

第十八屆旺宏科學獎

成果報告書

參賽編號：SA18-551

作品名稱：溺水不只是缺氧－溺水昏迷引發蟑螂潛水反射與氣道閉鎖的探討

姓名：呂冠滙

關鍵字：__溺水__、__蟑螂__、__缺氧__

壹、研究動機

人類在胚胎發育的九個月中身體浸泡於羊水中，但出生後卻可能因溺水而受傷甚至身亡，可說是一大矛盾(Anonymous, 1973)。在臺灣，每年因溺水而死亡的比例約為每十萬人中有 5.35 人，其中男性死亡率為女性的 3.1 倍，1-4 歲的兒童及 75 歲以上的老人為高危險族群(林等人, 2010)。以往對於溺水的死亡原因，多只歸因於常其缺氧造成腦部不可逆的損害。但事實上溺水後有可能造成冷休克、身體喪失行為能力、血壓降低、肌肉抽搐等生理反應(Bierens, et al., 2016)，最後在歷經缺氧、血液循環受阻、心臟收縮功能不全、心律不整等情況下，大腦才遭受嚴重的缺氧傷害，患者慢慢失去意識，終至死亡(陳, 2009)。溺水後若搶救成功，亦可能出現頭痛或視覺障礙、劇烈咳嗽、胸痛、呼吸困難、咳粉紅色泡沫樣痰或寒戰發熱等症狀(張, 2016)。

2017 年 6 月，美國德州發生一名男童戲水後，連續多日出現腹痛、上吐下瀉等症狀，一週後卻因呼吸停止而死亡，新聞報導指出醫師推測其死於「乾溺水(dry drowning)」(嚴, 2017)。大部分溺水患者因水進入肺部引發濕性溺水，但有約 10% 溺水者因氣管嚴重收縮，引發自發性呼吸窘迫症(Acute respiratory distress syndrome, ARDS)而窒息，其肺部沒有水份侵入的現象。乾溺水的報導引起許多父母驚慌，甚至還有謠言說喝水或其他原因也會乾溺水。雖然後來許多醫生認為該男童的病徵不符合乾溺水的定義，可能是其他原因引發死亡，但也因此引發大眾對「乾溺水」的注意。乾溺水有時也稱為「二次逆水」，是指人體在水中將水吸入肺部，離開水一段時間後，身體才出現症狀，包含：心跳減慢、肺部腫脹、血液氧氣含量下降，後者可能導致心臟停止(夏, 2017)。由此可知，溺水不只是因短暫地缺氧所造成的直接傷害，也可能透過其他機制，擴大了缺氧的生理效應。

我們在操作不同的蟑螂麻醉方式(蔡, 2006)與查閱前人資料(蔡等人, 2004)時，皆發現以溺水麻醉方式與二氧化碳麻醉方式，皆可使蟑螂麻痺，但兩種麻醉方式的恢復過程差異很大。溺水麻醉的蟑螂，恢復其明顯較長，且恢復後的行為反應較差，實驗後的死亡率亦較高。Kölsch 等人(2002)以椴葉甲蟲(alder leaf beetles, *Agelastica alni* L.)作為研究對象，也發現椴葉甲蟲在缺氧一分鐘時便會出現完全靜止的昏迷狀態，相較於溺水麻痺所需的時間較短。這讓我們想到：溺水的處理可能不只含有「缺氧」這個單一因子，可能還引發其它的生理效應，就如同人類溺水時所引發的生理效應，也許不只是「缺氧」這個單一因子。也許對蟑螂溺水的生理反應研究方式，對於研究「溺水對動物生理的效應」，是一個有效、方便且易操作的動物模式。因此我們期望建立一套適用於昆蟲溺水的研究模式，透過溺水和其他缺

氧處理，可比較兩種情況下蟑螂的行為與生理反應。

貳、研究目的

- 一、建立研究「溺水對昆蟲行為與生理的效應」的動物模式
- 二、探討蟑螂因氮缺氧、二氧化碳缺氧與溺水處理而昏迷的過程中，昏迷及甦醒所需時間
- 三、探討蟑螂在氮缺氧、二氧化碳缺氧與溺水處理而昏迷後，對呼吸與代謝生理的效應
- 四、探討蟑螂在長期氮氣缺氧及溺水處理而昏迷後，對蟑螂呼吸與代謝生理的效應
- 五、探討蟑螂在長期氮氣缺氧及溺水處理而昏迷後，比較兩者引發氣門閉鎖反射的程度



圖一 研究器材與設備的照片。

參、研究過程與方法

- 一、氣體缺氧與溺水處理的操作方式，與昏迷所需時間與甦醒所需時間的測量

(一)、氣體缺氧造成昏迷

1. 在空瓶中灌滿二氧化碳或氮氣。
2. 以將氣體管子抽離瓶口，放入蟑螂，並蓋上玻璃蓋定義為缺氧時間開始(圖二)。
3. 將蟑螂置於玻璃瓶中直到蟑螂六肢、觸角皆不再運動，定義為昏迷成功。另有一組為延長氣體缺氧時間，當蟑螂六肢及觸角皆不再運動(已達昏迷)後，再持續灌氣五分鐘才終止(此時間是參考溺水處理引發昏迷的實驗結果)。
4. 將蟑螂自玻璃瓶取出後置於玻璃培養皿上，接觸一般空氣，定義為甦醒時間開始(圖三)。
5. 分別記錄自甦醒時間開始至任一觸角開始動、任一隻腳開始動、六隻腳皆產生活動所需時間。



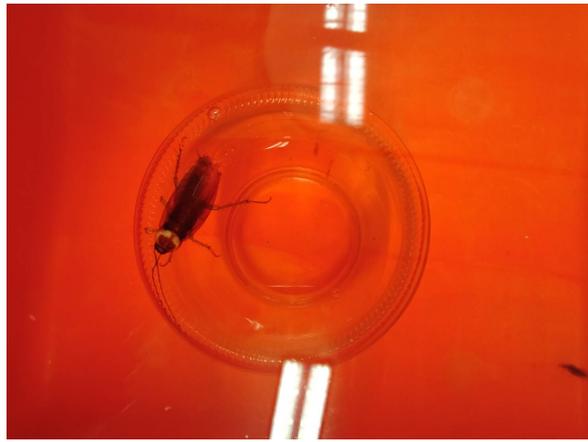
圖二 氣體麻醉的操作方式。



圖三 觀察蟑螂甦醒過程的操作方式。

(二)、溺水處理造成昏迷

1. 在水盆中加入剛好能淹過玻璃瓶的水量，將玻璃瓶裝滿水後倒放至水盆內。
2. 將玻璃瓶稍微傾斜，確保玻璃瓶依舊維持滿水的狀態，把蟑螂至入瓶中(圖四)。
3. 以蟑螂整隻浸入水中定義為溺水處理開始。
4. 將蟑螂置於滿水的玻璃瓶中，並持續搖晃玻璃瓶促使蟑螂運動直到蟑螂六肢、觸角皆不再運動，定義為昏迷成功。
5. 將蟑螂自玻璃瓶取出後置於玻璃培養皿上，接觸一般空氣，定義為甦醒時間開始。
6. 分別記錄自甦醒時間開始至任一觸角開始動、任一隻腳開始動、六隻腳皆產生活動所需時間。



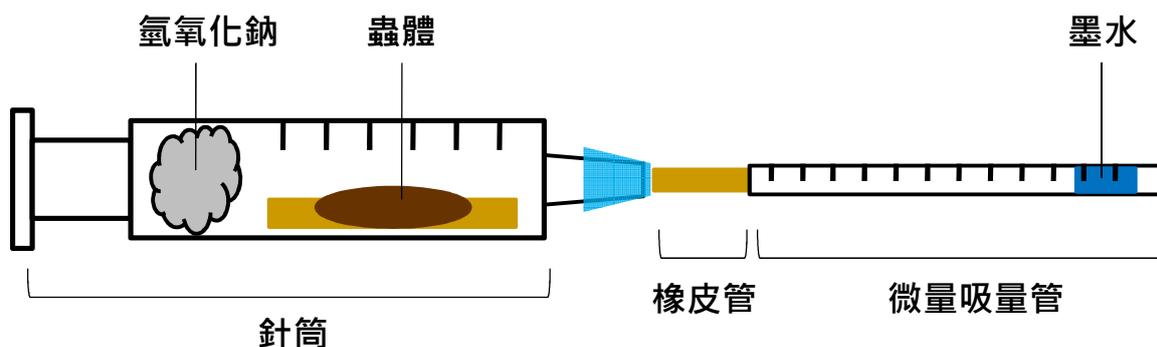
圖四 溺水麻醉的操作方式。

二、呼吸週期與代謝率測量

我們參考、改良蔡等人(2004)、高與胡(2015)、劉(2018)測量蟑螂代謝率的方法，由呼吸週期、換氣期、非換氣期、耗氧速率、產二氧化碳速率與呼吸商，這六個指標來分析蟑螂在溺水、缺氧兩個狀態下的相異與相同之處。呼吸週期與代謝生理的各指標的測量方式如下(圖五)：

- (一)、將 50 毫升的針筒與微量吸量管(最小刻度為 0.01 毫升)用橡皮管連接，將實驗動物與滴一小滴水的氫氧化鈉(包裹於紗布中)放入針筒中。
- (二)、吸入亞甲藍液至微量吸量管內，橫放使此自製呼吸週期檢測系統靜置於桌面上
- (三)、當蟑螂吸收氧氣而排出二氧化碳，二氧化碳可經氫氧化鈉吸收而造成針筒內氣體體積減少，可透過微量吸量管內之水的移動情形，測量針筒內氣體體積於 15 分鐘內所發生的變化，進而計算蟑螂的耗氧速率，單位為「毫升/分鐘」。
- (四)、觀察亞甲藍液柱的移動情形，紀錄液柱每一次移動與停止的時間與刻度，即可推算換氣期與非換氣期的時間長短，一次換氣期與一次非換氣期之和，即為呼吸週期(一次呼吸週期 = 一次換氣期 + 一次非換氣期)。換氣期、非換氣期與呼吸週期的單位為「秒」。
 - 1.換氣期：液柱一次移動所需的時間
 - 2.非換氣期：液柱在兩次換氣期間停滯不動的時間
 - 3.呼吸週期：一次換氣期 + 一次非換氣期
- (五)、當針筒內無放置氫氧化鈉，測量針筒內氣體體積於 15 分鐘內所發生的變化。此時蟑螂呼吸時消耗的氧氣與產生的二氧化碳氣體將吸量管內的亞甲藍液帶動，並測量其移動速度，此時的氣體體積變化速度 = 產二氧化碳速度 - 耗氧速度，單位為「毫升/分鐘」。

- (六)、將(三)與(四)兩項氣體體積變化速率，經計算可得產二氧化碳速率，單位為「毫升/分鐘」。
- (七)、將產二氧化碳速率除以耗氧速率所得數值即為呼吸商(respiratory quotient, RQ)，呼吸商的大小可推論動物正在代謝的主要物質，當呼吸商接近於 1 時，代表以醣類為主要代謝物，當呼吸商的接近於 0.7 時，代表以脂質為主要代謝物，若介於 0.7 至 1 之間，則可能同時代謝醣類與脂質(蔡等人，2004；劉，2018)。



圖五 呼吸週期與代謝率的測量裝置。上圖為裝置示意圖，下圖為實際照片。

三、蟑螂氣道閉鎖程度的比較

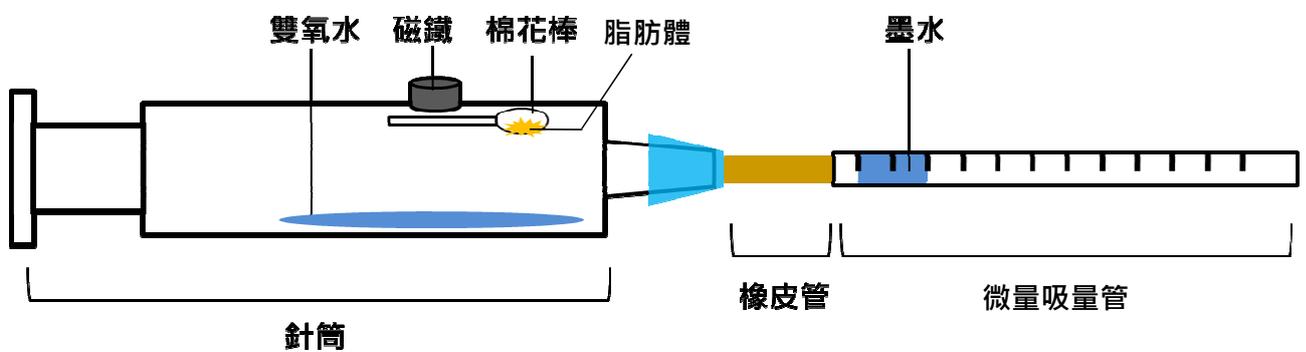
- (一)、蟑螂處理方式分為長期氮氣缺氧(直到蟑螂六肢、觸角皆不再運動後，再持續灌入氮氣 5 分鐘)與溺水處理兩種。
- (二)、將蟑螂、亞甲藍液置入 60 毫升針筒中，排出針筒內多餘的氣體並蓋上蓋子(圖六)。
- (三)、反覆拉動活塞造成唧筒內形成負壓，使亞甲藍液可滲入蟑螂的氣管系統內。
- (四)、將蟑螂取出後以清水洗去體表上殘餘的亞甲藍液，並以衛生紙吸乾蟑螂體表的水分。
- (五)、蟑螂放置於培養皿上，觀察蟑螂胸部與步足氣管內亞甲藍液的滲入情形。亦將前胸背板分離，觀察前胸背側組織與氣管中，亞甲藍液的滲入程度。



圖六 利用負壓環境中蟑螂氣管系統攝入亞甲藍液的程度，比較氣道閉鎖程度的裝置照片。

四、脂肪體觸酶活性測量

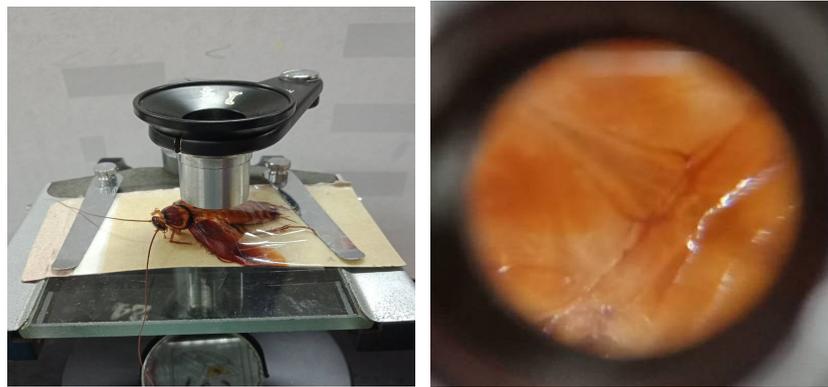
- (一)、將 50 毫升的針筒與微量吸量管(最小刻度為 0.01 毫升)用橡皮管連接
- (二)、將乾淨棉花棒插入珠針後秤重並記錄其數值
- (三)、解剖待測蟑螂並用棉花棒沾取蟑螂脂肪體後再次測量棉花棒的重量
- (四)、將沾取脂肪體後的棉花棒放入針筒內，以磁鐵吸住珠針，並以推桿塞住針筒使針筒內形成密閉空間
- (五)、架設網路攝影機後，拿掉磁鐵開始進行脂肪體與雙氧水的反應



圖七 脂肪體觸酶活性測量裝置圖

五、心跳率的測量

- (一)、將待測蟑螂翅膀分開後以膠帶固定於蟑螂屋貼紙上，以解剖顯微鏡觀察心跳率



圖八 心跳率的測量情形

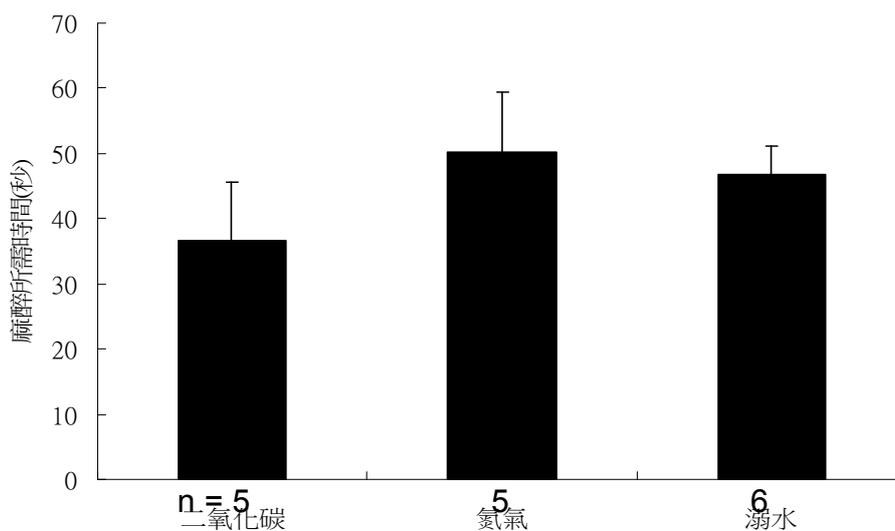
肆、研究結果

一、肢體僵直程度的觀察

在各種缺氧處理的操作過程中，我們發現溺水而昏迷的蟑螂，其四肢較為柔軟無力，而二氧化碳與氮氣缺氧而昏迷的蟑螂，四肢則較為僵直。

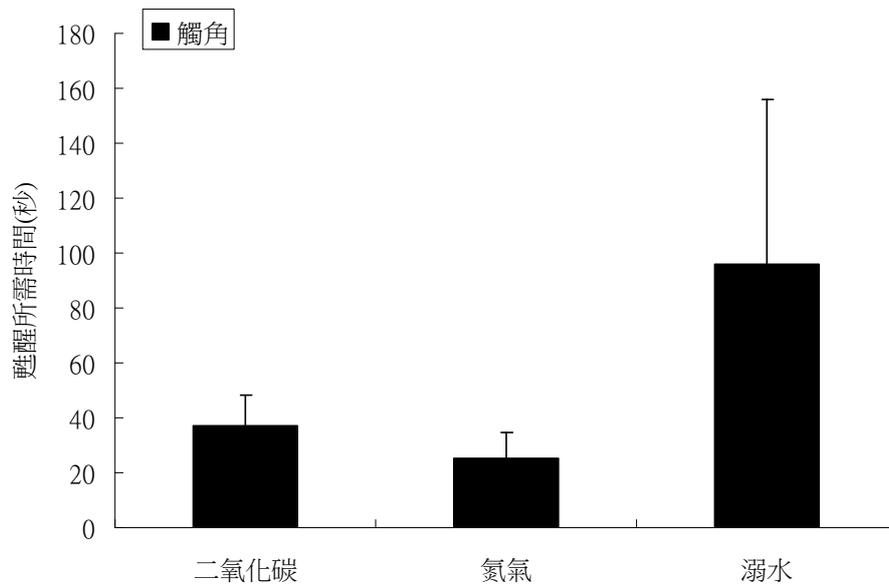
二、造成昏迷及甦醒所需時間

無論是氮缺氧、二氧化碳缺氧與溺水處理，造成昏迷所需的時間並無統計上的顯著差異(圖九)。若以觸角開始運動作為甦醒指標，各種缺氧方式之間亦無差異(圖十)。若以單一步足開始運動作為甦醒指標，氮缺氧所需時間較其他兩組長(圖十一)。若以六隻步足皆運動作為甦醒指標，溺水處理組所需時間較其他兩組長(圖十二)。



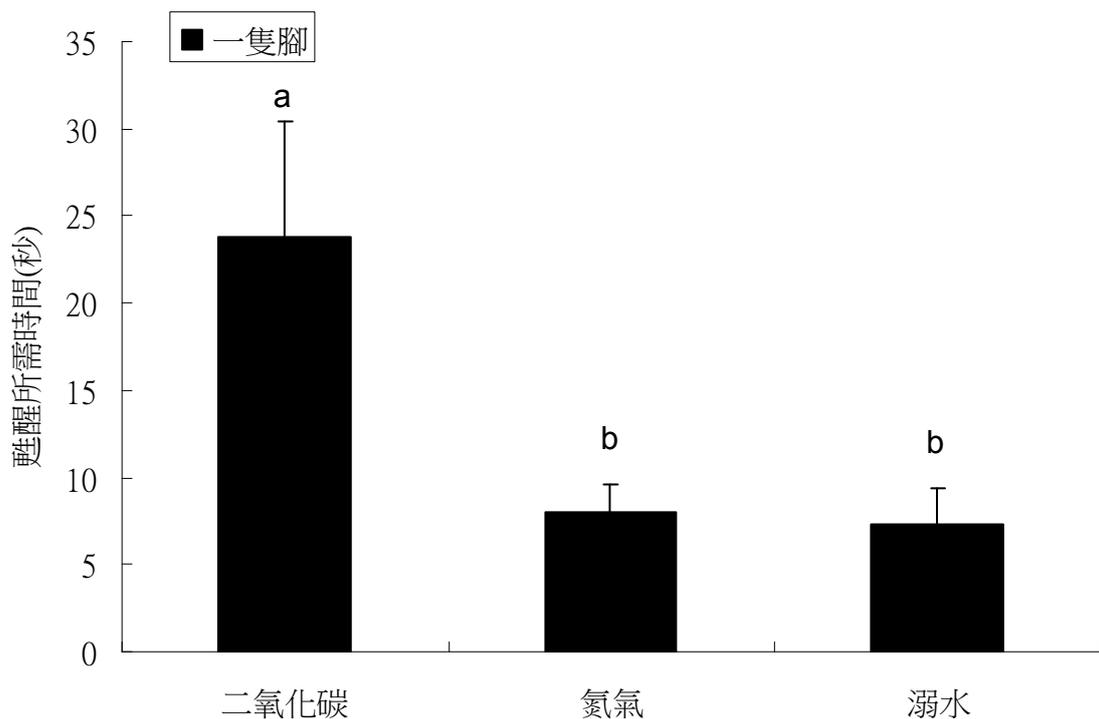
圖九 氮缺氧、二氧化碳缺氧與溺水處理，造成昏迷所需的時間(平均 ± 標準誤，n = 取樣數)。

各組之間未達統計上的顯著差異(單尾 t 檢定， $p > 0.05$)



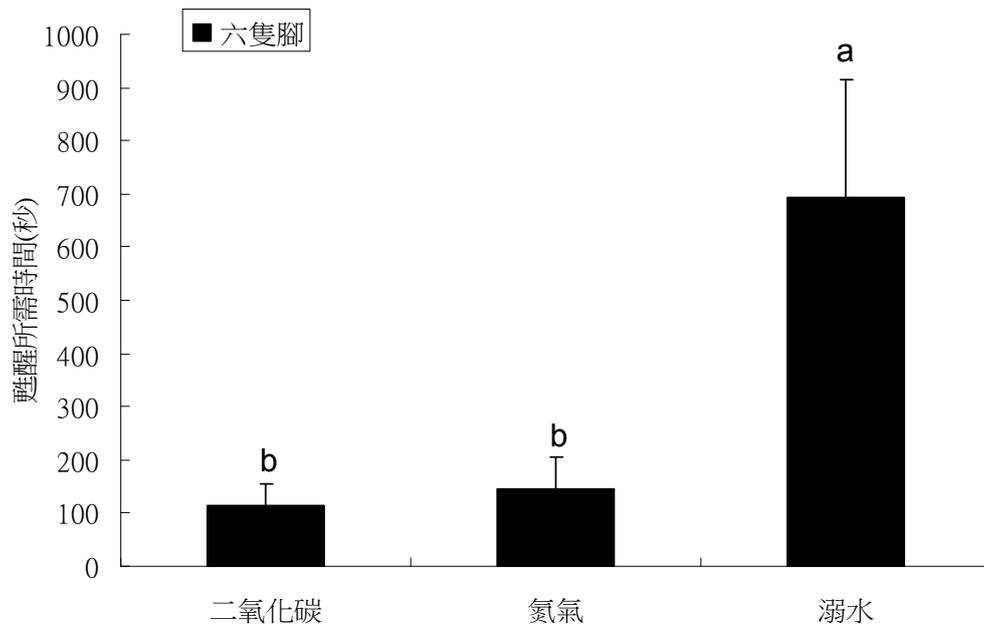
圖十 不同缺氧方式造成昏迷後，甦醒過程中觸角開始擺動所需時間 (平均 ± 標準誤，取樣數如同圖九)。

各組之間未達統計上的顯著差異(單尾 t 檢定， $p > 0.05$)



圖十一 不同缺氧方式造成昏迷後，甦醒過程中任一隻腳開始擺動所需時間 (平均 ± 標準誤，取樣數如同圖九)。

a 與 b 達統計上的顯著差異(單尾 t 檢定， $p < 0.05$)。

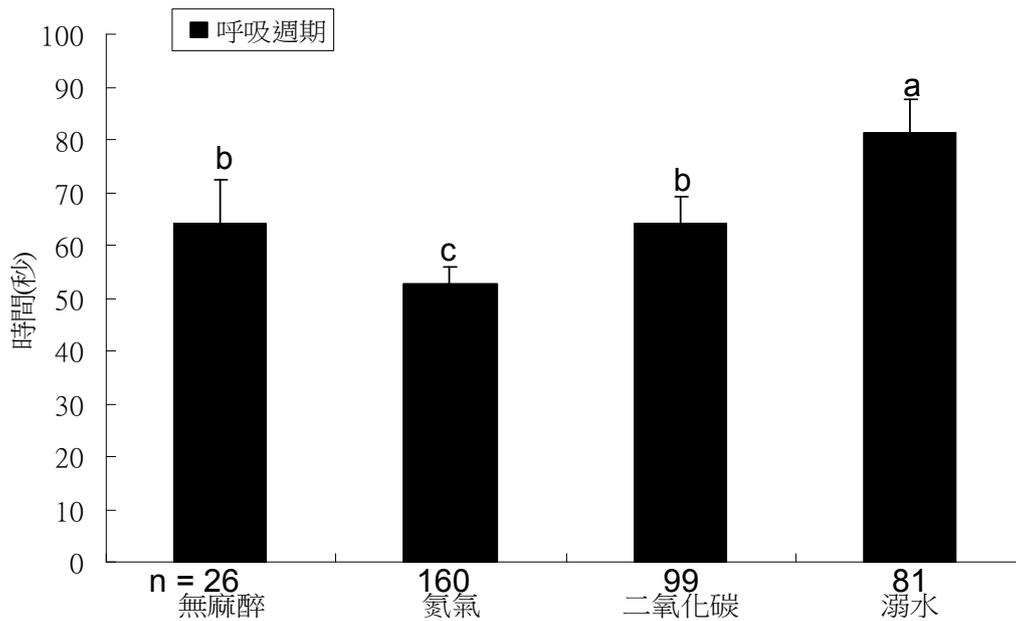


圖十二 不同缺氧方式造成昏迷後，甦醒過程中六隻腳皆擺動所需時間 (平均 ± 標準誤，取樣數如同圖九)。

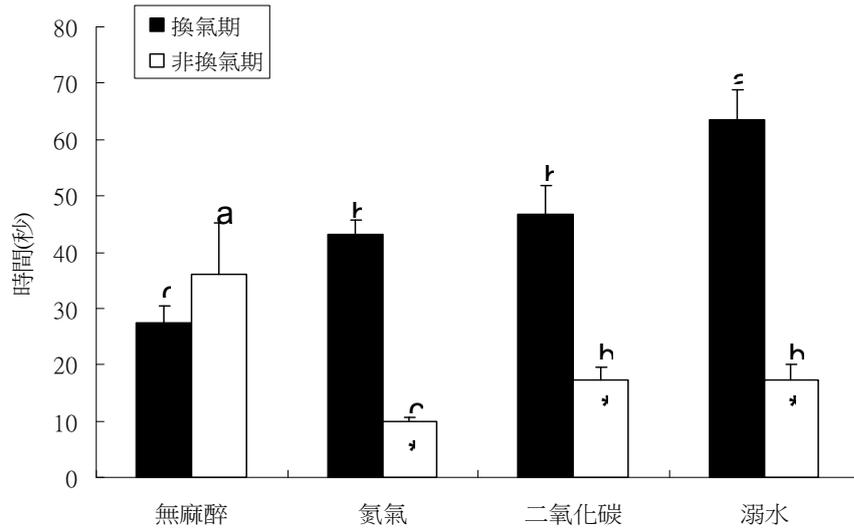
a 與 b 達統計上的顯著差異(單尾 t 檢定， $p < 0.05$)。

三、對呼吸週期的效應

比較氮缺氧、二氧化碳缺氧與溺水處理對呼吸週期長短的效應，發現氮缺氧可縮短呼吸週期，溺水處理可增加呼吸週期，而二氧化碳缺氧對呼吸週期的長度不具效應(圖十三)。分別比較換氣期與非換氣期的長度，氮缺氧、二氧化碳缺氧與溺水處理皆增加換氣期長度，其中溺水處理增加的幅度最大(圖十四)；氮缺氧、二氧化碳缺氧與溺水處理皆降低非換氣期長度，其中氮缺氧減少的幅度最大(圖十四)。



圖十三 氮缺氧、二氧化碳缺氧與溺水處理造成昏迷後，對「呼吸週期」的效應。
(平均 \pm 標準誤，n = 取樣數，分別來自 4、12、9、11 隻個體)。
a、b 與 c 之間達統計上的顯著差異(單尾 t 檢定， $p < 0.05$)。



圖十四 氮缺氧、二氧化碳缺氧與溺水處理造成昏迷後，對「換氣期」與「非換氣期」的效應(平均 \pm 標準誤，取樣數如同圖十三)。

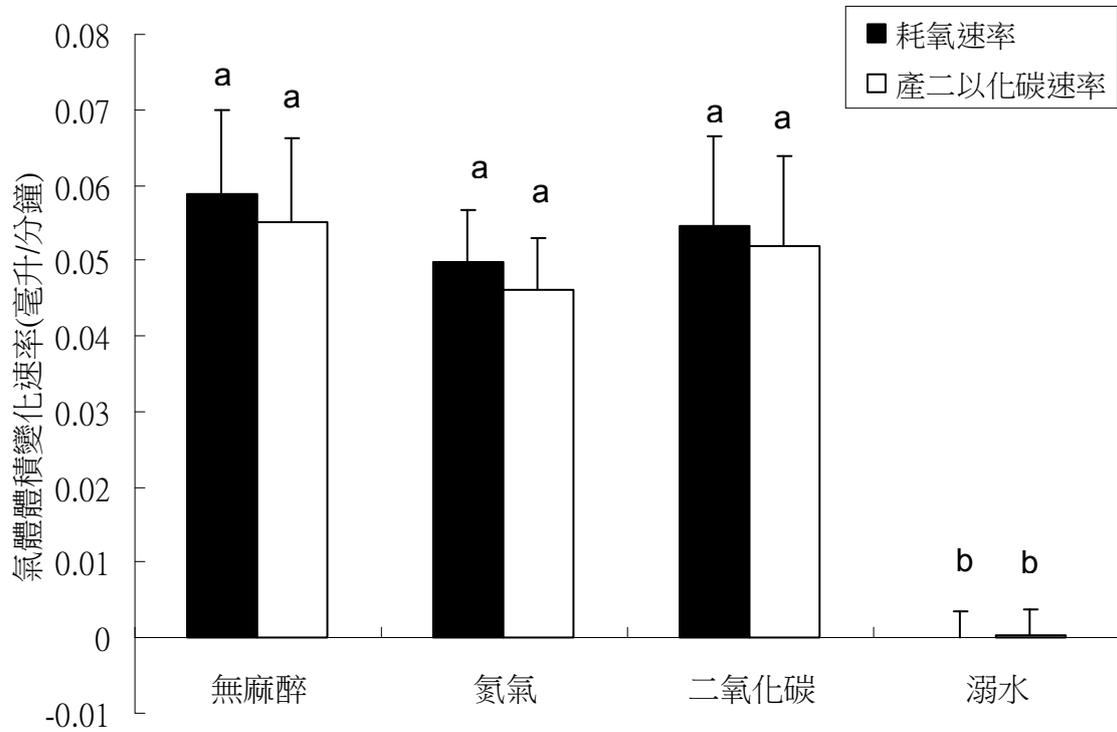
*：與「換氣期」相比達統計上的顯著差異(單尾 t 檢定， $p < 0.05$)。

a、b 與 c 之間達統計上的顯著差異(單尾 t 檢定， $p < 0.05$)。

a'、b' 與 c' 之間達統計上的顯著差異(單尾 t 檢定， $p < 0.05$)。

四、對代謝率的效應

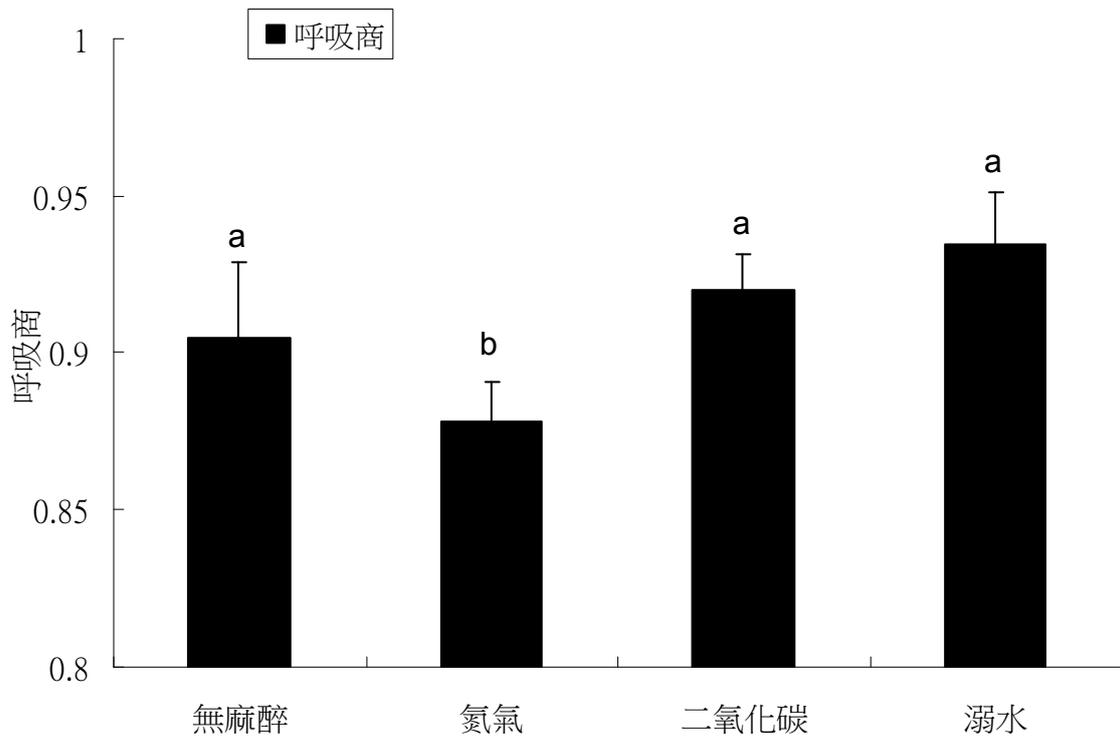
比較氮缺氧、二氧化碳缺氧與溺水處理造成昏迷後，對耗氧速率與產二氧化碳速率的效應，發現溺水處理後，代謝率大幅減少至幾乎測量不到，而氮缺氧與二氧化碳缺氧則與對照組一致(圖十五)。各種缺氧方法中，只有氮缺氧使呼吸商下降(圖十六)。



圖十五 氮缺氧、二氧化碳缺氧與溺水處理造成昏迷後，對「耗氧速率」與「產二氧化碳速率」的效應(平均 ± 標準誤，取樣數如同圖十三)。

a 與 b 之間達統計上的顯著差異(單尾 t 檢定， $p < 0.05$)。

a' 與 b'之間達統計上的顯著差異(單尾 t 檢定， $p < 0.05$)。



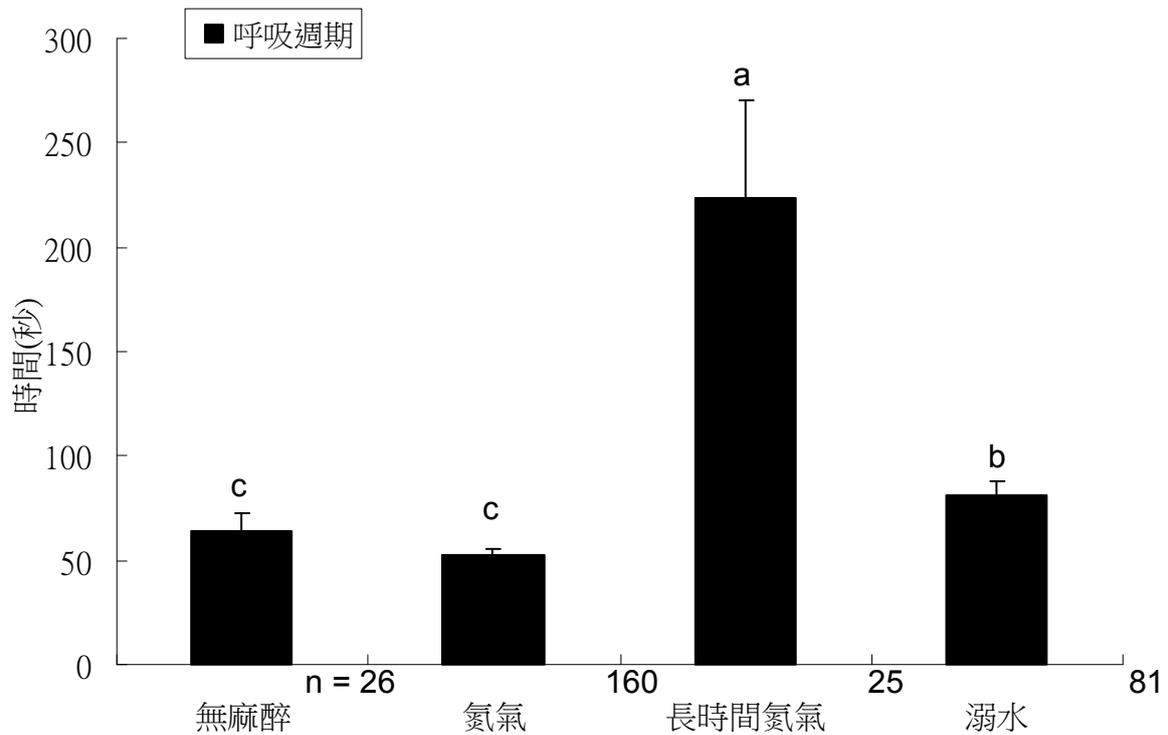
圖十六 氮缺氧、二氧化碳缺氧與溺水處理造成昏迷後，對「呼吸商」的效應 (平均 ± 標準誤，取樣數如同圖十三)。

a 與 b 之間達統計上的顯著差異(單尾 t 檢定， $p < 0.05$)。

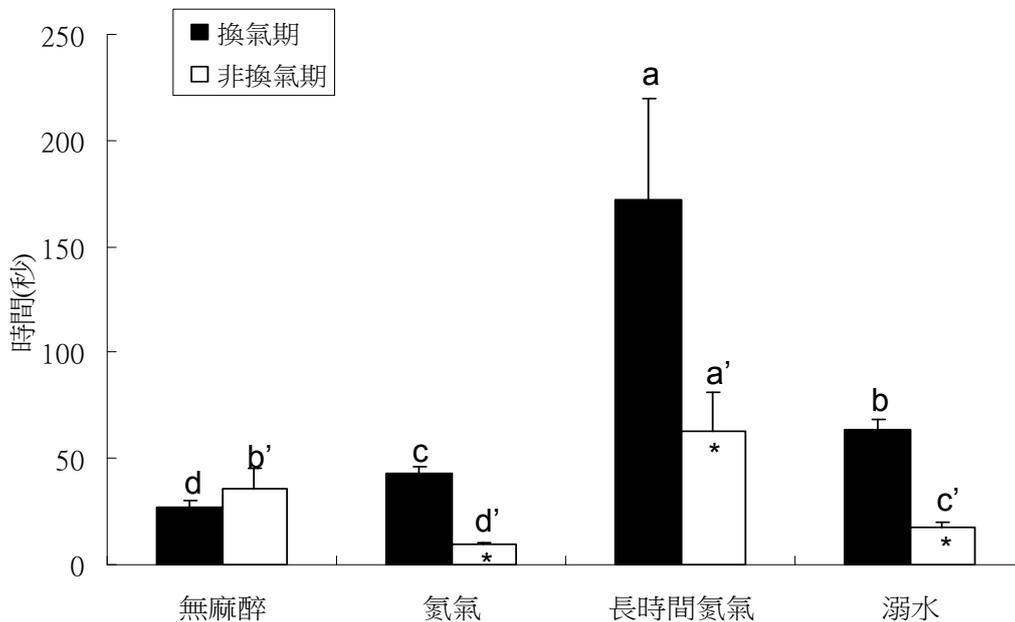
五、長期氮缺氧對呼吸週期與代謝率的效應

我們已發現氮缺氧、二氧化碳缺氧與溺水處理，造成昏迷所需的時間是一致的(圖九)，但我們懷疑溺水處理的蟑螂，在離開水面後可能依然處於缺氧狀態。為了探討溺水處理是否可造成缺氧時間較久，故產生與其它缺氧麻醉方式不同的生理效應，故我們透過氮缺氧處理時，透過增加蟑螂暴露於氮氣的時間(超過 5 分鐘)，增加缺氧時間。我們發現長期氮缺氧所引發的昏迷，可大幅增加呼吸週期(圖十七)，與溺水處理的呼吸週期較長的趨勢類似。其中，長期氮缺氧的換氣期與非換氣期皆較對照組長，但溺水處理組的換氣期增加而非換氣期減少，兩者趨勢則不吻合(圖十八)。

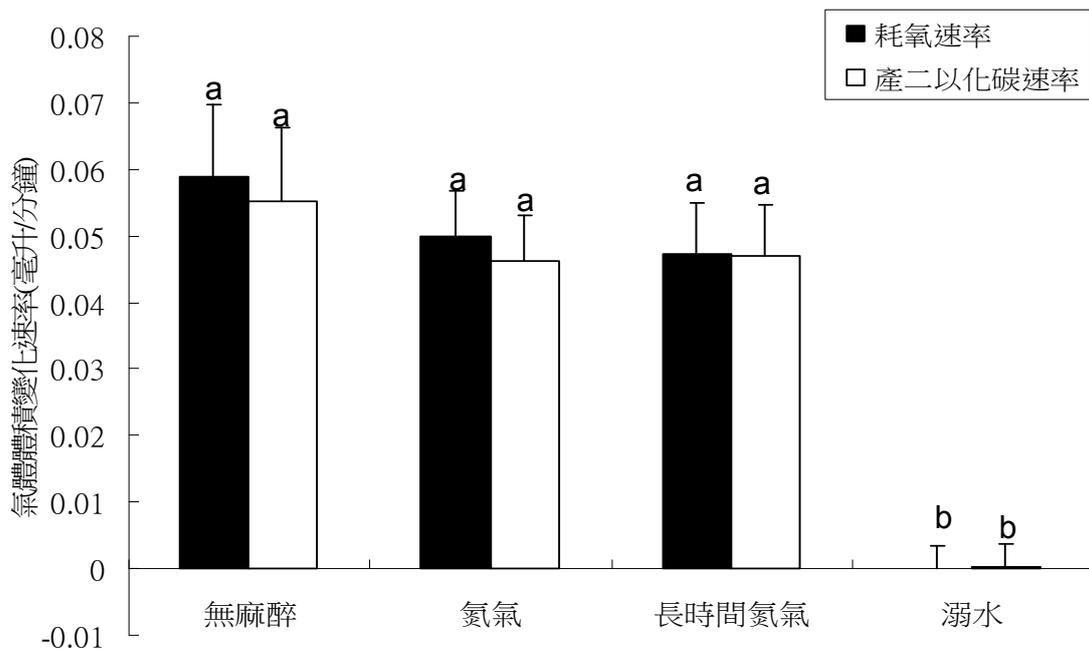
長期氮缺氧對耗氧速率與產二氧化碳速率不具有效應，與對照組與短期氮缺氧具同樣的效果(圖十九)，但長期氮缺氧卻會大幅增加呼吸商(圖二十)，與溺水處理可增加呼吸商的趨勢相似。



圖十七 短期氮缺氧、長期氮缺氧與溺水處理對「呼吸週期」的效應
(平均 ± 標準誤，n = 取樣數，分別來自 4、12、10、11 隻個體)。
a 與 b 之間達統計上的顯著差異(單尾 t 檢定， $p < 0.05$)。



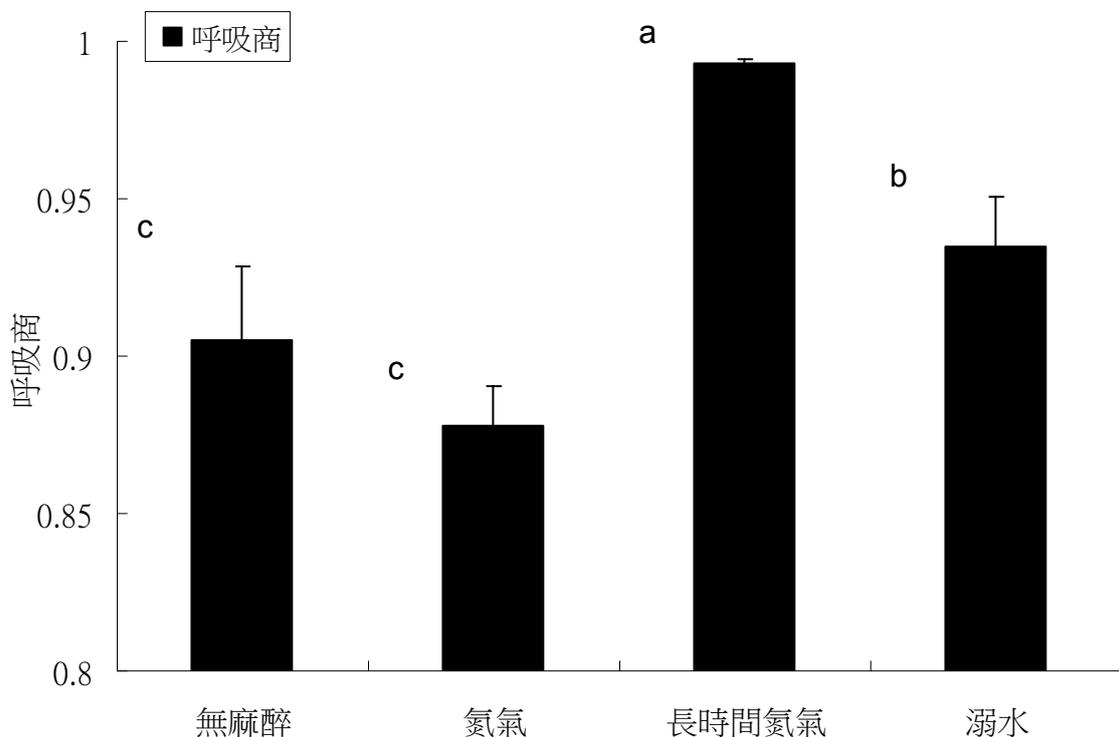
圖十八 短期氮缺氧、長期氮缺氧與溺水處理對「換氣期」與「非換氣期」的效應
(平均 ± 標準誤，取樣數如同圖十五)。
*：與「換氣期」相比達統計上的顯著差異(單尾 t 檢定， $p < 0.05$)。
a、b、c 與 d 之間達統計上的顯著差異(單尾 t 檢定， $p < 0.05$)。
a'、b'、c' 與 d' 之間達統計上的顯著差異(單尾 t 檢定， $p < 0.05$)。



圖十九 短期氮缺氧、長期氮缺氧與溺水處理對「耗氧速率」與「產二氧化碳速率」的效應(平均 \pm 標準誤，取樣數如同圖十五)。

a 與 b 之間達統計上的顯著差異(單尾 t 檢定， $p < 0.05$)。

a' 與 b'之間達統計上的顯著差異(單尾 t 檢定， $p < 0.05$)。



圖二十 不同麻醉法麻醉後，對「呼吸商」的效應

(平均 \pm 標準誤，取樣數如同圖十五)。

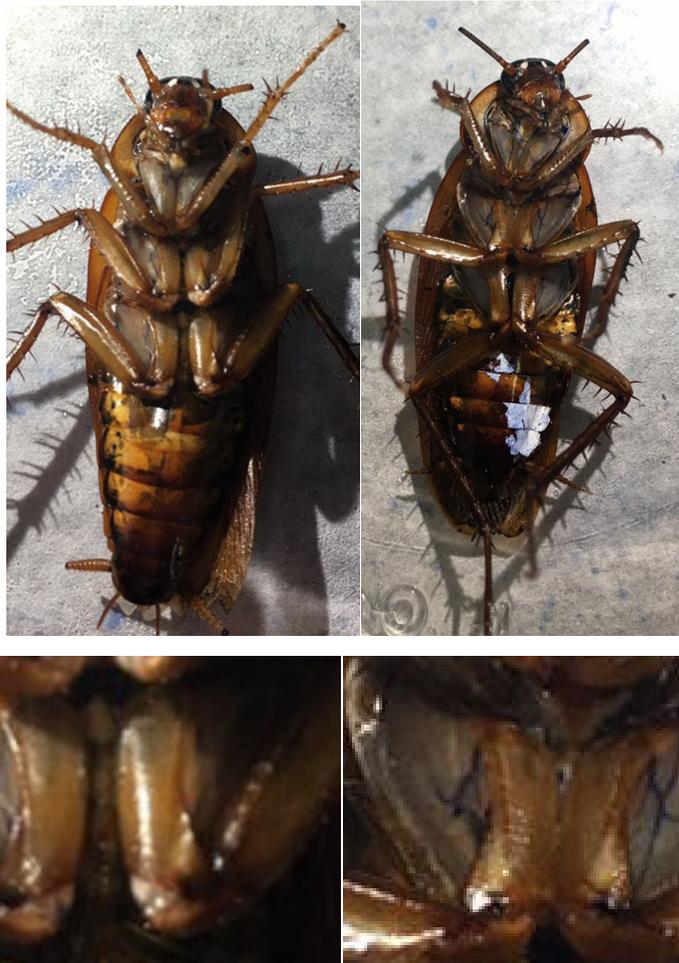
a、b 與 c 之間達統計上的顯著差異(單尾 t 檢定， $p < 0.05$)。

六、氣門閉鎖反射的程度

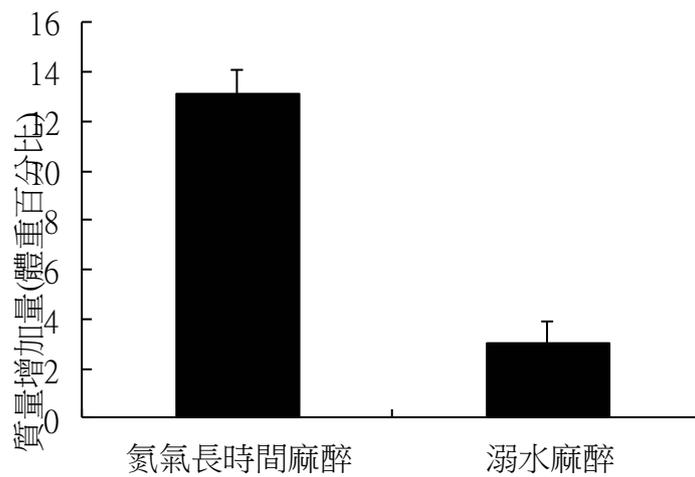
比較溺水處理與長期氮缺氧的蟲體，透過「氣管系統攝入亞甲藍液」之器材的操作後，比較前胸背板下組織與氣管系統的亞甲藍液滲入情形，以比較氣道閉鎖的程度，發現溺水處理後，亞甲藍液經氣管系統滲入身體的程度，較長期氮缺氧組小(圖二十一)，代表溺水處理可引發較大程度的氣道閉鎖。



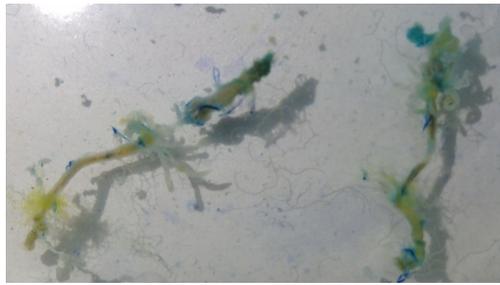
圖二十一 溺水處理(左)與長期氮缺氧(右)，比較氣管系統攝入亞甲藍液程度的照片。照片中為掀開前胸背板後，觀察肌肉組織與氣管系統攝入亞甲藍液的情形比較。



圖二十二 溺水處理(左)與長期氮缺氧(右)，比較氣管系統攝入亞甲藍液程度的照片。照片中為足部氣管系統攝入亞甲藍液的情形比較(箭頭所指處為被亞甲藍液滲入的氣管)。



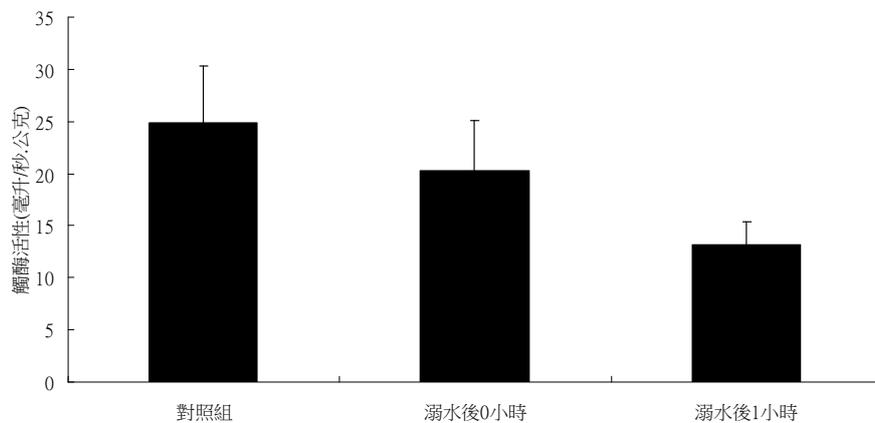
圖二十三 比較長時間氮氣麻醉與溺水麻醉蟑螂涉入亞甲藍液後的質量增加量



圖二十四 解剖氣門反射實驗過後的蟑螂，發現消化管內並無亞甲藍液

七、脂肪體觸酶活性的差異

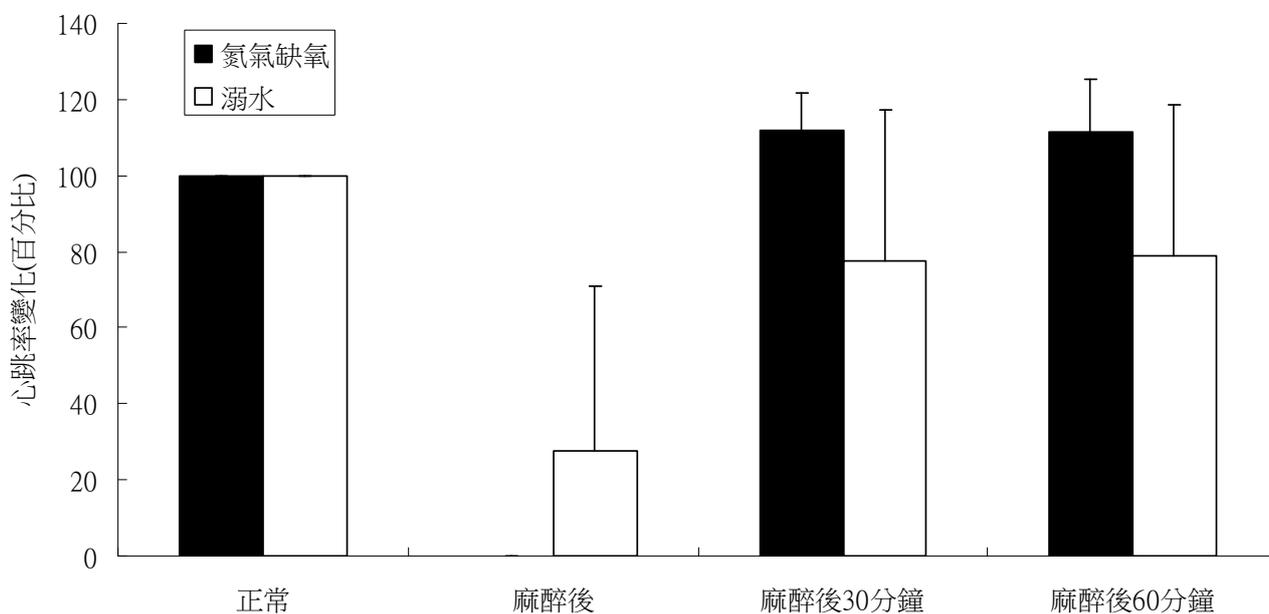
比較在溺水後直接測量(對照組)，以及溺水後 30 分鐘、溺水後 1 小時的脂肪體觸酶活性差異，發現體內的脂肪體觸酶活性有逐漸下降的趨勢，以溺水後 1 小時活性最小。顯示蟑螂在溺水後 1 小時的體內氧化壓力最小，處於長期缺氧的狀態。



圖二十五 比較溺水後不同時間下的脂肪體觸酶活性

八、心跳率的測量

近一步測量蟑螂的心跳率。藉由比對麻醉後及麻醉後 30、60 分鐘的心跳數值，看出蟑螂在溺水情況下所需恢復時間不僅較長，在 30、60 後的心跳數值也較無麻醉對照組的低。

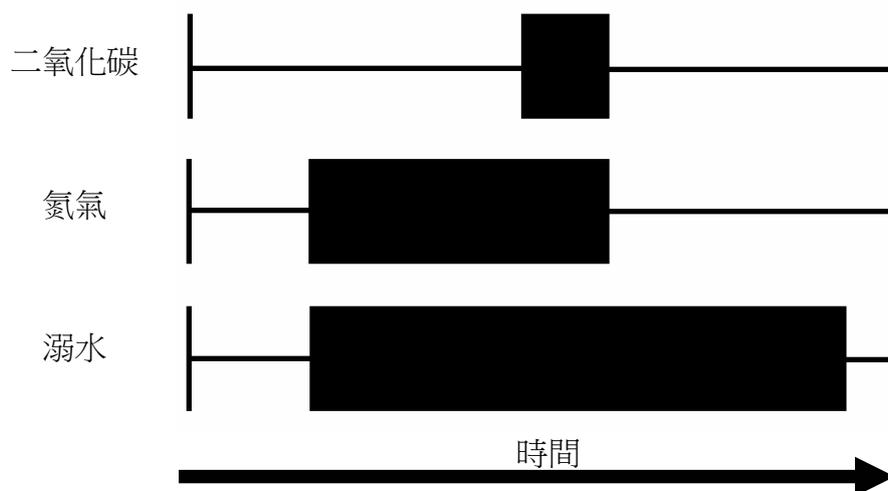


圖二十六 比對無麻醉、麻醉後、麻醉後 30 分鐘、麻醉後 60 分鐘的氮氣、溺水昏迷心跳率數值

伍、討論

本研究成功建立「溺水對昆蟲行為與生理的效應」的動物模式。透過比較缺氧造成昏迷及甦醒所需時間，以及對呼吸與代謝生理的效應，與氣門閉鎖反射的程度等指標，探討、比較氮缺氧、二氧化碳缺氧與溺水處理等不同方式，以及不同氮缺氧時間的生理效應。我們發現溺水處理與其它缺氧昏迷的效應不相同，其中以耗氧速率與產二氧化碳速率的大幅下降(圖十五)，是對代謝生理的效應中，與其它缺氧昏迷的最大差異。

不同缺氧方式造成昏迷所需時間相同，但甦醒所需時間不同，若以單一隻步足開始運動視為啟動甦醒過程，六隻步足皆可運動視為完全甦醒。我們可將蟑螂的甦醒過程彙整成圖二十，其中二氧化碳缺氧昏迷後，較晚啟動甦醒過程，但可較早完全甦醒，也就是甦醒所需的恢復期較短。這可以解釋為何絕大部分的昆蟲實驗，皆以二氧化碳麻醉作為麻醉實驗動物的手段。溺水昏迷雖較早就已啟動甦醒程序，但較晚才完全甦醒，代表甦醒所需的恢復期較長。



圖二十七 麻醉後至甦醒階段所需時間示意圖。黑色柱狀代表麻醉後開始甦醒至完全甦醒的期間。

早在 1972 年，Gooden 即已提出人類溺水時會引起反射性的心血管反應，其效應海洋哺乳動物潛水時相似，這個心血管反應即為潛水反射。海洋哺乳動物在長時間潛水過程中，必須有一些機制防止水進入肺部，同時兩個重要區域(心臟和大腦)仍需持續供應氧氣。目前有許多證據指出，非海洋哺乳類的人類，在身處水面下時，喉部具有阻擋水進入與對大腦和心臟的氧氣供應具有保護性反應(Gooden, 1972)，很類似海洋哺乳動物的潛水反射。

我們懷疑蟑螂溺水昏迷後，甦醒所需的恢復期較長，與代謝率大幅下降，可能與人類溺

水過程中，出現的喉痙攣(Laryngospasm)與潛水反射(diving reflex)相似。溺水生理學涉及兩個不同的事件：浸入(immersion，上呼吸道在水上)和淹沒(submersion，上呼吸道在水下)，淹沒包含了潛水反射與上呼吸道反射，其中上呼吸道反射最長常見也最重要的是喉痙攣(Bierens, et al., 2016)。喉痙攣是指是喉部受刺激後，引發喉部杓狀褶皺，假聲帶和真聲帶的閉合，造成氣道閉鎖以防止水與其它異物進入氣道(Bierens, et al., 2016；陳，2009；張茹，2016)。潛水反射是指爬蟲類、鳥類與哺乳類的面部受水刺激後，引發呼吸運動終止、心跳率下降與代謝率下降的反射，潛水反射可以解釋部分溺水受害者在水下長時間仍可存活的部分原因(Bierens, et al., 2016)。

若蟑螂溺水時引發氣道閉鎖與抑制呼吸運動，可使蟑螂在離水後，氣道仍處於閉鎖狀態，且呼吸運動依然受抑制，如此在離水後仍會處於無法交換氣體的狀態，使缺氧情況仍然持續，使身體受損程度更大，故甦醒所需的恢復期較長，形成乾溺水的現象。我們的實驗結果中確實發現溺水後，呼吸週期增加，這代表了呼吸頻率下降，證明蟑螂溺水後呼吸運動受到抑制，而其它的缺氧性昏迷則無此現象。這個現象讓我們相信：昆蟲也存在著類似如同爬蟲類、鳥類與哺乳類等脊椎動物的潛水反射。

為了驗證是否因呼吸運動受到抑制，使得在離水後仍無法進行氣體交換，就是溺水昏迷與其它缺氧昏迷出現差異的原因嗎？我們以長期氮缺氧模擬長時間缺氧，發現部分生理效應與溺水昏迷有類似的趨勢，包含：呼吸週期增加與呼吸商增加。

此外，為了驗證溺水過程是否可引發氣道閉鎖，我們以自製的「氣管系統攝入染劑」的器材，比較溺水昏迷與長期氮缺氧昏迷後，氣管系統攝入染劑的程度。我們發現溺水昏迷確實可引發氣道閉鎖，使得染劑被氣管系統攝入的量較少，使得組織與氣管中的染劑較少(圖二十一、圖二十二)。

透過以上實驗，我們發現蟑螂適合作為「溺水對動物行為與生理的效應」的模式動物。透過這個動物模式，我們發現溺水昏迷與其它缺氧昏迷，對呼吸生理與代謝生理具有不同效應，這些生理效應上的差異，可能起因於氣道閉鎖與抑制呼吸運動，所造成的持續性缺氧傷害。我們也證明，昆蟲在溺水時，會產生類似人體溺水時的喉痙攣與潛水反射等生理反應。在研究近乎淹溺(near drowning)的病理機制與治療預後等醫療策略，提供了一項有力的研究工具。

誠如加拿大醫學協會期刊(*Canadian Medical Association Journal*)於 1973 的一篇報導中指出：潛水反射的相關研究提供了溺水救生的重要信息，例如：溺水的患者即使肢體已出現紫紺症狀，實際上仍然保有對心臟和大腦的血液供應，此時不能以腕部的橈動脈搏動(常見的脈搏測量方法)作為生命跡象的判斷，而應以頸動脈或瞳孔反射判斷身體中樞是否仍有血

液循環(Anonymous,1973)。藉由新型的判斷手法可以更精確的判斷患者的生命狀況，而本研究則提供了昆蟲的動物模式，可應用於溺水對生理效應的研究，與相關治療手段與預後情形的相關研究。

陸、結論

- 一、本研究成功建立研究「溺水對昆蟲行為與生理的效應」的動物模式。
- 二、不同缺氧方式造成昏迷所需時間相同，但甦醒所需時間不同
 - (一)、二氧化碳麻醉較晚啟動甦醒過程，但較早完全甦醒，甦醒所需的恢復期較短
 - (二)、溺水昏迷較早啟動甦醒程序，但較晚才完全甦醒，甦醒所需的恢復期較長
- 三、氮缺氧昏迷可縮短呼吸週期，溺水昏迷可增長呼吸週期。氮缺氧、二氧化碳缺氧與溺水處理皆增加換氣期長度，其中溺水昏迷增加的幅度最大；氮缺氧、二氧化碳缺氧與溺水處理皆降低非換氣期長度，其中氮缺氧減少的幅度最大。
- 四、溺水昏迷後，耗氧速率與產二氧化碳速率大幅下降。氮缺氧昏迷使呼吸商下降。
- 五、長期氮缺氧而昏迷後，可大幅增加呼吸週期與呼吸商，與溺水昏迷的趨勢相似。
- 六、我們以自製的「氣管系統攝入染劑」的器材，發現溺水處理可引發氣道閉鎖，使得染劑被氣管系統攝入的量較少。
- 七、我們推測蟑螂溺水的過程，可出現類似人類溺水過程出現的喉痙攣(Laryngospasm)與潛水反射(diving reflex)，造成氣道閉鎖與抑制呼吸運動的現象，造成缺氧時間增加而增加損傷。

柒、參考資料及其他

- Anonymous. 1973. Drowning and the diving reflex. *Can. Med. Assoc. J.* 108(10): 1209.
- Bierens, J. J., Lunetta, P., Tipton, M. and Warner, D.S. 2016. Physiology Of Drowning: A Review. *Physiology.* 31(2): 147-66.
- Gooden, B. A. 1972. Drowning and the diving reflex in man. *Med. J. Aust.* 2(11): 583-7.
- Kölsch, G., Jakobi, K., Wegener, G. and Braune, H. J. 2002. Energy metabolism and metabolic rate of the alder leaf beetle *Agelastica alni* (L.) (Coleoptera, Chrysomelidae) under aerobic and anaerobic conditions: a microcalorimetric study. *J. Insect Physiol.* 48(2): 143-151.
- 林佳欣、白璐、高森永、林金定、賴建丞、簡戊鑑，2010。臺灣 1982-2007 年溺水及梗塞窒息死亡趨勢分析。北市醫學雜誌，7(1)，41-52。
- 夏雨綜，2017。美 4 歲男孩「乾溺水」身亡 卻救了另一幼童。大紀元。
(<http://www.epochtimes.com/b5/17/6/15/n9271766.htm>，檢索日期：2019.03.03)
- 高榆婷、胡品嫻，2015。無頭殭屍大解密-失去頭部對蟑螂循環、呼吸與代謝生理功能的效應。第 48 屆臺北市中小學科展高中組生物科優等作品。
- 張茹梅，2016。近乎淹溺致急性呼吸窘迫綜合征的治療進展。天津醫科大學學報，22(4)，367-369。
- 陳明仁，2009。不容輕忽的溺水意外。恩主公醫訊，6 月號，13-16。
- 劉茲妤，2018。小強酒醉會嗨還是茫?-酒精對蟑螂行為與生理之 Hormesis 與其他效應的探討。2018 年臺灣國際科學展覽會動物學二等獎作品。
- 蔡**，2006。認識身旁的小傢伙(二)—美洲蟑螂外部型態與內部器官的初步觀察。科學教育月刊，290，43-47。
- 蔡**、張凱淳、李彥翰、陳柏妮、陳暉瀚、林金盾，2004。缺氧對美洲蟑螂代謝的影響。師大生物學報，39(1)，41-48。
- 嚴云岑，2017。乾溺水潛伏期達 72 小時 「嗆水」後出現這 2 症狀快就醫。ETtoday 新聞。
(<https://house.ettoday.net/news/942207>，檢索日期：2019.03.03)

註:尊重匿名原則，故隱去作者姓名資訊