

水下攝影監測生態水路枯水期亞臨界流況 魚類族群的分布

Monitoring the Fish Population in Subcritical Flow Ecological Channel in Dry Season by Underwater Video Techniques

國立台灣大學
生物環境系統工程學系
碩士

虞 淨 卉*

Ching-hui Yu

國立台灣大學
生物環境系統工程學系
教授

張 文 亮

Wen-lian Chang

摘 要

本研究以雙鏡頭水下攝影技術，對苗栗穿龍圳東河排水之生態工程渠段進行非侵入性的魚類族群監測。

計算各採樣點之魚通量(單位時間單位體積魚隻數量，本研究為： $\text{隻}/0.007 \text{ m}^3 \cdot \text{sec}$)；魚通量的概念能將不同能見度之各採樣點相互比較，其值受到棲地物理條件如遮蔽、水深與拍攝時段等影響。

貝氏有限混合分佈理論以魚通量作權重，繪製不同魚種之最適福祿數曲線，尋找交點得到不同魚種之適合福祿數範圍。研究發現，福祿數為 0 至 0.06 之間為大肚魚(觀測之平均體長為 2.0 cm)優勢區；福祿數 0.06 至 0.18 為台灣石鱗(觀測之平均體長為 2.4 cm)佔優勢；超過福祿數 0.18 則台灣馬口魚(觀測之平均體長為 1.8 cm)佔優勢。魚隻成熟度會影響其魚種在不同福祿數下之表現，而本研究所觀察魚隻主要處於幼魚階段。

野外各點在影片中由人工觀測魚類棲所行為判定為棲息地的變異係數 CV 值皆小於 1，也就是標準差小於平均值之情況為魚類棲息地的可能性較高；反之若標準差大於平均值之情況則為廊道的可能性較高。

關鍵詞：台灣馬口魚，台灣石鱗，大肚魚，生態工程，影像監測。

ABSTRACT

This study used non-invasive bi-camera underwater video techniques to monitor the

*通訊作者，國立台灣大學生物環境系統工程學系碩士，10617 台北市大安區羅斯福路 4 段 1 號，shark0201@gmail.com

fish population in ecological engineering channel sections in Chuan-Long channel in Miaoli County.

The experiment recognized the fish species and calculated the fish flux (fish number/unit of volume · unit of time, in this study it is fish number/ $0.007 \text{ m}^3 \cdot \text{sec}$) in different ecological engineering channel sections. The fish flux could compare with different sites with different visibility. The fish flux was affected by different factors such as surrounding conditions of habitats like shelter, water depth and different filming time, etc.

By using Bayesian finite mixture distribution as the method and the fish flux index as weight values, the experiment estimated the optimum-Froude number curves in different species in order to find the intersection points. The results showed that the *Gambusia affinis affinis* (the observed average body length is 2.0 cm) predominated over other species when the Froude number was 0-0.06. The *Acrossocheilus paradoxus* (the observed average body length is 2.4 cm) predominated over other species when the Froude number was 0.06-0.18. The *Candidia barbata* (the observed average body length is 1.8 cm) predominated over other species when the Froude number was higher than 0.18. The fish maturity affected the performances in different Froude number, and most of the observed fish in this study is in juvenile stage.

The coefficients of variance of fish flux were smaller than 1 in the study sites which were judgment artificially to be habitats by behavior of fishes. That was to say, when the standard deviations were smaller than means of fish flux, the sites might more likely be fish habitats but corridors.

Keywords: *Candidia barbata*, *Acrossocheilus paradoxus*, *Gambusia affinis affinis*, Ecological engineering, Video monitor.

一、緒 論

1.1 文獻回顧

進行水域系統之環境監測，或是評估生態系統的復育程度，魚類、底棲無脊椎動物和附生藻類是常見的指標性物種(宋等，2004)。

其中，使用魚類來做生態監測比起其他物種有許多優點：大部分魚種的生活史資料豐富；魚類族群位於水域食物鏈頂端，有多樣化的營養階層(trophic levels)；種別鑑定較無困難，能直接在野外進行鑑定，花費時間較少；對環境污染與生存壓力的反應敏銳；與一般大眾關聯性較強等。缺點則是其運動性強，取樣與觀測均較困難且耗費人力；晝夜與季節等因子也會改變魚類族群分布(Karr, 1981)。

魚類生態調查方法可分為非目視法與目視法，前者包括手釣(hook-and-line)、魚籠(baited fish trap)、刺網(trammel net)與電魚(electrofishing)等；後者包括錄影(video device)、照相(camera, still photography)、水下遙控潛航器(Remote Operating Vehicle)等(邵等，1993)。而國內目前調查河川渠道內魚種豐度變化，多以電魚採集法為主，其他採集法為輔(羅，2005)。若是研究保育種魚類，或是保育區內的魚類生態是不宜採取這類侵入式的採樣方法。

非侵入式的生態調查方法中，有利用兩台平行放置之錄影機，以彼此間的距離與魚隻相對位置差別為比例，去估計錄影到的魚隻體長(Boland, 1983)。也有以相同概念去計算游動中雙髻鯊(*Sphyrna lewini*)魚體長度與魚隻彼此間的距離，

重複量測精度可小於 5% (Klimley and Brown, 1983)。

近代以加裝一對雷射裝置的單鏡頭攝影機，將雷射打在目標物上，再由雷射點間距，估計魚體長；在光線充足下(目標物照度 16700 Lux)平均誤差小於 1 公分，隨著目標物與鏡頭距離大於 2.5 公尺誤差增加(Yoshihara, 1997)。水下攝影也可用作魚類行為監測，使用兩台攝影機，量化斑馬魚(*Danio rerio*)群聚行為，探討有群聚行為之斑馬魚與其他種魚之間相處行為差異(Kato *et al.*, 2004)。另有半自動模式 FICASS(Fish Image Capturing and Sizing System)，使能更經濟與快速的紀錄與研究魚類行為、游速與體型分布(Petrell *et al.*, 1997)。

最新以聲波攝影機 DIDSON (Dual frequency IDentification SONar acoustic camera)進行魚類監測，能夠在濁度高或是陰暗環境下量測魚體大小與游速，觀察行為，唯價格昂貴，且不能直接辨認魚種，還須與其他監測方法合併使用(Mueller *et al.*, 2006)。

圳路生態方面，水生生物常以農水路或水田作為棲息地或移動廊道，若是水田棲地環境改變，會影響當中的水生生物出現頻率與行為。泥鰍(*Misgurnus anguillicaudatus* C.)會利用灌溉與排水溝渠，從溪流進入水稻田，作為生育繁殖地；新式水田系統下，水田與排水溝渠間存在 50~100 公分的垂直落差，會造成泥鰍繁殖遷移障礙；此外，排水後，水稻田內泥鰍數量銳減，而溪流與溝渠中泥鰍量增加(Fujimoto *et al.*, 2008)。另外，日本研究三種水田溝渠常見青蛙：日本赤蛙(*Rana japonica* Günther)、東京達摩赤蛙(*Rana porosa* Cope)與日本樹蛙(*Hyla japonica* Günther)，這三種青蛙皆產卵在淺且靜止的水田中，幼體長成成蛙後分散至附近有水的池子或溝渠中；研究發現，U 型水泥溝渠的難以攀爬，與溝渠和水田間的高度落差，會造成青蛙向外繁殖與覓食的阻礙(Fujioka and Lane, 1997)。

渠道內生態工程的設計，有助於魚類棲地的營造。日本於部分河段邊岸施作原木壩、楔型壩與導流木，以減少沖刷與營造深潭環境，並於下

游施放石川鮭魚(*Oncorhynchus masou ishikawae*)幼苗，以幼鮭密度多寡比較施作河段中與水理環境的關係發現，深潭(pool)比例較高的區域魚隻密度較高，可達 0.5 尾/m²；反之淺灘(rapid)比例較高的區域魚隻密度低，小於 0.1 尾/m²，表示深潭是石川鮭魚幼魚的重要棲地(柳井等，2004)。

1.2 研究目的

採用影像監測方法來調查魚類，是一非侵入性之調查，但在技術與理論方面仍在發展。本研究的目的在以雙鏡頭水下攝影運用在渠道監測，以提供一個簡單、便宜且可行之非破壞性監測技術，將對於生態化復育之渠道、溪流等水域生態復育評估有所助益。

二、理論與模式

2.1 福祿數(Froude number)

流體力學中常用之無因次參數(Dimensionless number)之一，為慣性力與重力之比值(Street *et al.*, 1996)：

$$Fr^2 = \frac{\text{Inertia force}}{\text{Gravity force}} = \frac{\rho V^2 L^2}{\rho g L^3} = \frac{V^2}{gL} \dots\dots\dots(1)$$

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{gL}} \dots\dots\dots(2)$$

其中 ρ 為液體密度， V 為液體流速， L 為液體深度， g 為重力加速度。福祿數是影響自由表面流的重要參數，常用在明渠流等受重力影響較大的流體。

若福祿數值大於 1，稱為超臨界流(supercritical flow)，代表慣性力大於重力；若福祿數值小於 1，稱為亞臨界流(subcritical flow)，代表重力大於慣性力。在河川調查研究中，統計出深潭棲地的流速與水深比小於 1.24，福祿數不超過 0.18；急流(riffle)的流速與水深比大於 3.20，福祿數超過 0.41；而深流(run)棲地環境介於兩者之間(Jowett, 1993)。本研究將以福祿數，取代傳統以流速為變數，來探討魚類族群分布與魚隻行為變化。

2.2 貝氏有限混合分佈理論 (Bayesian Finite Mixture Distribution)

本研究利用貝氏有限混合分佈理論，計算不同魚種適合之福祿數機率分佈，並求各分佈之交界值來做進一步探討。

假設在一樣本空間 χ 中，一變數 X 的事件機率密度函數(probability density function)為(Duda et al., 2001)：

$$p(x) = \sum_{j=1}^k p(x|\omega_j)P(\omega_j) \quad \dots\dots\dots(3)$$

$$= P(\omega_1)p(x|\omega_1) + \dots + P(\omega_k)p(x|\omega_k)$$

其中 $x \in X$

$$P(\omega_j) > 0 \quad (j=1, 2, \dots, k \circ k \text{ 為有限})$$

$$P(\omega_1) + P(\omega_2) + \dots + P(\omega_k) = 1 \circ$$

$P(\omega_j)$ 稱為事前機率 (prior probability, prior)，為發生事件前，可能為 ω_j 之機率； $p(x|\omega_j)$ 稱為條件機率(likelihood)，未知值 x 為 ω_j 之機率。可能為 ω_j 的機率除上總事件機率即為事後機率 $P(\omega_j|x)$ (posterior probability, posterior)，實際未知值 x 為 ω_j 之機率：

$$P(\omega_j|x) = \frac{p(x|\omega_j)P(\omega_j)}{p(x)} \quad \dots\dots\dots(4)$$

以上即為 Bayes' formula。

由於中央極限定理(the central limit theorem)指出，不論原本 x 的分布為何，當樣本數越大，越趨近於常態分佈。故自然界發生之機率分佈通常假定為常態分佈(normal distribution)，或對數常態分佈(log-normal distribution)。

而要找出區分 ω_j 與 $\omega_{j+\Delta} (j \neq j+\Delta)$ 的臨界點 x_0 ，為當兩者事後機率相等時之交點：

假設 likelihood 為常態分佈，則：

$$x_0 = \frac{B \pm \sqrt{(B)^2 - (A)(C)}}{(A)} \quad \dots\dots\dots(5)$$

其中，

$$A = \sigma_{j+\Delta}^2 - \sigma_j^2 \quad \dots\dots\dots(6)$$

$$B = \mu_j \sigma_{j+\Delta}^2 - \mu_{j+\Delta} \sigma_j^2 \quad \dots\dots\dots(7)$$

$$C = \mu_j^2 \sigma_{j+\Delta}^2 - \mu_{j+\Delta}^2 \sigma_j^2 - 2\sigma_j^2 \sigma_{j+\Delta}^2 \ln \frac{P(\omega_j)\sigma_{j+\Delta}}{P(\omega_{j+\Delta})\sigma_j} \quad \dots\dots\dots(8)$$

如此可得到 ω_j 與 $\omega_{j+\Delta}$ 之間之交界值 x_0 。

若 likelihood 為對數常態分佈，則(5)式求得之值為 $\ln(x_0)$ ：

$$\ln(x_0) = \frac{B \pm \sqrt{(B)^2 - (A)(C)}}{(A)} \quad \dots\dots\dots(9)$$

其中 A 、 B 與 C 同為(6)、(7)與(8)式，再取指數化得出 x_0 ：

$$x_0 = e^{\ln(x_0)} \quad \dots\dots\dots(10)$$

2.3 量測魚隻體長

以雙鏡頭量測攝影範圍內魚隻的體長，若魚隻與鏡頭在同一水平面情況下游過，計算較為單純，其計算方法如下：

其中(如圖 1、圖 2)，

$$e = c - \frac{a}{2} \quad \dots\dots\dots(11)$$

$$f = d - \frac{b}{2} \quad \dots\dots\dots(12)$$

a 為左鏡頭水平照射角度； b 為右鏡頭水平照射角度； c 為左鏡頭與右鏡頭連線之夾角； d 為右鏡頭與左鏡頭連線之夾角。

攝影完畢影片檔切割成每秒 30 畫格之影像檔後，利用程式使左右兩鏡頭攝影影像無時間差，量測與計算左鏡頭攝影畫面中魚尾巴末梢距離右邊畫面邊緣之角度為 p ，同理右鏡頭攝影畫面中魚吻部前端距離左邊畫面邊緣之角度為 x ，

$$\alpha = p + e \quad \dots\dots\dots(13)$$

$$\beta = x + f \quad \dots\dots\dots(14)$$

使用三角函數公式，計算出 m 、 l 、 n 、 k 邊長，最後求得魚總體長 $\bar{Z}$ (total length) (如圖 3)：

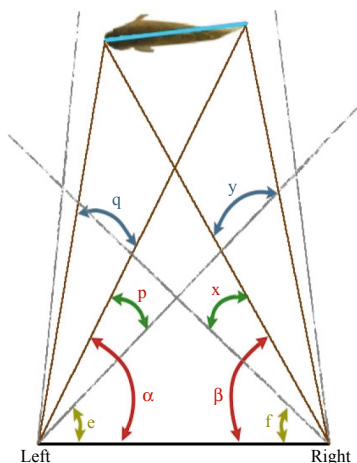


圖 1 量測魚體長之角度俯視圖

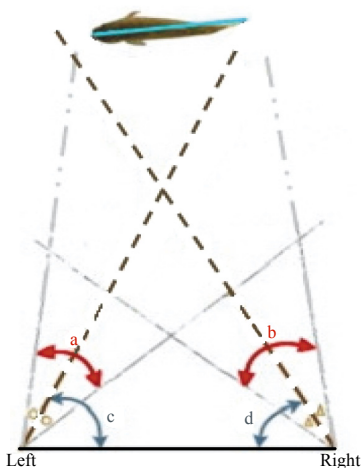


圖 2 雙鏡頭夾角俯視圖

$$m = \frac{\bar{X}}{\sin(180 - \alpha - \beta - y)} \cdot \sin(\alpha) \dots\dots\dots(15)$$

$$l = \frac{m}{\sin(\alpha + \beta)} \cdot \sin(y) \dots\dots\dots(16)$$

$$n = \frac{\bar{X}}{\sin(180 - \alpha - \beta - q)} \cdot \sin(\beta) \dots\dots\dots(17)$$

$$k = \frac{n}{\sin(\alpha + \beta)} \cdot \sin(q) \dots\dots\dots(18)$$

$$\bar{Z} = \sqrt{k^2 + l^2 - 2kl \cos(180 - \alpha - \beta)} \dots\dots\dots(19)$$

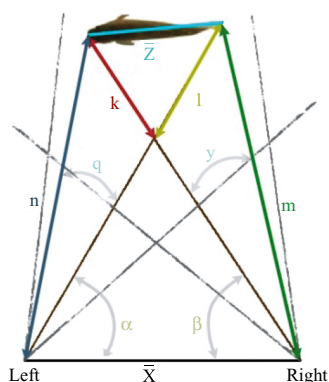


圖 3 量測魚體長之線段俯視圖

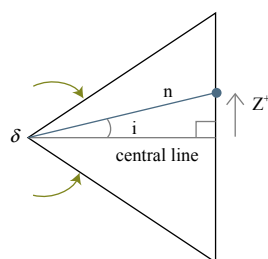


圖 4 側視圖

如果魚隻吻部靠近的是右鏡頭，或是魚隻由左鏡頭游向右鏡頭時，仍然可以用此方法做計算，只是符號所代表的邊與角度正負略有不同，對求取魚隻總體長沒有妨礙。

2.4 建立魚隻三維座標

由於魚吻部較易觀察，故以雙鏡頭建立魚吻部之 XYZ 座標，若是要建立尾部座標則同理計算。首先從已切割完成之影像分割中央線(central line)以利計算與建立相對位置，量測魚吻部距離中央線之垂直距離，計算角度 i，位於中央線上方 i 為正值；位於中央線下方 i 為負值，如圖 4。

其中 δ 為左鏡頭垂直照射角度。利用公式(17)之邊長 n 來計算 Z：

$$Z = n \cdot \sin(i) \dots\dots\dots(20)$$

如圖 5 進行簡單的畢氏定理，即可求出 Y 與 X。其中 Y' 為魚吻部與雙鏡頭間距線之垂直距離。

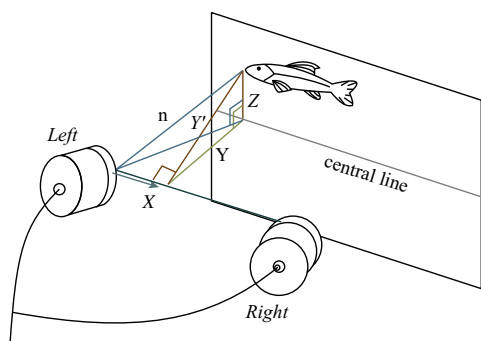


圖 5 XYZ 座標側視圖

$$Y' = n \cdot \sin(q + \alpha) \quad \dots\dots\dots(21)$$

$$Y = \sqrt{Y'^2 - Z^2} \quad \dots\dots\dots(22)$$

$$X = \sqrt{n^2 - Y'^2} \quad \dots\dots\dots(23)$$

以上建立出之 XYZ 座標是以左邊鏡頭為原點(0,0,0)，計算出攝影範圍內魚隻吻部之相對位置座標。

當魚在覓食或是跳躍、上溯時，常與鏡頭不在同一平面情況下游過，與鏡頭間存在一角度。故若要求取不水平於鏡頭之魚隻體長，則需要建立魚隻吻部與尾部之 XYZ 座標，再求兩點座標間距離，即為魚隻體長。

2.5 魚通量(Fish Flux)

由於以攝影鏡頭拍攝方法來調查，不同的濁度會影響可視距離，進而影響魚隻頻率的判讀；例如兩地有同樣魚隻數，但是第一點能見度高觀測到的魚隻數多，第二點能見度低觀測到的魚隻數較少，故單以每秒出現幾隻魚的頻率表示方法不夠客觀；因此本研究以魚通量的概念，來表示在一鏡頭可視距離所拉出的橢圓錐體積為單位來計算，如圖 6：

$$N'(\text{隻數}/\text{m}^3 \cdot \text{sec}) = \frac{N}{T(\frac{1}{3} \bar{Y} \pi a' b')} \quad \dots\dots\dots(24)$$

$$a' = \bar{Y} \cdot \tan\left(\frac{\theta}{2}\right) \quad \dots\dots\dots(25)$$

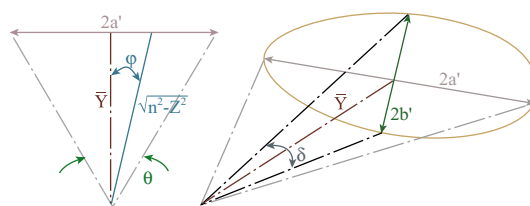


圖 6 (左)單鏡頭照攝範圍俯視圖；(右)照攝橢圓錐體積示意圖

$$b' = \min\left[\bar{Y} \cdot \tan\left(\frac{\delta}{2}\right), \frac{d}{2}\right] \quad \dots\dots\dots(26)$$

$$\bar{Y} = \sqrt{n^2 - Z^2} \cdot \sin(90 - \phi) \quad \dots\dots\dots(27)$$

其中， N' 為魚通量，單位體積與時間內通過的魚隻數(隻數/ $\text{m}^3 \cdot \text{sec}$)； N 為魚隻數量(隻)； T 為單位時間(秒)； $\bar{Y}$ 為以雙鏡頭法所計算出最遠背景與鏡頭之距離(公尺)； a' 為橢圓面積之長邊(公尺)； b' 為橢圓之短邊，或是水深(d)取其小值(公尺)； θ 為鏡頭水平照射角度； δ 為鏡頭垂直照射角度； ϕ 為最遠背景點距離鏡頭水平中線之夾角； n 為以公式(17)計算之值； Z 為以公式(19)計算之值。

2.6 變異係數 CV 值(Coefficient of Variation)

有學者研究金瓜寮溪，由觀測時間與魚通量的變化，去判定採樣點為魚隻棲息的可能性高低(蕭，2006)。發現單純只比較不同採樣點的平均魚通量或是魚通量之標準偏差易受到魚隻數多寡的影響，無法客觀的判斷其棲地特性，故採用變異係數 CV 值作為比較的依據：

$$CV = \frac{SD}{\bar{N}'} \quad \dots\dots\dots(28)$$

其中 CV 為變異係數；SD 為魚通量之標準偏差(standard deviation)； $\bar{N}'$ 為魚通量之平均值。

三、材料與方法

3.1 場址說明

以位於苗栗縣公館鄉福基村，穿龍圳北幹線之東河排水渠段為研究地點。豐水期為 4 月至 10 月，枯水期為 11 月至翌年 3 月。穿龍圳水源為

表 1 穿龍圳各採樣點座標分佈表

採樣點編號	經緯度座標		施工樁號	工法說明	備註
	東經	北緯			
1	120°49'41"	24°28'32"	0+618K	石樑固床工	已沖毀
2	120°49'38"	24°28'35"	0+760K	跌水工	
3	120°49'36"	24°28'37"	0+830K	渠底礫石固床工	
4	120°49'35"	24°28'37"	0+840K	左右岸排塊石	已沖毀
5	120°49'34"	24°28'38"	0+900K	松木樁工法	
6	120°49'15"	24°28'55"	1+650K 後一公尺	跌水工	

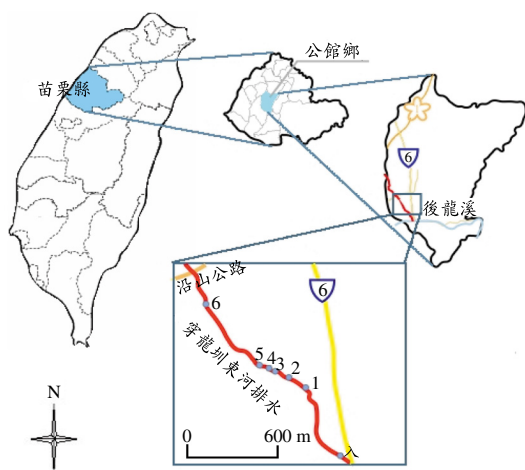


圖 7 穿龍圳地理位置與各採樣點分佈圖

後龍溪之溪水，為附近農田之灌溉水源運輸之主要渠道，下游再匯至後龍溪。

民國九十六年在穿龍圳東河排水渠段實施生態工程，將原本三面光的農田水路拓寬，並以濕式砌石等工法重新建造邊坡護岸與渠底固床工、跌水工、石頭陰壩等，工程全長為 1650 公尺，營造出不同流況，以吸引更多生物回來，讓農田灌溉渠道成為生物廊道的一環。

藉由不同生態工程的營造來做採樣點的選定：第一個採樣點是位於石樑固床工(已沖毀)前方、道路箱涵之下，由於靠近入水口，流速較快，鏡頭放置位置在橋下緩流區，提供遮陰與降低流速。

第二點位於景觀橋後方的水泥階梯式跌水工下，在渠道左岸處，有許多上游沖下的礫石來減緩流速，其上生長的青苔與四周水草成為小型魚與幼魚的棲息與覓食場所。

第三點為渠底礫石固床工，以平均 15.86 cm 大小的石塊濕式砌石法固定於渠底，礫石間隙小且平均水深不到 8 公分。

第四點位於第三點渠底固床工之下 10 公尺處，四周的桂圓樹形成天然遮陰，此處渠道中分布一些已沖毀的左右岸排塊石之石塊，礫徑平均 20.75 cm。

第五點位於木樁工法中，木樁工法是以木樁隔開水生植物生長區域，將中央水道保留，當木樁腐爛仍能成為水中生物能利用的有機碎屑以達自然工程之效用。

第六點位於生態工程設施末端，最後一個礫石跌水工之後，渠道寬度較生態工程段來的窄，且水深較深，以三面光為主體，但渠底有許多上游沖下來之礫石塊(礫徑平均 18.67 cm)，上有青苔可供覓食與棲息，穿龍圳各樣點地理位與樣點工程見圖 7 與表 1。

實驗期間各點觀察到的魚種以台灣馬口魚、大肚魚與台灣石鱗為主，故將以這三種魚為探討對象。

3.2 實驗設置

實驗將雙鏡頭水下攝影機放置於穿龍圳生態工程渠段中第一點至第六點，固定於底床，使不隨水流晃動；另外，每個月加採入流量測水質與流速，但不放置攝影機。

攝影影像由訊號纜線連接至數位 DV 攝影機中，每點錄製 5 至 20 分鐘，視拍攝到的魚數而定，若拍攝範圍中為同一群魚，就縮短拍攝時間。拍攝點方位之選取為有可能出現魚隻之地

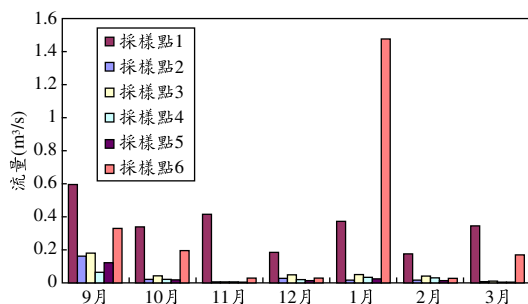


圖 8 穿龍圳 2008 年 9 月至 2009 年 3 月各採樣點流量變化圖

點，如石頭後方緩流區、沉水植物區等等。放置好儀器之後等 5 至 10 分鐘泥沙沉澱並使嚇離之魚群回來後開始拍攝。拍攝完後在網內放置魚飼料進行撈魚，辨認魚種，並以附量尺鐵盤量測總體長(total length)；最後以流速計與皮尺作拍攝點的渠道流速斷面測量，並以邊長 50 公分的正方形框架量測照射點內礫徑大小，紀錄礫石最長邊長(gravel size)。

將拍攝後 DV 帶中原始影像，經由個人電腦 USB 輸入源轉檔成為 320 × 240 大小，每秒 30 個畫格(30 fps)之 MPEG 檔案，再剪輯成各點 AVI 檔案，最後經由程式把影片(video)切割成每秒 30 張之圖片(image)；影像壓縮格式採用「XviD MPEG-4 Codec」。

裁減好之檔案以人工方式讀取游經之不同魚種之魚數，再除上觀看影片時間長度，即為出現頻率。每 30 個畫格(1 秒)為一單位，計算在此中出現魚隻數目，到下一秒歸零重新計數下 30 個畫格內出現魚隻數目，以此連續記錄至 1 分鐘後平均。若左右兩鏡頭出現頻率不一，將記取頻率高者。其中 12 月份因當天儀器問題，無法計算可視長度，故不包含第 2、4、5、6 採樣點之魚通量計算。

水質檢測採取行政院環境保護署環境檢驗所公告之方法：水中溶氧檢測方法—疊氮化物法(W421.57C)；水中磷檢測方法—分光光度計/維生素丙法(W427.52B)；水中硫酸鹽檢測方法—濁度法(W430.51C)；水中硝酸鹽檢測方法—馬錢子鹼比色法(W417.51A)；水中鹼度檢測方法—滴定法

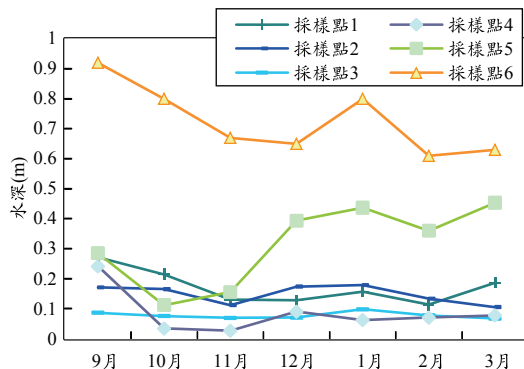


圖 9 穿龍圳 2008 年 9 月至 2009 年 3 月各採樣點水深變化圖

(W449.00B)；水中氯鹽檢測方法—硝酸銀滴定法(W407.51C)；水中總溶解固體及懸浮固體檢測方法—103°C~105°C 乾燥(W210.57A)；總凱氏氮 TKN 分析方法—分光光度計法(W420.51B)。

四、結果與討論

4.1 各採樣點背景資料

穿龍圳採樣頻率為每個月一次，從 2008 年 9 月份到 2009 年 3 月份，共 7 個月，其中 9 月份的採樣(9 月 24 日)前夕恰好有中度颱風哈格比來台(9 月 21 日)，故 9 月的流量較豐。第一點由於距離入水口最近，流量高；第一點與第二點間有一水門將水引入隔壁私畝圳(樁號 0+738K)，導致流量下降，此外，第二點渠道拓寬，水深也較低；而第六點位於跌水工之後，前方有兩個水門(樁號 0+382K 與 1+640K)調節水量，流速快且水深較深，故流量也較其他點為高(見圖 8、圖 9)。

河川魚類的棲息環境，主要分成三個影響因子：水量、水質與河川型態。水量豐沛且有適當的變動、水質良好、棲地型態的多樣性讓魚類能夠有自由行動的屏蔽，這些因素能使魚類不容易滅絕(葉，1997)。

往昔河川及魚類調查，多著重於以水質為導向之監測，而今許多研究資料顯示，河川水流型態與物理性棲地結構更是決定河川水生物群聚結構之主要因子(汪，1990)。

農田水路主要是用為灌溉附近農田之渠道，

表 2 穿龍圳各點平均水質特性表(2008 年 9 月至 2009 年 3 月, n = 7)

	BOD mg/L	PO ₄ ³⁻ -P* mg/L	SO ₄ ²⁻ mg/L	NO ₃ ⁻ mg/L	SS mg/L	NH ₄ ⁺ mg/L	CO ₃ ²⁻ mg/L	HCO ₃ ⁻ mg/L	Cl ⁻ mg/L	pH	EC μS/cm	DO mg/L	turbidity NTU
1	1.4	0.19	58.85	0.66	5.5	0.11	5.0	153.5	4.7	8.5	365.0	6.9	7.3
2	1.5	0.34	55.39	0.64	6.5	0.09	7.5	146.4	4.8	8.6	358.4	7.0	7.3
3	1.7	0.01	58.90	0.65	8.2	0.09	6.0	143.4	4.6	8.4	355.3	7.6	7.2
4	1.9	0.32	59.36	0.60	6.9	0.08	3.6	153.7	5.3	8.4	359.3	7.9	5.2
5	1.4	0.01	58.08	0.60	4.3	0.14	7.5	148.4	4.5	8.4	357.9	7.6	5.2
6	2.0	0.76	65.95	0.59	2.3	0.14	7.0	151.5	7.3	8.3	407.3	7.5	7.1

表 3 穿龍圳各點平均水力特性表(2008 年 9 月至 2009 年 3 月, n = 7)

	temp ℃	Water depth* m	Flow velocity m/s	Q* cms	gravel size* cm	Fr
1	23.5	0.16	0.19	0.34	0.0	0.14
2	23.3	0.14	0.03	0.03	14.6	0.02
3	23.4	0.08	0.17	0.05	15.9	0.19
4	22.6	0.12	0.07	0.02	20.8	0.08
5	23.8	0.33	0.09	0.03	0.0	0.06
6	23.6	0.75	0.11	0.32	18.7	0.04

*PO₄³⁻-P 項目中第 6 點與其他 5 點存在顯著差異(P<0.05)；平均水深(water depth)項目，第 1、2、4 點間與第 3、4 點間無顯著差異，其餘存在顯著差異(P<0.05)；流量(Q)項目，第 1、6 點間、第 2、3、4、5 點間、第 2、3、4、5、6 點間無顯著差異，其餘存在顯著差異(P<0.05)；礫石最長邊長(gravel size)項目，第 1、5 點與第 2、3、4、6 點存在顯著差異(P<0.05)。其餘項目各樣點間不存在顯著差異。

水質條件好，表 2 顯示穿龍圳各點水質變異不大，各點皆屬於未(稍)受污染水體，除了在採樣點 6 正磷酸鹽(PO₄³⁻)濃度與其它採樣點有顯著差異，其他水質化學因子在採樣點間皆沒有顯著性；而在穿龍圳中水力因子中，水深、流量與礫徑各採樣點間有顯著差異存在(見表 3)，營造出的渠道型態多樣性，可提供魚類休憩與躲藏的空間，故對於魚隻出現的魚通量影響，水力較水質因子來的高。

4.2 穿龍圳魚通量變化

將雙鏡頭器具放置在各採樣點有魚出現的地方進行錄影，最後把攝影鏡頭拍攝到的影片，以人工方式去數隻數與判斷魚種，計算其魚通量。

各採樣點有不同的魚種組成：採樣點 1 與採樣點 2 主要為大肚魚，其次為台灣馬口魚；採樣點 3 由於水深不夠沒有魚類出沒；採樣點 4 與採

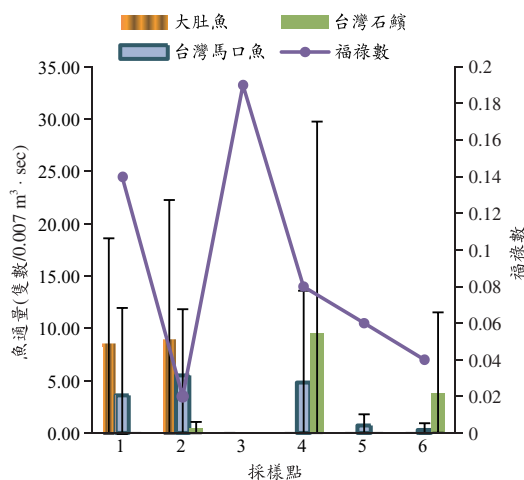


圖 10 穿龍圳各點平均魚通量與標準差

樣點 6 主要為台灣石鱚，其次為台灣馬口魚，其中在 11 月份出現過一窩台灣石鱚之幼魚，故其標準差較高；採樣點 5 主要為台灣馬口魚，見圖 10。

鑒於調查現地之氣候、水質、濁度、水生植

表 4 穿龍圳各點可視體積(m³)

樣點	1	2	3	4	5	6
2008/9	-	-	-	-	-	0.003
2008/10	-	0.033	-	0.018	0.021	-
2008/11	0.004	0.006	-	0.002	0.009	0.008
2008/12	0.001	-	-	-	-	-
2009/1	0.003	0.002	-	-	-	-
2009/2	0.001	0.002	-	0.002	-	0.007
2009/3	0.011	0.002	-	-	0.001	0.002
average	0.004	0.009		0.008	0.010	0.005

“-”表示無觀察到魚，12月份的2~6點為無法計算。

物、遮蔽等差異，除了各點可視體積不同外，同樣點每次調查可視體積也有變化，見表 4。為了讓各點有統一基準，故採用各點平均可視體積作為單位(0.007 m³)，導致部份樣點計算出之魚通量偏高。

以 9 月至翌年 3 月資料進行統計檢定：將三種魚一起進行 two-way MANOVA 分析，以 Wilks' Lambda 做計算得出採樣點因子對魚通量變化有顯著差異(P<0.05)，月份因子則無。再將三種魚分開，分別對月份因子與採樣點因子作 two-way ANOVA 檢測，得出大肚魚魚通量對採樣點因子有顯著差異(P<0.05)，對月份因子則無顯著差異；其他魚種對月份因子與採樣點因子皆無顯著差異(P>0.05)。綜合 4.1 節結論，得出枯水期下，月份影響小，各採樣點物理性差異才是影響魚通量變化的主要因子。

各採樣點於不同月份之魚通量變化如下：

將第一點至第六點不同月份魚通量與福祿數做比較。其中，福祿數代表以拍攝點之水深與流速計算出的福祿數，通常小於平均渠道斷面所計算出的福祿數。圖 11 顯示出，各月份各採樣點魚種變異不大，當採樣點福祿數增加，魚通量將會下降。大部分的魚隻出現在福祿數小於 0.18 的情況下，代表出現的魚隻較適合深潭的環境，而雖然在 11 月份的第一點(福祿數 0.22)有大肚魚與台灣馬口魚出現的紀錄，事實上影片中可清楚了解，他們是藏匿在護岸砌石的石縫下，或者貼近渠底邊界層，受流速影響較少，故仍能有較高的魚通量。

由此可知，在農田渠道中想藉由實施生態工程吸引生物回來，又必須顧慮到渠道本身供水灌溉的任務，必須要在週邊或渠底設置石塊，以營造出多樣化的水流環境，提供小魚與大魚棲息、躲避高流速的空間；石頭上長出的青苔或周圍水草，也能提供水中生物遮蔽或是食物的來源。例如生態工程已被沖毀的樣點 1 與 4，因為仍留有部分礫石，有助於魚隻躲藏，魚通量高。

但並非有施作生態工程就有高魚通量，水深也是影響的關鍵，水深不夠，大魚較難生存，這可能是各點發現魚隻多為幼魚之原因，採樣點 6 水深較深，2 月份採樣有以雙鏡頭法量測魚隻體長約 5 公分，較其他點為大。第三點水深不夠，福祿數相對較高(已到達深流範圍內)，即使有礫石為底，也難有小魚棲息，故枯水時期仍須保持一生態基流量與適當水深。

4.3 穿龍圳魚通量變異係數

計算各點各魚種魚通量平均值與其標準差，得到變異係數 CV 值：

CV 值除了表示魚通量的變化之外，也可顯示出魚類遷徙與棲地適應性的好壞。假設某魚種將某地設為棲息地(patch)，在此休憩或覓食，則其平均魚通量應該為大，且魚通量標準偏差應該為低，代表此區魚類數量多且不太游走與變動；反之若此地為魚隻廊道(corridor)，同一時間下魚隻數目較少，而魚隻不連續且快速的通過此區，導致魚通量震盪較高，標準偏差為高。如此計算出之變異係數(CV)在棲息地應為小；而在廊道或

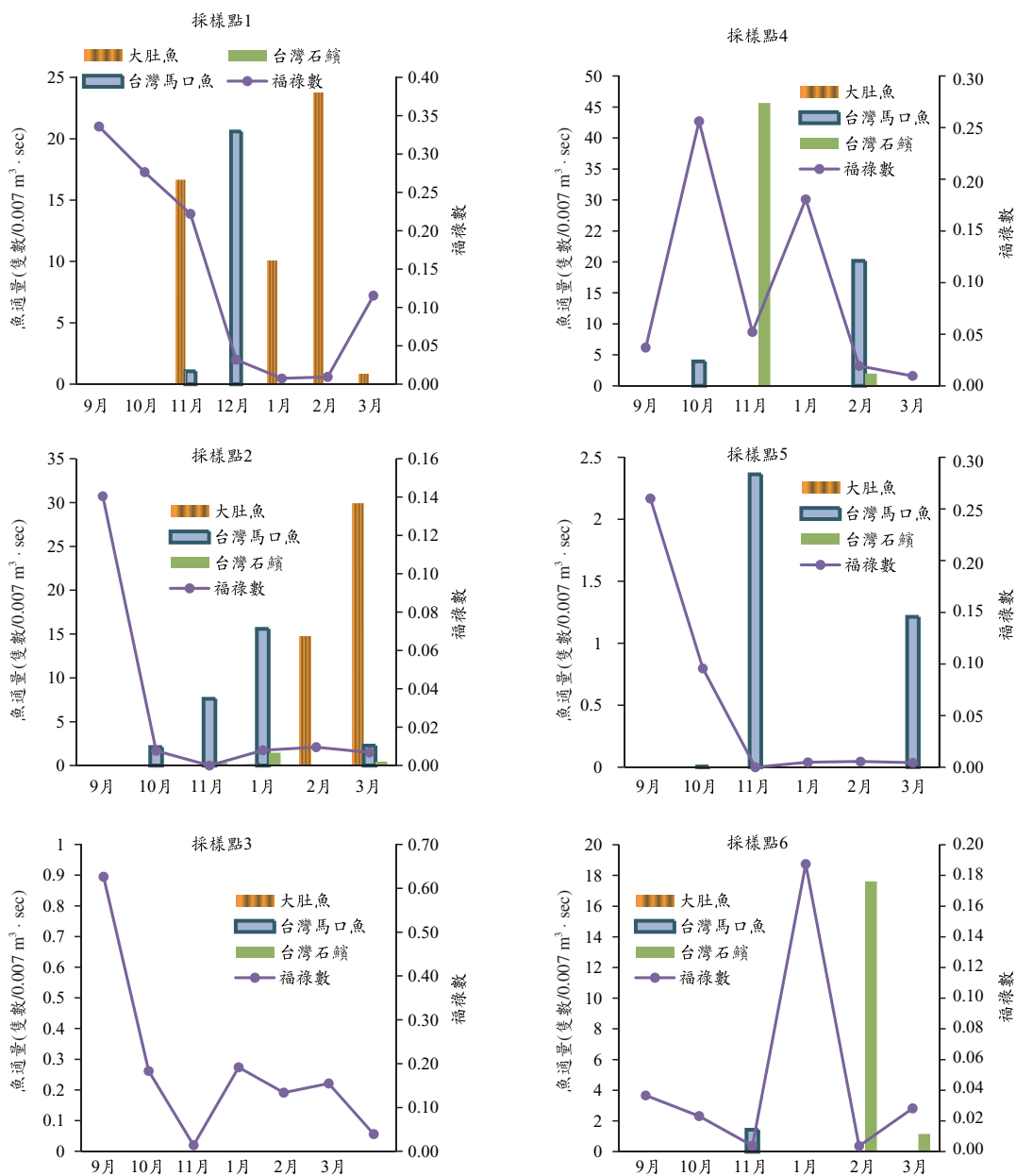


圖 11 穿龍圳 2008 年 9 月至 2009 年 3 月各採樣點魚通量變化圖

是低品質的棲息地(low-quality patch)其變異係數(CV)值應該為大。CV 值可以幫助判斷魚類適合之棲息地為何，將影片上得到的資訊得以量化，而非主觀判定。

圖 12 表現出魚種在各點的 CV 值，對照影片經由人工判讀魚隻行為模式，例如正在覓食、

不游動等，認定是否為棲息地之結果，得出判定是棲息地的 CV 值皆小於 1，也就是其變動量小於其平均值，而確切的臨界值還需未來更多的研究。

由於 9 月份颱風過境導致魚通量與其他月份相比少，而變異係數大，故表 5 是選用 2008 年

表 5 2008/10 至 2009/3 各採樣點不同魚種之魚通量(隻/0.007m³·sec)與 CV 值

採樣點	大肚魚			台灣馬口魚			台灣石鱗		
	mean	SD	CV	mean	SD	CV	mean	SD	CV
1	8.55	10.05	1.18	3.61	8.33	2.31	0.00	0.00	-
2	8.94	13.32	1.49	5.52	6.30	1.14	0.44	0.60	1.36
3	0.00	0.00	-	0.00	0.00	-	0.00	0.00	-
4	0.00	0.00	-	4.83	8.76	1.81	9.53	20.22	2.12
5	0.00	0.00	-	0.72	1.06	1.48	0.00	0.00	-
6	0.00	0.00	-	0.29	0.64	2.24	3.75	7.77	2.07

mean 為各月份魚通量之平均，SD 為各月份平均魚通量之標準差，CV 為前兩者之比值。

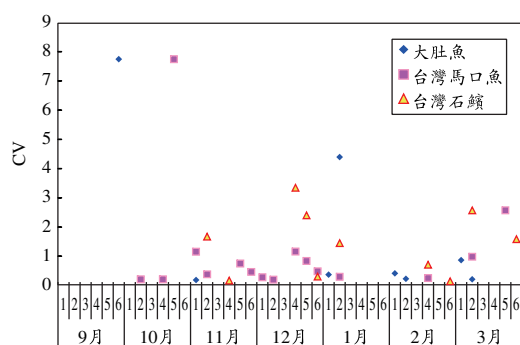


圖 12 穿龍圳各月份各點魚種 CV 值

10 月份至 2009 年 3 月份之資料作計算。上表統合各月份的魚通量變化來計算 CV 值，以表示穿龍圳各採樣點經過 6 個月較長期的環境變化，是否仍為某魚種的棲息地不變，若是其 6 個月間的變異係數 CV 值仍在 1 以內，推定此採樣點為某魚種之長期棲地可能性較高，不隨時間長短、環境變化而有不同。

表 5 顯示，採樣點 1 趨近於大肚魚之長期棲息地，CV 值 1.18 略大於 1；採樣點 2 趨近於台灣馬口魚之長期棲息地，CV 值 1.14 略大於 1；其他採樣點 6 個月間的魚通量變化過大，與圖 12 相比，那些單月份魚通量 CV 值表現出的棲地，只是暫時性的棲地。

4.4 穿龍圳魚種最適福祿數

依照貝氏有限混合分佈理論(Bayesian Finite Mixture Distribution)找出穿龍圳三種魚種之最適福祿數分布。由於魚隻多出現在低流速，經由

SPSS 中 Q-Q 圖計算出魚通量與福祿數之關係較接近對數常態分布，故以對數常態分布模擬出福祿數之機率分布，為其條件機率分布(likelihood)。將不同魚種出現的魚通量化為對數福祿數之權重，計算對數福祿數的樣本平均與樣本標準偏差，以此帶入常態分布式中。為求其事後機率分布，還需乘上事前機率之權重，此權重即為各魚種在穿龍圳中的魚通量比例。

圖 13 中，計算出的大肚魚平均福祿數為 0.01 (對數值為 -4.21 ± 1.27)，事前機率為 0.40；台灣馬口魚平均福祿數為 0.01 (對數值為 -4.61 ± 1.97)，事前機率為 0.32；台灣石鱗平均福祿數平均為 0.02 (對數值為 -3.75 ± 1.21)，事前機率為 0.23。大肚魚與台灣馬口魚之間的福祿數截點為 0.00 與 0.14；大肚魚與台灣石鱗之間的福祿數截點為 0.06 (另一截點為 83.23 過大不合理)；台灣馬口魚與台灣石鱗之間的福祿數截點為 0.01 與 0.18。也就是在福祿數為 0 至 0.06 之間為大肚魚優勢區；福祿數 0.06 至 0.18 為台灣石鱗佔優勢；超過福祿數 0.18 則台灣馬口魚佔優勢。與大肚魚一般生活在流速慢之地方，而台灣馬口魚與台灣石鱗較屬於流速快，棲息於溪流上游等區概念符合。

以平均值來看，台灣馬口魚與台灣石鱗最適合之福祿數值極低，是因為現場拍攝到的影片中與捕撈到的魚隻，總體長皆小於 3 公分，還處於幼魚階段，沒有完整建立好適應高流速之肌肉強度，也不比成熟魚隻有力。此推論可由圖 14 中得證，將捕撈到的魚隻體長作平均，沒有捕撈到

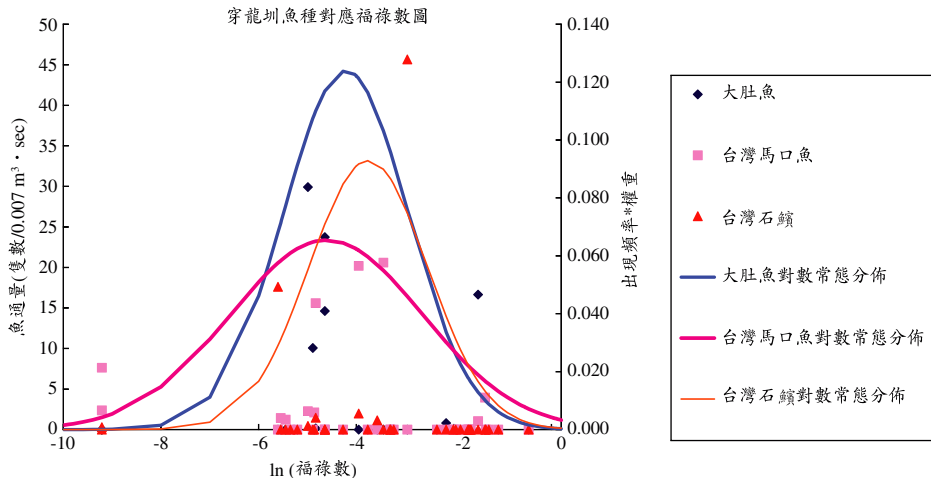


圖 13 穿龍圳魚種對應福祿數之對數常態分佈圖(大肚魚平均體長為 2.0 cm；台灣馬口魚為 1.8 cm；台灣石鱚為 2.4 cm)

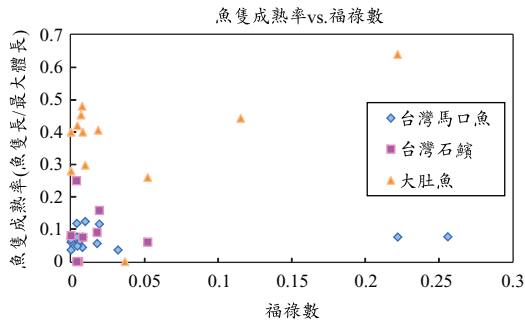


圖 14 魚隻成熟度-福祿數圖

的部份以雙鏡頭法計算出魚隻體長，與魚類圖鑑(邵等，2003)中記載的最大體長做比值，假設其最大體長為成熟魚體長，表示出魚隻成熟度。

大肚魚最大體長為 5 公分，台灣馬口魚為 25 公分，台灣石鱚為 20 公分(邵，2003)。現地魚隻多聚集於低福祿數處，隨著福祿數的增加，出現的魚隻成熟度也上升。大肚魚普遍已趨於成熟，平均成熟率為 40.7%，而台灣馬口魚與台灣石鱚成熟度皆低，分別為 7.2%與 11.9%，自然無法像溪流中成魚一般對抗強勁的水流。此外，在圖 14 中，高福祿數下($Fr = 0.2-0.25$)，台灣馬口魚成熟率(約 7.7%)雖然遠低於大肚魚(約 64%)，但仍有出現，代表台灣馬口魚比大肚魚有對抗高流速先天的優勢。

有研究指出台灣馬口魚已達性成熟最小雌

魚體長為 79 mm，雄魚為 75 mm(顏，1993)，也能佐證穿龍圳拍攝與捕撈到之馬口魚魚體，皆屬未成熟狀態。

台灣石鱚在基隆河的調查中發現，最適流速為 0.2 m/s，最適水深為 0.62 m(胡與葉，2002)，計算出福祿數為 0.08，代表台灣石鱚並非嗜高流速之魚種，而在穿龍圳發現到的台灣石鱚幼魚，計算出最適合福祿數只有 0.02。但在 2 月份發現到體長約 5 公分台灣石鱚正覓食石頭上青苔，其 CV 值為 0.14，推斷為其棲地，所處水深為 0.61 m，流速為 0.01 m/s，符合文獻中敘述其不嗜高流速之敘述。

台灣馬口魚則在學者研究大溝溪中指出，福祿數從 0.3 至 1 都有出現(Lin et al., 2006)，但並未說明發現魚隻體長範圍。而在哈盆溪研究台灣馬口魚進行 t 檢定發現，不論是幼魚或是成魚，皆喜好在深潭而非急流(莊，2004)。

魚隻體長或是成熟度，也是探討適合棲地環境的因子，不同生長階層的魚隻需要的棲地條件不同，求得最適棲地條。件範圍時，應附註調查魚隻體長或成熟度作為參考依據。

五、結論與建議

綜合本研究，可得以下結論：

1. 野外調查發現，農田圳路中流速高的環境下，

魚隻利用周邊石頭做為遮蔽與棲息空間，或者貼緊渠底，利用邊界層低流速來維持穩定。故在斷面平均福祿數為 0.44 情況下，仍有大肚魚出現。

2. 野外各點在影片中由人工觀測魚類棲所行為判定為棲息地的變異係數 CV 值皆小於 1，也就是標準差小於平均值之情況為魚類棲息地的可能性較高；反之若標準差大於平均值之情況則為廊道的可能性較高。推測 CV 值可以幫助判斷魚類適合之棲息地為何，將棲息地之概念得以量化。
3. 平均體長為 2.0 cm 的大肚魚之最適福祿數為 0.01；平均體長為 1.8 cm 的台灣馬口魚之最適福祿數為 0.01；平均體長為 2.4 cm 的台灣石鱗之最適福祿數為 0.02。在福祿數為 0 至 0.06 之間為大肚魚優勢區；福祿數 0.06 至 0.18 為台灣石鱗佔優勢；超過福祿數 0.18 則台灣馬口魚佔優勢。魚隻成熟度會影響其魚種在不同福祿數下之表現。

本研究之建議為：

1. 農田渠道中想藉由實施生態工程吸引生物回來，又必須顧慮到渠道本身供水灌溉的任務，可在週邊或渠底設置石塊，以營造出多樣化的水流環境，提供小魚與大魚棲息、躲避高流速的空間。
2. 福祿數是結合流速與水深之重要流力因子，以福祿數探討魚類適合度較單純考慮流速在未來工程運用上更為恰當。
3. 以人工判讀方法非常耗時耗力，期望未來能結合電腦程式，做出即時監測系統，將能更有效且更精準的得到結果。

謝 誌

本研究感謝行政院農委會「農田水利會生態工程推動與調查(97 農發-6.1-利-03)」與「農田水利會生態工程成效評估與技術推廣(98 農發-4.1-利-03)」之經費支持，與苗栗農田水利會前工程師與設計股長涂乃仁先生的幫助。特別感謝友晉與研究室夥伴瑞君學姊、尹婉、奕良、巧雯研究上的協助。

參考文獻

1. 汪靜明，1990，「河川魚類棲地生態調查之基本原則與技術」，林務局森林溪流淡水魚保育訓練班論文集，119-137 頁。
2. 宋蘭蘭、陸桂華、劉凌，2004。「淺析生態系統健康評價研究現狀」。河海大學學報(自然科學版)。第 32 卷，第五期。539-541 頁。
3. 邵廣昭、何林泰、林介屏，1993。「魚類群聚生態調查監測與分析方法」。生物科學。第 36 卷，第二期。41-56 頁。
4. 邵廣昭、陳靜怡，2003。「魚類圖鑑—台灣七百多種常見魚類圖鑑」。遠流出版公司。
5. 胡通哲、葉明峰，2002。「基隆河員山子至八堵河段環境基流量之研究」。中華水土保持學報。第 33 卷，第 3 期。241-247 頁。
6. 柳井清治、長毗有、佐藤弘和、安藤大成，2004。「都市近郊溪流における木製構造物による流路とサクラマス生息環境の改善」。應用生態工學。第 7 卷，第 1 期，第 13-24 頁。
7. 莊鈴川，2004。哈盆溪魚類族群棲地利用之研究。國立台灣大學生態學與生物演化學研究所，博士論文。59-64 頁。
8. 葉素惠，1997。清流復活事業による都市河川の生物生息環境の回復。東京農工大學院農學研究科，碩士論文。95 頁。
9. 顏俊雄，1993。哈盆溪臺灣馬口魚族群生態學之初步探討。國立師範大學生物學研究所，碩士論文。11-17 頁。
10. 蕭友晉，2006。以混合高斯理論影像計數浮萍與魚類族群之研究。國立臺灣大學生物環境系統工程研究所，碩士論文。19、34 頁。
11. 羅義碩，2005。以生態觀測建立河川魚類棲地適合度曲線。國立中央大學土木工程研究所，碩士論文。19 頁。
12. Boland, G. L., 1983. A technique for determining length of free swimming fishes using underwater stereo television. The visual assessment of fish population in the southeastern United States: 1982

- workshop, Technical Report 1(SC-SG-TR-01-83). The South Carolina Sea Grant Consortium. pp. 10-11.
13. Duda, R. O., Hart, P. E. and Stork, D. G., 2001. Pattern Classification, 2nd ed. John Wiley & Sons, Inc. New York, USA.
 14. Fujimoto, Y., Ouchi, Y., Hakuba, T., Chiba, H., and Iwata, M., 2008. Influence of modern irrigation, drainage system and water management on spawning migration of mud loach, *Misgurnus anguillicaudatus* C. Environmental Biology of Fishes. Vol. 81, pp. 185-194.
 15. Fujioka, M. and Lane, S. J., 1997. The impact of changing irrigation practices in rice fields on frog populations of the Kanto Plain, central Japan. Ecological Research. Vol. 12, pp. 101-108.
 16. Jowett, I. G., 1993. A method for objectively identifying pool, run, and riffle habitats from physical measurements. New Zealand Journal of Marine and Freshwater Research. Vol. 27, pp. 241-248.
 17. Karr, J. R., 1981. Assessment of biotic integrity using fish communities. Fisheries (Bethesda). Vol. 6, pp. 21-27.
 18. Klimley, A. P. and Brown, S. T., 1983. Stereophotography for the field biologist: measurement of lengths and three-dimensional positions of free-swimming sharks. Marine Biology. Vol. 74, pp. 175-185.
 19. Kato, S., Nakagawa, T., Ohkawa, M., Muramoto, K., Oyama, O., Watanabe, A., Nakashima, H., Nemoto, T. and Sugitani, K., 2004. A computer image processing system for quantification of zebrafish behavior. Journal of Neuroscience Methods. Vol. 134, pp. 1-7.
 20. Lin, J. Y., Chen, Y. C., Wu, M. S. and Lee, S. H., 2006. The Ecohydraulic of Fish Habitats in Engineered Streams. Journal of Ecotechnology. Vol. 2, pp. 1-14.
 21. Mueller, R. P., Brown, R. S., Hop, H., and Moulton, L., 2006. Video and acoustic camera techniques for studying fish under ice: a review and comparison. Reviews in Fish Biology and Fisheries. Vol. 16(2), pp. 213-226.
 22. Petrell, R. J., Shi, X., Ward, R. K., Naiberg, A. and Savage, C. R., 1997. Determining fish size and swimming speed in cages and tanks using simple video techniques. Aquacultural Engineering. Vol. 16, pp. 63-84.
 23. Street, R. L., Watters, G. Z. and Vennard, J. K., 1996. Elementary Fluid Mechanics, 7th ed. John Wiley & Sons, Inc. New York, USA.
 24. Yoshihara, K., 1997. Fish body length measuring method using an underwater video camera in combination with laser discharge equipment. Fisheries Science (Japan). Vol. 63(5), pp. 676-680.

收稿日期：民國 99 年 3 月 19 日

修正日期：民國 99 年 6 月 2 日

接受日期：民國 99 年 6 月 4 日