

生物科

科別：生物科

組別：高中組

作品名稱：蟑螂之缺氧逆境生理反應和耗氧量的測定方法

關鍵詞：蟑螂、耗氧量、缺氧逆境

編號：040721

學校名稱：

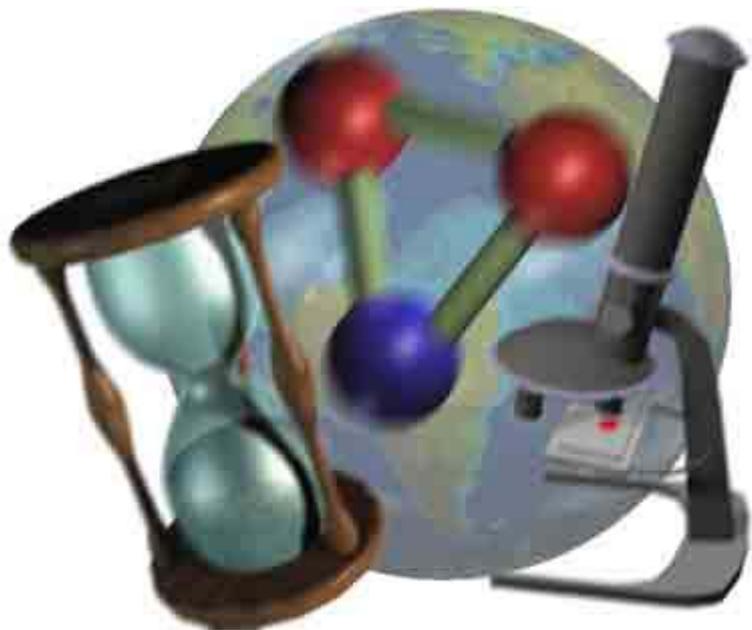
台北市立大同高級中學

作者姓名：

張凱淳、陳曄瀚、李彥翰、陳柏妮

指導老師：

蔡任圃



摘要

蟑螂是一種古老的生物。看起來並不顯眼的牠，竟然存在至少三億年之久，可見其適應環境的能力是其他已絕跡的生物所望塵莫及的。至於這三億年牠是如何度過的我們並不清楚，但我們可以從觀察蟑螂面對逆境的反應著手，期望透過本實驗來找出答案。

我們藉著溺水使蟑螂面臨缺氧逆境，計算達到昏迷所需的缺氧時間，以及蟑螂昏迷後到甦醒所需的時間，發現蟑螂甦醒所需的時間(平均 \pm 標準誤：1787.4 \pm 117.3 秒)，遠大於達到昏迷所需的缺氧時間(270.7 \pm 18.7 秒)。此外，藉由間隔 90 分鐘的重複溺水，發現在第二次與第三次溺水產生昏迷所需的缺氧時間，比第一次溺水長，也就是曾有溺水經驗的蟑螂，較不容易因缺氧而昏迷。此外蟑螂昏迷後甦醒所需要的恢復時間，無論是第一次、第二次還是第三次溺水，皆無明顯改變。

我們利用氧化鈣等藥品與器材，設計出一套方便又有效的方法，可以測量蟑螂等小動物的耗氧量。結果發現一隻蟑螂的耗氧量其實並不高(約 0.294 \pm 0.019 毫升/小時 公克, n = 12)，也就是說，就算在氧氣極少的環境下，也可以生存一段時間，這是一般動物所無法達到的境界。也許，以上那兩點可能就是蟑螂可從三億年前存活至今而不被滅絕的原因吧！

我們藉由自行設計架設的器材設備，已經發現許多有趣的現象，包含蟑螂的呼吸商(respiratory quotient)在活動期會下降，顯示蟑螂在活動期是以脂質為主要的能量來源。此外，經歷缺氧逆境後的蟑螂，其耗氧量會增加，但其呼吸商會下降，顯示出蟑螂可因應逆境而改變其生理狀態。以上的結果皆可說明，我們自行設計架設的測量設備，可以用來解開蟑螂生存秘訣的謎團。

壹、研究動機

我們原本設計一個迷宮，將蟑螂置於水中的迷宮，觀察其尋找出口的過程，以探討蟑螂的辨識與記憶能力。不料，一段時間後，竟然發現牠(蟑螂)竟然一動也不動的漂在水面上，於是我們趕緊將這隻溺死的蟑螂撈起。後來，原本以為死亡的蟑螂居然在垃圾桶中開始覓食！「打不死蟑螂」這句話牠們真是當之無愧啊！這個現象引發了心中許多的問號：蟑螂在缺氧多久會昏迷？又多久會甦醒？經常在缺氧逆境中的蟑螂，會不會產生適應的現象？這些問題促使我們著手設計實驗，期望能獲得解答。

蟑螂等小型動物的耗氧量非常難以測量，特別是在高中的生物實驗室中。若能發展一個簡易有效的測量方式，對於小型動物代謝率與耗氧量的瞭解，非常有幫助。我們在高中化學課本中，曾經學過氧化鈣與水作用可形成氫氧化鈣，氫氧化鈣可吸收空氣中的二氧化碳，產生碳酸鈣。我們也在高中生命科學第三章第三節(光合作用與呼吸作用)中學到，葡萄糖氧化後可產生二氧化碳。在與老師討論後，我們似乎可以利用在化學與生命科學所學的知識，設計發展一套簡單的設備，可方便且有效地測量小型動物(包含蟑螂)的耗氧量。

若我們能建立一套測量蟑螂耗氧量的方法，在蟑螂缺氧逆境(溺水)時，對於昏迷與甦醒時的生理狀態能更加瞭解，可使我們瞭解蟑螂的代謝特性，更進一步解開為何蟑螂可以存活三億年之久的謎團。

貳、研究目的

很多的殺蟲劑都是透過阻斷昆蟲的代謝路徑，而達到滅殺的效果。因此瞭解蟑螂的代謝特性，可以幫助人類發展更有效的殺蟲策略。我們希望透過觀察蟑螂在缺氧逆境時的反應，瞭解缺氧逆境對蟑螂的影響以及傷害。我們同時也試著測量蟑螂的耗氧量，以獲知蟑螂在缺氧逆境時的代謝狀態，但因小型動物的耗氧量不好測量，且器材昂貴，所以我們想試試看能不能找出一個較簡單、便宜又準確的方法，因此著手設計我們的實驗架構，並逐步實現。

參、研究設備及器材

一、實驗動物：

美洲蟑螂(*Periplaneta americana*)的成年雄蟲，取自國立臺灣師範大學生物學系昆蟲生物學實驗室。蟑螂培養於飼養箱中，每週換水與食物(白麵包)兩次，飼養於 15 20 的室內環境。

二、蟑螂在缺氧逆境時，昏迷與甦醒時間之計算：

攝影機、錄放影機、錄影帶、飼養箱、剪刀、膠帶、水槽、計時器、以 OHP 透明片製成之透明盒子、底片盒蓋子、橡皮筋。

三、蟑螂耗氧量之測定：

唧筒、吸管、染色墨水、氧化鈣、衛生紙、橡皮筋、凡士林、橡膠製的假蟑螂。

肆、研究過程或方法

一、蟑螂在缺氧逆境時，昏迷與甦醒時間之計算：

- (一)、以 OHP 透明片、底片盒蓋與橡皮筋製成一筒狀盒子(圖一 A)，並在其壁上挖出一隙縫，使水可滲入。
- (二)、測量並紀錄蟑螂體重，將其關入自製的筒狀盒子中，一盒子裝一隻蟑螂(圖一 B)。
- (三)、將一水盆裝滿水，在水盆上方架設攝影機，使水盆與周邊桌面皆攝入於攝影機的視野中。
- (四)、同時將蟑螂連同筒狀盒子浸入水中，並且開始錄影。
- (五)、確定蟑螂因溺水缺氧而昏迷不動時，立刻將其夾起，並六腳朝天式倒放於水盆附近的桌面上(圖一 C)。
- (六)、當全部蟑螂皆甦醒時，以同一批蟑螂重新進行步驟(三)至步驟(五)的過程，每次相隔 90 分鐘，重複三次。
- (七)、將錄影帶播放以進行分析，測量蟑螂昏迷所需的缺氧時間，以及甦醒所需的時間(以蟑螂可自行翻身而六腳著地做為蟑螂甦醒的指標)。

二、耗氧量之測定：

- (一)、先將氧化鈣用衛生紙包起，滴上數滴水，放入 A 與 C 組的唧筒內(圖二 A)，B 組則放入一衛生紙團(作為對照組)。

- (二)、在 A 組與 B 組唧筒內放入已秤重的蟑螂，C 組放入一假蟑螂(作為對照組)。
- (三)、將吸管插入唧筒，並用凡士林將可能漏氣的地方封住。
- (四)、將吸管前端吸入染色墨水，每 30 分鐘測量液面在吸管中上升的高度。
- (五)、利用液面在吸管中的高度變化，可推算出唧筒內空氣體積的變化(液面移動 8.8 公分代表體積改變 1 毫升)。
- (六)、透過以下的式子，可以計算出蟑螂在單位時間中耗氧量與排出二氧化碳量。

A 組(蟑螂 + 氫氧化鈣)水面上升的體積 = (蟑螂耗去的氧氣量) + (唧筒內二氧化碳體積)

B 組(蟑螂)水面上升的體積 = (蟑螂耗去的氧氣量) - (二氧化碳產生量)

C 組(氫氧化鈣)水面上升的體積 = (唧筒內二氧化碳體積)

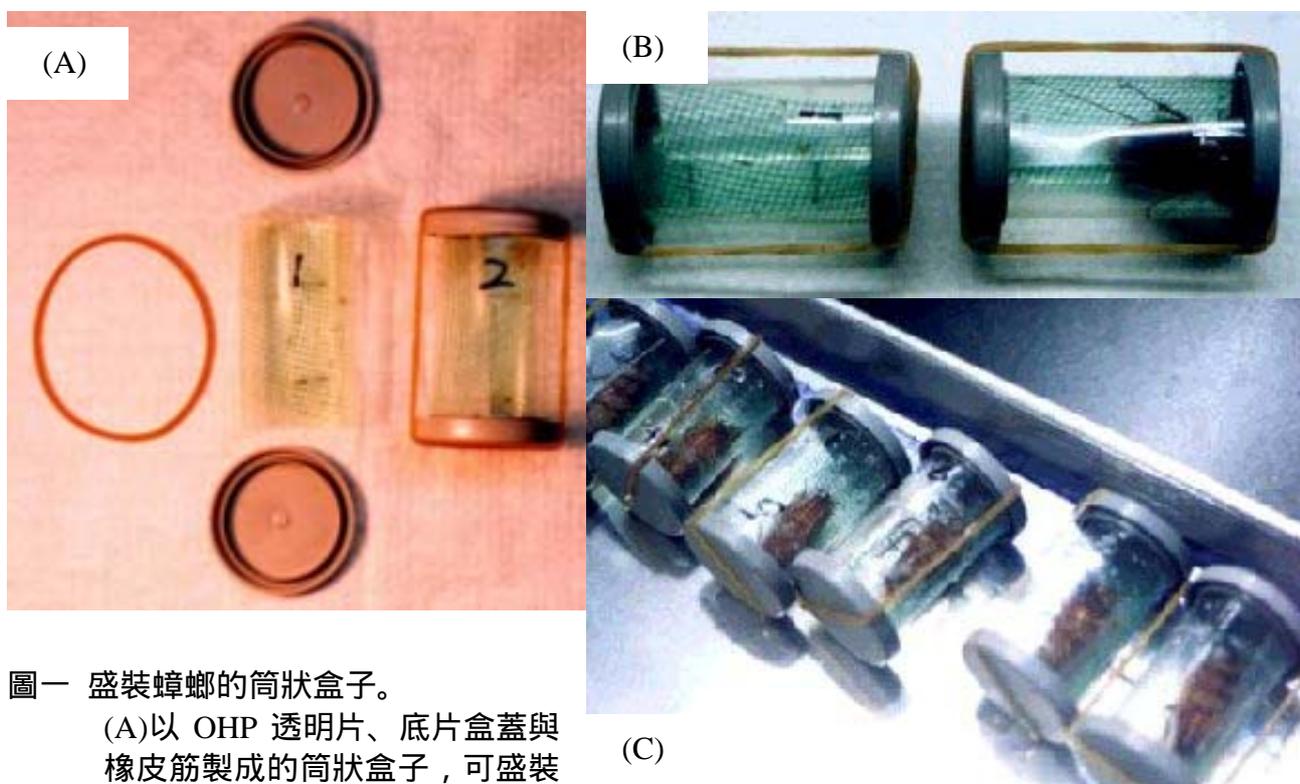
蟑螂耗氧量 = A 組水面上升的體積 - C 組水面上升的體積

蟑螂排二氧化碳量 = 蟑螂耗氧量 - B 組水面上升的體積

= (A 組水面上升的體積 - C 組水面上升的體積) - B 組水面上升的體積

三、在缺氧逆境後，蟑螂耗氧量之測定：

- (一)、測量並紀錄蟑螂體重，將其關入自製的筒狀盒子中，一盒子裝一隻蟑螂。
- (二)、將蟑螂浸於水中，使蟑螂溺水，待蟑螂昏迷後取出。
- (三)、將昏迷的蟑螂裝入測量耗氧量的唧筒中，進行耗氧量之測量，其步驟如同「二、耗氧量之測定」。
- (四)、若要測量重複溺水三次之蟑螂的耗氧量，先秤重後，再將蟑螂連續溺水達到昏迷三次(每次相隔 90 分鐘)，在蟑螂第三次昏迷後，重複(二) (三)步驟。

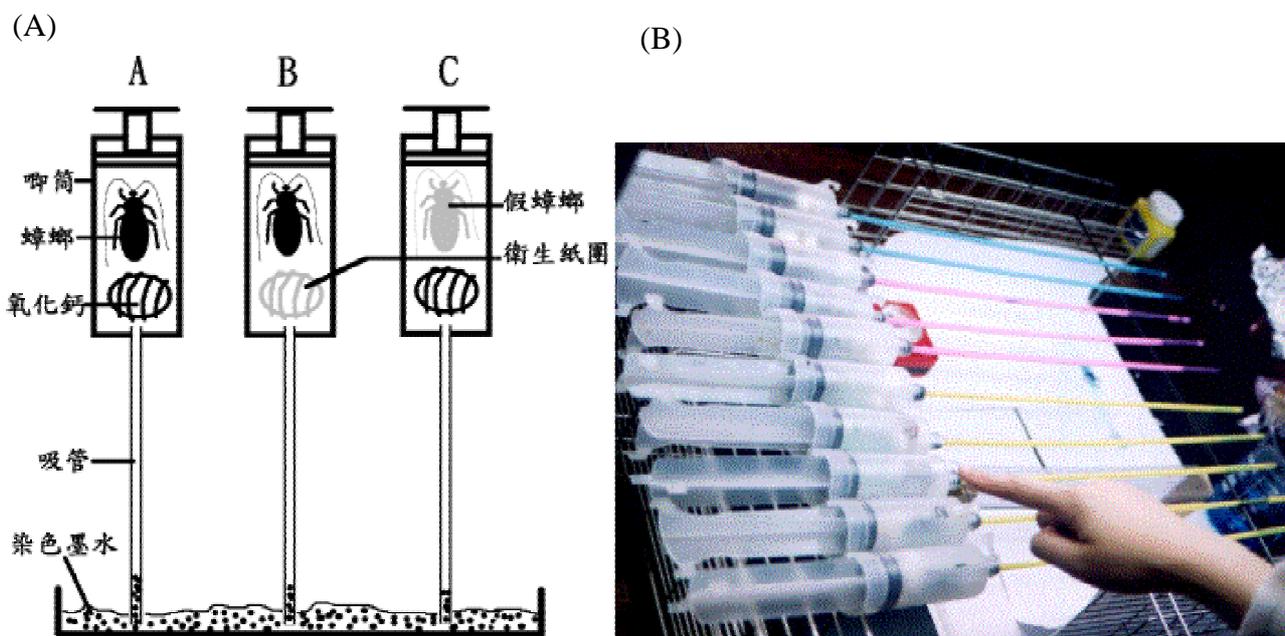


圖一 盛裝蟑螂的筒狀盒子。

(A)以 OHP 透明片、底片盒蓋與橡皮筋製成的筒狀盒子，可盛裝

蟑螂，上有一隙縫，可使水滲入，以進行蟑螂溺水實驗；(B)盛裝蟑螂的情形，其中右

側筒狀盒子中有一隻蟑螂；(C)溺水昏迷的蟑螂在桶狀盒子中的恢復情形。



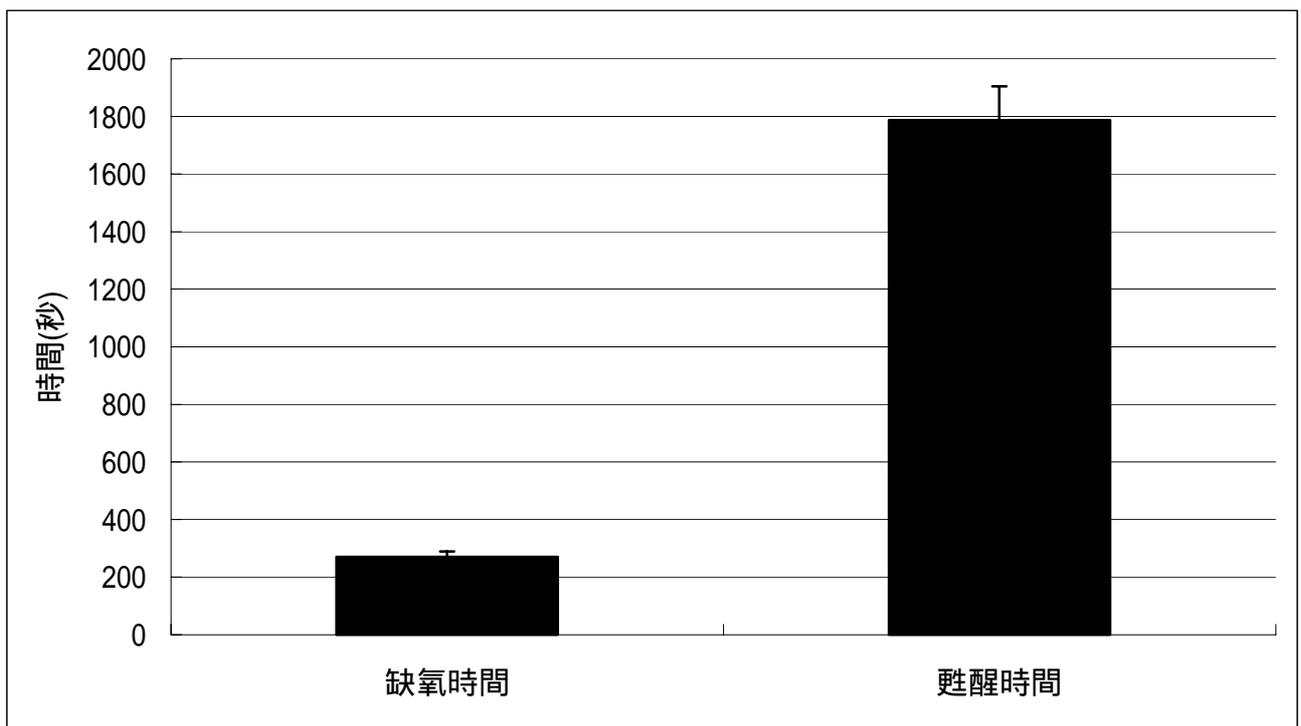
圖二 測定蟑螂耗氧量的裝置。(A)模式圖；(B)實際裝置照片。

伍、研究結果

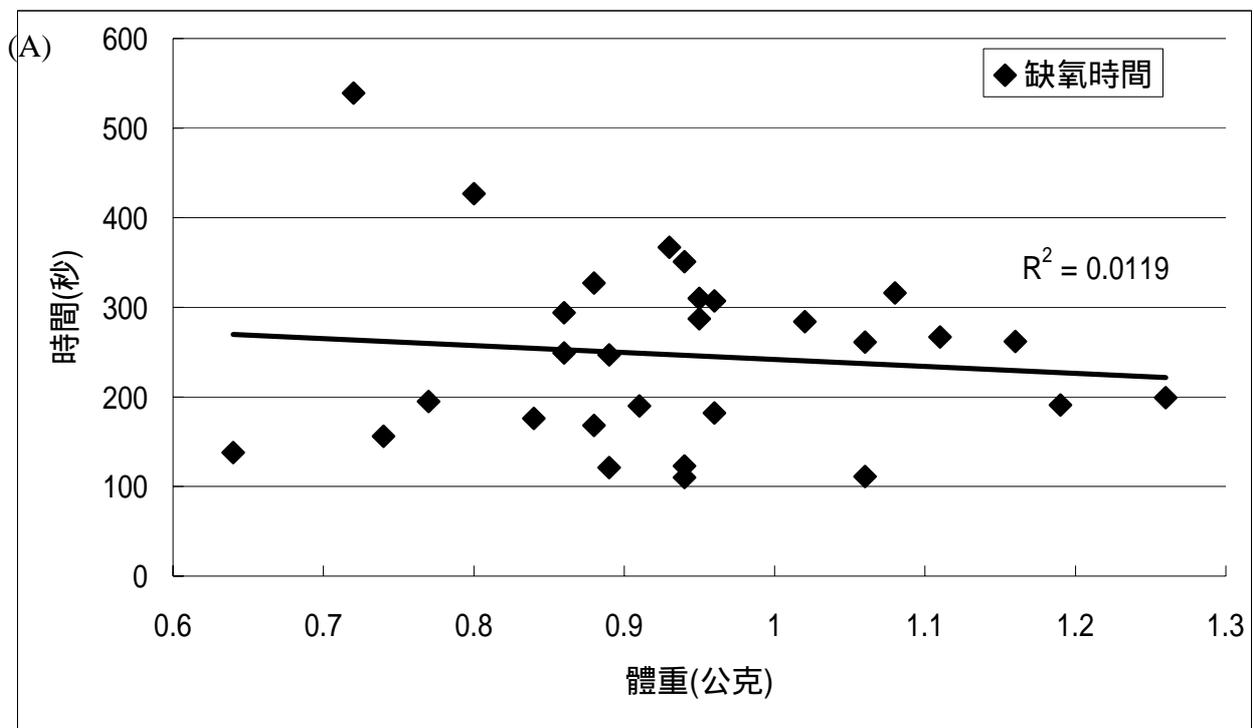
一、蟑螂在缺氧逆境時的反應：

本實驗所有的操作皆在 16-19 的環境下進行。由圖三可知，若要使蟑螂昏迷，平均約須 270.7 ± 18.7 秒(平均 \pm 標準誤)的缺氧時間，而待其甦醒，平均必須花 1787.4 ± 117.3 秒，有此可知，蟑螂甦醒的時間約為窒息時間的 6-7 倍。若將蟑螂昏迷所需的缺氧時間與甦醒時間，和蟑螂的體重比較(圖四)，可發現昏迷所需的缺氧時間與甦醒時間皆與蟑螂的體重無直接相關。

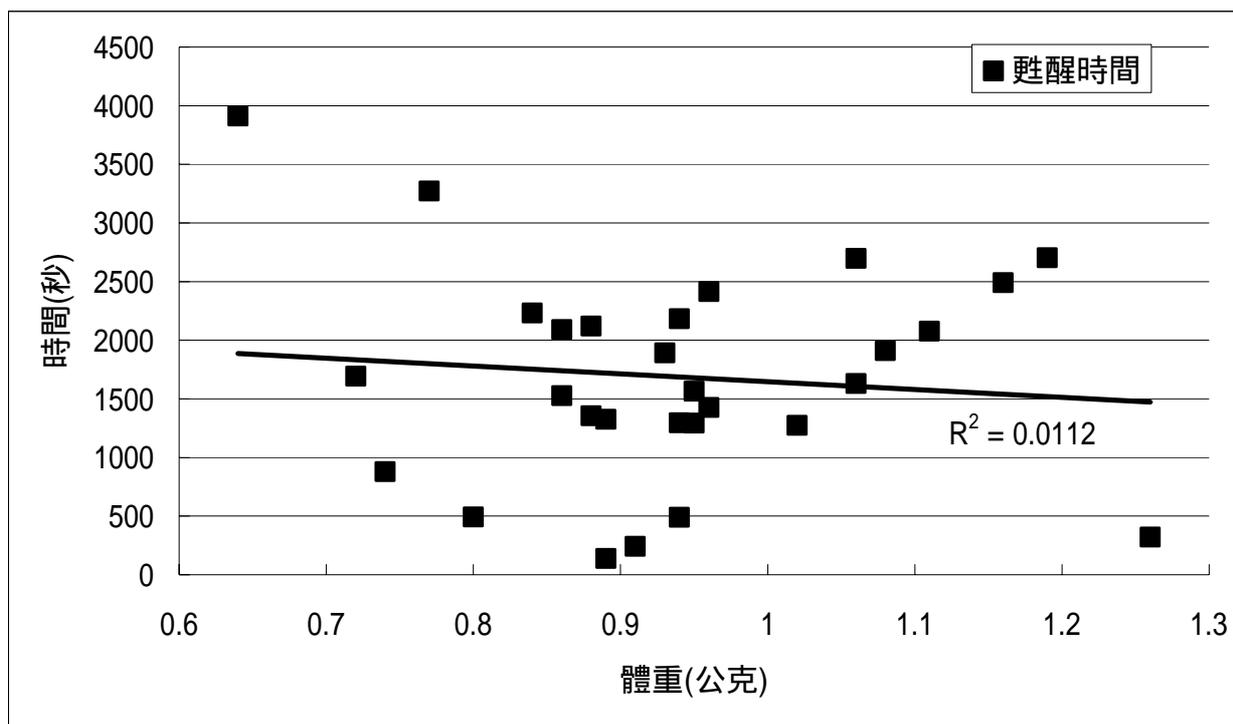
再從圖五的結果中可發現，當蟑螂有了溺水經驗之後，蟑螂可以適應溺水的缺氧逆境，也就是蟑螂在第二次與第三次溺水時，可以忍受更久的缺氧時間才會昏迷。此外，隨著溺水次數的增加，蟑螂甦醒的時間並無明顯改變(圖六)。在三次的溺水操作中，蟑螂昏迷所需的缺氧時間和蟑螂的體重皆無直接關係(圖七 A)，但甦醒時間與蟑螂體重的關係會因溺水的次數而有所不同，隨著溺水次數增加，體重越重的蟑螂，甦醒的時間越快(圖七 B)。



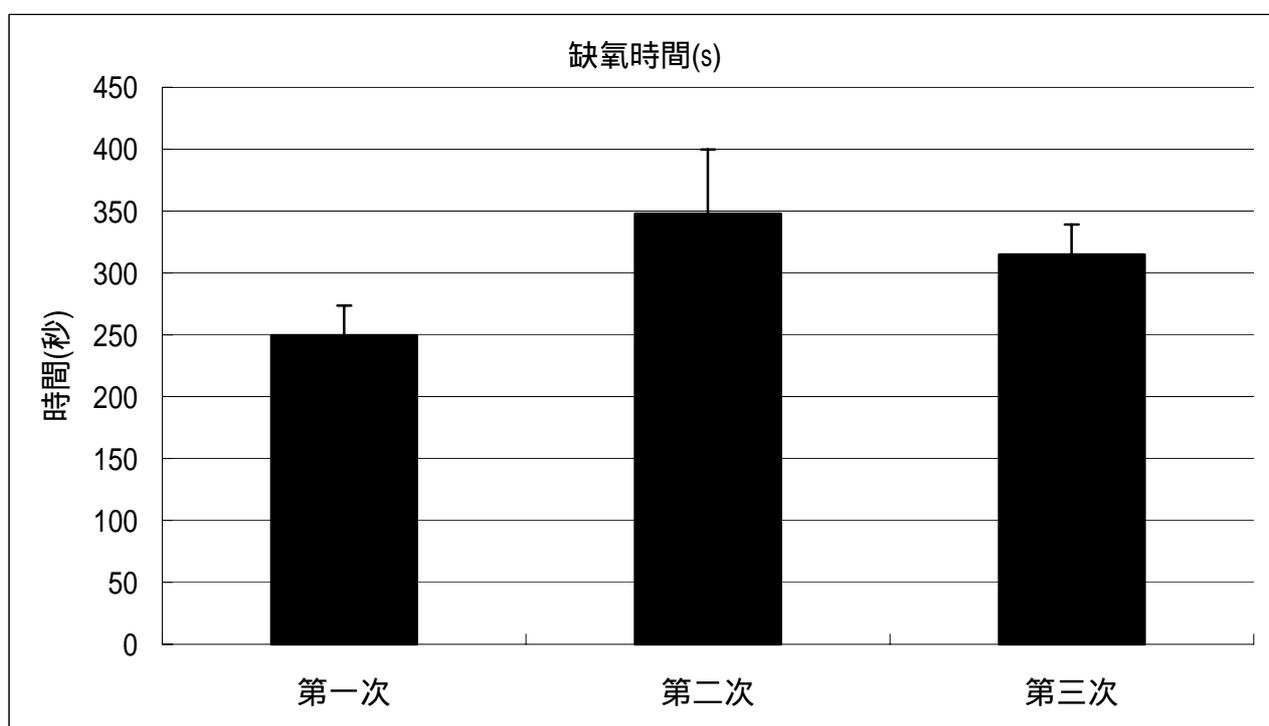
圖三 蟑螂昏迷所需的缺氧時間與所需的甦醒時間(平均值 \pm 標準誤，單位為秒， $n = 29$)。



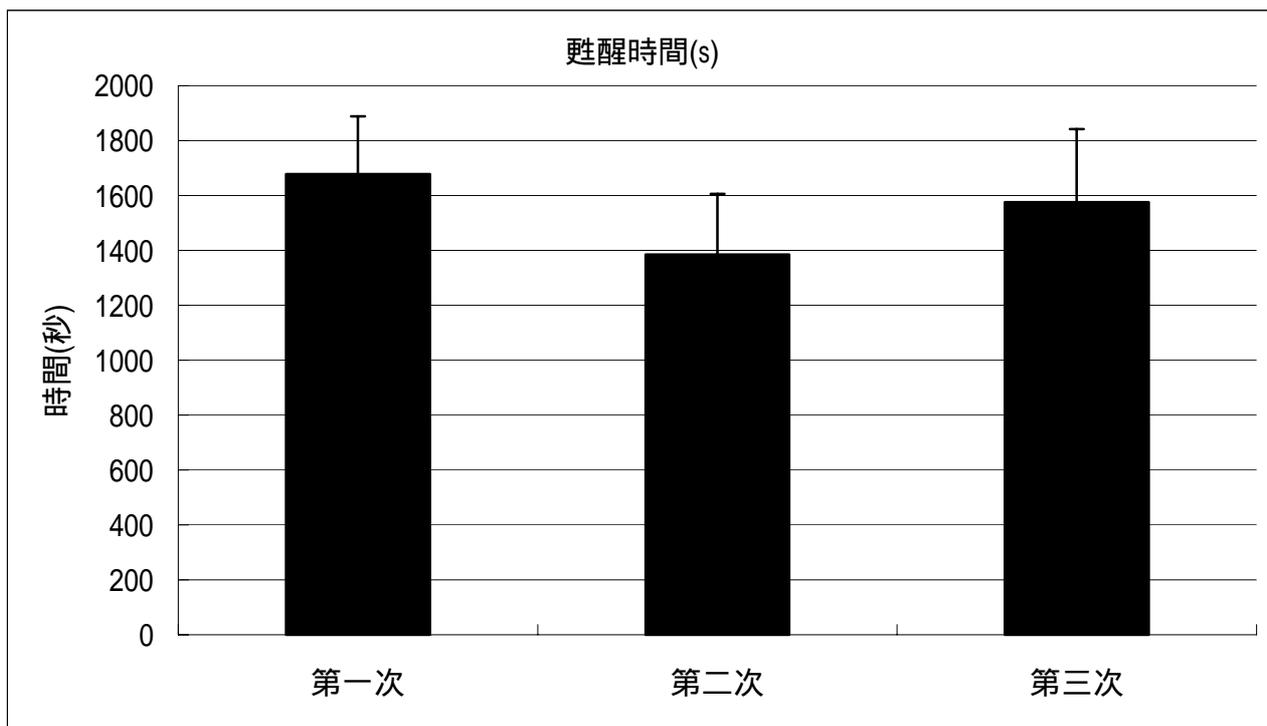
(B)



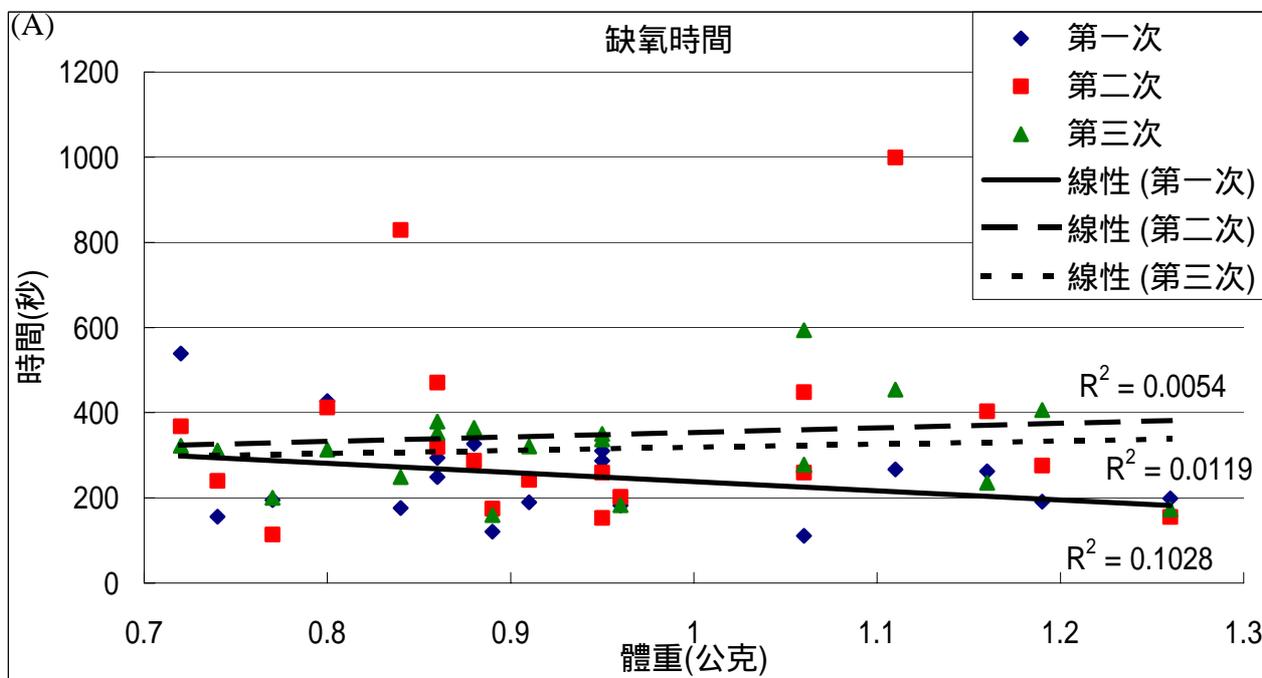
圖四 缺氧逆境反應與蟑螂體重的關係 (n=29)。
 (A)昏迷所需的缺氧時間與蟑螂體重關係；(B)甦醒時間與蟑螂體重關係。



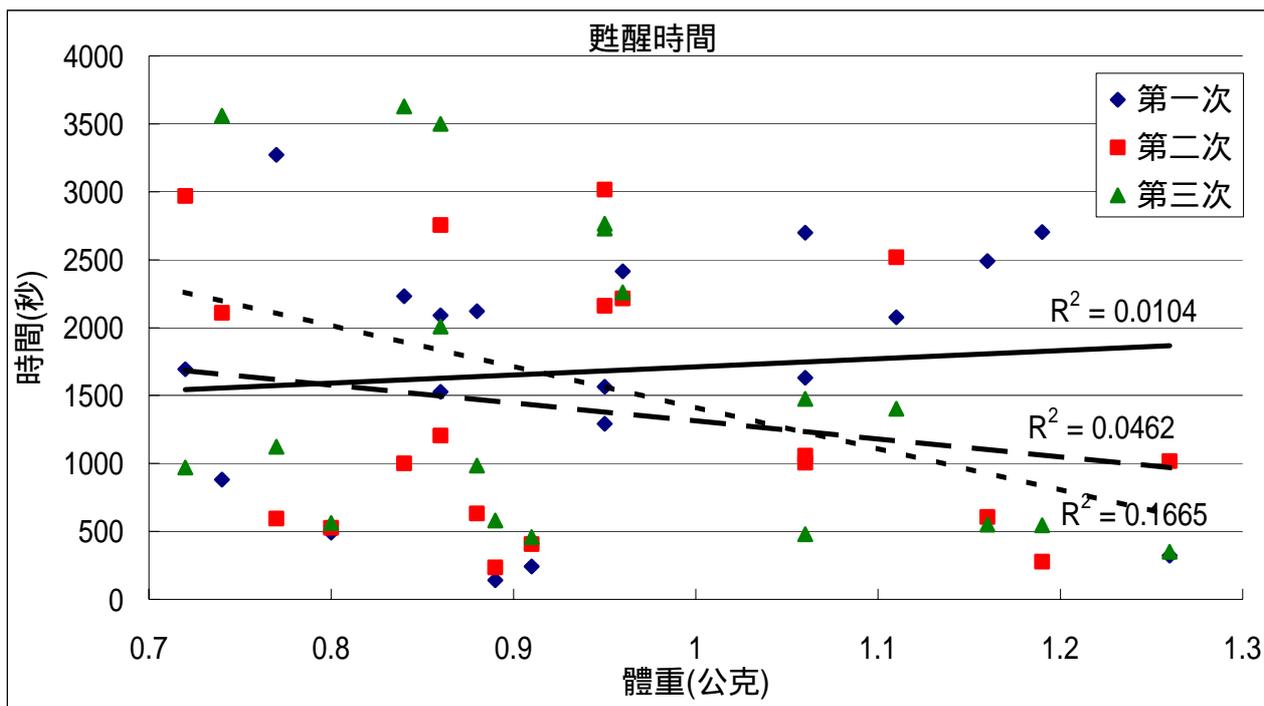
圖五 不同次數的缺氧逆境中，使蟑螂昏迷所需的時間(平均值 ±標準誤，單位為秒，n=19)。
 代表在配對 t 檢定中 $p < 0.05$ ，也就是其數值在統計上與第一次溺水具顯著差異。



圖六 不同次數的缺氧逆境中，蟑螂甦醒所需的時間(平均值 ±標準誤，單位為秒，n=19)。



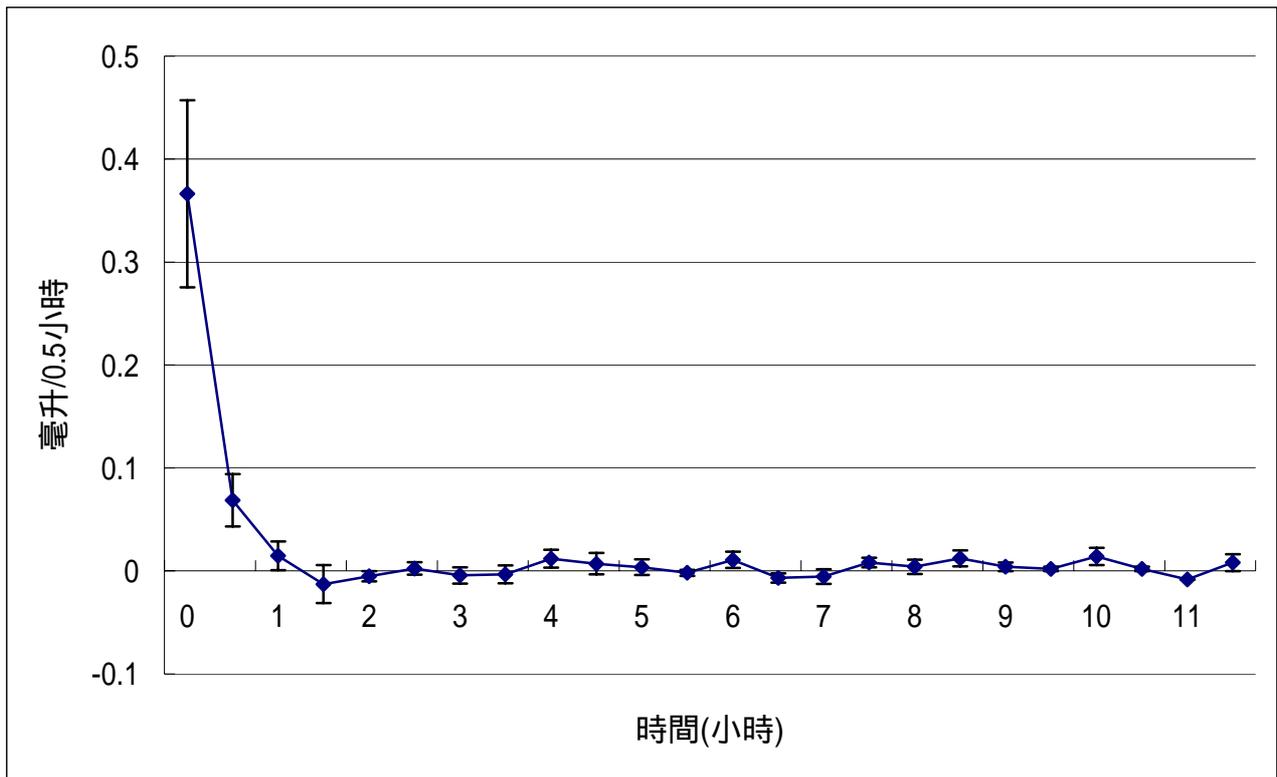
(B)



圖七 蟑螂重複三次溺水中，缺氧逆境反應與蟑螂體重的關係(n = 19)。
 (A)昏迷所需的缺氧時間與蟑螂體重關係；(B)甦醒時間與蟑螂體重關係。

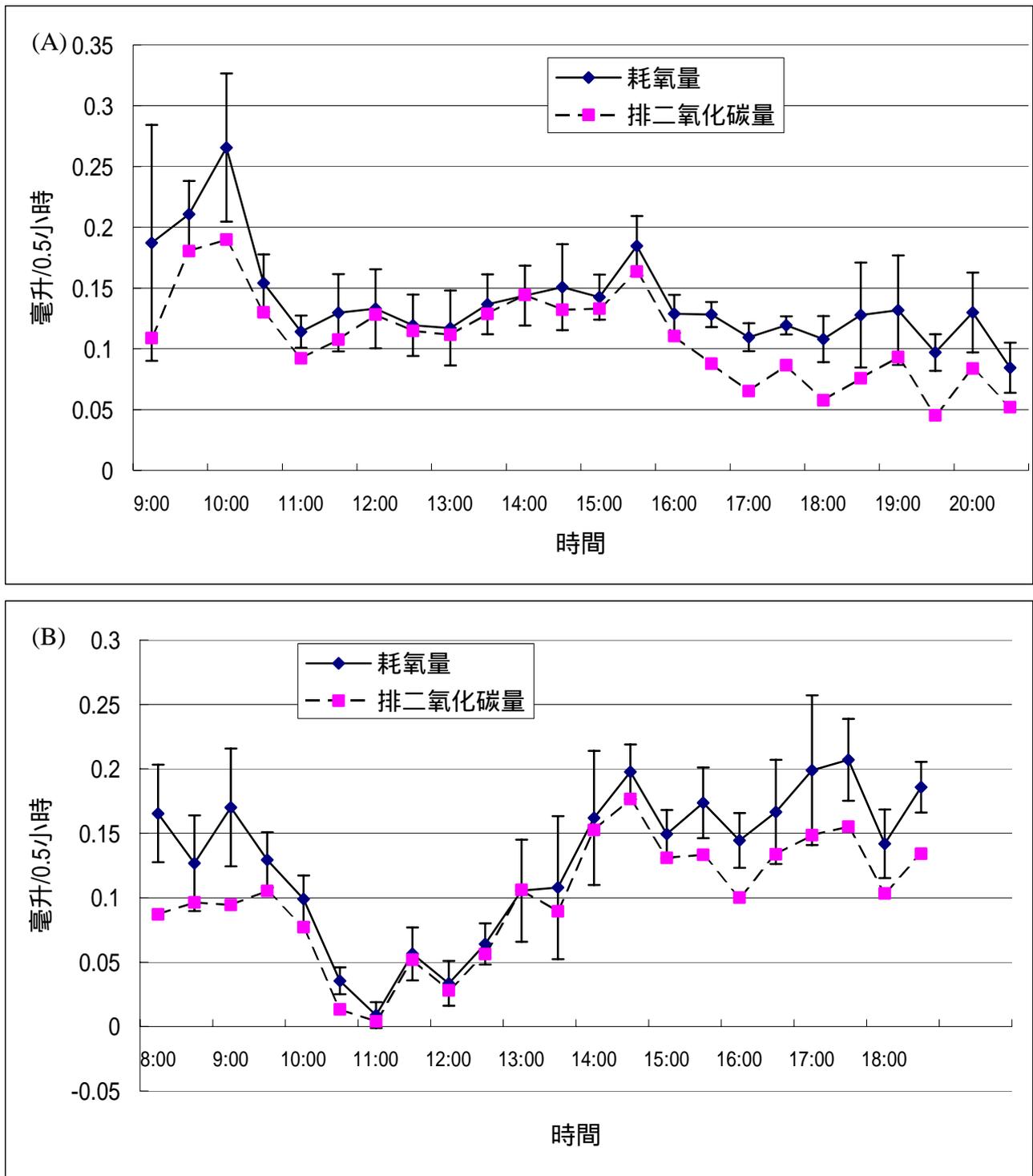
二、耗氧量之測定：

將氧化鈣滴水後放入唧筒中，使之形成氫氧化鈣，氫氧化鈣可吸收空氣中的二氧化碳，因此可將染色墨水吸入吸管。當氫氧化鈣開始吸收唧筒內的二氧化碳後，約在一小時之內可將唧筒中的二氧化碳吸收完全(圖八)，所以在一小時後，吸管內的液面幾乎不再變動。由於在測量蟑螂耗氧量時，所放入的氫氧化鈣會吸收原本存在於空氣的二氧化碳，造成測量耗氧量的誤差，因此耗氧量的計算需減去空氣中二氧化碳被氫氧化鈣吸收的體積，作為校正(研究過程或方法：二、耗氧量之測定)。

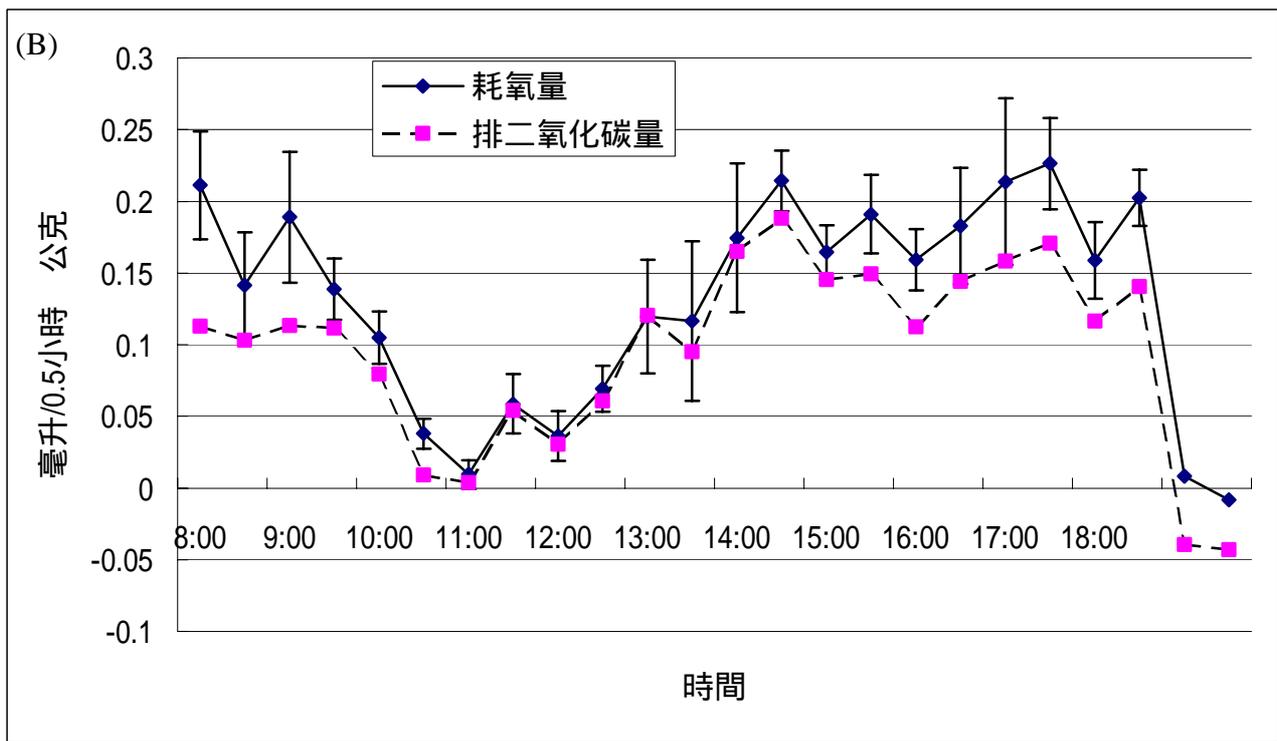
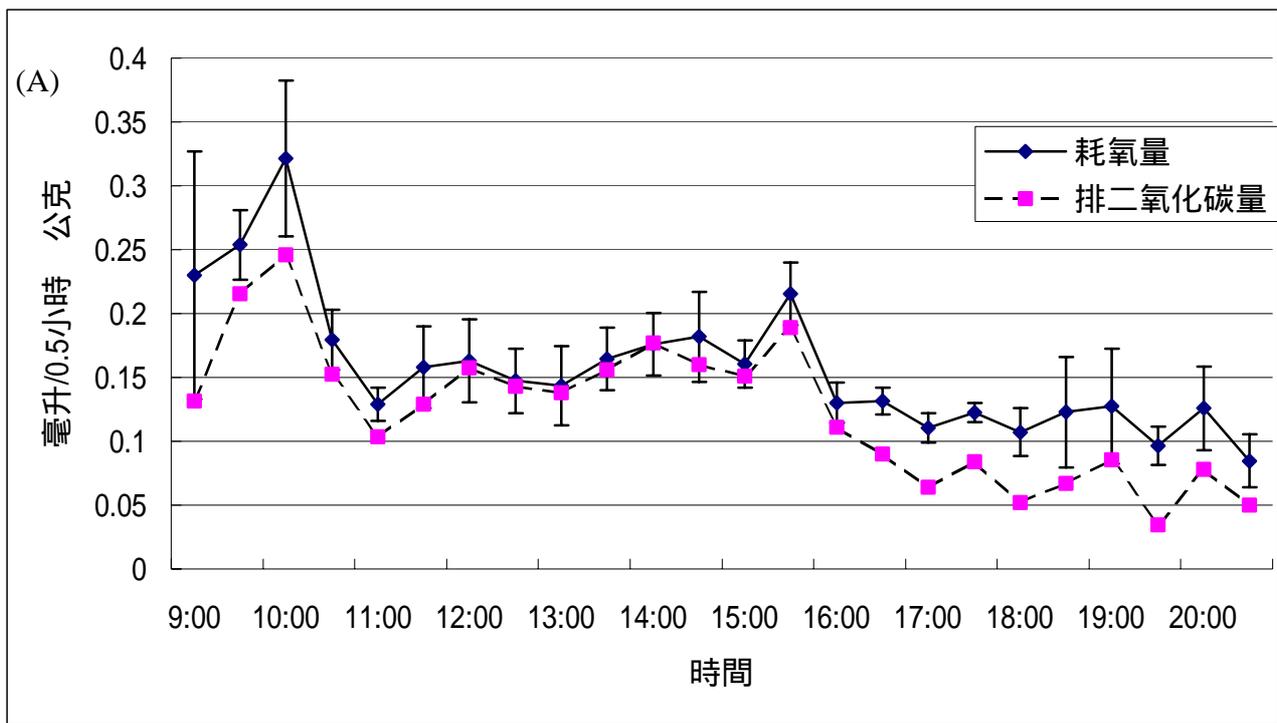


圖八 氫氧化鈣可吸收唧筒內二氧化碳的速率變化圖(平均值 \pm 標準誤, $n=10$)。

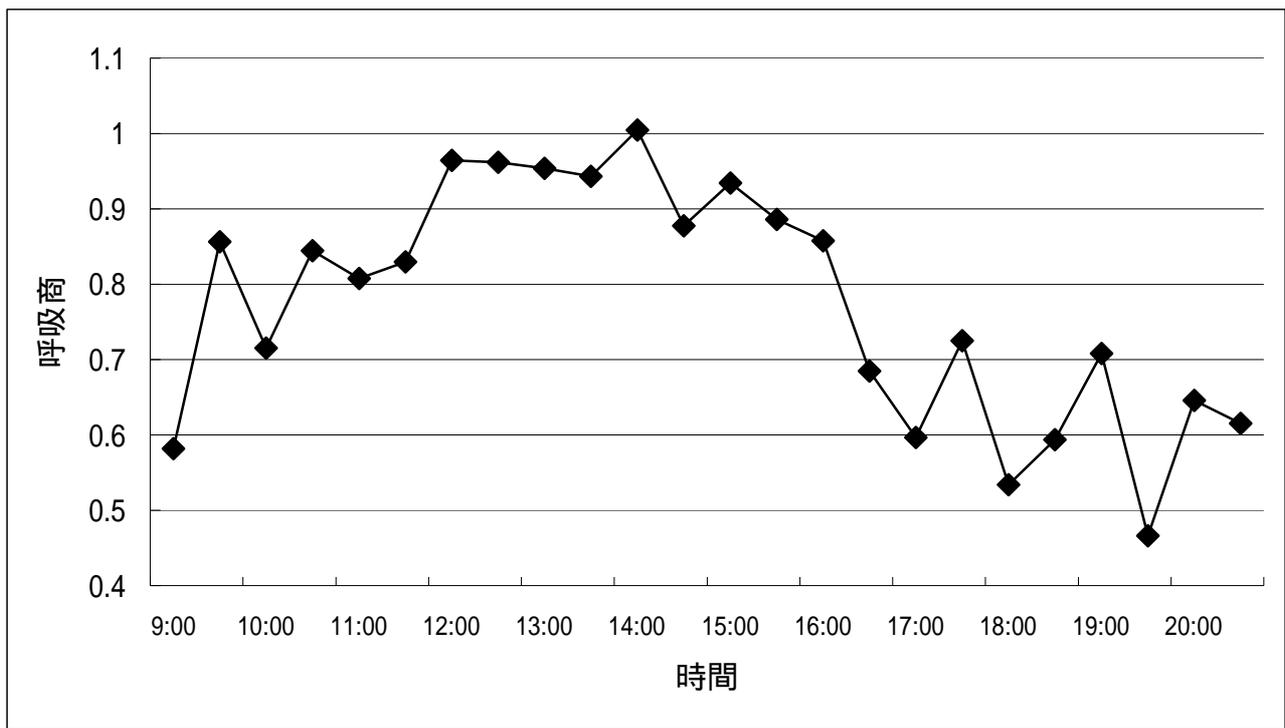
在測定耗氧量剛開始的一小時內，氫氧化鈣並不會立即將二氧化碳吸收乾淨，仍有殘餘，所以耗氧量與排二氧化碳量的計算會不準(圖九)。在兩次不同時間所做的實驗中，皆可發現除了前一小時之外，之後所測量的耗氧量與排二氧化碳量具有同步變化的趨勢(圖九)，顯示此方法的精準性。若將耗氧量與排二氧化碳量除以蟑螂體重(圖十)，其趨勢與耗氧量與排二氧化碳量相似，這是因為所實驗的蟑螂，體重變異小(0.90 ± 0.05 公克)。若計算蟑螂排二氧化碳量與耗氧量之商(排二氧化碳量/耗氧量)，可得到呼吸商(respiratory quotient)(圖十一)。蟑螂的呼吸商在白天多在 0.8 以上，在傍晚進入晚上時較低，多在 0.7 以下，此時正好也是蟑螂的活動期。



圖九 蟑螂耗氧量與排二氧化碳量在不同時段的變化情形(平均值 \pm 標準誤)。
 (A)與(B)分別為兩次不同實驗所得的測量值。實驗(A)使用 10 組 A 唧筒, 9 組 B 唧筒;
 實驗(B)使用 5 組 A 唧筒, 9 組 B 唧筒。排二氧化碳量由平均耗氧量與 B 唧筒體積變化
 換算而來(請見伍、研究過程或方法：二、耗氧量之測定)



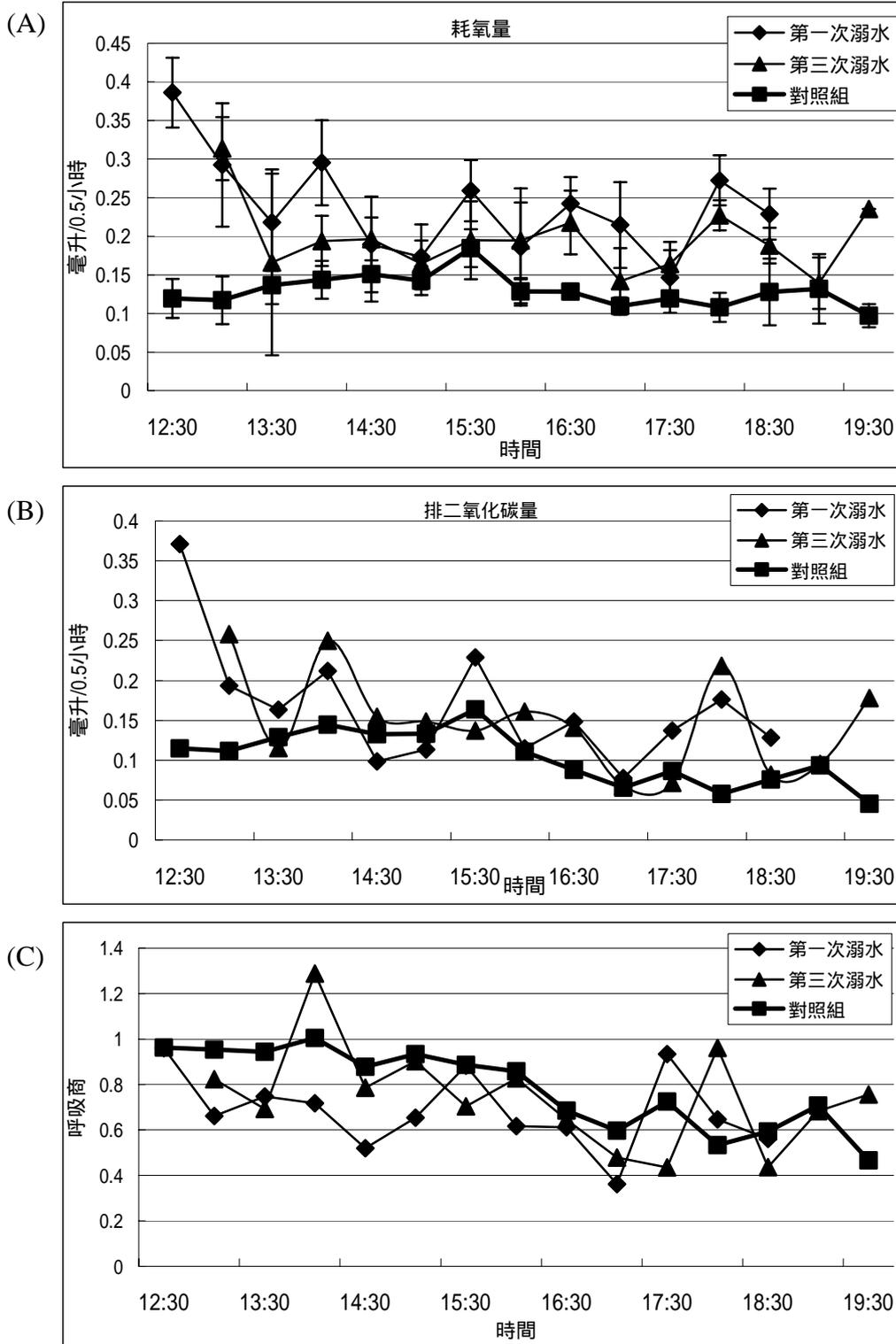
圖十 單位蟑螂體重的耗氧量與排二氧化碳量變化情形(平均值 \pm 標準誤)。
 (A)與(B)分別為兩次不同實驗所得的測量值。實驗(A)使用 10 組 A 唧筒, 9 組 B 唧筒;
 實驗(B)使用 5 組 A 唧筒, 9 組 B 唧筒。



圖十一 蟑螂的呼吸商在不同時段的變化情形(平均值 \pm 標準誤)。
數據來自 10 組 A 唧筒與 9 組 B 唧筒的計算。

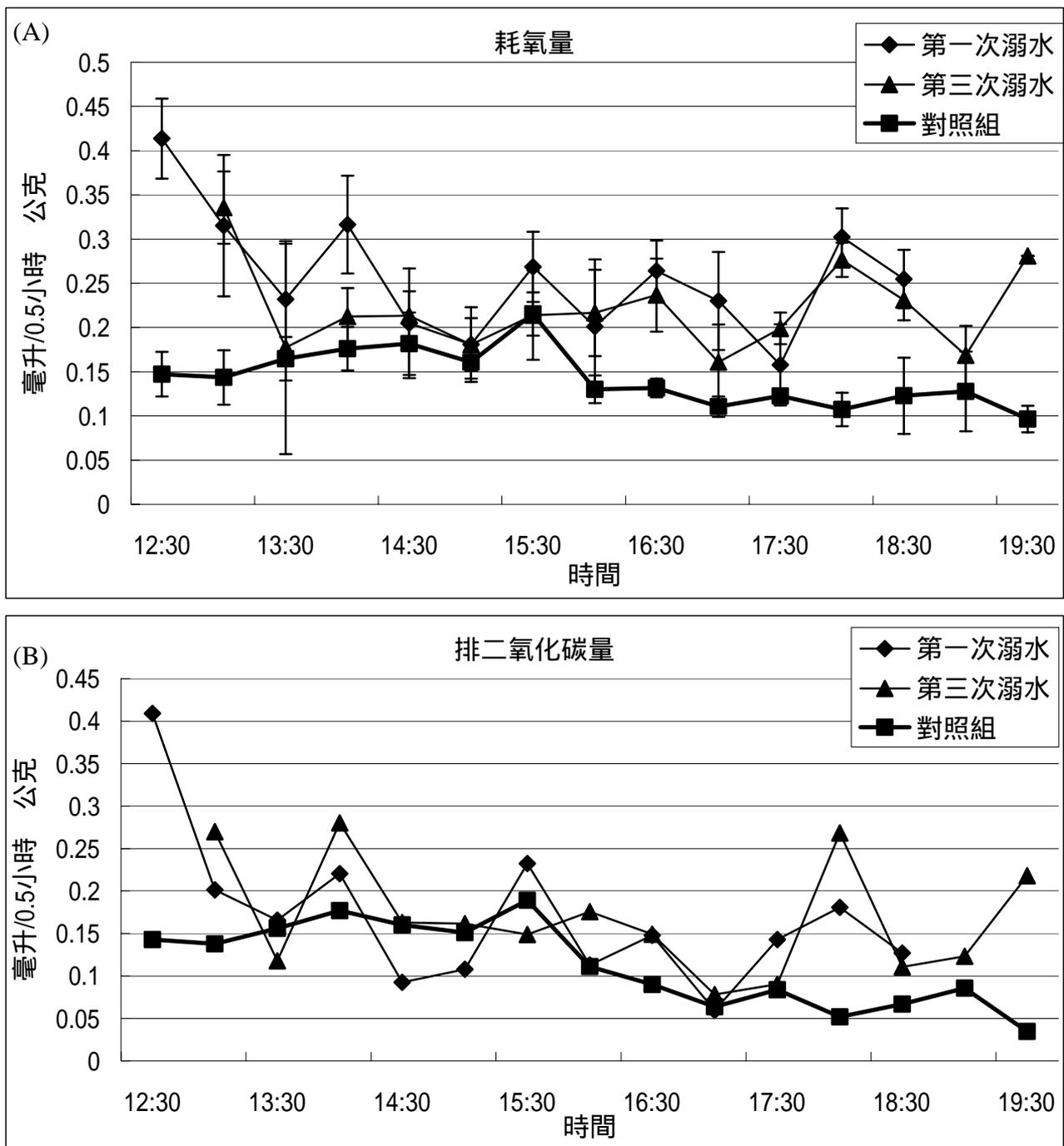
三、在缺氧逆境後，蟑螂耗氧量之測定：

在蟑螂第一次溺水昏迷後，以及蟑螂連續溺水昏迷(間隔 90 分鐘)三次後，分別測量其耗氧量、排二氧化碳量與呼吸商。每次進行溺水缺氧的時間作適當控制，使得耗氧量與排二氧化碳量的測量，皆於中午十二時開始。在結果中可發現經歷缺氧逆境後的蟑螂，其耗氧量會提升(圖十二 A、十四 A)，其中第一次溺水後的蟑螂，耗氧量的增加與連續溺水三次的蟑螂一樣。缺氧逆境後的蟑螂，其排二氧化碳量也有增加的趨勢，但其改變較小(圖十二 B、十四 A)。缺氧逆境後的蟑螂，其呼吸商較對照組低(圖十二 C、十四 B)。



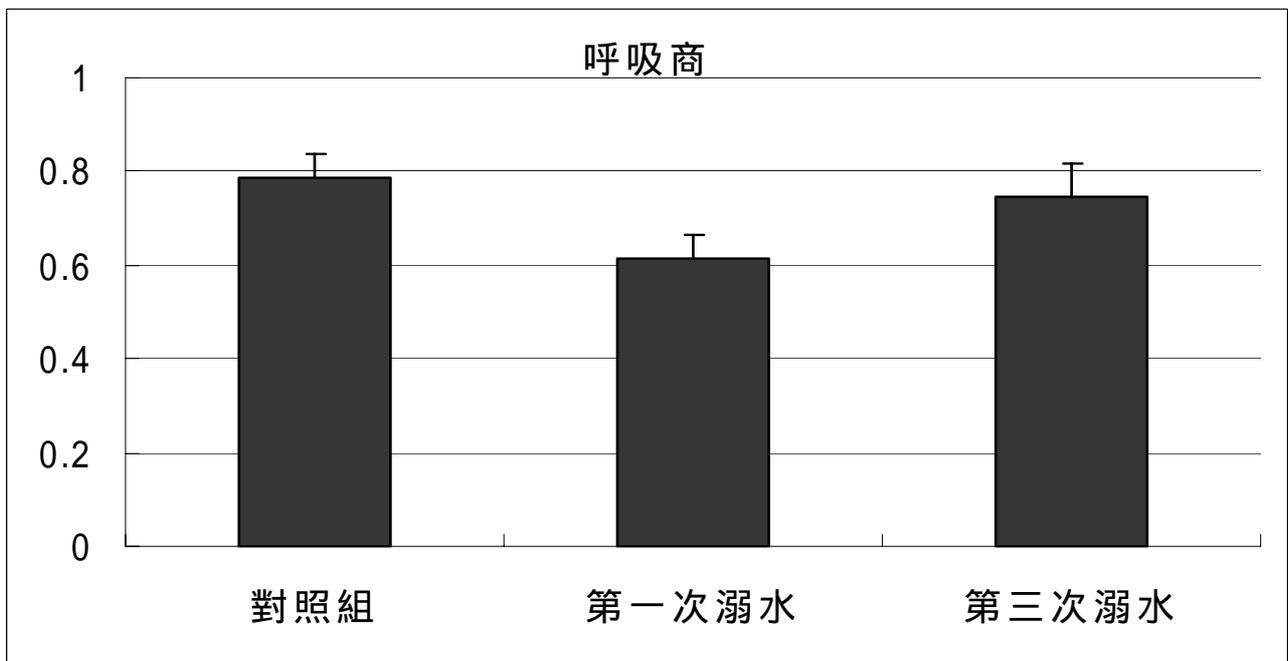
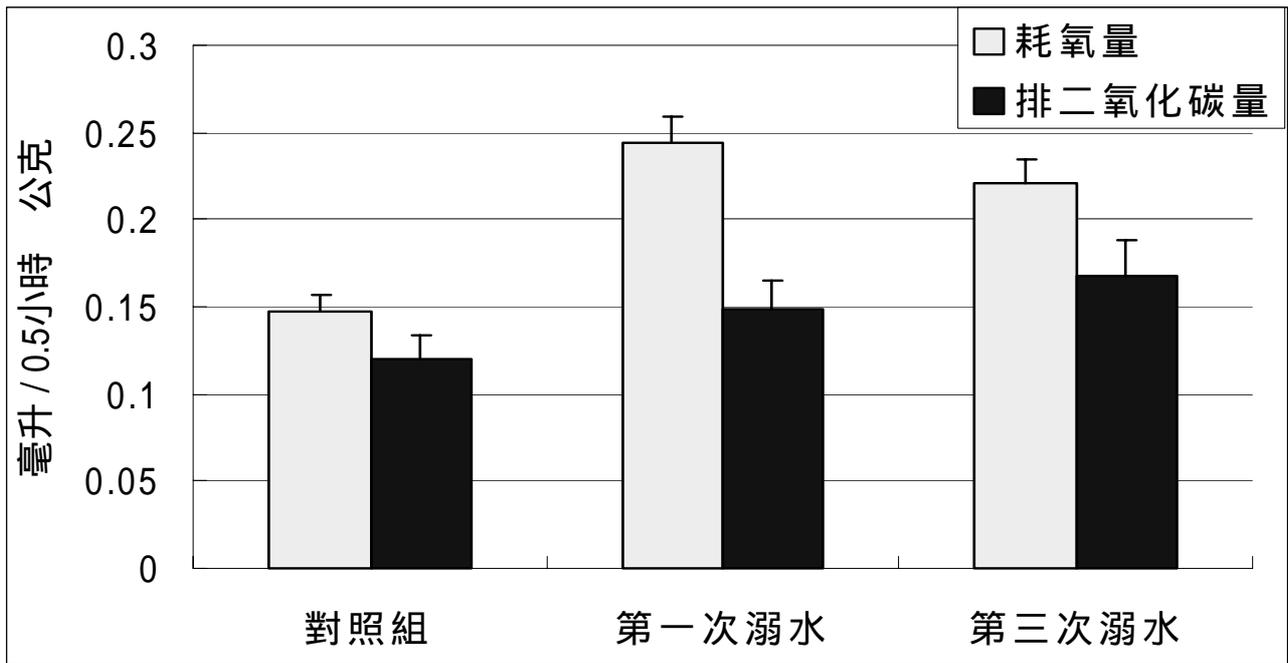
圖十二 不同溺水次數的蟑螂，呼吸作用在不同時段的變化情形(平均值 \pm 標準誤)。(A)耗氧量；(B)排二氧化碳量；(C)呼吸商。第一次、第三次溺水與對照組蟑螂的數據皆分別來自 10 組 A 唧筒與 9 組 B 唧筒。

若將耗氧量與排二氧化碳量除以蟑螂體重，可得到蟑螂缺氧昏迷後，單位體重的耗氧量與排二氧化碳量(圖十三)，其趨勢與耗氧量與排二氧化碳量(圖十二)相似。



圖十三 不同溺水次數的蟑螂，單位體重在不同時段的呼吸作用情形(平均值 ±標準誤)。(A)耗氧量；(B)排二氧化碳量。第一次、第三次溺水與對照組蟑螂的數據皆分別來自10組A唧筒與9組B唧筒。

根據以上的結果，計算其呼吸商，可得到以下的圖表(圖十四)。



圖十四 缺氧逆境對蟑螂代謝狀態的影響

(平均值 ±標準誤，使用 10 組 A 唧筒，9 組 B 唧筒，各量十二次)。

(A)單位體重與時間耗氧量與排二氧化碳量。

(B)呼吸商變化。

代表在配對 t 檢定中 $p < 0.05$

代表在配對 t 檢定中 $p < 0.005$

陸、討論

從實驗的結果中可以推測，蟑螂具有適應逆境的能力。因為曾經溺水的蟑螂，達到昏迷

所需的缺氧時間會增加，這可以部分解釋為什麼蟑螂這麼古老的生物，過了 3 億年以後，還能夠存活下來。隨著溺水次數增加，體重越重的蟑螂的甦醒時間會越來越短(圖七 B)，顯示體重較重的蟑螂對於缺氧逆境可能較具適應能力。

本實驗測得在 16.19 時，每半小時每公克蟑螂的耗氧量約為 0.1 0.2 毫升，也就是 0.2 0.4 毫升/小時 公克。昆蟲生理學者所測量的蟑螂耗氧量在 30 時為 0.38 毫升/小時 公克，與我們所量測的數據十分符合，顯示我們所設計架設的測量設備十分精準。此外，我們所測得的二氧化碳排放量，每半小時每公克蟑螂約為 0.1 0.2 毫升，也就是 0.2 0.4 毫升/小時 公克，其他學者所測量的數值，在 10 時為 0.053 毫升/小時 公克，在 35 時為 0.654 毫升/小時 公克，我們所測的的數值介於此範圍之間，也是十分準確。昆蟲學家利用探測氣體的光譜，才測得像蟑螂這種代謝率如此微小的昆蟲之耗氧量，在我們高中並沒有如此昂貴的儀器，但我們用很簡單也很便宜的方法和器具，就可測出不輸實驗室裡作出的結果，為此我們感到非常高興，這當然也得感謝指導老師的幫忙。

根據在動物生理相關書籍所查到的資料，當呼吸商接近 1 時，代表此生物目前代謝的物質以醣類為主，若為 0.7 時則以脂質為主，本實驗所觀察到的呼吸商多介於 0.7 1 之間，代表蟑螂代謝的物質包含醣類、脂質與蛋白質。但在傍晚時蟑螂的呼吸商下降，此時正是蟑螂的活動期，這代表了蟑螂在活動期所代謝的物質中，脂質的比例增加了，此現象的意義仍待進一步的研究。

當蟑螂經歷缺氧逆境後，其耗氧量增加，可能是為了補償氧氣的缺乏，但蟑螂的呼吸商卻下降，顯示蟑螂的代謝可能由代謝糖類為主改以脂質為主，這也可以解釋體重越重的蟑螂可能具有較高的缺氧適應能力(圖七 B)，因為體重越重的蟑螂具有較多的脂肪體。代謝物質改變的情形，也可見於蟑螂飛行或長時間運動時，可見代謝狀態的改變，是蟑螂適應生理狀態與環境的策略之一。以上的結果皆顯示蟑螂確實會因應環境的變化，改變其行為反應與生理狀態，度過各種逆境，也難怪我們會稱他們為「打不死的蟑螂」。

柒、結論

- 一、我們已發展出一套能測量小型動物耗氧量的方法，簡單到在一般中小學實驗室中都可以操作，不須使用科學實驗室所使用的昂貴儀器，而且精確度不輸實驗室做出的結果。
- 二、蟑螂昏迷後甦醒的時間約為達到昏迷所需缺氧時間的 6 7 倍。
- 三、蟑螂若有缺氧經驗，會使蟑螂更不易因缺氧而昏迷，蟑螂對於缺氧逆境具有適應能力。
- 四、蟑螂在活動期的呼吸商較低，顯示此時身體主要的代謝物質可能是脂質。
- 五、蟑螂在經歷缺氧逆境後，其耗氧量會增加，以補充所需的氧氣。
- 六、蟑螂在經歷缺氧逆境後，其呼吸商會下降，代表其代謝物質由糖類轉變成脂質。
- 七、由以上的結果可發現，蟑螂會因應環境的變化，改變其行為反應與生理狀態，度過缺氧逆境。

捌、參考資料

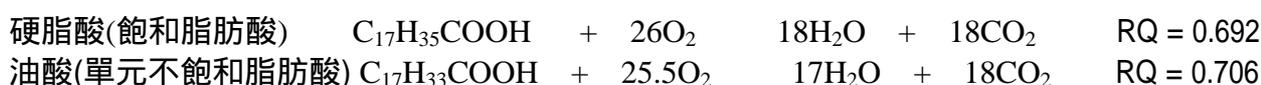
- 一、施河主編 高中生命科學教科書上冊 修訂版 台南 南一書局 78~79 頁 91 年 8 月
 二、楊寶旺主編 高中物質科學化學篇教科書上冊 第八版第一刷 台北 龍騰書局 19、41 頁 90 年 8 月
 三、Bell, W. J. and Adiyodi, K. G. 1982. The American Cockroach. *Chapman and Hall*. Pp.87-116.
 四、Schmidt-Nielsen, K. 1997. Animal Physiology: adaptation and environment. 5th ed. *Cambridge*.

附錄一：醣類、脂質與蛋白質的呼吸商

- 醣類完全氧化時的呼吸商(RQ)值：



- 脂肪酸完全氧化時的呼吸商(RQ)值：



- 各種胺基酸完全氧化時的呼吸商(RQ)值：

中文名	英文名	分子式	氧化所需 O ₂	產生 CO ₂	產生 H ₂ O	其他產物	RQ 值
甘胺酸	Glycine	C ₂ H ₅ O ₂ N	1.5 O ₂	2 CO ₂	1 H ₂ O	1 NH ₃	1.33
丙胺酸	Alanine	C ₃ H ₇ O ₂ N	3 O ₂	3 CO ₂	2 H ₂ O	1 NH ₃	1.00
糸氨酸	Valine	C ₅ H ₁₁ O ₂ N	6 O ₂	5 CO ₂	4 H ₂ O	1 NH ₃	0.83
白胺酸	Leucine	C ₆ H ₁₃ O ₂ N	7.5 O ₂	6 CO ₂	5 H ₂ O	1 NH ₃	0.80
離胺酸	Lysine	C ₆ H ₁₅ O ₂ N ₂	7.25 O ₂	6 CO ₂	4.5 H ₂ O	2 NH ₃	0.83
精胺酸	Arginine	C ₆ H ₁₅ O ₂ N ₄	5.75 O ₂	6 CO ₂	1.5 H ₂ O	4 NH ₃	1.04
組織胺酸	Histidine	C ₆ H ₁₀ O ₂ N ₃	5.25 O ₂	6 CO ₂	0.5 H ₂ O	3 NH ₃	1.14
天門東胺酸	Aspartic acid	C ₄ H ₆ O ₄ N ₂	2 O ₂	4 CO ₂	0 H ₂ O	2 NH ₃	2.00
異白安酸胺酸	Isoleucine	C ₆ H ₁₃ O ₂ N	7.5 O ₂	6 CO ₂	5 H ₂ O	1 NH ₃	0.80
天門東醯胺	Asparagines	C ₄ H ₈ O ₃ N ₂	3 O ₂	4 CO ₂	1 H ₂ O	2 NH ₃	1.33
麩胺酸醯胺	Glutamine	C ₅ H ₁₀ O ₃ N ₂	4.5 O ₂	5 CO ₂	2 H ₂ O	2 NH ₃	1.11
絲胺酸	Serine	C ₃ H ₇ O ₃ N	2.5 O ₂	3 CO ₂	2 H ₂ O	1 NH ₃	1.20
息寧胺酸	Threonine	C ₄ H ₉ O ₃ N	4 O ₂	4 CO ₂	3 H ₂ O	1 NH ₃	1.00
半胱胺酸	Cysteine	C ₃ H ₇ O ₂ NS	2.5 O ₂	3 CO ₂	1 H ₂ O	1 NH ₃ 、 1 H ₂ S	1.20
麩胺酸	Glutamic acid	C ₅ H ₈ O ₄ N	4.25 O ₂	5 CO ₂	2.5 H ₂ O	1 NH ₃	1.17
甲硫胺酸	Methionine	C ₅ H ₁₁ O ₂ NS	5.5 O ₂	5 CO ₂	3 H ₂ O	1 NH ₃ 、 1 H ₂ S	0.91
苯丙胺酸	Phenylalanine	C ₉ H ₁₁ O ₂ N	10 O ₂	9 CO ₂	4 H ₂ O	1 NH ₃	0.90
酪胺酸	Tyrosine	C ₉ H ₁₁ O ₃ N	9.5 O ₂	9 CO ₂	4 H ₂ O	1 NH ₃	0.95
色胺酸	Tryptophan	C ₁₁ H ₁₂ O ₂ N ₂	11.5 O ₂	11 CO ₂	3 H ₂ O	2 NH ₃	0.96
脯胺酸	Proline	C ₅ H ₈ O ₂ N	5.25 O ₂	5 CO ₂	2.5 H ₂ O	1 NH ₃	0.95

評語

本研究創意甚佳，方法亦新，表達良好。