list-style-type: none"> <li>1. 染色體的數量與基因數量相等。</li> <li>2. 染色體的套數與染色體數量成比例關係。</li> <li>3. 一條染色體複製後成四條染色體。</li> <li>4. 同源染色體即為姊妹染色體(sister chromatids)。</li> <li>5. 所有的染色體不是 X 就是 Y，Y 染色體決定性別。</li> <li>6. 男性有 X 染色體，女性有 Y 染色體。</li> </ol> | <ul style="list-style-type: none"> <li>● 教科書或教材圖示結構不清楚。</li> <li>● 不適切的教學方法。</li> <li>● 日常生活經驗的混淆。</li> </ul> |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

## 細胞分裂

### ●有絲分裂

- |                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |                                                                                                                                                                                                                                                                              |                                                                                                                                   |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <ol style="list-style-type: none"> <li>1. 細胞藉由有絲分裂來產生新細胞，以修補衰老或耗損的細胞。</li> <li>2. 有絲分裂發生於體細胞。</li> <li>3. 有絲分裂的過程：             <ul style="list-style-type: none"> <li>● 前期：染色體複製。</li> <li>● 中期：染色體排列於細胞中央。</li> <li>● 後期：姊妹染色體分離。</li> <li>● 末期：細胞質分離，形成兩個染色體與遺傳物質相同之子細胞。</li> </ul> </li> </ol> | <ol style="list-style-type: none"> <li>1. 細胞隨功能不同具有不同的基因，並僅攜帶表現其功能的基因。</li> <li>2. 細胞經有絲分裂後產生四個子細胞、子細胞染色體會減半或增為兩倍。</li> <li>3. 有絲分裂過程，染色體不會複製、染色體不會相連、姊妹染色體沒有分離、具有聯會。</li> <li>4. 子細胞具有的遺傳訊息依細胞年齡與健康程度而異。</li> <li>5. 有絲分裂發生於體組織和生殖組織。</li> <li>6. 植物僅有或甚至沒有有絲分裂。</li> </ol> | <ul style="list-style-type: none"> <li>● 學生未具形式操作期的認知能力。</li> <li>● 教學方法不適切。</li> <li>● 教科書圖示不清楚。</li> <li>● 教師具有迷思概念。</li> </ul> |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

●減數分裂

1. 細胞藉由減數分裂產生生殖細胞(即配子)。
  2. 減數分裂發生於生殖細胞。
  3. 減數分裂的過程：
    - (1)減數分裂 I(同源染色體分離)：
      - 前期 I：染色體複製並聯會(基因片段互換)。
      - 中期 I：同源染色體成對併排於細胞中央。
      - 後期 I：同源染色體分離。
      - 末期 I：細胞質分離，形成兩個子細胞。
    - (2)減數分裂 II(姊妹染色體分離)：
      - 前期 II：紡錘體重新形成。
      - 中期 II：姊妹染色體排列於細胞中央。
      - 後期 II：姊妹染色體分離。
      - 末期 II：細胞質分離，形成兩個子細胞。
1. 減數分裂和有絲分裂的過程相同。
  2. 染色體複製兩次，僅分裂一次；染色體先分離再複製、染色體互換發生在複製之前。
  3. 子細胞的染色體數與原本的細胞相同或增加為 2 倍或為 1/4、1/8，甚至不具有染色體。
  4. 減數分裂產生 2 個單套體或 2 個雙套體或 4 個 4 套體的生殖細胞，或讓 2 個細胞變成 1 個、只產生 1 個子細胞、產生兩倍的子細胞數。
  5. 子細胞的遺傳訊息與原本的細胞相同。
  6. 子細胞的遺傳訊息不同於原本的細胞，因為要執行的功能不同。
  7. 減數分裂僅發生於體組織或同時發生於生殖組織與體組織。
  8. 植物不具有減數分裂。
- 學生未具形式操作期的認知能力。
  - 學生的工作記憶空間有限。
  - 教學方法不適切。
  - 教科書圖示不清楚。
  - 教師具有迷思概念。
  - 教學時間太少。

---

資料來源：整理自 Brown(1995)、Lewis et al.(2000a, b)、Lewis 和 Wood-Robinson(2000)、Oztap et al.(2003)與楊坤原和張賴妙理(2004)

由表 1 可以知道，學生在細胞分裂主題上的學習困難主要有：

1. 對於遺傳學之基本結構與其物理性的連結關係不清楚，並對於遺傳學的專有名詞感到困惑。
2. 細胞分裂發生於細胞中，學生無法親眼看到這個動態的過程，特別是染色體與遺傳訊息在細胞分裂過程中的變化。
3. 無法區辨兩種細胞分裂的異同處。

這些學習困難主要源於，遺傳學之基本結構的概念分布在生物課程中不同單元，各基本結構之間的物理關係沒有被緊密的連結與明確地呈現，造成學生缺乏一個融貫的概念結構(Lewis et al., 2000b)，再加上因為學生無法對繁瑣的專有名詞產生有意義的聯結而造成混淆(Lewis et al., 2000a, b; Lewis & Wood-Robinson, 2000; Oztap et al., 2003)。此外，許多研究指出，學生的學習困難是源於教材圖示與教學方法不適切所致(楊坤原和張賴妙理，2004；Brown, 1995；Lewis et al., 2000b；Kindfield, 1991；Mertens & Walker, 1992；Simth, 1991；Oztap et al., 2003)，因為傳統教材圖示與教學無法具體呈現其動態本質。此外，亦有研究指出，學生的認知能力無法理解這些微觀抽象的概念亦是造成學習困難的原因之一(楊坤原和張賴妙理，2004；Brown, 1995；Lazarowitz & Penso, 1992)。

## 二、細胞分裂單元之資訊融入教學的設計原則

由上述的文獻回顧可以知道學生對於細胞分裂主題的學習困難與成因，而近年來資訊科技的優勢已逐漸能輔助改善上述的學習困難。以下依據資訊科技的優勢，提出資訊科技融入細胞分裂教學的設計原則，分別說明如下：

### (一) 具體呈現基本結構—細胞、細胞核、染色體和基因，以及這些基本結構之間的關係

由表 1 可知，遺傳學之基本結構與結構間的關係是學習細胞分裂概念的基礎，其中，染色體不僅是遺傳學教材的基本單位，更是細胞分裂過程中的實體(楊坤原和張賴妙理，2004；Lewis et al., 2000b；Kindfield, 1991；Oztap et al., 2003)。因此，若能協助學生建構染色體模型並發展出融貫的概念架構，將有助於學生對於遺傳學有更好的理解。然而，傳統講述式的教學與教材圖示卻無法協助學生發展此一融貫的概念。

Brown(1995)指出，在呈現染色體結構上，僅採用 2D 圖示是不適切的，學生必須理解染色體 3D 的結構，才有助於建立一個融貫之遺傳學的概念架構。學習科技之相關研究指出，視覺化(visualization)工具、以 2D、3D 或動畫來表徵一個科學現象，有助於讓學生看見現象或抽象的概念，呈現出文字無法具體描述的想法(Linn, 2003; Krajcik & Czerniak, 2007)。此外，結合影片、圖片、文字與互動性

的微世界、互動式多媒體與模擬工具，能具體提供學生直接、豐富的經驗(Krajcik & Czerniak, 2007)，讓學生透過主動的參與來發展有意義的科學概念並提高其學習動機。例如，針對遺傳學所開發之 BioLogica™ 軟體，在學生學習孟德爾定律與基因的表現型之前，先讓學生透過 3D 互動軟體來學習細胞的結構(如圖 1)，以協助學生建構細胞、細胞核與染色質的結構與物理性的連結關係；此外，並讓學生知道基因產物—蛋白質的表現，是透過核孔、粗糙內質網、高基氏體等層層傳遞，將蛋白質表現出來，以影響生物體的表型(phenotype)。

## (二) 具體呈現兩種細胞分裂的動態本質

由表 1 可知，學生對於兩種細胞分裂存在許多迷思概念，究其原因主要為細胞分裂具有動態的本質且發

生於細胞中，屬於微觀抽象的概念，對於尚未具備形式操作認知能力的學生而言，屬於較難理解的概念(楊坤原和張賴妙理，2004；Lazarowitz & Penso, 1992)。若能有效在教學過程中呈現細胞分裂的動態本質，將有助於學生克服該學習困難(Brown, 1995; Oztap et al., 2003; Kindfield, 1991)。

近年來隨著 Java、Adobe Flash 等軟體之發展，電腦視覺化與動畫軟體已成為輔助科學學習之可行的方法(Barak, Ashkar, Dori, 2011; Dori, Barak & Adir, 2003)；以動畫來表徵一個科學現象，有助於讓學生看見現象或抽象的概念(Linn, 2003; Krajcik & Czerniak, 2007)，尤其是對於課堂中不可見或難以解釋之過程的視覺化特別有效(Barak et al., 2011)。Dori 和 Barak (2001)也建議，在學習的過

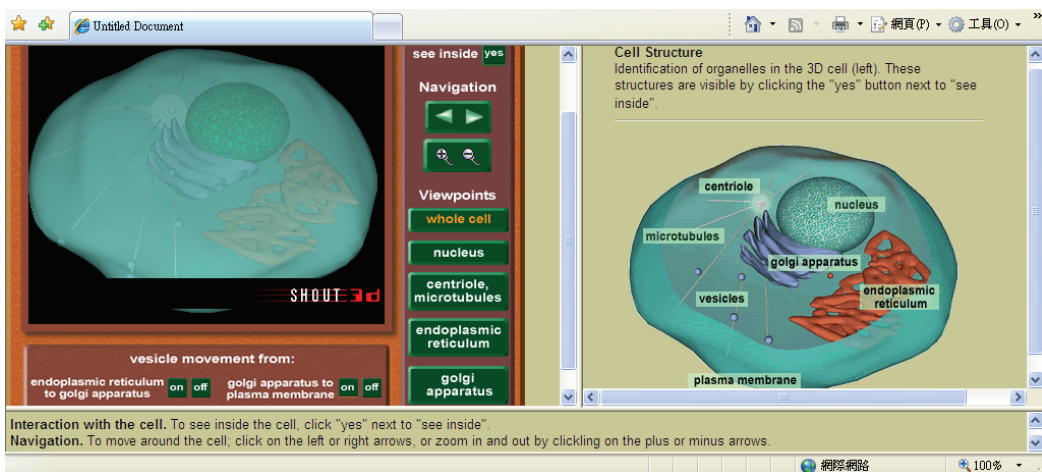


圖 1、BioLogica™ 生物網站(<http://biologica.concord.org/>)中以 3D 互動軟體介紹細胞結構之介面

程中若涉及複雜的空間結構與動態過程時，可以採用動畫輔助學習。由此可知，動畫軟體適用於呈現具有動態本質之細胞分裂概念。

然而，對於同樣具有動態本質之有絲分裂而言，減數分裂對於學生而言更加困難(Brown, 1995)。針對遺傳學所開發之 BioLogica™ 軟體(Hickey, Kindfield, Horwitz, & Christie, 2003)，設計了兩個網路實驗室—「恐龍遺傳學(Dragon Genetics)」與「孟德爾的豌豆(Mendel's peas)」，來輔助學生學習遺傳學基因型、表型、減數分裂與家族譜系的概念。其中，「恐龍遺傳學」是源自於 GenScope 軟體(Hickey et al., 2003)，GenScope 透過富

有想像性的生物—「恐龍」來輔助學生學習基因型與表型的概念，其設計了多個視窗同時展示遺傳因子傳遞的過程與結果，包含「減數分裂視窗」—讓學生看見減數分裂形成四個配子的動態過程(讓學生瞭解減數分裂過程的聯會與互換)(如圖 2)以及配子的結合，來輔助學生對於等位基因配對、基因型與表型的學習。另外，何秋萱(2004)探討 Adobe Flash 動畫軟體對於國中學生學習遺傳概念之影響，發現 Adobe Flash 動畫軟體能模擬並具體呈現減數分裂的動態過程，有助於學生對物體作直覺的瞭解，並降低其抽象思考的層次，對於學生的概念學習與概念改變具有幫助。

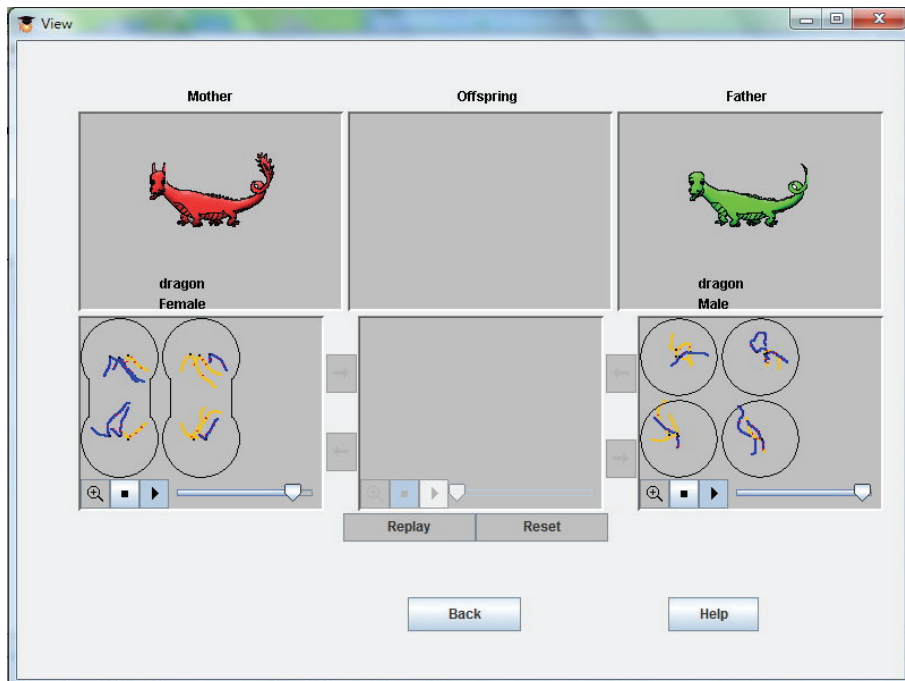


圖 2、BioLogica™ 生物網站(<http://biologica.concord.org/>)中以動畫介紹減數分裂形成配子之介面

### (三) 區分兩種細胞分裂的差異

除上述之外，從表 1 還可以發現，學生經常將有絲分裂與減數分裂混淆。除了部分學生沒有察覺到細胞分裂有兩種類型之外，大多數的學生雖然知覺到兩者間的差異，卻不清楚差異的本質為何。為了協助學生釐清兩種細胞分裂間的差異，Lewis et al.(2000b)與楊坤原和張賴妙理(2004)建議，若能將兩種細胞分裂之間的異同，明確地以目的、產物與過程來加以區分，將有助於學生釐清兩種細胞分裂間的差異。

另外，由於有絲分裂與減數分裂這兩種細胞分裂，對於生物體的重要性與意義是不同的。有絲分裂的目的在於確保子細胞與母細胞間具有相同的染色體數與遺傳物質，而減數分裂則在形成染色體數減半之配子，並增加配子間的遺傳變異，此外，減數分裂過程中因為染色體的獨立分配以及互換(cross over)形成重組染色體，所產生之配子的遺傳變異亦是有性生殖過程中造成基因變異的原因之一(Campbell et al., 2008)。而且減數分裂概念之學習對學生學習有性生殖與無性生殖具有決定性之影響，Hickey et al.(2003)進一步指出，學生雖然瞭解減數分裂過程中的各種生物事件，例如染色體聯會、互換 DNA 片段等，卻不知道互換對於遺傳的影響。因此，Lewis et al. (2000b)建議，

在討論有絲分裂、減數分裂與受精作用三者間的關係時，染色體的行為、遺傳訊息之間的傳遞與連結應明確呈現。因此，在設計此兩種細胞分裂以及兩種生殖策略的比較時，可以嘗試採用 BioLogica™ 網站中多頁面同時呈現的設計或是 GenScope 多視窗的設計(Hickey et al., 2003)，並結合互動式動畫軟體，讓學生同時比較兩細胞分裂與生殖策略的差異，並提供學生表格作為引導的鷹架，讓學生從細胞分裂的目的、染色體的複製、分裂過程、產物等方面來比較其異同。除此之外，GenScope 多視窗的設計中特別注意到減數分裂過程中染色體的互換，並引導學生瞭解互換對於遺傳變異的意義(Hickey et al., 2003)，是一個很重要的設計。

### (四) 教學序列應先呈現遺傳學之基本結構與結構間的關係，再進行兩種細胞分裂的教學

由前述文獻分析可知，遺傳學各概念間存有相互依存的關係，若學生無法具有一個融貫的遺傳學概念架構，則無法對各概念間作出有意義的連結，將致其混淆遺傳學的專有名詞而產生迷思概念(楊坤原和張賴妙理，2004; Lewis et al., 2000a, b; Oztap et al., 2003)。因此，Smith(1991)與楊坤原和張賴妙理(2004)建議，為能符合 Ausubel 所提之含攝理論(subsumption theory)，讓學生可以透同



化的原則，對於細胞分裂進行有意義的學習，應先介紹染色體的知識，包含：染色體的本質、染色體在減數分裂過程中的角色，以及染色體與基因間的關係等，亦即建立染色體模型 (Brown, 1995; Oztap et al., 2003) 與建立融貫的概念結構 (Lewis et al., 2000a, b)，待學生建立起染色體的模型後，再呈現兩種細胞分裂各階段的動態過程與染色體的變化並比較兩者間的差異，將有助於學生對染色體與細胞分裂各步驟產生有意義的連結。

## 參、結語

Hickey et al. (2003) 指出，遺傳學對於科學教師與學生之所以特別具有挑戰，是由於其涉及生物體各構造層次間(即：基因、染色體、細胞、組織、器官、系統)的關係，且其呈現之現象無法直接觀察，不是發生得太快就是發生得太慢，不然就是尺度太大或尺度太小。而「細胞分裂」這個主題是學生學習遺傳學相關概念的基礎。由於細胞分裂的過程除涉及複雜繁鎖之遺傳學的基本結構，以及基本結構之間的關係之外，還包含其動態的本質，因而「細胞分裂」一直是學生與教師最困難學習與教學的單元之一。

由學生對於細胞分裂的迷思概念可以知道，若能協助學生建立起一個融貫的概念架構，並結合教材輔具來呈現細胞分裂的動態過程，將有助於克服學生的學習

困難(Brown, 1995; Lewis et al., 2000a,b; Oztap et al., 2003)，並能協助其對遺傳學發展出更好的理解。此外，由於細胞分裂一有絲分裂與減數分裂，在遺傳學上具有重要的意義，然而，學生卻經常無法區分兩者的差異，也經常將其目的、過程、產物相混淆，而教科書對於這些遺傳學相關概念間之關係的闡述也較為隱晦不明，因此，若要克服此一問題，則需要透過教師的教學策略，將此兩種細胞分裂與受精作用、生殖策略等相關概念進行比較，讓學生對這些概念產生連結。從上述的文獻回顧，本文針對細胞分裂主題之數位媒體的設計提出四個原則：

1. 具體呈現基本結構—細胞、細胞核、染色體和基因，以及這些基本結構之間的關係。
2. 具體呈現兩種細胞分裂的動態本質。
3. 區分兩種細胞分裂的差異。
4. 教學序列應先呈現遺傳學之基本結構與結構間的關係，再進行兩種細胞分裂的教學。

除此之外，由於細胞分裂本身具有動態的本質，其所涉及的概念尺度較小且過程快速，因此，若要協助學生建構一個融貫之遺傳學的概念架構與染色體模型，互動式多媒體、結合 2D 與 3D 之多模態的視覺表徵，將有助於學生發展出細胞、染色體、基因結構間的關係之概念。此外，動態視覺化的設計，隨著動畫軟體的進步，已成為促進科學學習之可行的方法(Dori et al., 2003; Barak et al., 2011)，特別是對

於課堂中不可見或難以解釋的概念，視覺化與動畫軟體有助於讓學生可以看見微觀的現象或抽象化的概念，同時，也有助於提升學生的科學理解與學習動機(Barak et al., 2011; Linn, 2003; Krajcik & Czerniak, 2007)。綜合上述，視覺化與動畫軟體對於學生在細胞分裂概念之學習困難，提供一個可行的輔助教學策略，相較於講述式教學法與教科書靜態圖片呈現，將可以更有效地提升細胞分裂教學的效益。

## 附註

本文圖 1 與圖 2 的圖片均屬於原著作權擁有者所有，本文所提到之商標的所有權亦屬於原商標擁有者所有。

## 參考文獻

- 何秋萱(2004)。Flash 融入五階段概念改變教學策略對國中生遺傳概念改變的影響。國立彰化師範大學生物研究所碩士論文，未出版，彰化縣。
- 楊坤原、張賴妙理(2004)。遺傳學迷思概念的文獻探討及其對教學的啟示。科學教育學刊，12(3)，365-398。
- Barak, M., Ashkar, T., & Dori, Y. J. (2011). Learning science via animated movies: Its effect on students' thinking and motivation. *Computers & Education*, 56(3), 839-846.
- Brown, C. R. (1995). *The effective teaching of biology*. New York, USA: Longman publishing.
- Browning, M. E., & Lehman, J. D. (1988). Identification of student misconceptions in genetics problem solving via computer program. *Journal of Research in Science Teaching*, 25(9), 747-761.
- Campbell, N. A., Reece, J. B., Urry, L. A., Cain, M. L., Wasserman, S. A., Minorsky, P. V., & Jackson, R. B. (2008). *Biology* (8<sup>th</sup> ed.). San Francisco: Benjamin Cummings.
- Dori, Y. J., & Barak, M. (2001). Virtual and physical molecular modeling: Fostering model perception and spatial understanding. *Educational Technology & Society*, 4(1), 61-74.
- Dori, Y. J., Barak, M., & Adir, N. (2003). A web-based chemistry course as a means to foster freshmen learning. *Journal of Chemical Education*, 80(9), 1084-1092.
- Hickey, D. T., Kindfield, A. C. H., Horwitz, P., & Christie, M. A. T. (2003). Integrating curriculum, instruction, assessment, and evaluation in a technology-supported genetics learning environment. *American Educational Research Journal*, 40(2), 495-538.
- Kindfield, A. C. H. (1991). Confusing chromosome number and structure: A common student error. *Journal of Biological Education*, 14(2), 137-146.
- Kindfield, A. C. H. (1994). Assessing understanding of biological process: Elucidating students' models of meiosis. *The American Biology Teacher*, 56(6), 367-371.
- Krajcik, J. S., & Czerniak, C. M. (2007). *Teaching children science in elementary and middle school: A project-based approach* (3<sup>rd</sup> ed.), N. J.: Lawrence Erlbaum Associates.
- Lazarowitz, R., & Penso, S. (1992). High school students' difficulties in learning biology concepts. *Journal of Biological Education*, 26(3), 215-223.
- Lewis, J., & Wood-Robinson, C. (2000). Genes, chromosomes, cell division and inheritance – do students see any relationship? *International Journal of Science Education*, 22, 177-197.

- Lewis, J., Leach, J., & Wood-Robinson, C. (2000a). What's in a cell? – young people's understanding of the genetic relationship between cells, within an individual. *International Journal of Biological Education*, 34, 129-132.
- Lewis, J., Leach, J., & Wood-Robinson, C. (2000b). Chromosomes: The missing link – young people's understanding of mitosis, meiosis, and fertilisation. *International Journal of Biological Education*, 34, 189-199.
- Linn, M. C. (2003). Technology and science education: Starting points, research programs, and trends. *International Journal of Science Education*, 25(6), 727-758.
- Mertens, T. R., & Walker, J. O. (1992). A paper-&-pencil strategy for teaching mitosis & meiosis, diagnosing learning problems & predicting examination performance. *The American Biology Teacher*, 49(4), 229-233.
- Oztap, H., Ozay, E., & Oztap, F. (2003). Teaching cell division to secondary school students: An investigation of difficulties experienced by Turkish teachers. *International Journal of Biological Education*, 38, 13-15.
- Smith, M. U. (1991). Teaching cell division: Students' difficulties and teaching recommendations. *Journal of College Science Teaching*, 21, 28-33.