

中華民國第四十八屆中小學科學展覽會
作品說明書

國中組 生物及地球科學科

佳作

031715

有鰓乃大-魚鰓構造、表面積計算與鰓蓋運動之觀察

學校名稱：桃園縣立永豐高級中學(附設國中)

作者： 國二 曾盈蓁 國二 劉美辰 國二 吳建霖 國二 陳瑀禎	指導老師： 藍治平
---	------------------

關鍵詞： 魚鰓、鰓蓋運動、呼吸

摘要

本實驗共解剖 31 條吳郭魚。魚鰓共有八片鰓瓣，而且鰓區與嘴巴相連通。其中鰓瓣的鰓絲是交換氣體的場所，在顯微鏡下也觀察到鰓絲有血管分布，表面排列眾多突出的鰓小葉，可以增加呼吸的表面積。以平均體重 534 公克的吳郭魚來說，八片鰓瓣約含有 2516 根鰓絲，每根鰓絲長度平均為 1.25 公分，鰓小葉的總數約 74 萬個，所構成的魚鰓總表面積可達 12 萬平方毫米，相當於 A3 紙張大小。魚的鰓蓋運動主要是藉由嘴巴與鰓蓋的交替開閉所產生的壓力變化，造成水往單方向流動，水從嘴巴流入鰓區，然後在鰓區進行氣體交換，接著水從鰓蓋處流出魚體。吳郭魚的鰓蓋運動速率每分鐘平均為 66 次，其耗氧速率平均為 0.7041（毫克/公斤-小時），其鰓蓋運動速率與耗氧速率會受到溫度、酸鹼度及鹽度的影響而有所差異。

壹、 研究動機

有一次回家經過釣魚場，看到許多條吳郭魚，當我看得正起勁時，突然想到：「為什麼魚的嘴巴要一直張開呢？應該是爲了要吃東西吧！」後來在生物課上到呼吸時，在課本上看到一張吳郭魚的圖片，畫的是水從吳郭魚的嘴巴進去，然後從鰓流出來，當時我心想：「難道魚張開嘴巴就是要呼吸？」後來在老師的建議下，決定更深入探討魚類呼吸等相關問題，並以最常見的吳郭魚作為觀察對象。

貳、 研究目的

- 一、 觀察魚鰓的外觀、鰓瓣、鰓絲與鰓小葉的構造
- 二、 測量鰓絲長度、寬度，並計算鰓絲的數目
- 三、 測量鰓小葉的寬度，並估算鰓小葉的數目
- 四、 找出估算魚鰓表面積的方法，並算出魚鰓的表面積
- 五、 觀察魚的鰓蓋運動過程，並了解影響鰓蓋運動速率的因素
- 六、 觀察魚的耗氧速率變化，並了解影響呼吸速率的因素

參、研究設備及器材

一、實驗材料：

(一)、解剖的吳郭魚：

本實驗所觀察的對象是吳郭魚，又稱南洋鯽、台灣鯛，屬於龍頭魚亞目（Labroidei），麗魚科（Cichlidae），台灣的吳郭魚是從非洲引進的外來種魚。吳郭魚外形如下圖一所示，這些都是雜交種的吳郭魚。

解剖的吳郭魚是請同學的媽媽早上去市場買的，本次實驗共解剖 31 條吳郭魚，魚的平均重量為 534 公克，魚重量介於 162 至 1035 公克之間，其中 13 條魚的體長平均為 24.7 公分，魚體表面積平均為 533.24 平方公分，鰓蓋弧長平均為 9.06 公分。



圖 1

(二)、飼養的吳郭魚：

本次實驗為了觀察吳郭魚的鰓蓋運動與呼吸作用，我們嘗試在水族箱養吳郭魚。最後成功養活了其中的十一條魚，這十一條魚為便於觀察都將牠們取了姓名，其姓名與體重如下表所示。

		
恐龍(1100 公克)	蛋頭 (750 公克)	木瓜 (420 公克)
		
芭樂 (960 公克)	神仙 (480 公克)	木炭 (530 公克)

		
香蕉（400 公克）	彩虹（700 公克）	番茄（710 公克）
		
肥肥（700 公克）	黃瓜（420 公克）	

吳郭魚飼養在容積 100 公升的整理箱，輔以打氣設備，如右圖所示，為避免魚隻會互相攻擊造成傷亡，最後決定每個飼養箱只養一隻吳郭魚。吳郭魚皆以淡水飼養，而且水都會先曝氣 1-2 天，避免水中的氯影響到魚的生存，通常每 2-3 天會換飼養箱體積一半的水，其水溫維持在 20-25℃，水的酸鹼值約在 pH7，水中溶氧值在 5-6mg/L 左右。



圖 2

（三）、實驗器材：

- 1、**【鰓的解剖與觀察】**：培養皿、磅秤、電子天秤、水果刀、解剖刀、剪刀、砧板、複式顯微鏡、鑷子、目鏡測微器、載物臺測微器、游標尺、照相機、棉線、鋁箔紙、方格紙、尺
- 2、**【鰓蓋運動觀察】**：計數器（如圖）、計時器
- 3、**【呼吸速率測定】**：濾紙、吹風機、陶瓷纖維網、量筒、漏斗、抽濾漏斗、抽濾器、錐形瓶、橡皮塞、橡皮管、玻璃管、電子天秤、澄清石灰水、溫度計、溶氧計（如圖）、鹽度計（如圖）、酸鹼計（如圖）、溫度調控器（如圖）、加熱棒（100W）及烘箱（如圖）



溶氧計



鹽度計



溫度調控器



酸鹼計



烘箱



計數器

肆、研究過程及結果

一、建立魚的基本資料：

進行魚鰓解剖或呼吸實驗之前，應該先建立魚的基本資料，所以我們進行以下測量：

(一)、測量魚的體重：將活魚或欲解剖的魚放在秤重計上測量其結果，如圖 3 所示。



圖 3

(二)、測量魚的體表面積：利用鋁箔紙包覆魚體表面，再用剪刀剪下所需的大小，接著將剪裁的鋁箔紙放在方格紙，用鉛筆描出範圍，最後數出所佔的面積大小，如圖 4 所示。



圖 4

用鋁箔紙包覆魚身體，測量魚的體表面積

(三)、測量魚的體長：利用線測量頭部到尾鰭基部的長度，此為體長，如圖 5 所示。



圖 5

用線測量魚的體長

(四)、測量魚鰓蓋的弧長：利用線測量鰓蓋弧形的長度，此為鰓蓋的弧長，如圖 6 所示。

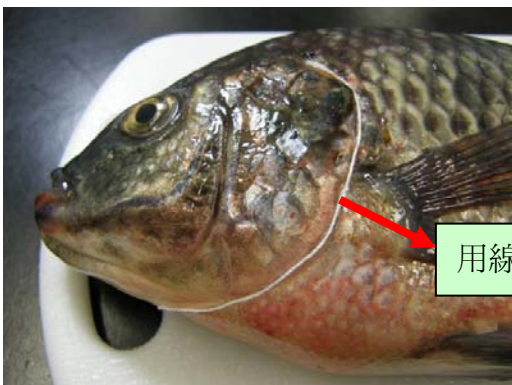


圖 6

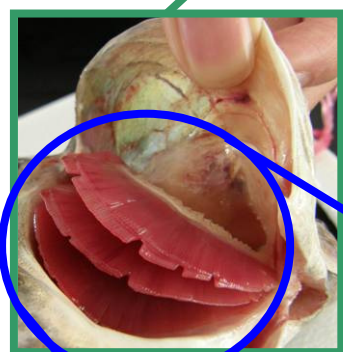
用線圍出鰓蓋，測量魚的鰓蓋弧長

二、魚鰓的解剖與觀察：

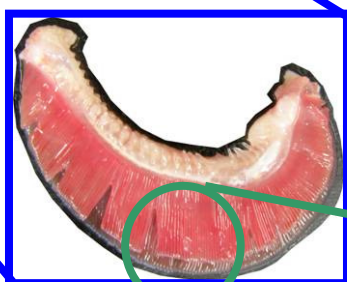
生物課本寫說鰓是魚的呼吸器官，因此觀察鰓的構造可以了解魚是怎麼進行呼吸，解剖及觀察的大致步驟如下所示（圖 7 至圖 10）：



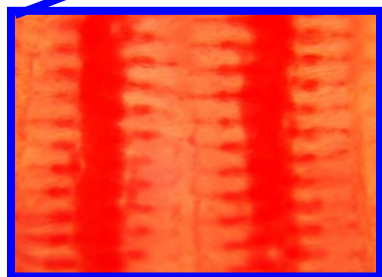
1、清洗吳郭魚身上的血液，並置於砧板上。
圖 7



2、將左右兩側的鰓蓋扳開，可以清楚看到各有四片鰓瓣。
圖 8



3、利用解剖刀及剪刀，將鰓瓣一片片取下，左右分開，由內到外依序編 1-4 號。
圖 9



4、利用複式顯微鏡觀察鰓絲與鰓小葉等構造。
圖 10

三、觀察魚的鰓蓋：

可以發現鰓蓋位於魚頭部兩側，為骨質狀構造，左右各一，鰓蓋弧長平均為 9.06 公分，如下圖 11 所示，若將鰓蓋掀開，則可以看見魚鰓。



圖 11

四、觀察魚的鰓瓣：

(一)、鰓瓣的外觀與位置：

若將鰓蓋掀開，可以在鰓腔看見紅色的魚鰓，如圖 12 所示。

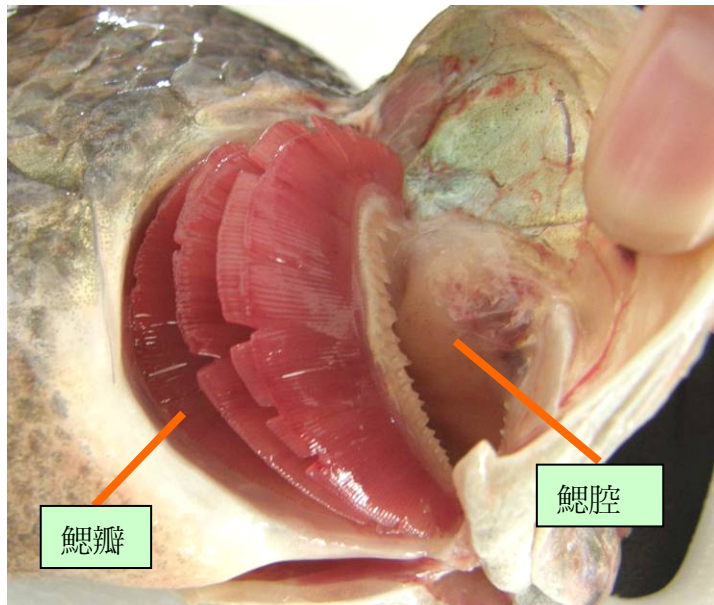


圖 12

再將魚的頭部進一步解剖，可以觀察到左右兩側的鰓腔各有四組鰓瓣，如圖 13 所示。

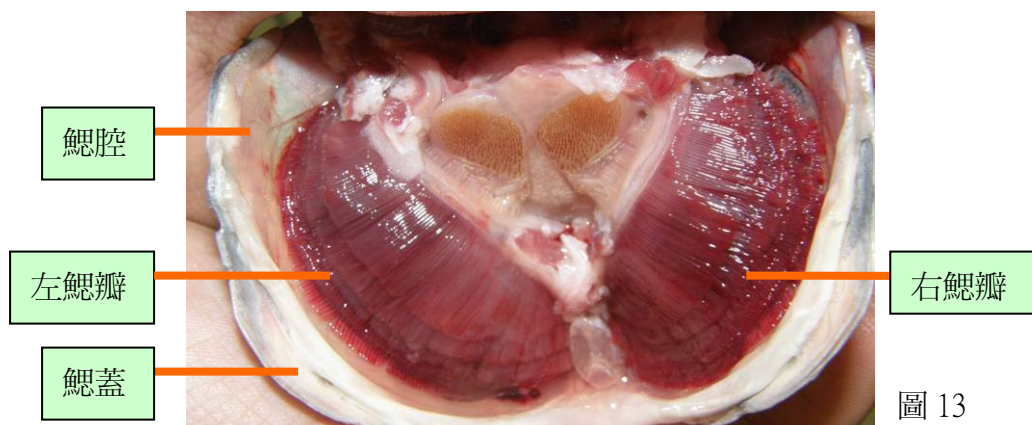


圖 13

魚的腹面也可以觀察到左右兩側的鰓腔各有四組鰓瓣，如圖 14 所示。

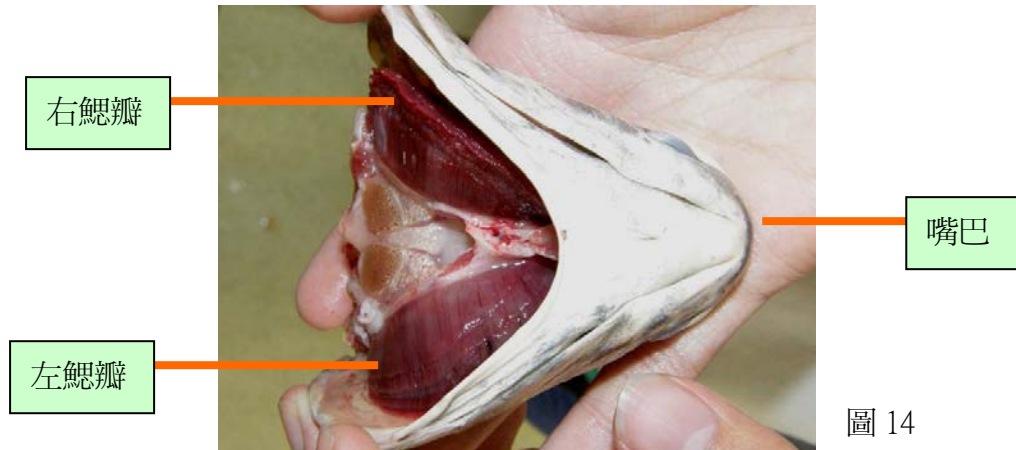


圖 14

將左右鰓瓣取出，可以看見整組魚鰓，下圖為魚鰓依照魚體方向擺示，如圖 15 所示。



圖 15

(二)、鰓瓣的數目：

將左右兩側的鰓取下，觀察到左側有四片鰓瓣，右側有四片鰓瓣，合計有八片鰓瓣，「左鰓一」代表靠近魚體左邊內側第一片鰓瓣，以下由此類推。如圖 16 所示。

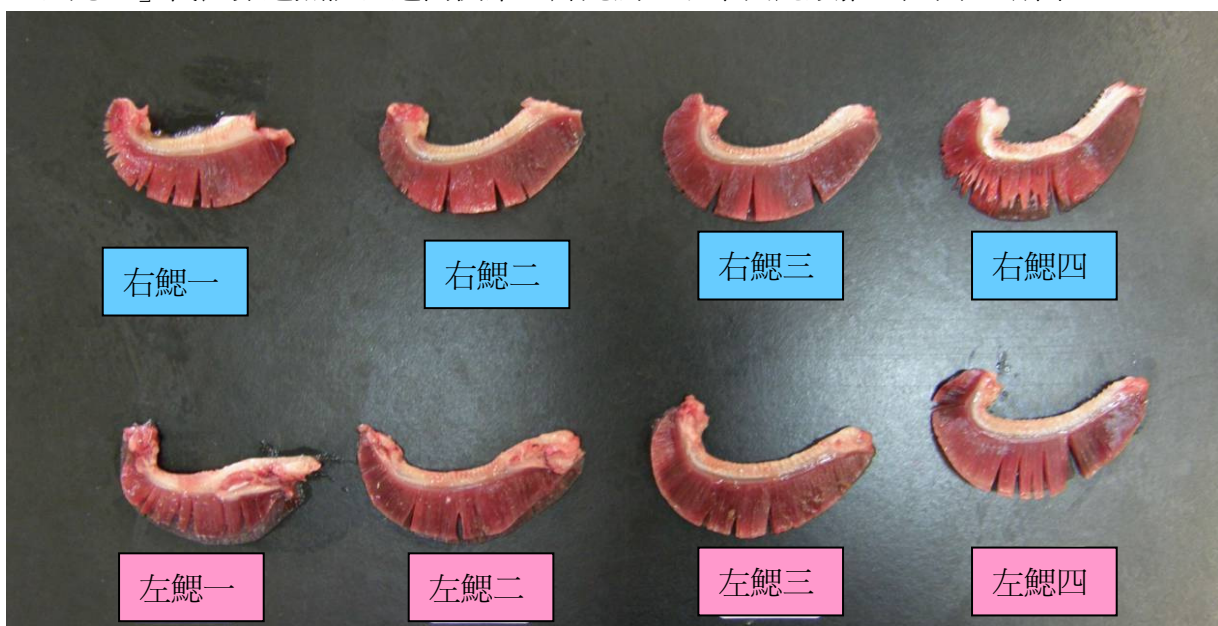


圖 16

(三)、鰓瓣的構造：

將鰓瓣取出放上方格紙上拍照，並對照文獻，可以看見每片鰓瓣是由鰓弧、鰓耙、鰓絲所組成，其外觀如下圖 17 所示，構造如下說明：

鰓弧是鰓瓣的骨架，它支撐著鰓絲，像房子的基座。

鰓絲呈現絲狀構造，摸起來柔軟，是交換氣體的主要場所。

鰓耙是鰓弧上的齒狀構造，就像冷氣機的過濾網，可以防止較大的異物從鰓腔進入鰓絲中。



圖 17

(四)、測量鰓瓣的重量與出水後的魚鰓表面積

我們將左右兩側各四片鰓瓣依序秤重、並利用方格紙測量整片鰓瓣的範圍（如圖 18 到圖 20 所示），並記錄結果。



圖 18



圖 19

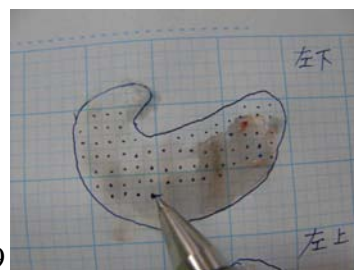


圖 20

五、觀察魚的鰓絲：

鰓絲的一端固定在鰓弧上，另一端游離（如圖 21 所示）。鰓絲一根根整齊的排列，兩側的鰓絲較短，中間的鰓絲較長。一組鰓瓣有兩排鰓絲，一排鰓絲較長，一排鰓絲較短。

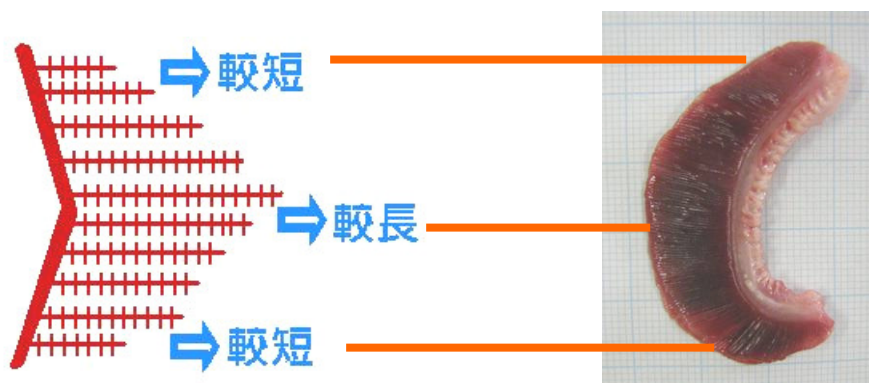


圖 21：鰓瓣示意圖

若用顯微鏡進一步觀察可以發現鰓弧有血管穿越，如圖 22 及圖 23 所示。經查文獻得知一條血管為出鰓動脈，另一條血管為入鰓動脈。

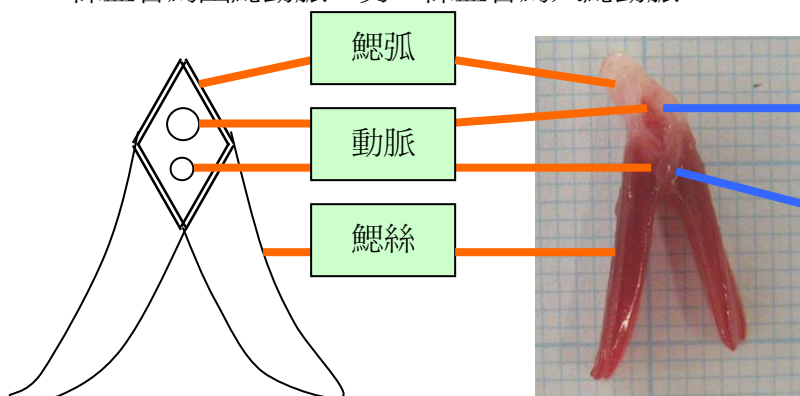


圖 22: 鰓絲示意圖

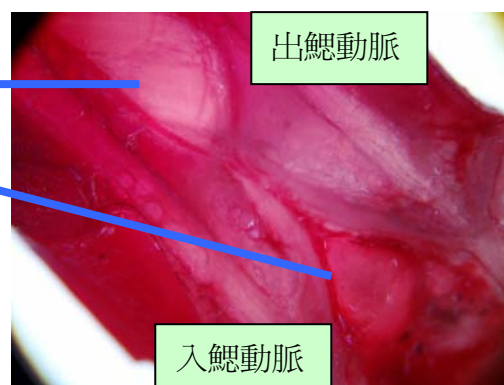


圖 23: 血管位置放大圖

六、觀察魚的鰓小葉：

曾經在生物實驗課利用複式顯微鏡觀察魚尾鰭的血管，發現效果不錯，因此老師建議我們也試著將鰓瓣置於複式顯微鏡下觀察，並用照相機將構造拍攝下來，如圖 24 及圖 25 所示：



圖 24: 顯微鏡觀察鰓瓣



圖 25: 顯微照相裝置

從 40 倍的視野發現鰓絲整齊的排成一列，鰓絲內有血管分布，如圖 26 所示，再從 100 倍的視野觀察，可以發現鰓絲中央貫穿一條大血管，往兩側延伸成對的微血管，如圖 27 所示。

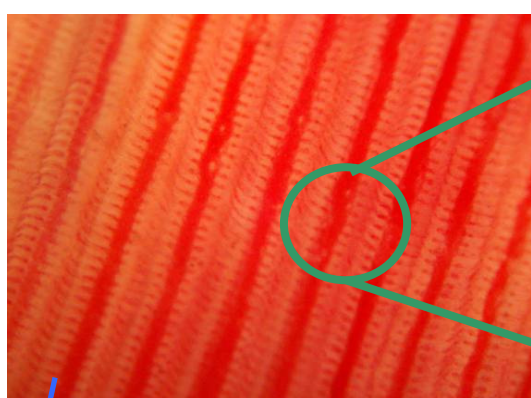


圖 26: 正視圖 (40 倍)

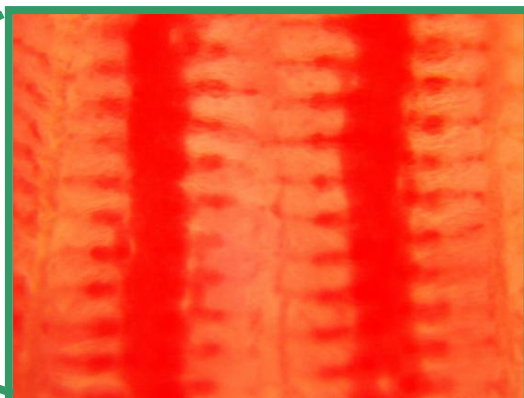


圖 27: 正視圖 (100 倍)

鰓絲整齊排列著

將鰓絲剪下，換個方向觀察，看見鰓絲的另一條血管（如側視圖 28、29 所示），我們發現到整根鰓絲有兩條動脈血管貫穿，此外也看見兩條動脈之間有環紋狀構造。經查文獻對照，這兩條動脈血管分別是入鰓絲動脈與出鰓絲動脈，環紋狀構造則是鰓小葉。



圖 28：側視圖（40 倍）

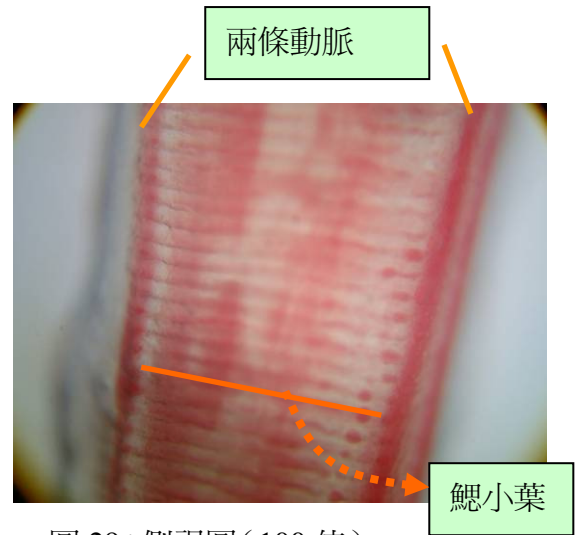


圖 29：側視圖（100 倍）

視野中可以看見鰓小葉內有微血管通過，所以可以從微血管分布的範圍看見鰓小葉的排列方式（如圖 30 所示）。經查文獻得知，入鰓絲動脈與出鰓絲動脈會再分支成微血管，微血管與動脈幾乎互相垂直。

鰓小葉似圓盤的構造突出在鰓絲表面，而且整齊密集的排列在鰓絲上，我們豁然地發現原來這是魚鰓增加呼吸表面積的方法。

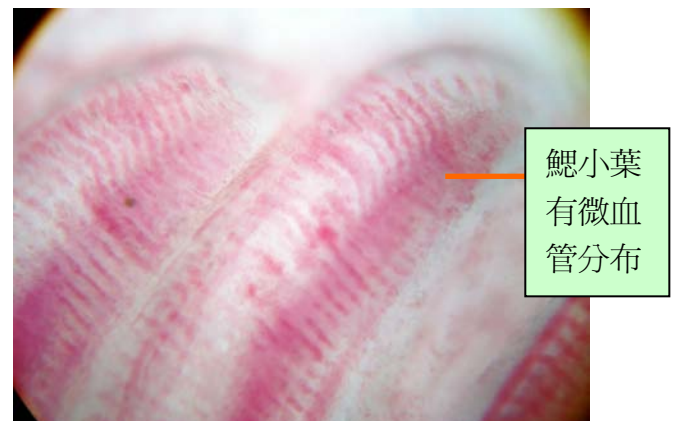


圖 30：鰓小葉與血管（100 倍）

爲了方便想像鰓絲構造，我們決定將鰓絲構造畫成示意圖，如下圖 31、圖 32 及圖 33。

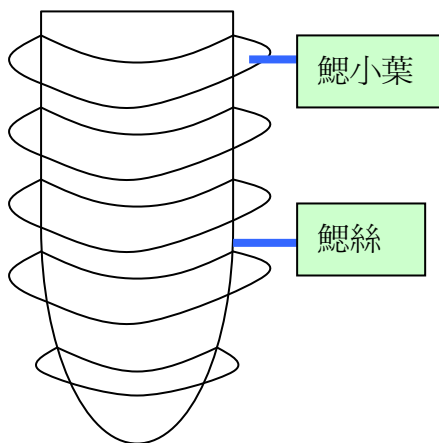


圖 31：鰓絲與鰓小葉

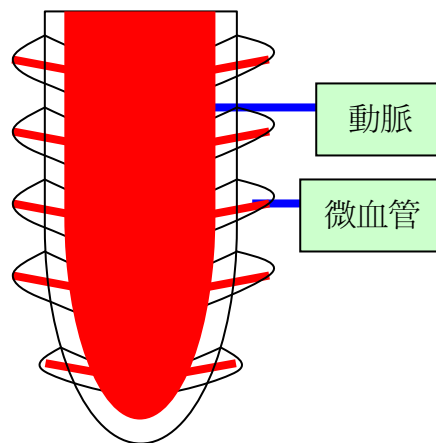


圖 32：鰓絲及血管分布（正視圖）

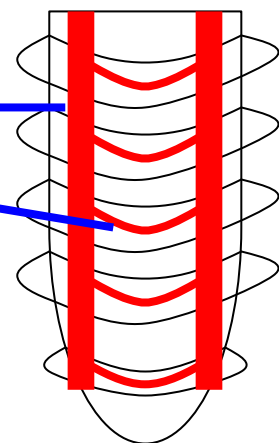


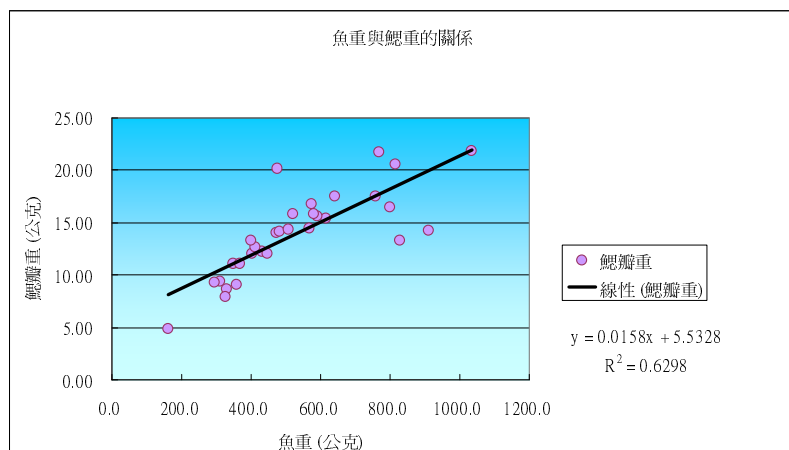
圖 33：鰓絲及血管分布（側視圖）

結論：

- 1、鰓絲有兩條動脈貫穿，中間以微血管相連繫。
- 2、細長的鰓絲上布滿了鰓小葉，鰓小葉的形狀類似圓盤，整齊且密集地排列在鰓絲上。
- 3、鰓小葉有微血管分布，突出的構造可以增加交換氣體的表面積，以提供魚足夠的氧氣。

七、鰓瓣與各項數據的關係

(一)、魚的重量與魚鰓重量的關係

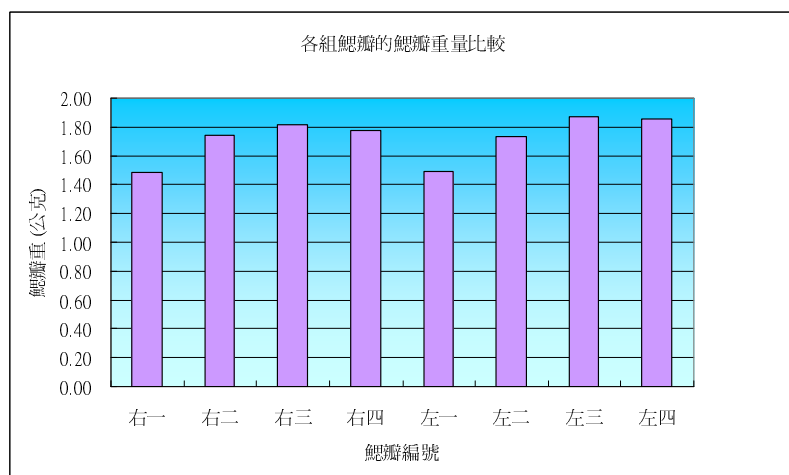


結論：

魚愈重，鰓瓣也會愈重，
且鰓重佔體重的 2.7%。

表 1

(二)、各組鰓瓣的重量比較



結論：

右三及左三的鰓瓣最重，右一及左一的鰓瓣最輕，因此第三片鰓瓣通常會最大片，而第一片鰓瓣則會最小片。魚鰓的平均重量為 13.98 公克。

表 2

八、找出估算魚鰓表面積的方法

(一)、估算魚鰓表面積的緣起

生物老師曾經問過我們一個問題：「魚鰓的呼吸表面積有多大呢？有沒有方法可以估算魚鰓的呼吸表面積？」但上網查詢的結果卻令人大失所望，因為國內缺少相關的研究與數據。於是大家就參考之前解剖的結果嘗試討論估算方法。

(二)、估算魚鰓表面積的所需條件

首先我們必須要有以下數據才能推估鰓的表面積，如表 3 所示，其中覺得最困難的是如何得知「每根鰓絲的鰓小葉平均數目及如何計算鰓小葉的表面積」。

老師說鰓小葉類似一個圓盤狀構造，若能知道鰓小葉寬度也許可以從圓面積公式求得，後來藉由「目鏡測微器」協助，估算工作才有所進展。

編號	項目
1	每隻魚有八片鰓瓣
2	每片鰓瓣的鰓絲數目
3	每片鰓瓣的鰓絲平均長度
4	每根鰓絲的鰓小葉平均數目
5	每個鰓小葉的平均表面積

表 3

(三)、如何測量鰓小葉的表面積

我們將目鏡測微器放入目鏡中，再將鰓瓣置於複式顯微鏡的載物台上，接著利用目鏡測微器量出鰓絲寬度及鰓小葉寬度，如圖 34 及圖 35 所示，微血管左右延伸的距離可以視為鰓小葉的寬度，而中央的動脈寬度可以視為鰓絲的寬度。

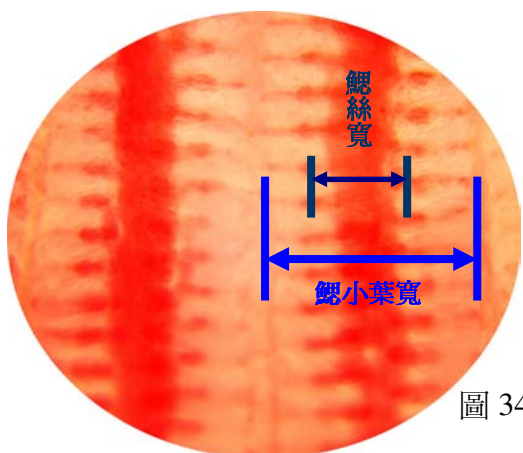


圖 34

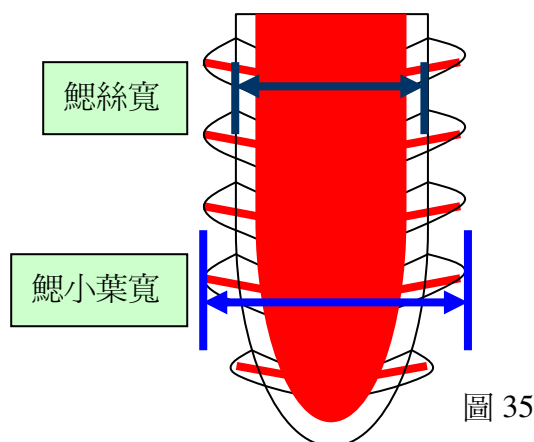


圖 35

由鰓絲寬度與鰓小葉寬度，參考圖 36 及圖 37 所示，可以估算出每個鰓小葉的表面積：

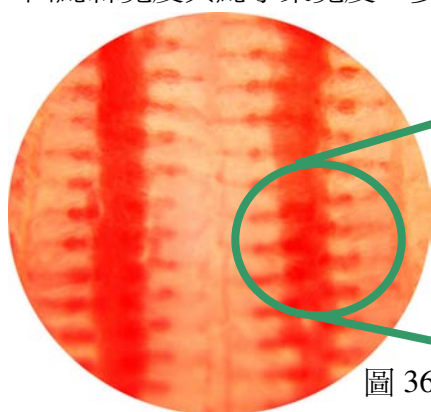


圖 36

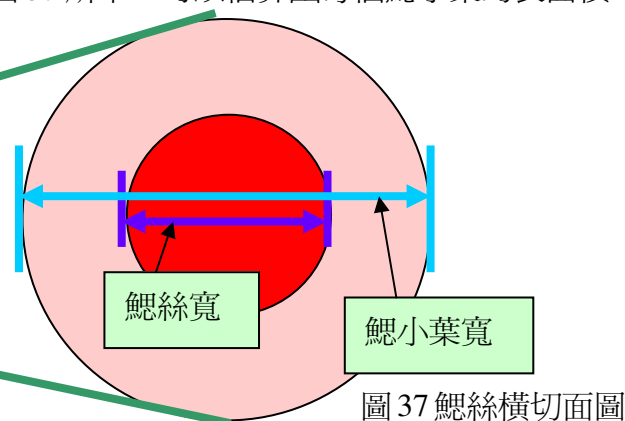


圖 37 鰓絲橫切面圖

鰓小葉為圓盤狀構造鑲嵌在鰓絲上，而且鰓小葉有上下兩面，因此

$$\text{【鰓小葉的表面積】(粉紅色部分)} = [(\text{鰓小葉寬} \div 2)^2 \pi - (\text{鰓絲寬} \div 2)^2 \pi] \times 2$$

(四)、如何估算每根鰓絲的鰓小葉數目

將鰓絲置於複式顯微鏡下觀察，如圖 5 所示，再利用目鏡測微器觀察 5 排微血管佔幾格測微器的刻度，已知目鏡測微器的 1 格 = $10 \mu\text{m} = 10^{-3} \text{cm}$ ，依比例就可以推算一根鰓絲會有多少排的鰓小葉。

估算方法採用比例的方式，方法如下：

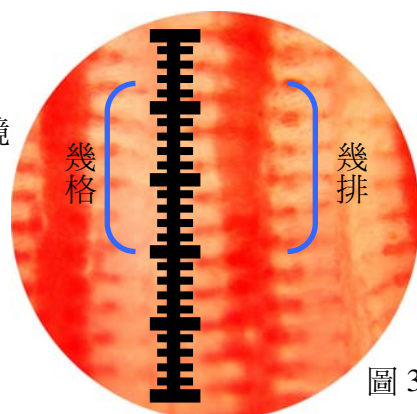


圖 38

【假設】一根鰓絲的鰓小葉數目為 N 個

一根鰓絲長度 (D)：鰓小葉總數 (N) = 一段鰓絲長度 (d)：一段鰓絲的鰓小葉數目 (n)



$$N = Dn/d$$

(五)、如何估算魚鰓的表面積

由鰓絲寬度、鰓小葉寬度、每根鰓絲的鰓小葉數目、每片鰓瓣的鰓絲長度、每片鰓瓣的鰓絲數等數據，就可以算出魚鰓的表面積，過程如下：

『魚鰓表面積』：

$$\begin{aligned} &= \text{鰓小葉表面積} \times \text{上下兩面} \times \text{每根鰓絲的鰓小葉數目} \times \text{每片鰓瓣的一排鰓絲數} \times \text{每片鰓瓣有兩組鰓絲} \times 8 \text{ 片鰓瓣} \\ &= \text{鰓小葉表面積} \times 2 \times \text{鰓小葉數目} \times \text{鰓瓣的一排鰓絲數} \times 2 \times 8 \\ &= [(\text{鰓小葉寬} \div 2)^2 \pi - (\text{鰓絲寬} \div 2)^2 \pi] \times 2 \times \text{鰓小葉數} \times \text{鰓絲數} \times 2 \times 8 \\ &= 1/4 \pi [(\text{鰓小葉寬})^2 - (\text{鰓絲寬})^2] \times \text{鰓小葉數} \times \text{鰓絲數} \times 4 \times 8 \\ &= [(\text{鰓小葉寬})^2 - (\text{鰓絲寬})^2] \times \text{鰓小葉數} \times \text{鰓絲數} \times 8 \times \pi \end{aligned}$$

結論：【魚鰓表面積】 $= [(\text{鰓小葉寬})^2 - (\text{鰓絲寬})^2] \times \text{鰓小葉數} \times \text{鰓絲數} \times 8 \times \pi$

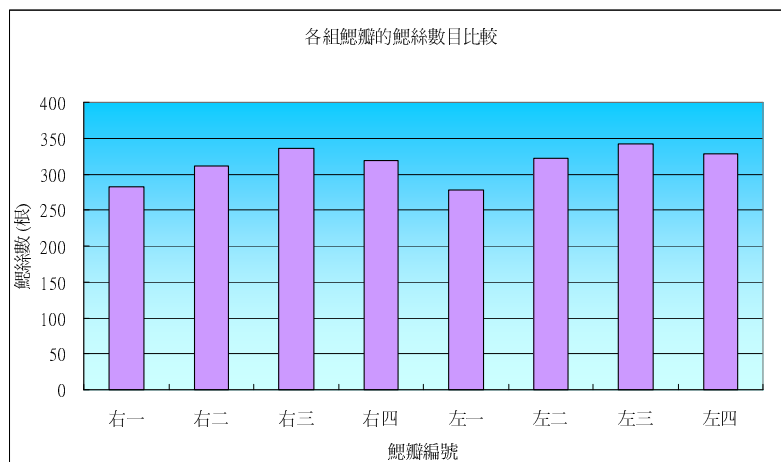
九、測量鰓瓣的鰓絲數目

(一)、將取下的鰓絲用清水沖洗掉黏稠的血液以方便觀察，利用鑷子一根根去數每片鰓瓣的鰓絲數目，如圖 39 所示，然後將八片鰓瓣的鰓絲數目加以平均。

(二)、各組鰓瓣的鰓絲數目之比較



圖 39



結論：

魚鰓的鰓絲總數平均為 2516 根。

表 4

十、測量每根鰓絲的長度

(一)、取右三和左三的鰓瓣，然後以鑷子取第 60 根附近的鰓絲三根，如下圖 40 所示，接著利用游標尺測量鰓絲長度。



圖 40

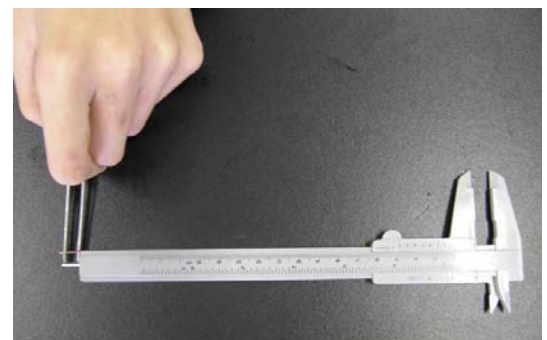


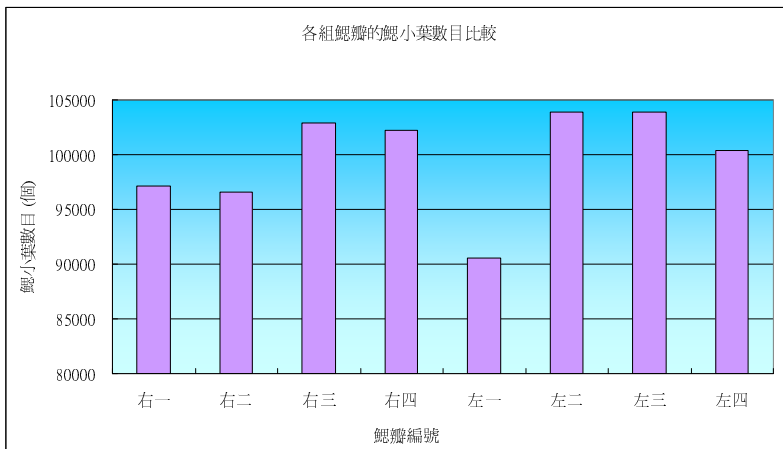
圖 41

(二)、鰓絲長度測量結果

結論：魚的左三和右三鰓瓣，鰓絲的平均長度為 1.25 公分。

十一、測量每根鰓絲的鰓小葉數目

- (一) 將鰓絲置於複式顯微鏡下，依照之前討論的方法估算每根鰓絲的鰓小葉數目。
- (二) 各組鰓瓣的鰓小葉數目之比較



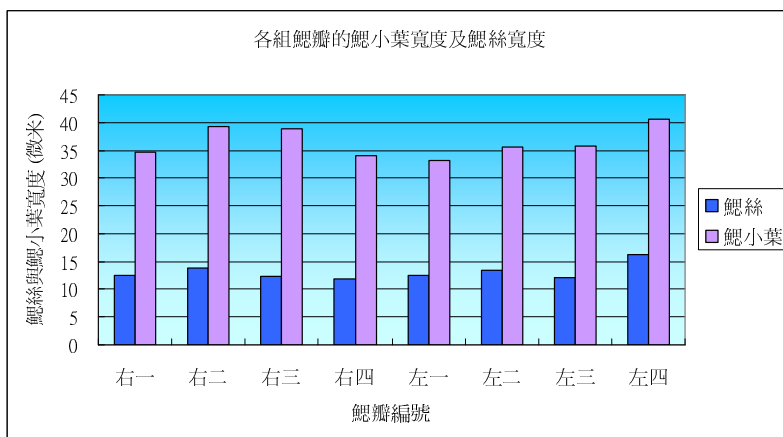
結論：

魚鰓的鰓小葉總數目平均為 744416 個。每片鰓瓣的鰓小葉數目平均為 99694 個。

表 5

十二、測量鰓小葉及鰓絲的寬度

- (一) 將鰓絲置於複式顯微鏡下，利用目鏡測微器測量鰓小葉及鰓絲的寬度
- (二) 各組鰓瓣的鰓小葉寬度及鰓絲寬度



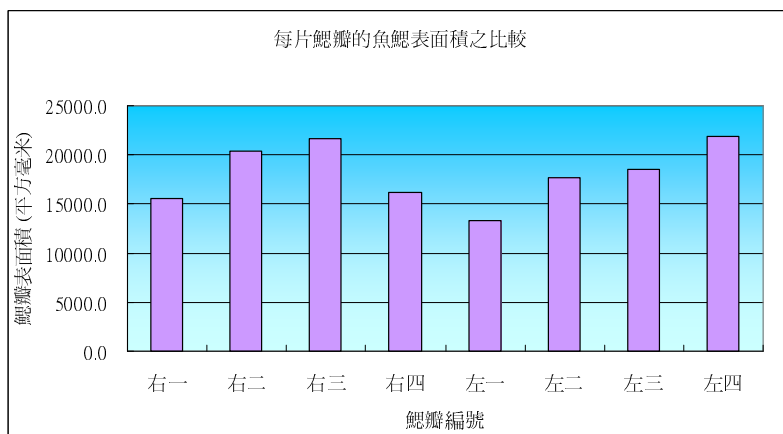
結論：

魚的鰓小葉寬度平均為 36 微米。鰓絲寬度平均為 13 微米。

表 6

十三、估算魚鰓的呼吸表面積

- (一)、依照之前估算的方法，求出每條魚的魚鰓表面積
- (二)、每片鰓瓣的魚鰓表面積之比較

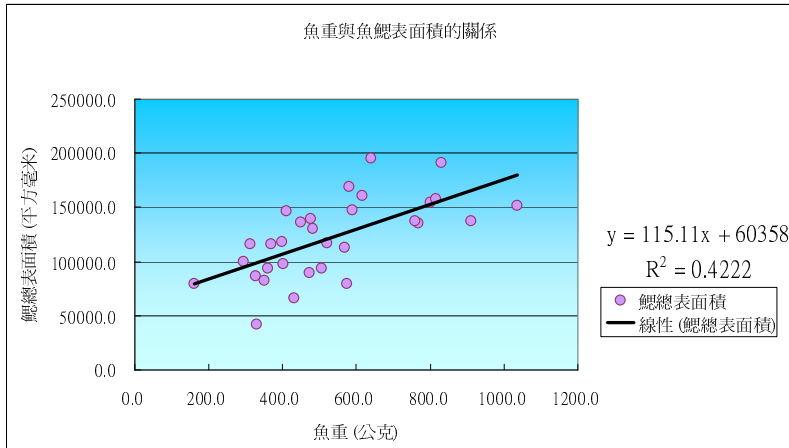


結論：

各組鰓瓣的鰓表面積約在 12000 至 21000 平方毫米。魚的魚鰓總表面積平均為 1218.1 平方公分，約等於邊長為 35 公分的正方形面積，與 A3 紙張的大小相近。

表 7

(三)、魚重量與魚鰓表面積之關係

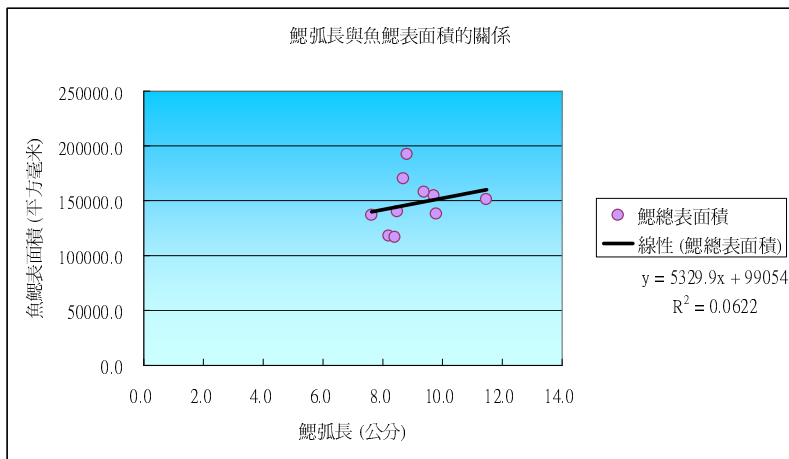


結論：

可以發現魚愈重，魚鰓的表面積也愈大。體重與魚鰓表面積之關係式為 $y = 115.11x + 60358$ ，其中 y 為魚鰓表面積（平方毫米）， x 為魚重量（公克）。

表 8

(四)、魚鰓蓋弧長與魚鰓表面積之關係

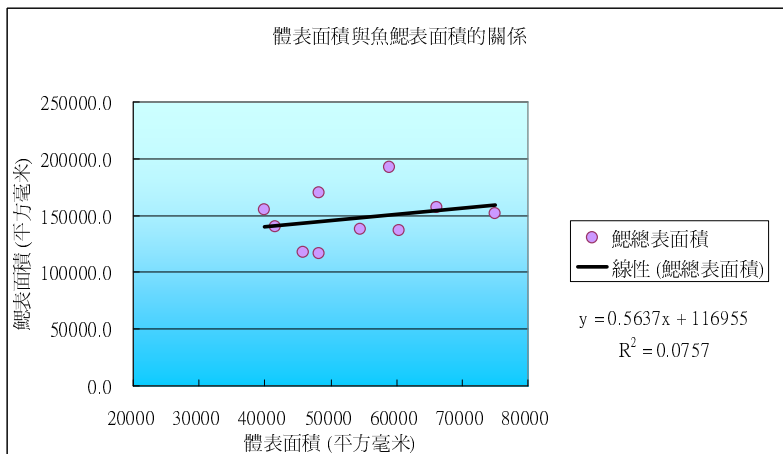


結論：

可以發現魚鰓表面積與鰓蓋弧長並沒有太大的相關性。

表 9

(五)、魚體表面積與魚鰓表面積之關係

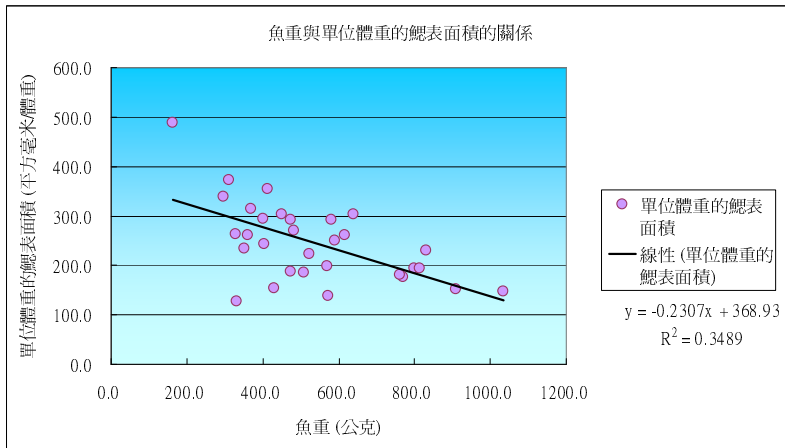


結論：

可以發現魚體表面積與魚鰓表面積沒有太大的相關性。

表 10

(六)、魚重量與單位魚重的魚鰓表面積之關係

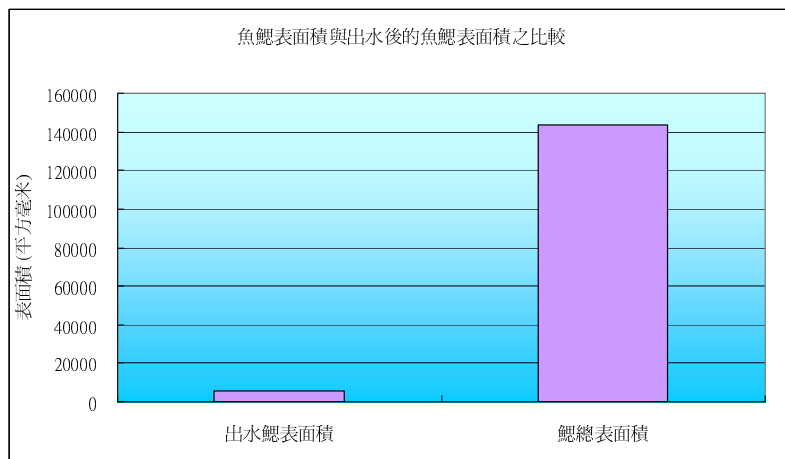


結論：

可以發現魚愈重，單位體重所佔魚鰓的表面積有愈小的趨勢。

表 11

(七)、魚的鰓表面積與出水後魚鰓表面積之比較



結論：

可以發現出水後魚鰓表面積大幅縮減，出水後的魚鰓表面積縮減為原來表面積的 3.9%。

表 12

(八)、推測活魚的魚鰓表面積

從前面「魚重與魚鰓表面積」實驗得到的趨勢線方程式可以估算多少重的魚應該會有多大的魚鰓表面積。體重與魚鰓表面積之關係式為 $y = 115.11x + 60358$ ，其中 y 為魚鰓表面積 (平方毫米)， x 為魚重量 (公克)。若將魚重量 (X) 帶入方程式，則可以得到其魚鰓表面積 (Y)

名字	體重(g)	預測的鰓總表面積 (mm ²)	名字	體重(g)	預測的鰓總表面積 (mm ²)
香蕉	400	766252	肥肥	700	1269172
神仙	480	900364	木瓜	420	799780
木炭	530	984184	彈頭	750	1352992
黃瓜	420	799780	芭樂	960	1705036
彩虹	700	1269172	恐龍	1100	1939732
番茄	630	1151824			

十四、魚嘴巴與鰓區是否相通？

解剖魚的頭部，可以了解魚的嘴巴與鰓區是否相通，並用相機記錄結果。我們發現魚的嘴巴與鰓區相通，表示水可以從嘴巴進入鰓區，因此推測魚的嘴巴規律地開閉，此過程可以將水流送入鰓區，與呼吸有關聯。如圖 42 所示。

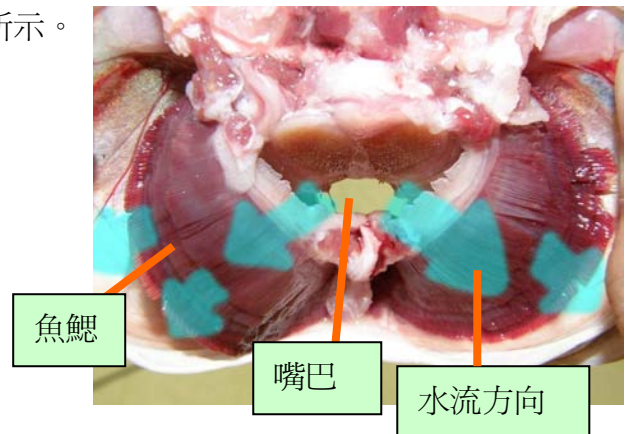


圖 42

十五、魚是否利用肌肉來控制鰓蓋開閉？

將鰓蓋翻開，我們發現鰓蓋基部有肌肉，表示魚可以利用肌肉的牽動來控制鰓蓋的開閉，如圖 43 所示。

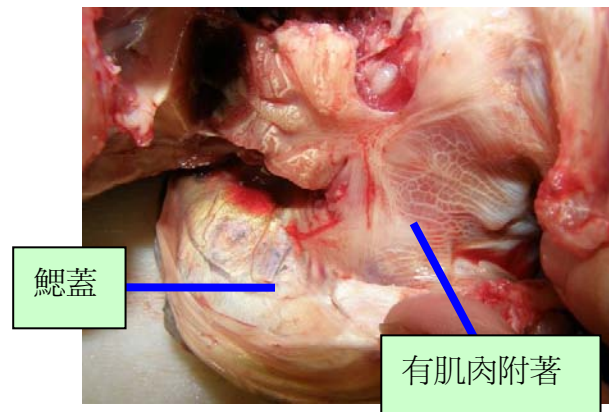


圖 43

十六、魚鰓蓋運動過程的觀察

用肉眼觀察魚嘴巴開閉與鰓蓋開閉的關聯，並嘗試用示意圖表達。結果發現魚嘴巴張開，鰓蓋就關閉；若是嘴巴關閉，鰓蓋就打開，後來查文獻得知，這兩種運動交替的模式稱為鰓蓋運動，與呼吸有關。

爲了方便想像鰓蓋運動過程，我們將此過程畫成示意圖，如圖 44 至圖 47 所示，整個鰓蓋運動如同人體的呼吸運動也可以分成「吸氣」與「呼氣」兩部分：

(一)、吸氣：水流進鰓區，此時嘴巴張開，鰓蓋關閉，使得口咽腔、鰓蓋腔形成一股吸力，進而讓含有氧氣的水流進鰓區，如圖 44 及 45 所示：

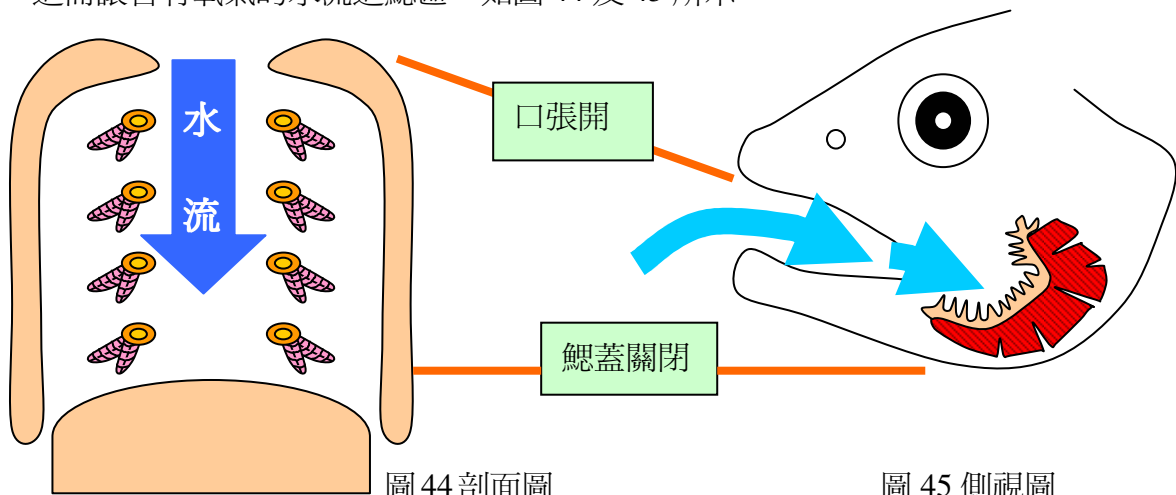


圖 44 剖面圖

圖 45 側視圖

(二)、呼氣：水流出鰓區，此時嘴巴關閉，鰓蓋打開，在鰓腔形成一股推力，進而讓含有二氧化碳的水流出鰓區，如圖 46 及 47 所示：

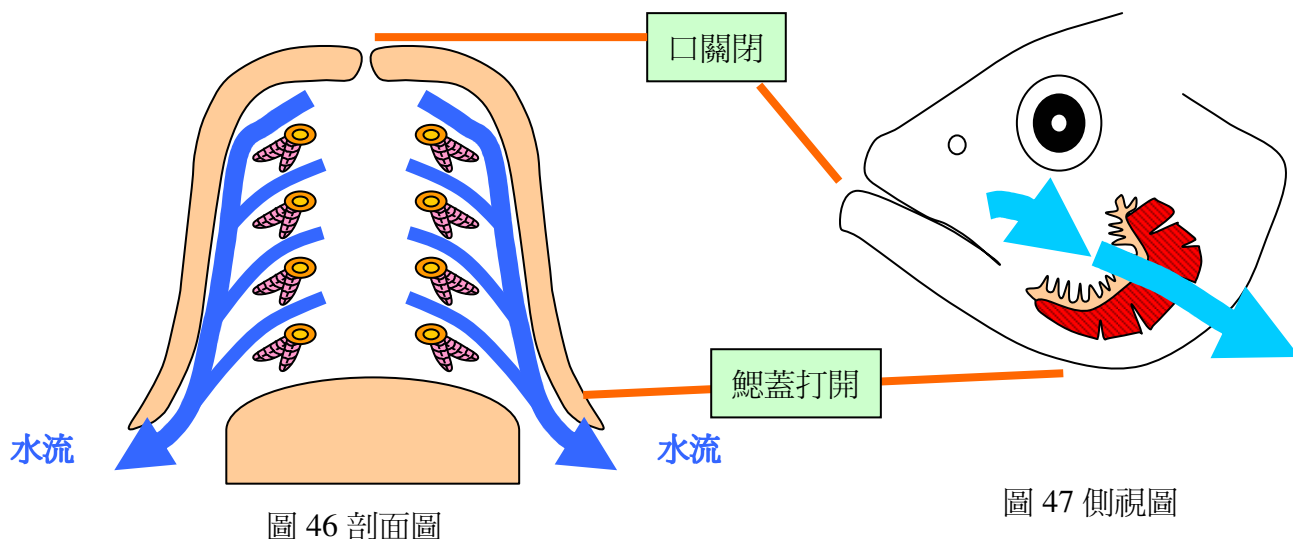


圖 46 剖面圖

圖 47 側視圖

接著口再張開，鰓蓋關閉，鰓蓋運動就重新開始。而水流一進一出的過程，魚鰓從中獲得氧氣，並將二氧化碳排出。

十七、如何測量鰓蓋運動速率及呼吸作用

(一)、測量鰓蓋運動速率：先調整飼養箱的水質狀況，再準備計數器、計時器、紙、筆，接著調整到方便觀察鰓蓋開閉的角度，每三十秒紀錄一次結果，共紀錄三分鐘，如圖 48 所示。

(二)、測量魚的耗氧速率：先調整飼養箱的水質狀況，利用溶氧計測量水中溶氧量，每小時紀錄一次結果，共紀錄四小時，如圖 49 所示。

(三)、測量魚的二氧化碳生成速率：

先調整飼養箱的水質狀況，分別在第 0、1、2、3、4 小時以量筒取出 1000ml 水樣，隨後馬上加入 1000ml 的澄清石灰水互相混合一段時間，若水樣有白色沉澱物生成，此為碳酸鈣，見圖 50 所示。接著取濾紙烘乾秤重，所得濾紙重為 W_1 ，再將白色混濁的水樣進行抽濾，抽濾裝置如圖 51 所示，抽濾完畢後，將含有碳酸鈣的濾紙拿至 80°C 烘箱烘乾 8 小時。將濾紙烘乾後，再秤重一次所得濾紙重分別為 W_2 ，碳酸鈣重量 $W_3 = W_2 - W_1$ ，二氧化碳的重量 $= W_3 \times 0.44$ ，再除以魚的體重及測量的時間即可得魚的二氧化碳生成速率 (1/小時)。



圖 48



圖 49



圖 50



圖 51

(四)、測量魚鰓蓋的開閉幅度大小：在測量鰓蓋運動速率的同時，我們也觀察魚鰓蓋的開閉幅度，我們定義開閉幅度指數為 1~3，指數越低表示開閉幅度越小，以下是參考的對照表。

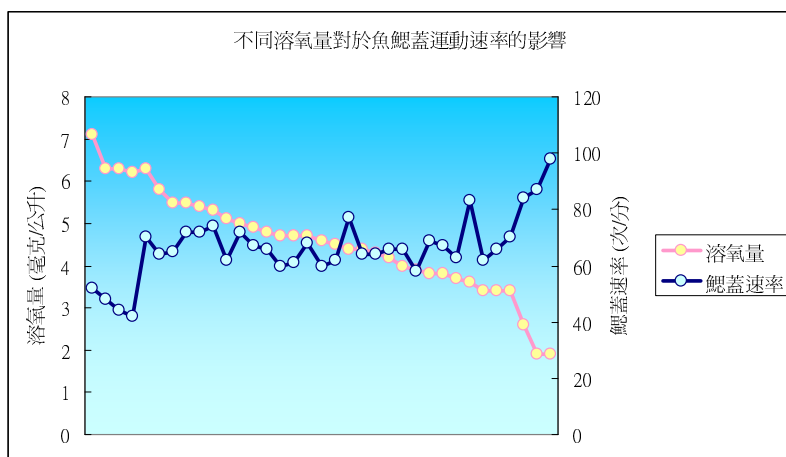
指數	定義
0.5	僅有鰓蓋膜輕微擺動，嘴巴幾乎沒有開閉。
1	鰓蓋膜擺動幅度較大，嘴巴微微張開。
1.5	鰓蓋微微開閉，可較清楚看見嘴巴開閉。
2	鰓蓋開閉幅度明顯，但胸鰭擺動不明顯。
2.5	鰓蓋開閉幅度很大，且胸鰭擺動速率加快。
3	鰓蓋開閉幅度幾乎與快死亡的魚一樣大，嘴巴幾乎完全張開，用盡全身力量呼吸。

表 13

十八、水中溶氧量對於鰓蓋運動與呼吸作用的影響

先換飼養箱的水量至少 1/2，在不打氣情況下，每小時測量一次鰓蓋運動速率、溶氧量、酸鹼度、鹽度、鰓蓋的開閉幅度。

(一)、不同溶氧量對於鰓蓋運動速率的影響

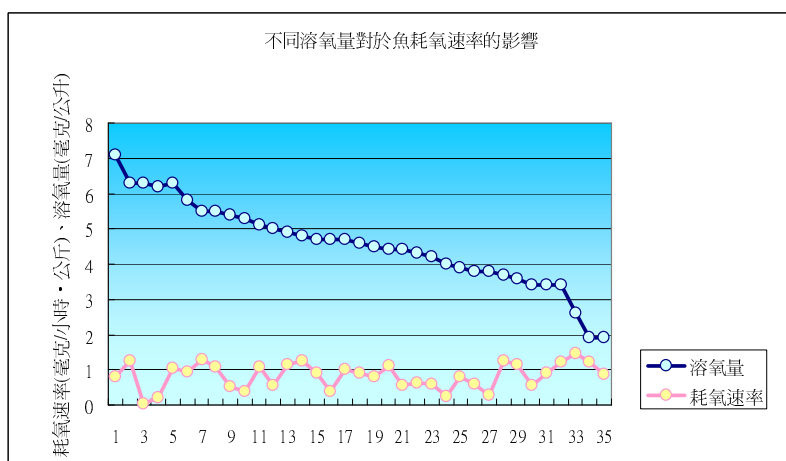


結論：

水中溶氧量愈低，鰓蓋速率也會愈快。

表 14

(二)、不同溶氧量對於耗氧速率的影響

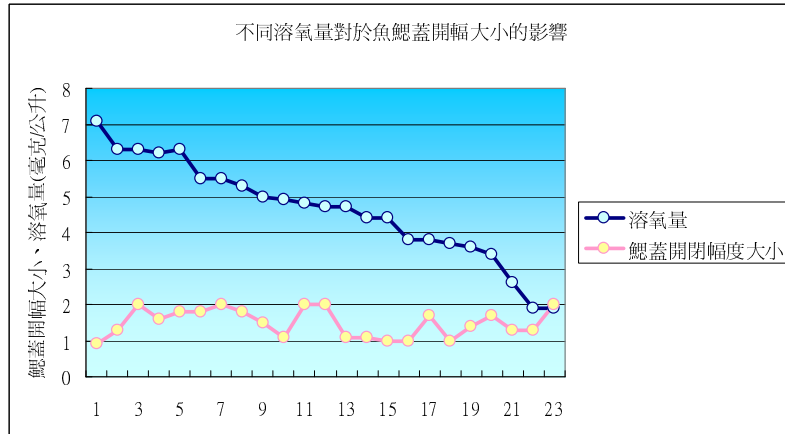


結論：

水中溶氧量在 2 至 7(毫克/公升)時，耗氧速率約在 1(毫克/公斤-小時)左右。

表 15

(三)、不同溶氧量對於鰓蓋開閉幅度大小的影響



結論：

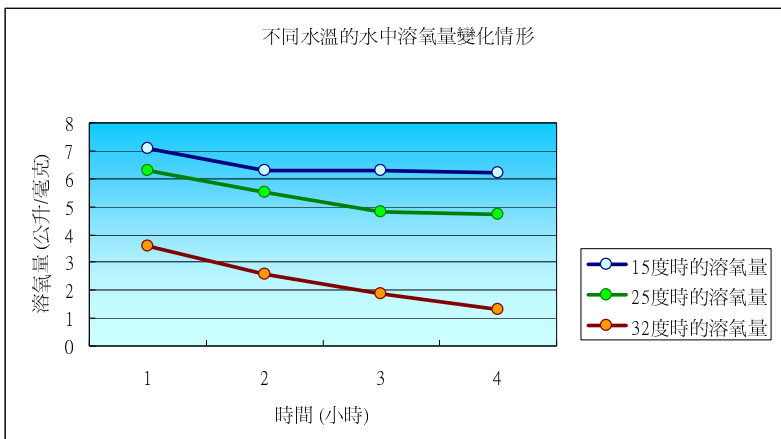
水中溶氧量在2到7(毫克/公升)時，鰓蓋開閉幅度指數約為1到2之間。

表 16

十九、水溫對鰓蓋運動與呼吸作用的影響：

先換飼養箱的水量至少 1/2，再將水溫調整成 15°C、25°C 及 35°C，在不打氣的情況下，每一小時測量一次鰓蓋運動速率、溶氧量、酸鹼度、鹽度、鰓蓋的開閉幅度，並分別在第 0、1、2、3、4 小時取水樣來測量二氧化碳生成速率 (1/小時)。

(一)、不同水溫的水中溶氧量變化情形

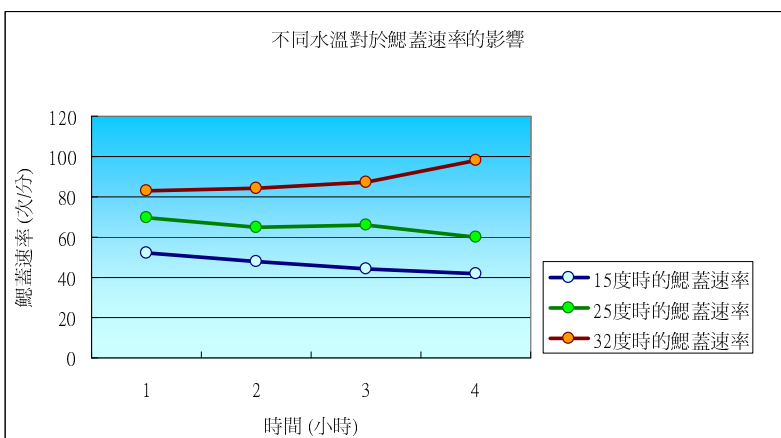


結論：

- (1) 從第一小時的溶氧量可以發現水溫愈高，水中的溶氧量也愈低。
- (2) 各組的水中溶氧量都隨著魚的呼吸時間增長而逐漸下降。

表 17

(二)、不同水溫對於鰓蓋運動速率的影響

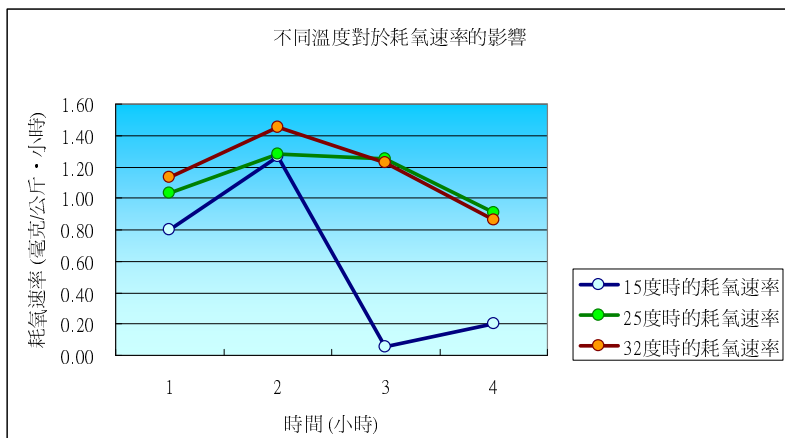


結論：

可以發現水溫愈高，魚的鰓蓋速率也愈快。

表 18

(三)、不同水溫對於耗氧速率的影響

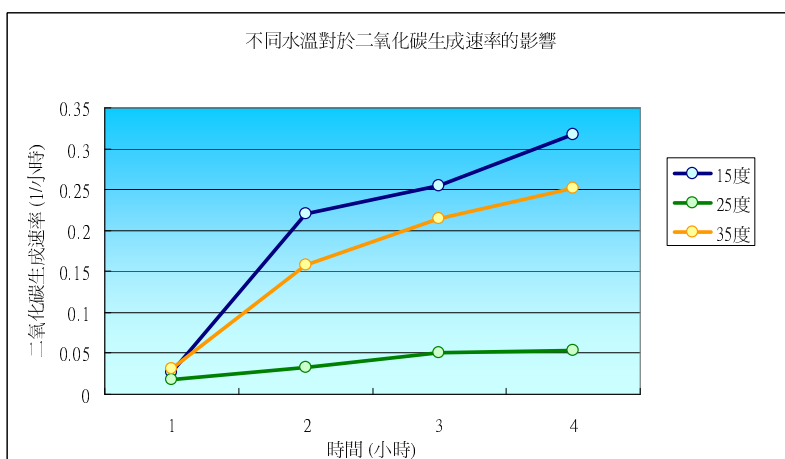


結論：

水溫愈高，魚的耗氧速率也愈快，且隨著魚的呼吸時間增長，魚的耗氧速率也跟著下降。

表 19

(四)、不同水溫對於二氧化碳生成速率的影響

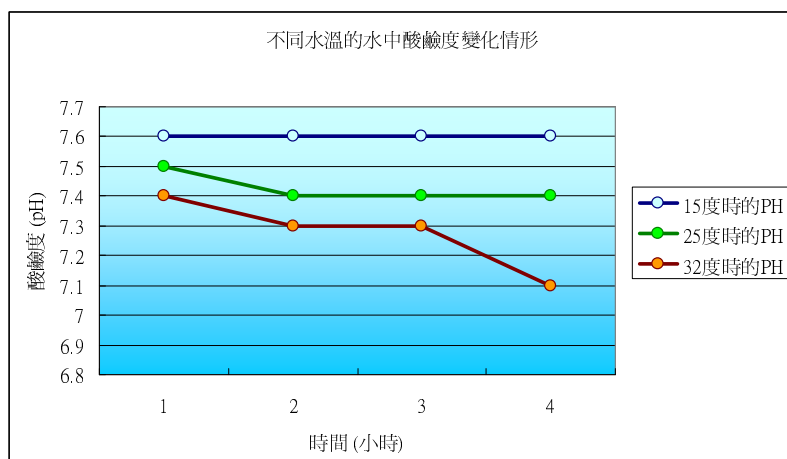


結論：

(1) 隨著魚的呼吸時間增長，二氧化碳生成速率也逐漸上升。

表 20

(五)、不同水溫的水中酸鹼度的變化情形

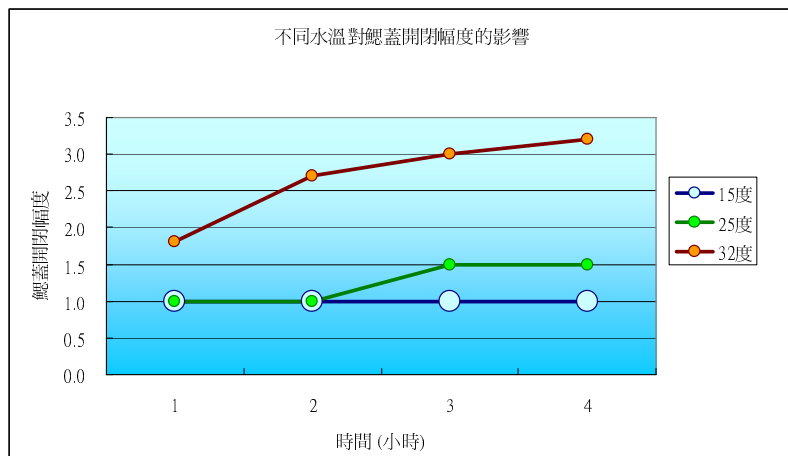


結論：

(1) 隨著魚的呼吸時間增長，水中的 pH 值也出現下降的情形。
(2) 在 32°C 的水溫，水中的 pH 值下降幅度較 15°C 及 25°C 來得大。

表 21

(六)、不同水溫對於鰓蓋開閉幅度大小的影響



結論：

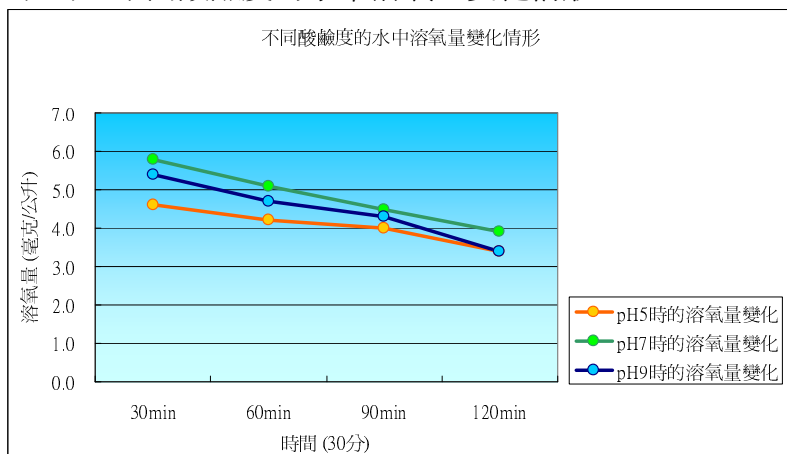
- (1) 水溫愈高，鰓蓋的開閉幅度也愈大。
- (2) 隨著魚的呼吸時間增長，各組魚的鰓蓋開閉幅度也變得較大。

表 22

二十、酸鹼度對鰓蓋運動與呼吸作用的影響

先換飼養箱的水量至少 1/2，再將酸鹼度調整成 pH5、pH7 及 pH9，在不打氣的情況下，每半小時測量一次鰓蓋運動速率、溶氧量、水溫、鹽度、鰓蓋的開閉幅度。

(一)、不同酸鹼度的水中溶氧量變化情形

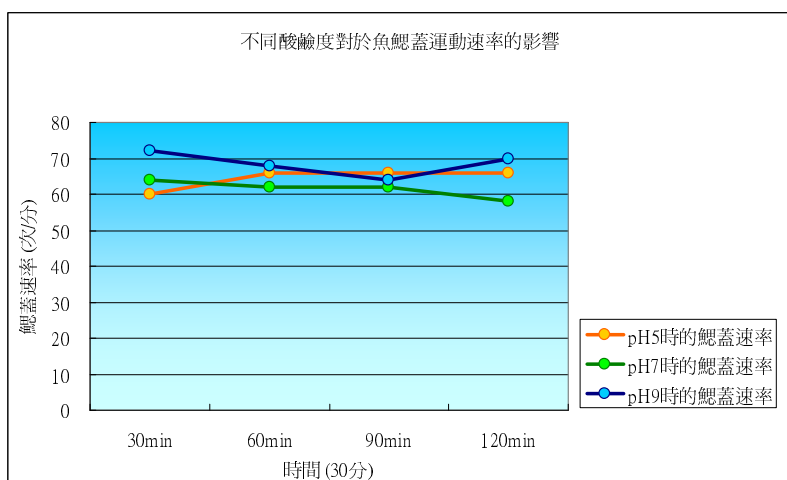


結論：

- (1) 從第一小時的溶氧量可以發現 pH5 的水中溶氧量較低。
- (2) 各組的水中溶氧量都隨著魚的呼吸時間增長而逐漸下降。

表 23

(二)、不同酸鹼度對於鰓蓋運動速率的影響

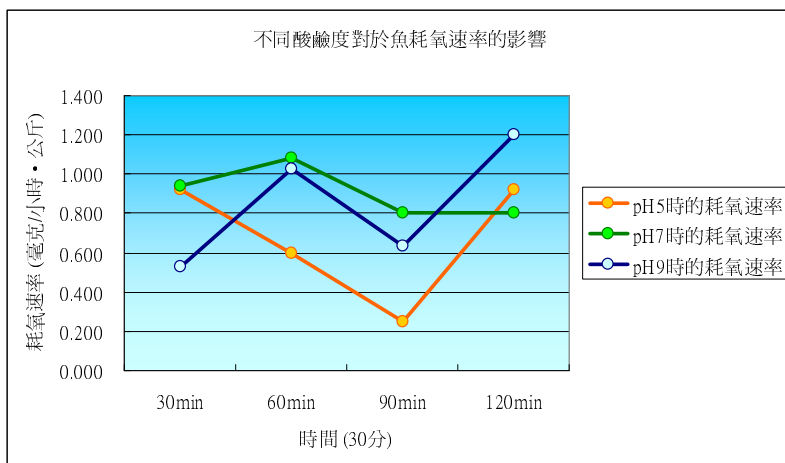


結論：

在 pH5 的鰓蓋運動速率平均為 66(次/分)，在 pH7 平均為 63(次/分)，在 pH9 平均為 69(次/分)。

表 24

(三)、不同酸鹼度對於耗氧速率的影響



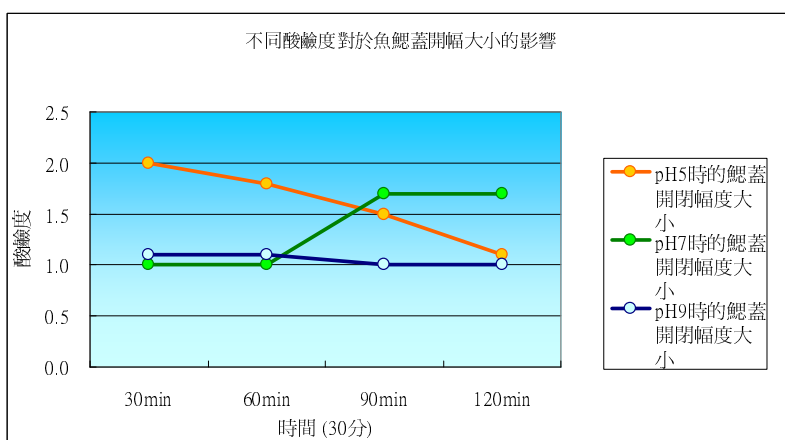
結論：

(1)在 pH5 的耗氧速率平均為 0.671(毫克/公斤-小時)，在 pH7 為 0.906(毫克/公斤-小時)，在 pH9 為 0.847(毫克/公斤-小時)。

(2)pH5 的魚耗氧速率在前 90 分鐘有較明顯下降。

表 25

(四)、不同酸鹼度對於鰓蓋開閉幅度大小的影響



結論：

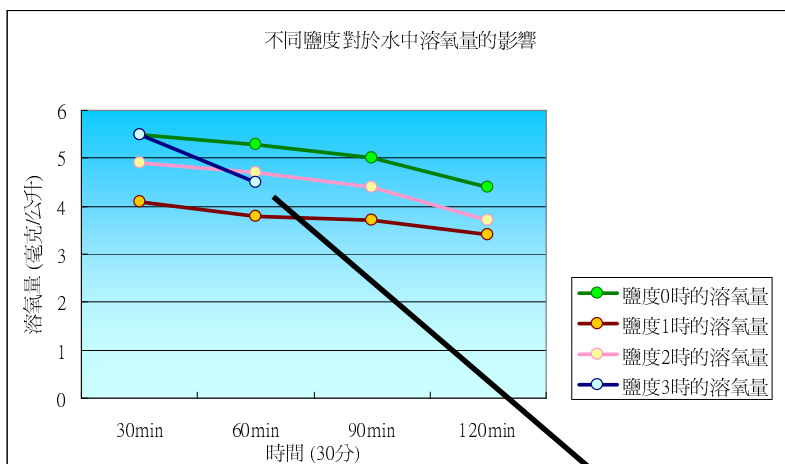
在 pH5 的環境，魚起初的鰓蓋開閉幅度較大，後來則逐漸降低。

表 26

二十一、鹽度對鰓蓋運動與呼吸作用的影響：

先換飼養箱的水量至少 1/2，再將鹽度調整成 0%、1%、2%及 3%，在不打氣的情況下，每半小時測量一次鰓蓋運動速率、溶氧量、水溫、酸鹼度、鰓蓋的開閉幅度。

(一)、不同鹽度的水中溶氧量變化情形



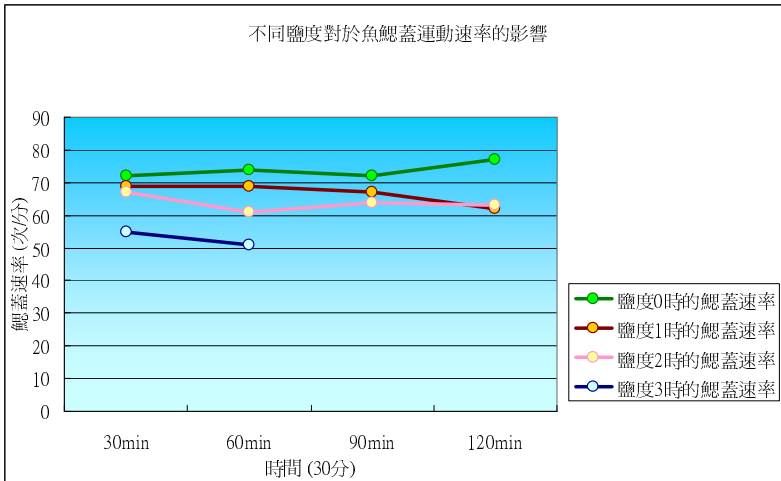
結論：

在鹽度 0%、1%、2%及 3%的水中溶氧量都隨著魚的呼吸時間增長而逐漸下降。

表 27

在鹽度 3%的魚失去表面光澤及平衡，且魚鰭靜止不動，鰓蓋開幅很大，因此我們決定停止實驗。

(二)、不同鹽度對於鰓蓋運動速率的影響

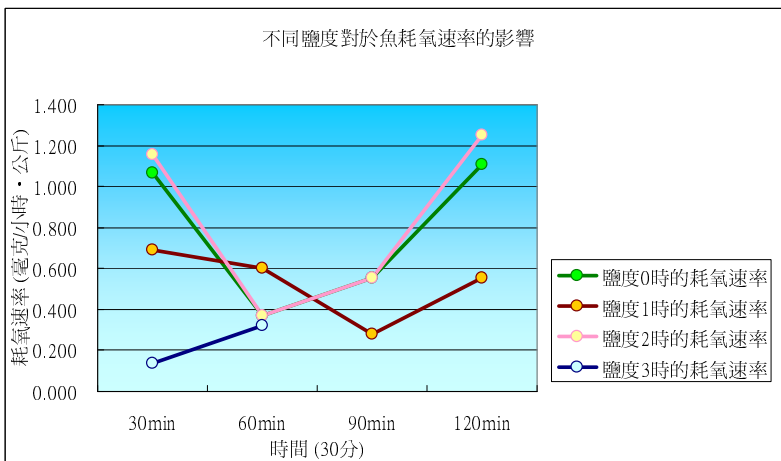


結論：

在鹽度 0% 的鰓蓋運動速率平均為 73(次/分)，在 1% 為 68(次/分)，在 2% 為 65(次/分)，在 3% 的鰓蓋運動速率則明顯下降。

表 28

(三)、不同鹽度對於耗氧速率的影響

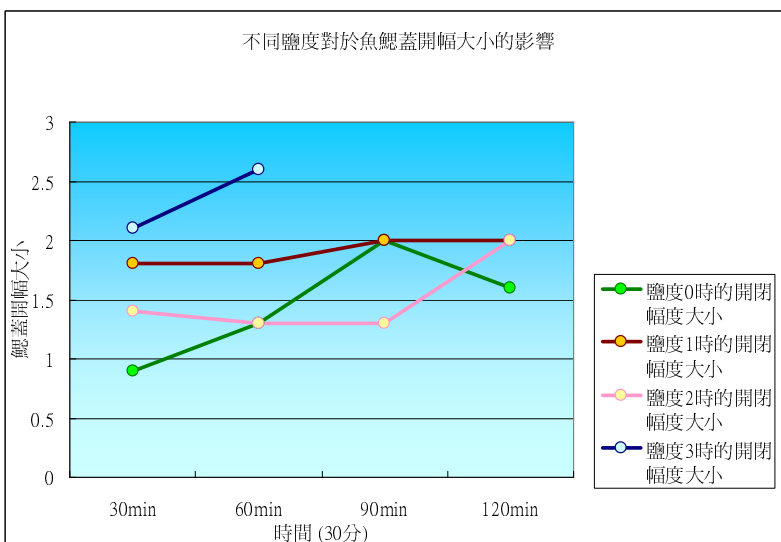


結論：

鹽度 0%、1% 及 2% 的魚起初一小時的耗氧速率都下降，接著在第 2 小時的耗氧速率才開始上升。鹽度 3% 的耗氧速率則是上升。

表 29

(四)、不同鹽度對於鰓蓋開閉幅度大小的影響



結論：

- (1) 在鹽度 0%、1% 及 2% 的魚鰓蓋開閉幅度指數都在 2 以下。
- (2) 在鹽度 3% 的魚鰓蓋開閉幅度指數則超過 2。

表 30

伍、討論

一、吳郭魚是台灣最普遍、常見的食用魚，很容易在市場購得，價格也十分便宜，此外吳郭魚的體型不會太大，魚鰓也明顯可見，容易解剖觀察，飼養起來也相對容易，因此我們最後決定以吳郭魚作為觀察的對象。

二、媽媽說：「買魚要看魚鰓，若呈鮮紅色表示這是新鮮的魚。」我們發現魚鰓外觀是否有鮮紅色的光澤取決於鰓絲的結構與血管是否完整。放置愈久的魚鰓，其鰓絲的結構與血管也破壞得愈嚴重，如下表 31 所示。

剛解剖下來的魚鰓	放置四小時後的魚鰓
	
	
鰓瓣呈鮮紅色，血管清楚，結構完整	鰓瓣呈暗紅色，血管破裂，結構破壞

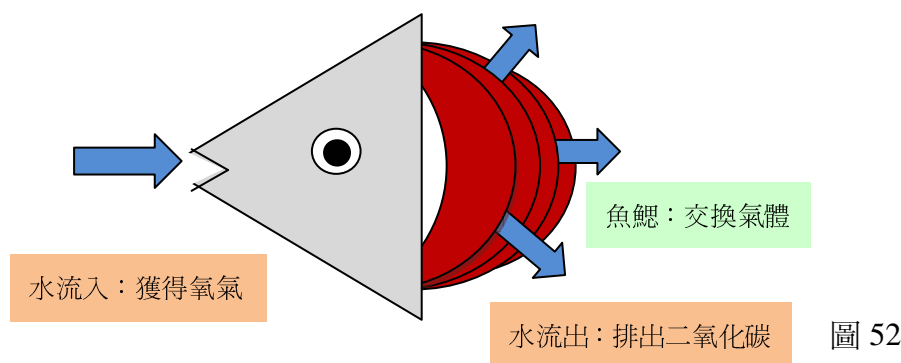
表 31

三、一般來說，魚的體重愈重，魚鰓的表面積也愈大，在本實驗也得到證實，這是因為愈大條的魚所需要的氧氣量愈多。從結果也發現隨著魚體重增加，其單位魚重的魚鰓表面積反而愈少，這顯示魚的代謝速率會隨著體重增加而降低。

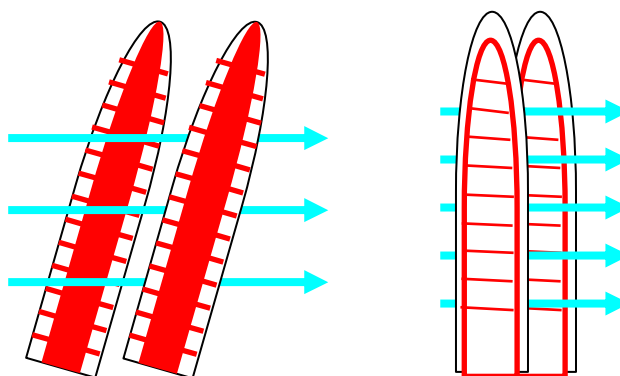
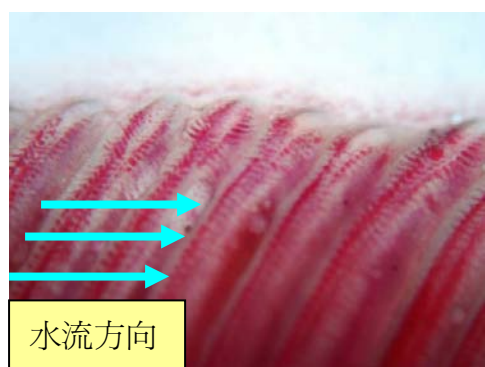
四、動物為了增加呼吸的表面積，最常見的方法便是呼吸器官有許多分支及突起，這些特徵在吳郭魚的鰓皆可發現到，牠們利用數量多的鰓絲來增加鰓小葉的數量，再利用鰓小葉突出構造來增加呼吸表面積。

五、為什麼魚沒有辦法在陸地上呼吸呢？我們推測與魚鰓的呼吸表面積大量縮減有關，從結果得知出水後魚鰓的表面積只剩原來的 3.9%，因此無法獲得足夠的氧氣而死亡，這是由於魚離開了水，空氣無法托住柔軟的鰓絲和鰓小葉使其展開，而使它們互相疊合在一起。

六、魚的呼吸運動就是將含有氧氣的水流送入鰓區，並把含有二氧化碳的水流送出鰓區。當魚嘴巴張開時，水流會由口進入鰓區，當水流經鰓區時，水中所含的氧氣便經由擴散作用進入魚鰓的微血管，同時微血管內的二氧化碳也擴散進入水中，此時鰓蓋打開，再將水流帶離鰓區（如圖 52 所示）。我們也發現吳郭魚會藉由胸鰭快速擺動來加速水的流動。



七、水流在鰓區會如何流動呢？從解剖的角度來看，鰓絲排列方向與水流方向相互垂直，而鰓絲排列方向與微血管方向垂直，因此水流方向會與微血管方向平行，如圖 53 及圖 54 所示。



八、鰓表面積大小和魚的活動性成正相關，活動力愈大的魚種，魚鰓的表面積也愈大。鯖科魚類的鰓表面積可以超過每公克 1000mm^2 ，多數硬骨魚則為每公克 $150\text{-}350\text{mm}^2$ ，本實驗的吳郭魚則是每公克有 245.8mm^2 的魚鰓表面積，推測吳郭魚屬於中等活動性的魚類。

九、以吳郭魚來說，其體重與魚鰓表面積之關係式為 $y=115.11x+60358$ ，其中 y 為魚鰓表面積（平方毫米）， x 為魚重量（公克）。但是我們猜測不同發育階段的吳郭魚，其關係式可能也會有所不同，需要進一步修正。此外不同種的魚，其體重與魚鰓表面積之關係式也應該會有差異。

十、吳郭魚屬於閉鎖式循環系統，經查資料得知血液從心臟送出後，會經由入鰓動脈進入魚鰓，接著在鰓絲分支為入鰓絲動脈，最後在鰓小葉分支為微血管，在微血管交換氣體後，再將充氧血送至出鰓絲動脈，再送至出鰓動脈，然後再送至全身各處，魚的血液循環方向如下圖 55 所示。

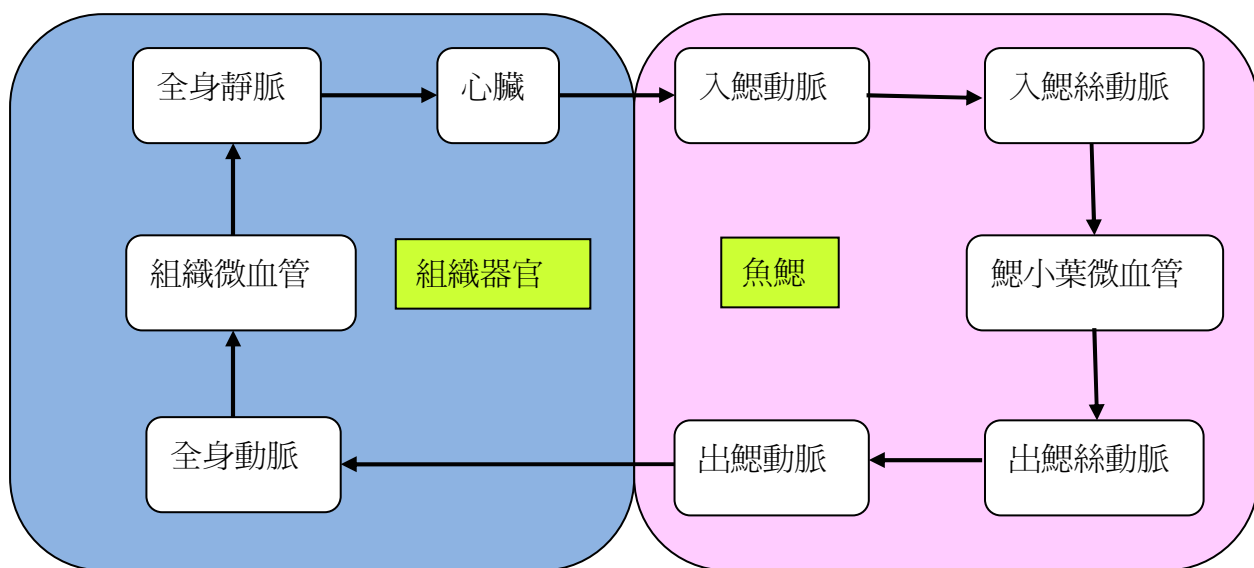


圖 55

十一、本實驗將吳郭魚生活一段時間的水取出來與澄清石灰水互相混合，可以發現水樣變成白色混濁，此為碳酸鈣沉澱，表示吳郭魚在水中呼吸會產生二氧化碳。此外隨著魚的呼吸時間加長，水中溶氧量的逐漸下降，碳酸鈣量的逐漸增加，再輔以觀察到 pH 值下降，這表示魚的呼吸是吸入氧氣，吐出二氧化碳。

十二、從文獻得知氧氣不足會引起魚類呼吸中樞的興奮，而出現鰓蓋運動加強且速率加快，不過在一定程度的溶氧範圍，耗氧速率不受外界環境中氧氣變化的影響。本實驗發現水中溶氧量在 2 至 7(毫克/公升)時，吳郭魚耗氧速率確實沒有明顯的變化。不過當水中溶氧量愈低，則鰓蓋運動速率會加快。

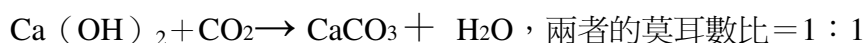
十三、耗氧速率可以作為魚體代謝強度的指標，又稱代謝速率。代謝速率會受到溫度、水中溶氧量、鹽度等外在因素的影響，也會隨著不同種類、年齡、性別、營養狀況、攝食、肌肉活動等內在因素而有所不同。結果顯示飼養箱的吳郭魚，其耗氧速率為 0.7041 (毫克/公斤-小時)，耗氧速率會因水溫上升或鹽度上升而加快。

十四、以水溫來說，魚的耗氧速率會隨著水溫升高而升高，但升高至一定程度時，耗氧率反而降低，證明鰓蓋運動速率與耗氧速率都會因水溫上升而加快。而鰓蓋運動速率與耗氧速率的上升顯示魚需要更多的氧氣來進行呼吸作用。

十五、從文獻得知當環境的 pH 值太低或太高時，都會降低魚的呼吸速率。本實驗的吳郭魚雖然在 pH5 的環境剛開始有較大的耗氧速率及鰓蓋開閉幅度，但隨後也逐漸適應下來。這說明吳郭魚在 pH5 至 pH9 的水質酸鹼範圍內都可以適應良好，無怪乎吳郭魚會成為台灣各個流域的優勢種。

十六、從文獻得知鯽魚和鯉魚移至高鹽度的頭幾個小時，耗氧量會下降，而且鹽度越高下降越厲害。本實驗的吳郭魚剛移入鹽度 1%、2%、3% 的環境時，其耗氧率都呈現下降趨勢，不過在鹽度 1%、2% 環境的吳郭魚，在隨後的第二個小時，其耗氧速率就開始上升，我們猜測可能是吳郭魚後來利用某種需要耗能的生理機制來進行排鹽。不過在鹽度 3% 的環境，則明顯看出吳郭魚無法忍受，才沒多久身體就失去平衡。總結來說，吳郭魚可以適應的鹽度範圍算是很大。

十七、為什麼二氧化碳重量＝碳酸鈣重量×0.44 呢？假設碳酸鈣（分子量為 100）重量為 X 公克，二氧化碳（分子量為 44）的重量為 Y 公克，由澄清石灰水的反應式得知：



故 $X/100 = Y/44$ ， $Y = X \times 0.44$ ，即二氧化碳重量＝碳酸鈣重量×0.44

十八、比較人體的肺與吳郭魚的鰓，並製成下表，發現無論人的肺泡或吳郭魚的鰓小葉，其數量都很多，也因此呼吸表面積都很大。

項目	人體（70 公斤）	吳郭魚（538 公克）
呼吸器官	肺	鰓
平均重量	1000 公克	13.98 公克
肺泡（鰓小葉）數目	3 億至 5 億個	74 萬個
呼吸表面積	50 至 60 平方公尺（羽球場大小）	12 萬平方毫米（A3 紙張大小）
單位體重的表面積 （平方公分/公克）	8.5	2.45
呼吸運動速率	每分鐘 18 次	每分鐘 66 次

十九、本實驗以常見的吳郭魚進行研究，利用解剖方式仔細觀察魚鰓構造，並以觀察結果進一步推導出估算魚鰓表面積的方法，而且也利用簡單的實驗器材及步驟觀察魚的鰓蓋運動與耗氧速率，這些實驗步驟可以作為往後其他人研究魚鰓表面積大小、鰓蓋運動速率與耗氧速率的參考依據。

二十、本次實驗仍有許多可以再深入探討的問題。例如比較不同種、不同發育階段的魚鰓表面積，或是進一步研究還有哪些內在或外在因素會影響鰓蓋運動速率與耗氧速率。此外，吳郭魚是外來的優勢種魚類，為何牠們可以在各種水域適應良好，也許可以從魚鰓構造與呼吸的角度，進行實地的觀察與研究。

陸、結論

關於魚鰓的觀察、魚鰓表面積的計算、鰓蓋運動與耗氧速率實驗，我們得到以下結論：

- 一、魚鰓位於頭部兩側，外側有鰓蓋保護，而且鰓區與嘴巴相通。
- 二、魚的左右兩側各有四片鰓瓣，合計有八片鰓瓣，平均重量為 13.98 公克，其中以左三與右三的鰓瓣較大片。
- 三、鰓瓣是由鰓弧、鰓絲與鰓耙所構成，其中鰓絲有血管分布，是交換氣體的場所。
- 四、每片鰓瓣有兩組鰓絲，鰓絲內有兩條動脈，鰓小葉表面則有微血管分布。
- 五、鰓絲表面排列許多突出的鰓小葉，可以增加呼吸的表面積。
- 六、每條吳郭魚平均有 2516 根鰓絲，每根鰓絲長度平均為 1.25 公分，鰓絲表面排列的鰓小葉總數平均為 744416 個，魚鰓的總表面積平均為 121810mm^2 ，與 A3 紙張的大小相近。且魚愈重，其魚鰓的總表面積也愈大。
- 七、鰓蓋運動分成吸氣與呼氣兩部分，主要是藉由嘴巴與鰓蓋交替開閉所產生的壓力變化，造成水往單方向流動。水從嘴巴流入鰓區，然後在鰓區進行氣體交換，接著水從鰓蓋處流出魚體。
- 八、吳郭魚的鰓蓋運動速率每分鐘為 66 次，其耗氧速率平均為 0.7041 (毫克/公斤-小時)，二氧化碳生成速率平均為 0.1690 (毫克/公斤-小時)。因此鰓蓋每開閉一次即可獲得 10.7 微克的氧氣。

柒、參考資料

- 一、魚類生態學，1998 年，殷名稱編著，基隆市：水產出版社。
- 二、魚類生理學，1999 年，施琮芳編著，基隆市：水產出版社。
- 三、脊椎動物通論(上冊)，1981，J.Z.Young 編著，于名振譯，臺北市：台灣商務印書館。
- 四、你的臉皮有多厚，2006，張嘉文編著，臺北市：先覺出版股份有限公司。
- 五、菜市場魚圖鑑，2006，吳佳瑞、賴春福，臺北市：天下遠見出版股份有限公司。
- 六、國中自然與生活科技課本，2006，臺北市：翰林出版社。
- 七、COMPARATIVE STUDY OF THE GILL AREA OF MARINE FISHES，I. E. GRAY，*Biol Bull* **107**: 219-225.，1954
- 八、雅虎奇摩知識：關於魚呼吸的相關知識
<http://tw.knowledge.yahoo.com/question/?qid=1005032403792>
<http://tw.knowledge.yahoo.com/question/?qid=1205081210339>
<http://tw.knowledge.yahoo.com/question/?qid=1005021504845>
- 九、維基百科：關於吳郭魚的相關知識
<http://zh.wikipedia.org/wiki/%E5%90%B4%E9%83%AD%E9%B1%BC>
- 十、魚類入門，2004 年，邵廣昭、陳麗淑編著，台北市：遠流出版事業股份有限公司。

【評語】 031715

1. 對吳郭魚鰓觀察細微，並仔細測量計算魚鰓表面積，實驗態度佳，值得鼓勵。
2. 結果多數與已發表資料相似，較不具創新性，建議繼續深入探討研究。