

海洋酸化：二氧化碳扮演的角色

全文翻譯自：Murphy, J.L., and C.I. Measures. 2014. Ocean acidification: The role of CO₂. *Oceanography* 27(1):238–246, <https://doi.org/10.5670/oceanog.2014.01>.

譯者：郭晏寧^{1,2}、林卉婷¹

引用

Murphy, J.L., and C.I. Measures. 2014. Ocean acidification: The role of CO₂. *Oceanography* 27(1):238–246, <https://doi.org/10.5670/oceanog.2014.01>.

DOI

<https://doi.org/10.5670/oceanog.2014.01>

版權

本文發表於*Oceanography*，第27卷，第1期，海洋學學會的季刊。2014年海洋學會（The Oceanography Society）版權所有，翻印必究。

用途

允許複製本文以用於教學和研究。需經海洋學會（The Oceanography Society）批准，才可透過影印、轉貼或其他複製的方式對本文任何部分進行再出版、大量的系統性複製或發布。

若有任何疑問，請將信件發送至：info@tos.org或The Oceanography Society, PO Box 1931, Rockville, MD 20849-1931, USA。

1. 台灣大學海洋研究所（郭晏寧為暑期大專生計畫學生）

2. 台灣大學大氣科學系

活動目的

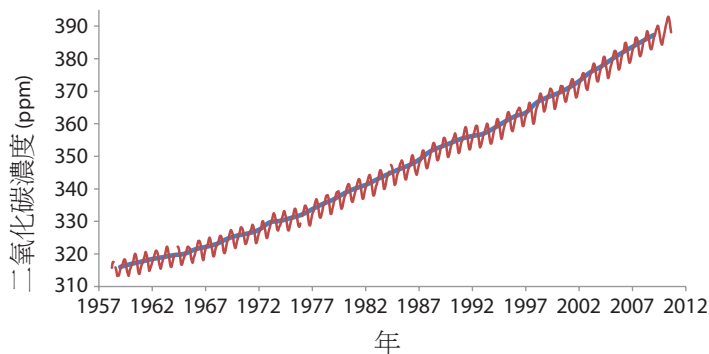
- » 了解加入二氧化碳如何改變水中的酸鹼值。
- » 了解為什麼大氣中的二氧化碳增加會導致海水的酸鹼值下降。
- » 了解人類活動為何會影響到大氣中的二氧化碳含量。
- » 了解水溫如何影響二氧化碳在水中的溶解度。

對象

本文介紹的內容適合用來教非理科的大學新生與高中生，老師們可調整教材中計算部分的多寡與難易度，也可用在教導國中生、大學生與研究生。我們在線上提供一份補充學習單的範例。

背景

在過去 250 年中，人類經由燃燒化石燃料和土地的開發與利用，大量地增加了大氣中的二氧化碳含量 (CO_2)。在工業革命初期，大氣中的二氧化碳濃度為 270~280 ppmv (Wigley, 1983; Petit et al., 1999)，但在過去50年來，於夏威夷冒納羅亞 (Mauna Loa) 山上的氣象觀測站每週測量結果顯示，大氣二氧化碳從 1960 年的 317 ppm 增加到 2011 年的 390 ppm。(http://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/mlo.html; 圖一)



圖一、在夏威夷冒納羅亞 (Mauna Loa) 測量的大氣中二氧化碳含量。藍線是大氣中二氧化碳濃度的年平均値 (單位為ppm)；紅線為每個月的二氧化碳濃度測量值 (單位為ppm)，可看出大氣中二氧化碳濃度的季節震盪。

圖片來源：<http://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/mlo.html>

碳儲存庫

地球上的碳以不同的化學形式儲存在幾種稱為儲存庫 (reservoir) 的地方 (表一)。地球上的總碳量在過去甚至是未來，都不會發生變化，碳僅會因地質、地球化學、或是在近代因為人類活動，而在不同的儲存庫之間移動。從表一中可以清楚地看出，在地球表面大部分的碳是儲存在碳酸鹽沉積物儲存庫中。碳酸鹽沉積物由貝殼、曾經生活在海洋中的動植物骨骼以及從海水中沉澱出來的無機碳組成。這些生物活著的時候，從水中吸收無機碳和鈣離子，構建碳酸鈣化合物 (CaCO_3)，這一過程稱為鈣化。(每當一個生物體的殼產生1莫耳的碳酸鈣時，也會產生1莫耳的二氧化碳。更確切地說，有多少二氧化碳保持溶解在海洋中、或者有多少二氧化碳釋放到大氣中，與海水溫度和上層大氣中二氧化碳分壓的平衡有關。) 當含碳酸鈣的生物死亡時，其碳酸鈣殼體或骨骼慢慢下沉到海底，在運輸過程中，大部分碳酸鈣溶解在海水中，但有約 35% 的碳酸鈣埋在沉積物中，成為碳酸鹽沉積物儲存庫的一部分。碳從海表向深海的轉移被稱為生物幫浦 (biological pump)，這個從海表將碳轉移到深海的速率會在大約幾個人類世代的時間尺度內有所變化。前述的過程，二氧化碳可從大氣和海洋儲存庫中移除，進入海洋沉積物中，因此海洋沉積物中埋藏的碳酸鈣便是一個可以降低大氣二氧化碳的方式。

表一、碳在地球表面不同的碳儲存庫中的含量，以十億噸的碳 (1Pg = 1 petagram = 10^{15} 公克) 為單位來表示 (資料來源：Open University Team, 1989, and Libes, 2009)。

儲存庫	碳(十億噸)
地殼和碳酸鹽沉積物	70,000,000
溶於海洋、淡水	40,000
化石燃料	7,000
土壤中的有機碳	2,000
生物體	800
大氣層	800

以碳酸鹽形式儲存在沉積物中的碳總量只有受到較大的地質活動，例如板塊構造運動，才會有顯著變化，然而這地質構造運動的發生在很長的時間尺度下（數千年到數百萬年）。於是，碳從碳酸鹽沉積物儲存庫轉移出來的速度相對緩慢且恆定，與當前大氣二氧化碳濃度升高不同。因此，儲存在碳酸鹽沉積物中的碳含量變化，不會是對我們在過去幾百年中觀察到的大氣二氧化碳濃度變化的主要影響因素。近年來因為人類燃燒化石燃料和土地利用方式變化，例如砍伐森林和荒漠化，導致大氣儲存庫中二氧化碳濃度增加。從表一中可以看出，燃燒所有化石燃料，將其中的碳以二氧化碳形式直接釋放到大氣中，如果沒有其他過程發生來移除二氧化碳，大氣中的二氧化碳含量將增加到當前數值的十倍以上。

當化石燃料燃燒後，來自化石燃料儲存庫的碳立即轉移到大氣儲存庫。而大氣層中的二氧化碳，在海表面可從大氣進入到海洋儲存庫。海氣之間的碳量分配如亨利定律所描述（參見理論部分以進行更全面的討論），隨著大氣中二氧化碳含量的增加，會有更多的二氧化碳溶解到海洋中，以在大氣和海洋儲存庫之間達到平衡。隨著人類繼續透過燃燒化石燃料將碳從化石燃料儲存庫迅速轉移到大氣中，我們需要了解地球的氣候，和地球的碳化學循環將如何受到影響。

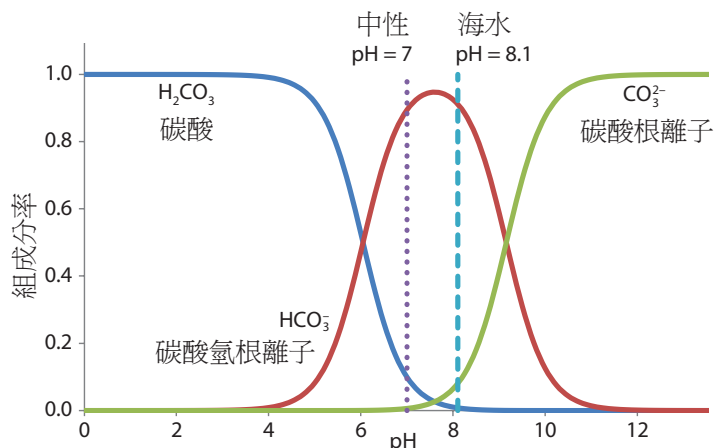
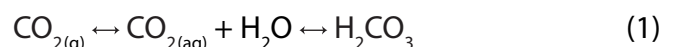
大氣中二氧化碳濃度的增加會影響全球溫度和海洋化學。地球以紅外光波段將從太陽獲得的能量輻射回太空，平衡地球的溫度。然而溫室氣體如二氧化碳、甲烷和水蒸氣，可吸收部分紅外線輻射，幫助地表維持一定溫度。雖然二氧化碳約僅佔大氣總量的 0.04%，在調節地球表面溫度方面卻非常重要，隨著大氣中二氧化碳含量的增加，加熱效應會越來越大。

大氣中二氧化碳濃度的增加也會影響海洋化學，根據亨利定律，每年排放到大氣中的二氧化碳約有三分之一溶解到海洋表面。迄今為止的所有證據都表示，隨著大氣中二氧化碳濃度的升高

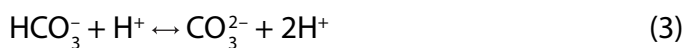
和更多的二氧化碳溶解到海洋中，海洋將變得更加酸化，並且相對於碳酸鈣而言，飽和度更低（見下文），從而減緩了生物的鈣化速度。降低鈣化速率將減少從地表海洋中移除並轉移到深海的二氧化碳量，因此也降低碳酸鹽沉積物產生的速度（二氧化碳沉降）。總而言之，人類活動將碳從化石燃料儲存庫移動到大氣、隨後移動到海洋，並降低碳轉移到碳酸鹽沉積物儲存庫的速率。

化學

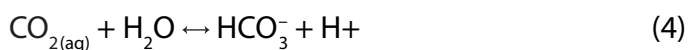
溶液的 pH 值是表示溶液中氫離子 (H^+) 濃度的量度方式， H^+ 越多，pH 值越低，溶液的酸性越強。我們根據存在溶液中氫離子濃度，將之分類為酸性 ($pH < 7$)，中性 ($pH = 7$) 或鹼性 ($pH > 7$) 溶液。當二氧化碳溶解在海洋中時，會形成幾種不同的分子化合物，其中一些形式會改變溶液的 pH 值。在平衡情況下，二氧化碳氣體分子溶於水，大部分仍維持為二氧化碳的形式，約只有 1/400 的二氧化碳會與水反應形成碳酸 (H_2CO_3 ，式1)，然後分解成碳酸氫根 (HCO_3^-) 與碳酸根離子 (CO_3^{2-})，如下列式1到式3中所示的含碳化合物。至於各物種於溶液中佔的比例，則取決於溶液的 pH 值（圖二）。



圖二、碳酸 (H_2CO_3) 於水中會形成的化學物種之間的組成分率隨著 pH 的變化。紫色虛線顯示中性溶液的 pH 值，藍色虛線為海水的 pH 值。



表層海水的平均 pH 值為 8.1（微鹼性）。如圖二所示，在 pH 值為 8.1 時， HCO_3^- 的存在量遠高於其他兩個化學物種（ HCO_3^- 和 CO_3^{2-} ）。因此，溶解的二氧化碳每次形成 H_2CO_3 分子，即解離成 HCO_3^- 和一個 H^+ 分子被釋放到水中（式4）。



二氧化碳在水中的溶解，導致溶液中 H^+ 增加，而使 pH 值降低。此外，隨著溶液 pH 值的降低， CO_3^{2-} 的含量也會減少（圖二），因而降低了水的緩衝能力（後面有更多說明）。使用 CaCO_3 來構建貝殼和骨骼的生物，例如珊瑚、鈣板藻和有孔蟲，特別容易受到 pH 值降低而導致的 CaCO_3 飽和態降低所影響。 CaCO_3 的飽和態是 Ca^{2+} 的濃度乘以 CO_3^{2-} 的濃度，隨著更多的二氧化碳溶解到海洋中，更多的 H^+ 被釋放，降低了水的 pH 值，從而降低了 CO_3^{2-} （圖二），進而導致碳酸鈣飽和態的降低。因此，過多二氧化碳溶解在海水中將增加生物形成 CaCO_3 結構的困難度，降低生物幫浦的速率，並減緩碳酸鹽沉積物的產生。

隨著大氣中二氧化碳濃度通過化石燃料的燃燒和土地利用改變而增加，更多的二氧化碳通過擴散和劇烈混合（例如海浪）等過程，從大氣轉移到海洋表面以達到亨利定律所定義的平衡，然而海洋是一個複雜的系統，同時受到物理、生物和化學過程的各種影響。例如：水與空氣界面處的物理混合，導致海洋和大氣之間的氣體交換；生物呼吸作用下會釋放二氧化碳到水中，形成溶解態的二氧化碳 $\text{CO}_{2(\text{aq})}$ ，並且如上所述，每 1/400 的溶解態二氧化碳將會轉化為 HCO_3^- 和 H^+ ，進而降低海洋 pH。

儘管海洋中發生了許多物理、生物和化學過程，但由於化學緩衝作用，海水的 pH 在短時間內保持相對恆定。在海洋中發生化學緩衝是因為存

在許多能夠吸收 H^+ 的離子（包括例如 HCO_3^- ， CO_3^{2-} ， HSO_4^- ）。當在海洋中加入酸（ H^+ ）時，上述的式2和式3中的反應可以從右向左移動，從而降低 H^+ 的濃度。在海洋中，緩衝能力或溶液吸收 H^+ 的能力是以鹼度來測量，鹼度簡單地說就是溶液中存在的鹼的總和。當添加 OH^- 時，也會有等效的過程緩衝海水變成鹼性。然而，緩衝能力是有限的，並不能防止海洋 pH 值不產生任何變化，緩衝能力只降低了 pH 值變化的幅度。如果添加足夠的 H^+ （或 OH^- ），使其超過海洋的緩衝能力，這將導致海洋的 pH 值比目前更快地變化，降低環境穩定性，而生活上需要相對恆定 pH 值的生物，其生存可能受到影響。

針對實驗活動的問題

- » 為什麼大氣中二氧化碳的增加會改變海水的 pH 值？
- » 水溫會影響水體吸收二氧化碳的量嗎？

材料

講師示範或五個學生為一組所需的材料：

- » 12 個輪胎氣閥
- » 12個1公升的寶特瓶，含蓋子
- » 5個 500 mL量筒
- » 5公升熱水（ $\sim 50^\circ\text{C}$ ）
- » 5公升冷水（ $\sim 10^\circ\text{C}$ ）
- » 5個簡易胎壓計
- » pH 試紙或手持式 pH 計（可選擇性使用）
- » 小型（5磅或2.27公斤）二氧化碳氣瓶帶壓力調節器，軟管和輪胎氣嘴接頭（在機車改裝行或五金行可以買到氣嘴接頭）
- » 室溫下1.5公升自來水
- » 室溫下1公升海水（或小蘇打溶解在自來水中作為緩衝溶液；詳情請見下文）
- » 甲基紅 pH 指示劑染料（ $\text{C}_{15}\text{H}_{15}\text{N}_3\text{O}_2$ 溶在0.1%乙醇中；VWR目錄號AA38698-AE CAS # 493-52-7）
- » 鑽壓機或鑽頭（在實驗之前改造瓶蓋使用）

注意：可以使用家用汽水製造機完成此活動的修改版本。雖然家用汽水製造機不允許我們來測量瓶內的氣體壓力，但對於那些關注氣瓶安全的教師來說，使用家用汽水製造機可能是更好的選擇。根據型號的不同，這些汽水製造機通常會將瓶頂空間加壓至30至55 psi。

活動

在實驗之前，先組裝好瓶蓋氣閥組件（圖三）。首先，必須先在塑膠瓶蓋上鑽出適當大小的洞，使得可以插入輪胎氣閥頭，瓶蓋內外皆有橡膠墊圈，達到氣密與水密效果。鑽頭應稍大於氣閥頭外徑，以確保組裝方便。最後使用扳手旋緊蓋子上的輪胎氣閥頭，以防活動期間洩漏。

講師示範

甲基紅指示劑在中性或是鹼性環境中($\text{pH} \geq 6.2$)會呈現黃色，在酸性環境下($\text{pH} < 4$)則會呈現紅色，在 pH 值為4到6 之間則呈現橘色。注意：因為每個地方的水質不同，有些區域的淡水本身已具有高緩衝能力，因此為呈現最佳實驗結果，必須調整所需預留的頂空體積（也就是加入的二氧化碳量），我們建議老師們提早測試，以配置最適當的水與頂空體積。

步驟1：準備/取水

為確保達到示範效果，如果無法取得海水，請於每升水溶解約30克（2湯匙）碳酸氫鈉（ NaHCO_3 ；小蘇打），製成人工緩衝溶液。小蘇打應完全溶解在水中，以免殘留可見的固體痕跡。



圖三、瓶蓋改裝所需要的零件照片。左邊是一個完全組裝好的瓶蓋，右邊是輪胎氣嘴的各項零件。瓶蓋夾在兩個黑色密封墊之間，壓緊式輪胎氣嘴可以在線上購買或者在汽車配件商店購買。

注意：碳酸氫鈉 (NaHCO_3) 是溶液中的緩衝劑。當溶解時， NaHCO_3 離解成鈉離子 (Na^+) 和碳酸氫根離子 (HCO_3^-)，當二氧化碳溶解到水中時， HCO_3^- 提供 H^+ 的吸收機制來增加水的緩衝能力。淡水組則根據使用的是去離子蒸餾水（譯者註：無緩衝能力）或自來水，並受到自來水的初始鹼度影響，實際需要的小蘇打水將會略有不同。

步驟2：淡水瓶

標記瓶子。加入約1000毫升的室溫水，以及約1毫升的甲基紅指示劑。（譯者註：亞洲常見的700毫升瓶中，建議加入500毫升的室溫水跟約1毫升的甲基紅指示劑。）

步驟3：海水瓶

標記瓶子。加入約1000毫升的室溫海水（或小蘇打粉緩衝水溶液）和約1毫升的甲基紅指示劑。（再次提醒，成功演示所需的實際水量將根據瓶子類型略有不同，因此在演示前請進行測試。）

步驟4：二氧化碳添加

固定蓋子（鎖緊），並向每個瓶子的頂部空間添加大約30psi（兩個大氣壓力）的二氧化碳。注意：如果在加入二氧化碳時沒有搖動淡水瓶，可以觀察到二氧化碳從頂部空間擴散到液體的表面，造成在黃色淡水最表層中形成微小紅色漩渦。

步驟5：劇烈混合

觀察氣體擴散進入水溶液的作用後，劇烈搖動瓶子以顯示劇烈混合。根據學生的程度，教師可以詢問哪些過程（譯者註：擴散、混和、溶解、解離）正在控制二氧化碳從頂部空間到水的運動，在搖動造成混合之前，擴散是主要的氣體交換過程。淡水瓶會變紅，而海水瓶保持橘黃色（圖四）。其原因是在室溫下，二氧化碳溶解度，不足以克服海水的緩衝能力，並且將 pH 值降



圖四、使用甲基紅指示劑染料來做緩衝的示範。左邊的瓶子為鹽水組，右邊的瓶子為淡水組。

低到4以下（指示劑變色的臨界值）；淡水組的緩衝能力很小或沒有，因此 pH 值會立即下降到足以讓指示劑改變顏色。我們也可以透過增加 pH 值將淡水返回黃色：倒掉瓶子中約三分之一的水（以增加空氣與水的氣體交換），然後，擠壓瓶子三到四次，用室內空氣交換瓶子頂部空氣，更換瓶蓋上的蓋子並劇烈搖晃。有時需重複五次或更多次，瓶中的水才會開始變回黃色。請參考線上提供的學習單的範例。

動手做科學—實驗活動

這個實驗最適合二到五名學生為一個小組。所需總時間取決於學生完成問題和計算細節的時間，但可以在三十分鐘到兩小時之間完成。線上補充學習單通常需要兩個小時，因為它包含了許多計算。

一般常見的物質（例如糖，鹽）在熱水中比在冷水中更易溶解，但對於像二氧化碳這樣的氣體則是相反。這個活動測試水溫對氣體溶解度的影響。可選擇使用 pH 試紙或 pH 酸鹼度計。如果教學過程包含實際 pH 值測量（而不僅僅是計算），請讓學生在加入二氧化碳之前先進行 pH 值讀數。

注意：由於使用的瓶子的體積變化，受到及當

地水源的 pH 和緩衝能力而改變（例如來自具有白堊土區域的水已經具有高緩衝能力），此演示所需的頂空量（即需要獲得所需效果的二氧化碳量）將有所不同。建議教師先提前用取得的水樣做測試，來確定所需的頂空實際體積。

步驟1：準備瓶子

每組需要兩瓶。在一瓶中加入0.8公升溫水（約50°C），在另一瓶中加入0.8公升冷水（約10°C）選擇進行定量實驗的老師，請先要求學生測量兩瓶的初始 pH 值。（譯者註：溫熱水組用60°C 水差異會更顯著。）

步驟2：蓋上蓋子

蓋上蓋子，不要全部蓋緊並擠壓瓶子以從頂部空間移除所有空氣。移除完空氣後旋緊蓋子，該步驟對於觀察兩個瓶子之間的二氧化碳吸收差異是重要的。

注意：現在是做出一些假設並向學生提問的好時機（請參閱線上補充教材取得實驗室學習單）。

例如，我們假設瓶中只有水（即沒有二氧化碳溶解到水中），並要求學生計算瓶中的 pH 值（7.0）和二氧化碳莫耳數（0莫耳）。

步驟3：添加二氧化碳

將瓶子帶到講師處，加入30psi的二氧化碳。

（使用氣體調節器控制釋放到每個瓶子中的氣體壓力。）

注意：填充後，組中的所有學生都應該觸摸瓶子，並確認瓶子是充足氣的（瓶子會因為充滿氣體而變得比較堅硬）。

步驟4：測量壓力

學生可以使用手持式輪胎壓力表測量瓶子中的初始壓力。請注意，使用的輪胎壓力表必須進行良好密封，以避免瓶子中的氣體損失過多，且壓力只應測量一次，因為此測量過程會導致瓶子中

的氣體損失。在活動的這一步驟，可以使用理想氣體方程式計算瓶中二氧化碳的莫耳數（詳見下文）。

步驟5：劇烈混合

劇烈搖動瓶子，觀察兩個瓶子的壓力下降情形。當二氧化碳溶解到水中時，兩個水瓶會被壓縮，冷瓶被壓縮情況較溫水瓶明顯地，代表冷水瓶頂空的壓力減少較多（圖五）。如果使用 pH 值試紙，學生可以讀取二氧化碳溶解後的讀數，並反映計算和實際 pH 值變化的原因（表二）。（pH 值的實際變化取決於使用的溫度和水量。）

注意：藉由做一些假設，學生可以計算每種液體吸收的二氧化碳量、每瓶中釋放的 H⁺ 的莫耳數和隨後的 pH 值。引導學生的問題範例，請參閱線上補充材料。爲了讓學生計算出熱水瓶和冷水瓶之間水的 pH 值的變化，我們爲學生提供每瓶頂部空間吸收二氧化碳的百分比。程度更好的學生還可以測量瓶子體積的變化，以估算溶解在水中的二氧化碳量（表三）。測量瓶子體積的方法如下，首先，我們假設二氧化碳吸收後瓶子頂部空間的壓力等於大氣壓力，（輪胎壓力不夠靈敏，不足以精確測量到剩餘二氧化碳的壓力），透過測量瓶子浸在水中時所取代的水的體積來得



圖五、左邊的瓶子裝的是溫熱水，右邊的瓶子裝的是冰水。先將頂部空間中原有的空氣擠出後，將兩個瓶子裝滿二氧化碳後搖動混和。注意兩個瓶子之間的壓力差異。

到瓶子的體積。使用學生計算的體積，或利用表三中的值，學生可以計算出二氧化碳從頂部空間溶解到水中的量（參見理論部分中建議的計算方程式）。

人類和二氧化碳

這個教案除了幫助學生了解大氣中的二氧化碳對海洋 pH 值的影響外，還爲學生提供讓他們可以探索人類活動如何導致大氣中二氧化碳濃度的增加。目前有許多網站可供學生計算他們的碳足跡，而在這個教學活動中，我們建議讓學生進行實際的紙筆計算，深入理解人類增加大氣中的二氧化碳濃度，影響海洋環境之關聯。

首先，我們要求學生列出日常生活中會產生二氧化碳的各種方式。從使用汽車、用電、到呼吸，答案可能有所不同。然後，學生們將通過網站查詢，來了解每個過程中釋放的二氧化碳量。例如，人類每天呼吸大約1公斤的二氧化碳，相

表二、水樣pH測試範例，在1公升的保特瓶中，注入 0.8公升夏威夷大學馬諾阿分校的水，在頂空中加入二氧化碳前、後測量的pH 值。請注意，在文章中的海水與淡水實驗相比，如果只加入0.8公升的水，而不是學習單中建議的1公升時，即使是海水瓶組的pH值已下降到足以導致水色變化成紅色。請記住，實際的pH值會根據水的來源而有所不同，但很明顯地，頂空加入二氧化碳後，水中 pH值會顯著下降。

	加入二氧化碳前的pH值	加入二氧化碳後的pH值
海水	8.0	5.6
淡水	8.1	5.5
熱水 (50°C)	8.1	5.2
冷水 (12°C)	8.1	5.0

表三、熱水和冷水後瓶體積的變化。瓶子體積的減少是因為頂部空間中的氣體溶解到水中，導致頂部空間體積減小。（瓶子的初始體積爲1,000 cm³，用10°C的水搖動瓶子後，瓶子的體積下降到 900 cm³，瓶子的體積減少了100 cm³，總共是瓶頂空間50%的變化量。）

溫度	體積變化量	改變百分比
10°C	100 cm ³	50%
60°C	20 cm ³	10%

當於每天22.7莫耳的二氧化碳。學生還可以檢驗化石燃料對大氣二氧化碳的影響。我們假設燃燒一加侖（3.8升）汽油釋放8.8公斤二氧化碳（參見<http://www.epa.gov/otaq/climate/420f05002.htm>），學生可以評估具有不同效能的汽車所釋放二氧化碳的量。在補充學習單中，我們比較了三種類型的汽車，並計算每輛汽車在一年內每天行駛16公里時釋放的二氧化碳量。根據學生的年齡，學生可能對於計算他們每天通車往返學校過程中產生的二氧化碳排放量會有更大的共鳴。這個問題的延伸討論如下，美國每天消耗18,810,000桶石油，學生可以計算出在一天和一年內釋放到大氣中的二氧化碳的莫耳數。

另一項活動則是探討電力消耗對二氧化碳排放的影響。使用EPA（譯者註:United States Environmental Protection Agency 美國環境保護署）關於發電和電源的數據，可以計算使用燈泡和電器釋放到大氣中的二氧化碳量。例如，在夏威夷，石油是主要的電力來源，以0.609公斤/千瓦·小時的速度產生二氧化碳（EPA eGRID，見http://www.epa.gov/cleanenergy/documents/egridzips/eGRID2010V1_1_year07_SummaryTables.pdf），請學生統計教室裡燈泡的數量和功率，即可計算在這個課程進行的時間內，會釋放多少二氧化碳來為我們班級的燈供電。此練習也可以延伸來計算使用其他電子設備時所需釋放的二氧化碳量。這些例子提供教師可以使用的一些活動，以便學生更加了解在不同的人類活動中所釋放的二氧化碳量。學生可以使用大量免費線上碳足跡計算器，包括來自The Natural Conservancy (<http://www.natural.org/greenliving/carboncalculator>) 的計算器，以計算他們每年產生的二氧化碳當量噸數。也可以將位於地球上不同儲存庫中的碳量從Pg C轉換為等效的二氧化碳。這種轉換可以直接比較儲存庫和上面的計算，例如油燃燒釋放的二氧化碳量。

$$1 \text{ Pg C} = 1 \text{ Gt C} = 10^9 \text{ 噸C}$$

$$1 \text{ 噸C} = 3.67 \text{ 噸 二氧化碳 當量}$$

例如，以下等式可用於將海洋儲存庫中的碳量（4,000 PgC）轉換為二氧化碳噸當量。（譯者註：下面算式介紹質量與莫耳當量之間的換算，先將碳的質量，換算當量莫耳數，再求出此當量莫耳數的二氧化碳質量，以噸為單位來表示，3.67是把二氧化碳莫耳重量44除以碳的莫耳重量12，四捨五入而來。）

$$4,000 \text{ Pg C} \times 10^9 \text{ 噸 C} / 1 \text{ Pg C} = 4 \times 10^{12} \text{ 噸 C}$$

$$4 \times 10^{12} \text{ 噸C} \times 3.67 \text{ 噸 二氧化碳 當量} / 1 \text{ 噸C} = 1.5 \times 10^{13} \text{ 噸二氧化碳 當量}$$

理論

亨利定律

亨利定律指出，在定溫下，溶液中的氣體量與液體平衡時的氣體分壓成正比。（例如在瓶頂部分，我們演示的條件下，瓶頂空間中的氣體分壓等於測量的壓力，因為我們在添加二氧化碳之前排出了所有其他氣體）。增加瓶頂氣壓會增加氣體的溶解度，而增加溶液的溫度會降低氣體的溶解度。

這個實驗展示了亨利定律中溫度影響溶解度的觀點：水溫的降低，增加了二氧化碳在溶液中的溶解度。此外，透過使用固定溫度的水，但改變注入頂部空間的氣體壓力，也可以證明亨利定律中壓力影響溶解度的觀點。這個教案活動是海洋大氣相互作用的簡化版本，突出了不同溫度而非壓力如何影響二氧化碳在水中的溶解度。

理想氣體方程式

理想氣體方程式（式5）可用於計算瓶頂空間中二氧化碳的莫耳數，其中 P = 壓力（kPa）， V = 體積（L）， n = 莫耳（mole）， R = 氣體常數 = 8.314（J mole⁻¹K⁻¹）， T = 溫度（K）。

$$P \times V = n \times R \times T \quad (5)$$

已知1公升瓶子頂部空間的體積、室溫、氣壓，可以計算瓶子頂部空間中的氣體莫耳數。在1大氣壓（101.3kPa或14.7psi）和25°C下，1莫耳氣體的體積為23.9公升。（標準溫度和一大氣壓下理想氣體的體積，或standard temperature and pressure (STP) [0°C]，為22.4升。）式6顯示如何計算室溫下1升瓶子中灌入0.8升水，其餘頂部空間中的氣體莫耳數（6a），以及在瓶子裝滿30psi的二氧化碳之後的氣體莫耳數（6b）。

$$\frac{(101.3\text{kPa}) \times (0.2\text{L})}{(298\text{K}) \times (8.314\text{J moles}^{-1}\text{K}^{-1})} = 0.008 \text{ 莫耳的氣體} \quad (6a)$$

$$\frac{(206.7\text{kPa}) \times (0.2\text{L})}{(298\text{K}) \times (8.314\text{J moles}^{-1}\text{K}^{-1})} = 0.016 \text{ 莫耳的氣體} \quad (6b)$$

在使用氣瓶將二氧化碳添加到瓶子的頂部空間之後，瓶子中的壓力大約加倍（室壓為14.7psi，並且我們將其增加至約30psi）。因此，頂部空間中的氣體莫耳數也加倍。

pH值

溶液的pH值是可用氫離子濃度（[H⁺]）定義。溶液中存在的H⁺越多，溶液的pH越低。在數學上，使用式7計算pH值。

$$\text{pH} = -\log([\text{H}^+]) \quad (7)$$

在25°C的純水中，[H⁺] = 1.0 × 10⁻⁷ M（M = 莫耳濃度 = 每公升溶液中溶質的莫耳數），其 pH 值為 7.0。在實驗活動中，學生先計算每個瓶子頂部空間的氣體莫耳數（式6a，b）。通過用30 psi的純二氧化碳氣體填充瓶子的頂部空間，頂部空間中的氣體壓力加倍，使頂部空間中的氣體量增加一倍（式8）。

頂部空間的0.008莫耳的氣體在 15 psi × 2 = 30psi（氣體壓力倍增）下，有

$$0.008 \times 2 = 0.016 \text{ 莫耳的氣體} \quad (8)$$

由上述計算得到瓶頂空間充滿了純淨的二氧化

碳氣體時，共有0.016莫耳的二氧化碳。然後學生可以計算瓶中0.8升水的 pH 值（式9）。為簡單起見，我們要求學生假設二氧化碳氣瓶加入瓶中的所有二氧化碳都會從頂部空間溶解到水中。再進一步假設溶解在水中的所有二氧化碳都變成 HCO₃⁻，因此0.016莫耳的H⁺會釋放到0.8升水中。使用式9，可以計算釋放的H⁺的莫耳濃度。

$$0.016 \text{ 莫耳 H}^+ / 0.8 \text{ 升} = 0.02 \text{ 莫耳濃度(M)H}^+ \quad (9)$$

計算結果顯示，經由二氧化碳溶解，導致瓶中的H⁺總濃度比純水還多了0.02莫耳濃度（公式9），即[H⁺] = 1.0 × 10⁻⁷ + 0.02 = 0.02。使用公式7來計算 pH 值：-log(0.02) = 1.7。

注意：從H₂O解離的H⁺不會改變溶液 pH 值，pH 值改變主因是從H₂CO₃解離出來的大量H⁺。

但在水中的實際 pH 值並非1.7，因為並不是所有溶解的二氧化碳都會分解成 HCO₃⁻ 和H⁺。如前所述，水中的二氧化碳氣體 (CO_{2(g)}) 大部分變成了溶解態的二氧化碳 (CO_{2(aq)}) 實際上其中只有1/400變成了H₂CO₃，並在此過程中釋放出H⁺。因此，為了準確計算實驗中的 pH 值，有必要將計算出的[H⁺]除以400。當我們假設瓶頂空間中的所有二氧化碳都溶解到水中，並經由式10到12，可以較精確的計算出溶液的 pH。

$$\text{瓶頂：} 0.016 \text{ 莫耳 CO}_{2(g)} \rightarrow \text{CO}_{2(aq)} \quad (10)$$

$$0.016 \text{ 莫耳 CO}_{2(aq)} \times \frac{1 \text{ 莫耳 H}_2\text{CO}_3}{400 \text{ 莫耳 CO}_{2(aq)}} \times \frac{1 \text{ 莫耳 HCO}_3^-}{1 \text{ 莫耳 H}_2\text{CO}_3} \times \frac{1 \text{ 莫耳 H}^+}{1 \text{ 莫耳 HCO}_3^-} \quad (11)$$

$$= 4 \times 10^{-5} \text{ 莫耳 H}^+$$

$$\text{pH} = -\log(4 \times 10^{-5} \text{ 莫耳 H}^+ / 0.6\text{L}) = 4.4 \quad (12)$$

根據實際的實驗室活動，可以使用表三中給出的體積百分比變化（式13和14）計算不同水溫的pH變化。

$$4 \times 10^{-5} \text{ 莫耳 } H^+ \times 10\% (\text{在 } 50^\circ\text{C}) = 4 \times 10^{-6} \text{ 莫耳 } H^+, \text{ pH} = 5.4 \quad (13)$$

$$4 \times 10^{-5} \text{ 莫耳 } H^+ \times 50\% (\text{在 } 10^\circ\text{C}) = 2 \times 10^{-5} \text{ 莫耳 } H^+, \text{ pH} = 4.7 \quad (14)$$

實用的網路資源

- » <http://www.epa.gov/climatechange/fq/emissions.html>
- » <http://cdiac.ornl.gov/pns/faq.html>
- » <http://www.oceanacidification.noaa.gov>

參考資料

- Levitus, S., J. Antonov, T. Boyer, and C. Stephens. 2000. Warming of the world ocean. *Science* 287:2,225–2,229, <https://doi.org/10.1126/science.287.5461.2225>.
- Libes, S. 2009. *Introduction to Marine Biogeochemistry*, 2nd ed. Elsevier, Burlington, 928 pp.
- Open University Team, eds. 1989. *Seawater: Its Composition, Properties and Behavior*. 130 pp.
- Petit, J.R., J. Jouzel, D. Raynaud, N.I. Barkov, J.-M. Barnola, I. Basile, M. Bender, J. Chappellaz, M. Davis, G. Delaygue, and others. 1999. Climate and atmospheric history of the past 420,000 years from the Vostok ice core, Antarctica. *Nature* 399:429–436, <https://doi.org/10.1038/20859>.
- Wigley, T.M.L. 1983. The pre-industrial carbon dioxide level. *Climatic Change* 5(4):315–320, <https://doi.org/10.1007/BF02423528>.