

# 中華民國第 51 屆中小學科學展覽會 作品說明書

---

高中組 地球科學科

最佳(鄉土)教材獎

040508

別小看這「一尺之差」—海岸沙崙與水文環保

學校名稱：國立宜蘭高級中學

作者：  高二 陳容陞  高二 張文駿  高二 李子豪	指導老師：  陳可恭  林清正
---	-----------------------------

關鍵詞：海岸沙崙、水文環保、地電阻率

## 摘要

宜蘭自古就有「龜蛇把海口」之說，而海岸沙崙正是這得天獨厚的環境產物之一。近來沿海地區的地層下陷、地下水鹽化和海嘯避難等問題一直被大家所關切，而海岸沙丘也正與這些問題息息相關。本研究藉實地踏察與既有資料以探究海岸沙崙的成因與特徵，並嘗試引用高中物理與地球科學課本所介紹的基本流體力學和地球物理原理，併合「簡易地電阻率測勘」及「監測井水位資料」進行交叉分析，以探求沙崙下的水體分布概貌(藉電阻率  $\rho$  與地層水鹽度  $S\%$  推估)。結果發現：南北縱走的海岸沙崙，高度大多超過 10m，在地面上能對沿海達成防風、防鹽，甚至緩衝海嘯之效；而地面下則能把持部份淡水(水位在海平面上方 1-2m)形成壓力以抑制地下鹹水上揚。故而，請別小看「一尺之差」—每一寸地下水、每一尺沙崙在水文環保上都具有其正面意義，我們不應該恣意破壞。

### 壹. 研究動機

沿海地區的地層下陷、海水入侵等問題，向來都是大家所關切的環境議題，我們也常在報紙上讀到相關訊息。蘭陽平原位於臺灣東北角，環山面海，地質構造和地形景觀都相當特殊。在一次參加「自然走讀」造訪海岸線的活動中，有一位帶隊老師曾說：「宜蘭的海岸沙崙是世界上很特殊的自然景觀，也是一道保護平原的天然防堤，非常難得！」(呂學麟，2010) [1] 這一句話很令人訝異，也勾起我們的許多聯想與疑惑—究竟海岸沙崙是如何形成的呢？它如何構成天然屏障？它能否抵擋海嘯呢？除了非常難得之外，它是否還隱藏著什麼重要的玄機？就我們能力與知識所及有什麼方法可探知海岸沙崙下的水體分布呢？……(如圖 1)；這些都是饒富趣味，也是大家所關心的問題。

所以，本研究嘗試從所學過的流體力學與電學的基本原理入門，探討宜蘭海岸沙崙的水文機制，希望能對環境議題的思考提供些許線索與參考資料。

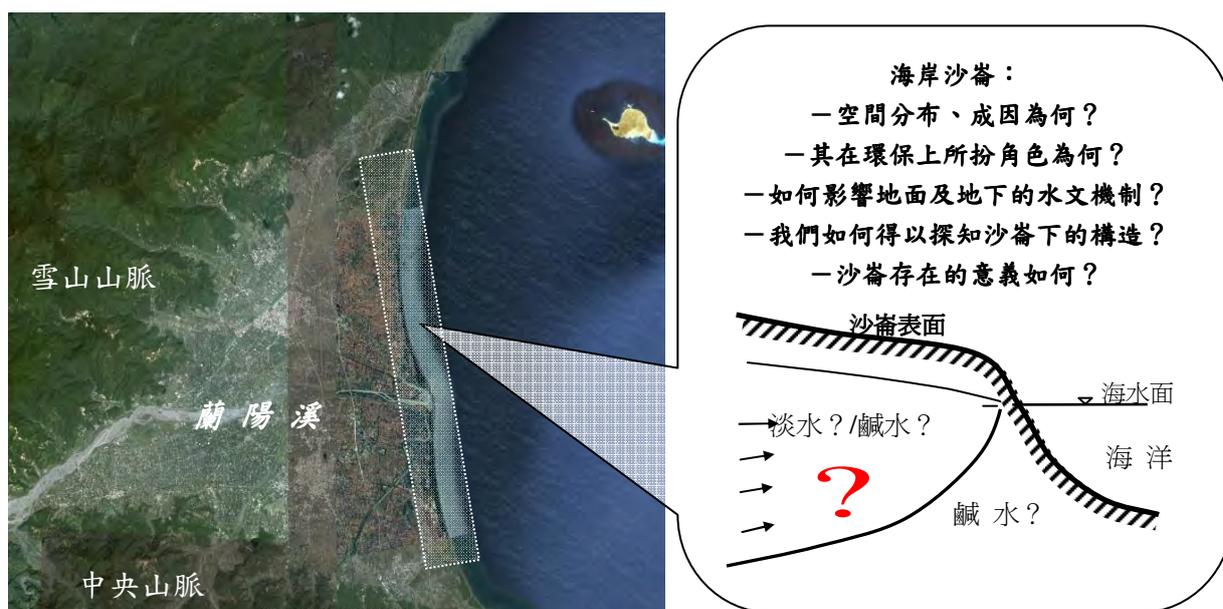


圖 1 衛星所見之宜蘭平原及海岸沙崙的空間分布(照片錄自 Google Earth) [2]

## 貳. 研究設備與器材

- 一.台灣東北部地質構造圖、衛星遙測影像圖(中大遙測中心、Google Earth 影像)。
- 二.地電阻率測勘設備—電源供應器、電線(250m×2)、毫安培計、毫伏特計及皮尺(100m)。

## 參. 研究目的與問題

### 一. 研究目的

- (一)剖析形成海岸沙崙之力學機制與環境條件。
- (二)尋找探知海岸沙崙地下水文特徵的物理原理與可行技術。
- (三)探討海岸沙崙在環保上所扮演的角色，並提出因應之道以供參考。

### 二. 研究問題

- (一)形成海岸沙崙的環境機制—地質、水文、氣象條件及其間的關聯性為何？
- (二)海岸沙崙分布特徵(走向、寬度和高度分布)及其對地面水文的影響為何？
- (三)有什麼物理方法可用來探知海岸沙崙地下水體的構造與特徵？
- (四)海岸沙崙淡/鹹水分布概貌為何？在水文環保上所扮演角色為何？(應否保護？)

## 肆. 研究方法與原理探討

### 一. 關於宜蘭海岸砂崙形成之環境機制的探討

- (一)蒐集台灣東北部地質構造圖、衛星遙測影像圖(中大遙測中心、Google Earth 影像)及相關氣象資料；剖析研究區主要地質地形構造線、河川流向與盛行風向之間的關聯性，藉以探討形成海岸砂崙的環境條件。
- (二)進行實地踏察、丈量與測勘，描繪沙崙地形(高度、寬度與長度)並紀錄地面水流狀況，以瞭解沙崙的空間規模和現場實況。

### 二. 關於宜蘭海岸砂崙下之地下水體分布形貌之探討

- (一)研究區附近地下水位分析—從經濟部水利署「水文資料庫」〔3〕找出蘭陽溪以北海岸沙崙附近的監測井，並利用 Google Earth 以經緯座標定位，找出代表「沙崙上方」的公館井與過嶺井(在厚實完整的沙崙上)，以及代表「沙崙區外」的大福國小井與補天宮井(在沙崙單薄且有人為破獲的區域)之井位(圖 5)；比較其間水位變化之差異，進而應用流體力學原理及電阻率分布以推算地下水分布概況。
- (二)探知海岸沙崙下水文特徵的可行方法之尋找—因為地層水的含鹽度  $S\%$  表現在電阻率  $\rho$  的高低，經查〈高中基礎地球科學(下)〉〔4〕可知直流電阻法對地層水鹽度的測勘相當簡便、有效，所以我們便嘗試使用此法在上述二區進行測勘，並將實測結果與監測井水位資料交叉分析、比對，以計算、推估沙崙下淡/鹹水分布的可能形貌。

1.簡易地電阻率測勘之工作原理(參考<高中基礎地球科學(下)>)[4]:

如圖 2 所示，地電阻率測勘，施測時是將直流電經由一對電極(A、B)將電流 I 通入地層中以建立一個人為電場，並在地表上利用另一對電極(M、N)量測其間的電位差  $\Delta V$ 。由於此電位差與通入地層的電流強度、電極相對位置及地層導電性有關，因此藉由一系列的量測及適當的計算，便可推知地下介質的電性構造。

因儀器設備與計算能力考量，本研究僅採地球科學教材中所介紹的排方式法進行簡易測勘；其中電流極為 A 與 B，電位極為 M 與 N，四者排在一直線上，A、B 在外，M、N 在內，對稱於中心點 O，如圖 2 所示。**當 A、B 展距越大則越能反應下部地層的性質，因此在探測中將電流極由短展距逐次加大，則可逐次獲得由淺至深的地層反應訊號。**(亦即：利用「半展距(AB/2)－視電阻率  $\rho$ 」的關係，即可判斷地層由淺而深的電阻率變化趨勢)。

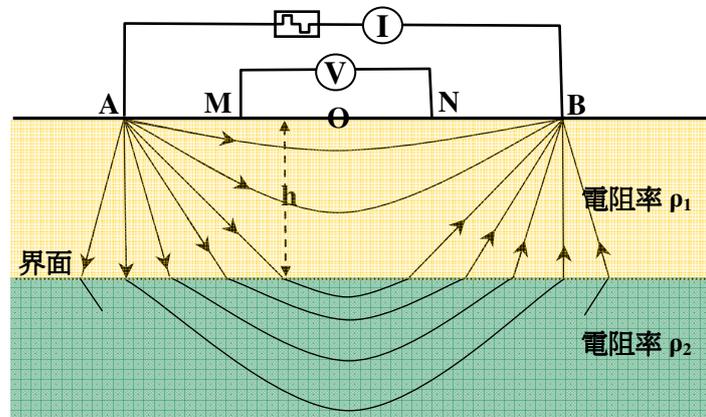
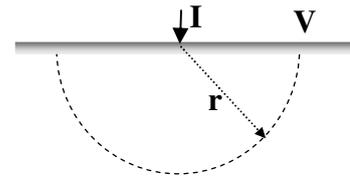


圖 2. 直流電阻法電極排列示意圖(電阻率  $\rho_1 > \rho_2$ ) [4]

經進一步查閱相關文獻(洪彥豪，2004)[6]發現：由「歐姆定律」( $E=J\rho$ )及「電荷守恆定律」，可推得在一電性均質的半空間中，由點電流源通以強度 I 的電流，則距離為 r 的任一點之電位為(如右圖)：



$$V = \frac{\rho I}{2\pi r} \dots\dots\dots(1)$$

因此，假設由 A 與 B 通入電流，則由 M 與 N 所量測的電位差值  $\Delta V$  應等於

$$\begin{aligned} \Delta V &= (V_{AM} - V_{BM}) - (V_{AN} - V_{BN}) \\ &= \frac{\rho I}{2\pi} \left[ \left( \frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} \right) - \left( \frac{1}{AN} - \frac{1}{BN} \right) \right] \dots\dots\dots(2) \end{aligned}$$

式中： $\Delta V$  為電位極間的電位差； $\rho$  為介質的電阻率；I 為通入地下的電流強度。

若將其中有關電極幾何排列的量寫成： $2\pi \left[ \left( \frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} \right) - \left( \frac{1}{AN} - \frac{1}{BN} \right) \right]^{-1} = K$

則上式(2)可縮寫成： $\rho = K \frac{\Delta V}{I}$   $\dots\dots\dots(3)$

由上式(3)可知，若能測得  $\Delta V$ 、 $I$  及電流極與電位極的相對位置，即可算出對應於此一電極幾何排列下所有電性地層之綜合效應的電阻率，稱為「視電阻率  $\rho$ 」〔6〕；在本研究之實際計算，請參閱結果討論(伍.二(二))。(註：經查閱相關文獻得知，地電測勘結果可經由「逆推」以獲取更詳盡的電阻率空間分佈，但本研究因計算能力與需用程度的考量，僅由「 $(AB/2) - \rho$ 」的關係來判斷地層由淺而深的電阻率變化趨勢。)

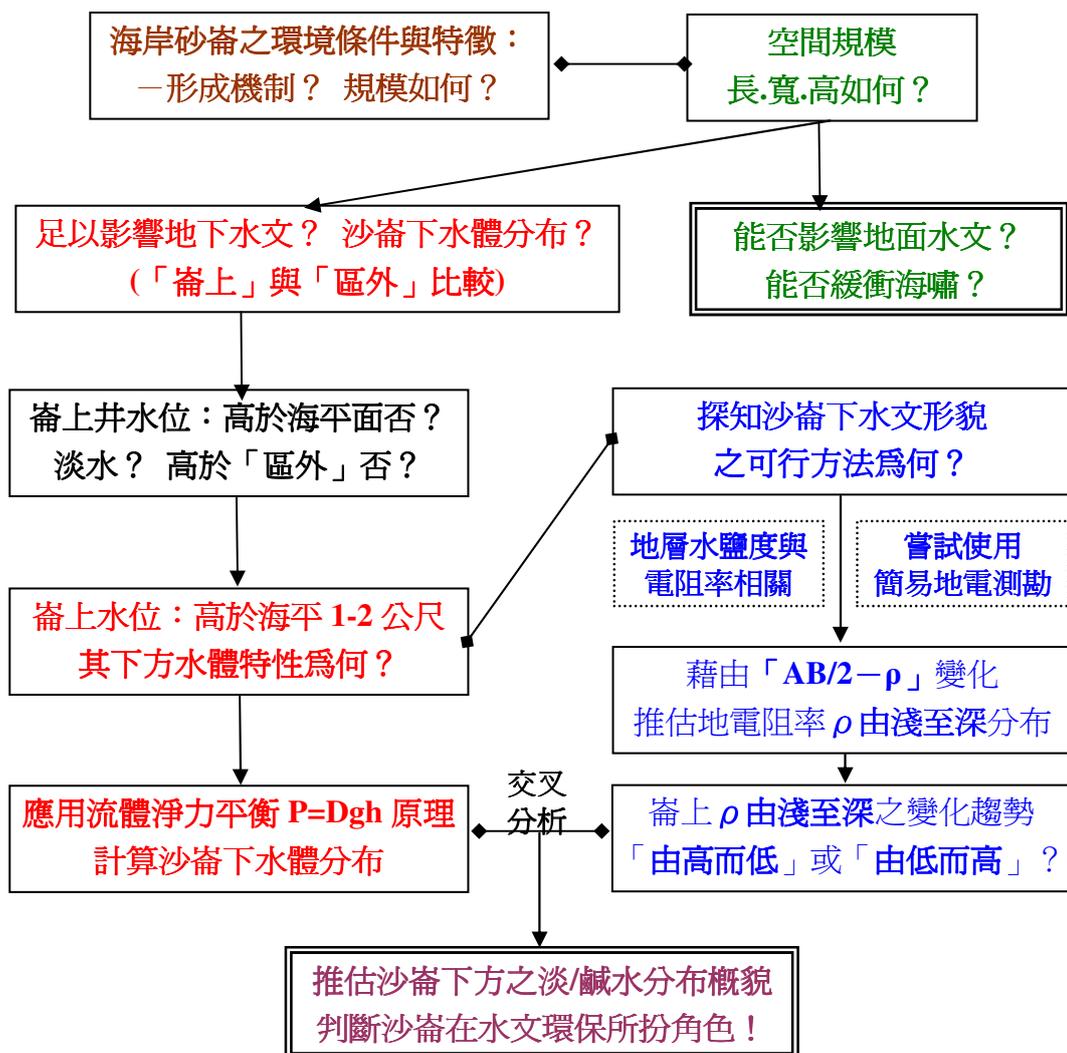
## 2. 直流電阻法工作程序：

- (1) 在現場用上述方法，以不同之「電流極半展距  $AB/2$ 」施測(參考表 5、6)；並算出電極排列  $K$  與視電阻率  $\rho$ 。
- (2) 使用雙對數刻度座標繪出「 $(AB/2) - \rho$ 」關係圖(參考圖 10、11)，並依其變化判斷地層由淺而深的電阻率變化趨勢(參考〔6〕)。

(三) 地電阻率測勘法應用於本研究之推理邏輯(下方為邏輯推理與工作流程圖)：

因為：電阻率  $\rho$  隨地層水鹽度  $S\%$  而異

所以：  $\rho$  隨深度之分佈 一推 估 → 地層水鹽度  $S\%$  隨空間之分佈



## 伍. 研究過程與結果討論

### 一. 關於形成宜蘭海岸沙崙的環境機制之探討

經由蒐集台灣東北部地質構造圖、衛星遙測影像圖(中大遙測中心、Google Earth 影像)、氣象資料，並剖析其間的關係可歸納如下結果與推論：

(一)地形、地質與氣象條件—由下圖可見，宜蘭平原三面高山、開口朝東，山高水急、沖刷劇烈，海岸北南兩端有三貂角及北方澳岬角突出，並在這兩個岬角之間形成安定的弧灣弓形海岸，弓形海岸中間之蘭陽溪口則形成向東凸出之尖嘴狀三角洲(如圖 3)。特殊的地形加上盛行風向使然，宜蘭平原於是有了發育平行於海岸線南北發展 36km(烏石港—無尾港)的沙崙之自然條件(呂學麟，2010) [1]。

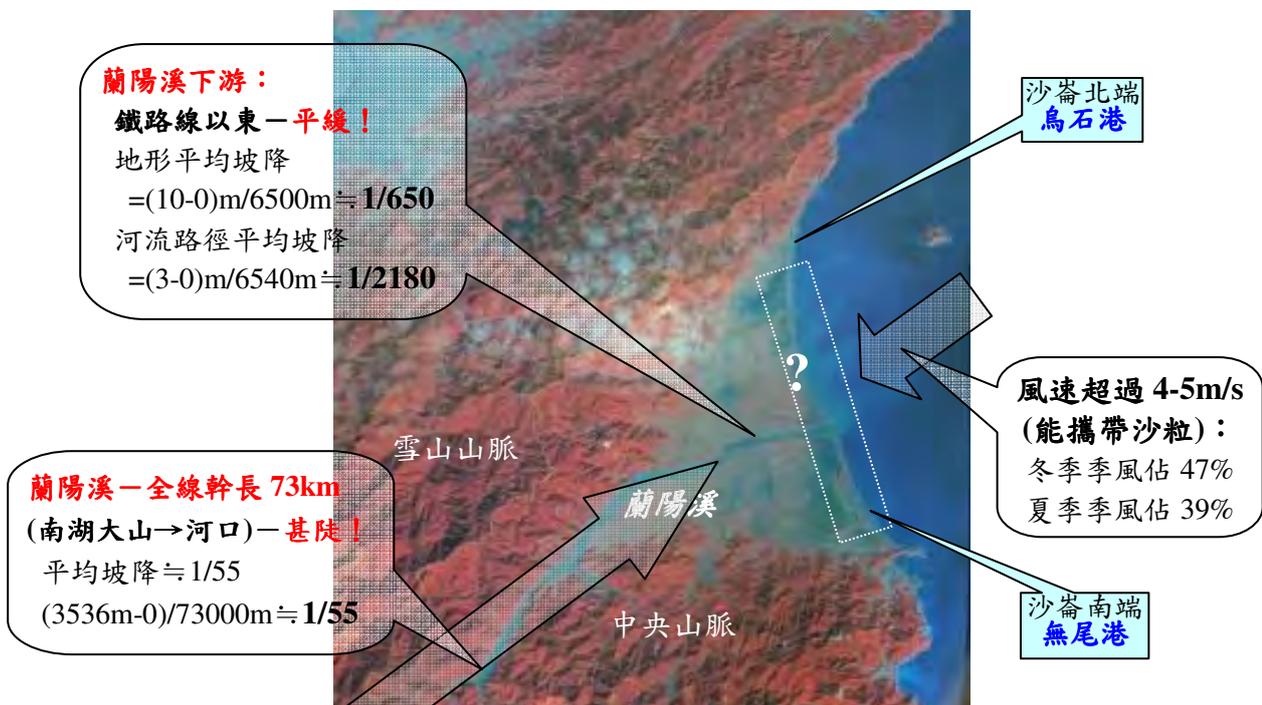


圖 3：人照衛星所見之宜蘭平原及海岸沙崙的空間分布(照片錄自宜蘭縣地理圖集)

蘭陽溪中穿於雪山山脈與中央山脈之間，上游坡度甚大，河川和地質的主要構造線均是由西南朝向東北，而沿海地區強勢風向則由東北朝向西南(尤其冬季)，於是造就了沿岸沙崙形成的環境條件。在豐盈的逕流量下，大量的泥沙被攜帶著，加上平原區因坡降平緩—蘭陽溪在鐵路線以東至出海口，從 google Earth 取點(鐵路線標高 10m、河面標高 3m)計算可得：地形平均坡降為 $(10-0)m / 6500m \approx 1/650$ ，河流路徑平均坡降為 $(3-0)m / 6540m \approx 1/2180$ ，故蘭陽溪所挾帶的豐富泥沙，便在沿海一帶孕育出體系完整的沙崙。此外，形成本區沙崙的營力以風為最重要，經實驗研究：風速在每秒 4-5 公尺時便能攜帶沙粒，超過此風速者，冬季季風佔 47%，夏季季風佔 39%；可見盛行的季節風對本區沙丘的生成和形態，有著重要的影響(引自張政亮，1992) [7]。

(二)海岸沙崙目前實況—經實地踏察、測量及從 google Earth 分析計算，可知：沙崙的分布有往南漸寬的趨勢(在蘭陽溪南側之利澤地區最發達其寬度可達 1.5km 左右，高度則多在 10-20m)，沙崙大致呈東坡(迎風側)較緩、西坡(背風側)則較陡的型態(請參考圖 9)；然而，雖說在河、海、風與定沙植物的聯手影響下，沿海沙丘曾經越積越高、越連越長，最後連成今日所見之南北走向的長沙崙(參閱照片 1、2)，但是「沙崙也曾隨著平原的成長而前後移動」[1]，推測將來亦復如此。

無論如何，由上可見，以目前視之宜蘭海岸沙崙之空間規模，不管長度(30km)、寬度(0.5-1.5km)與高度(10-20m)應該都足以對地上、地下水文構成影響，甚至在海嘯來襲時亦可達成緩衝之效；故而保護沙崙是環保上的當務之急！此外，關於其下的水文構造，則是我們試圖做進一步瞭解的課題。



圖 4 照片 1、2 均為沙崙上的景觀(地形與植生)

## 二. 關於宜蘭海岸沙崙下之地下水體分布形貌之探討

### (一)經濟部水文監測井資料分析結果(沙崙區附近監測井水位變化)：

由淘選度甚佳、透水性良好的材料所構成之海岸沙崙，其下到底隱藏著甚麼樣的水文玄機呢？為回答此問題，本研究進入經濟部水利署「水文資料庫」查詢沙崙區附近的監測井，並從 Google Earth 以經緯座標定位找出代表沙崙上方、區外的井位，並比較「沙崙上方」(公館井、過嶺井；本區附近沙崙厚實完整)與「沙崙區外」(大福國小井、補天宮井；本區附近沙崙單薄且人為破壞較嚴重)之水位變化的差異(如圖 5)。

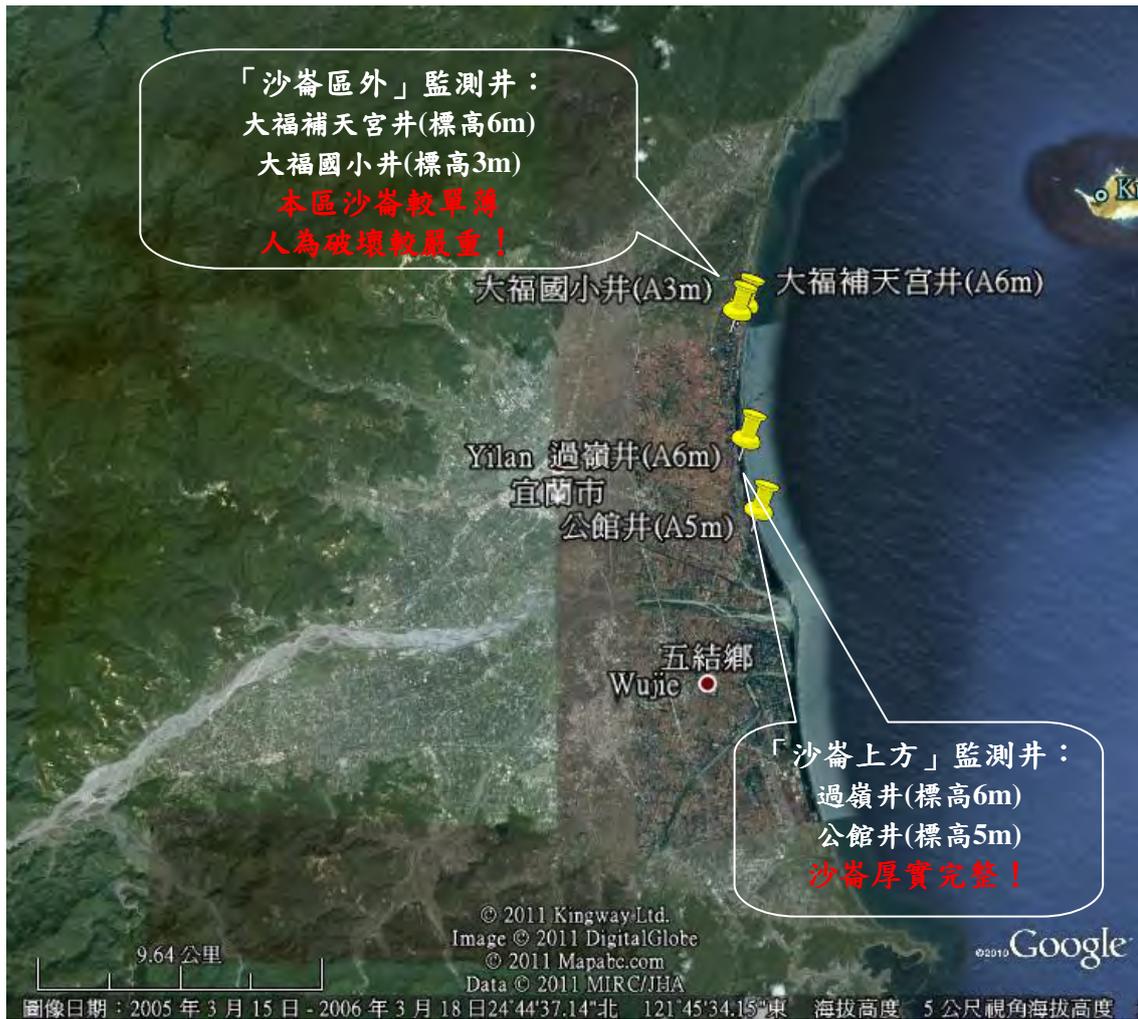


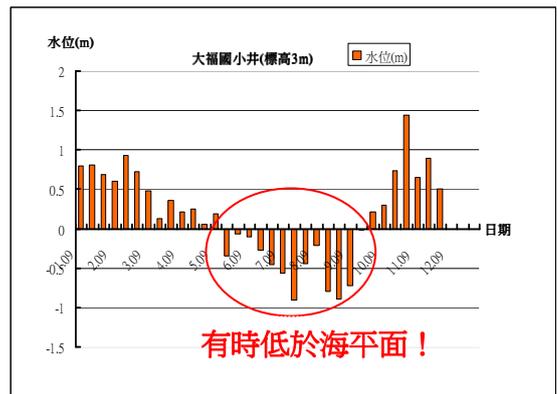
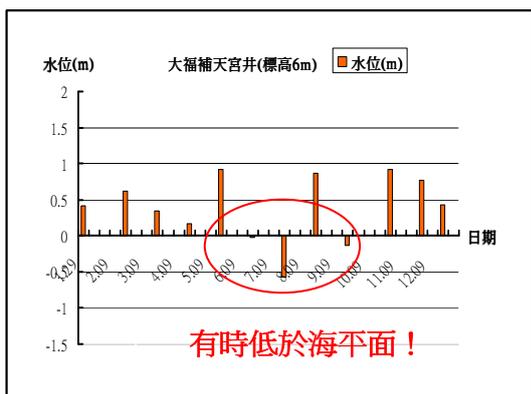
圖5 海岸沙崙附近經濟部水利署監測井之位址

經將所獲資料(2010年記錄)以十天為取樣週期，對四個監測井之水位(以海平面為基準，以公尺為單位)分別整理列表並作關係圖；可得表 1、2、3、4 及圖 6 所示的結果。顯見：「沙崙區外」公路西側的大福國小井、補天宮井之水位面均甚低( $< 1\text{m}$ )，有時甚至會低於海平面(如表 1、2)，推測其原因應是此區過去曾有許多養殖漁塭分布，同時其東側之沙崙有較多人為破壞，故沙崙較無法有效保護地下淡水體；反之，「沙崙上方」的公館井、過嶺井地下水水位面雖隨季節有所變化，但均能穩定的高於海平面  $1\text{-}2\text{m}$ (如表 3、4)，而此二處也正是沙崙體系較為完整厚實的區域，推測沙崙下方應可把持一部份的淡水形成壓力以抑制鹹水上揚，達成保護之效。

此結果可進一步配合流體力學原理( $P = Dgh$ )與地電阻率測勘資料，計算並推估淡、鹹水可能形貌(參見後文討論)。

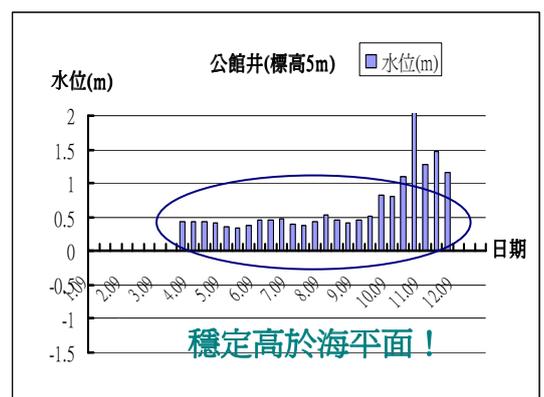
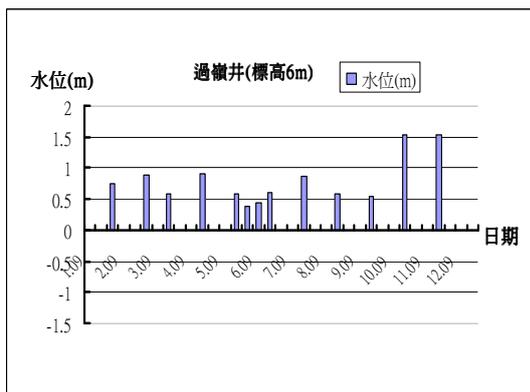
日期	水位 (m)	日期	水位 (m)	日期	水位 (m)
01.29	0.42	05.09		09.09	
01.19		05.20	0.92	09.23	-0.13
01.29		05.29		09.29	
02.09		06.09		10.09	
02.23	0.62	06.22	-0.03	10.19	
02.29		06.29		10.21	0.92
03.09		07.09		11.09	
03.22	0.34	07.22	-0.57	11.19	
03.29		07.29		11.24	0.77
04.09		08.09		12.09	
04.12	0.17	08.19	0.87	12.22	0.43
04.29		08.29		12.29	

日期	水位 (m)	日期	水位 (m)	日期	水位 (m)
01.09	0.80	05.09	0.19	09.09	-0.72
01.19	0.81	05.19	-0.35	09.19	-0.02
01.29	0.69	05.29	-0.07	09.29	0.21
02.09	0.60	06.09	-0.10	10.09	0.30
02.19	0.93	06.19	-0.27	10.19	0.74
02.28	0.73	06.29	-0.45	10.23	1.44
03.09	0.48	07.09	-0.56	11.09	0.65
03.19	0.13	07.19	-0.90	11.19	0.89
03.29	0.36	07.29	-0.44	11.29	0.50
04.09	0.21	08.09	-0.21	12.09	
04.19	0.25	08.19	-0.79	12.19	
04.29	0.06	08.29	-0.89	12.29	



日期	水位 (m)	日期	水位 (m)	日期	水位 (m)
01.09		05.09		09.09	
01.19		05.20	0.59	09.23	0.54
01.29	0.74	05.29	0.38	09.29	
02.09		06.09	0.45	10.09	
02.19		06.22	0.61	10.19	1.54
02.23	0.89	06.29		10.23	
03.09		07.09		11.09	
03.22	0.59	07.22	0.86	11.19	1.53
03.29		07.29		11.29	
04.09		08.09		12.09	
04.22	0.91	08.19	0.59	12.19	
04.29		08.29		12.22	0.99

日期	水位 (m)	日期	水位 (m)	日期	水位 (m)
01.09		05.09	0.36	09.09	0.46
01.19		05.19	0.34	09.19	0.51
01.29		05.29	0.38	09.29	0.82
02.09		06.09	0.45	10.09	0.80
02.19		06.19	0.45	10.19	1.11
02.29		06.29	0.47	10.23	2.38
03.09		07.09	0.40	11.09	1.28
03.19		07.19	0.38	11.19	1.48
03.29	0.43	07.29	0.43	11.29	1.16
04.09	0.44	08.09	0.54	12.09	
04.19	0.44	08.19	0.45	12.19	
04.29	0.41	08.29	0.42	12.29	



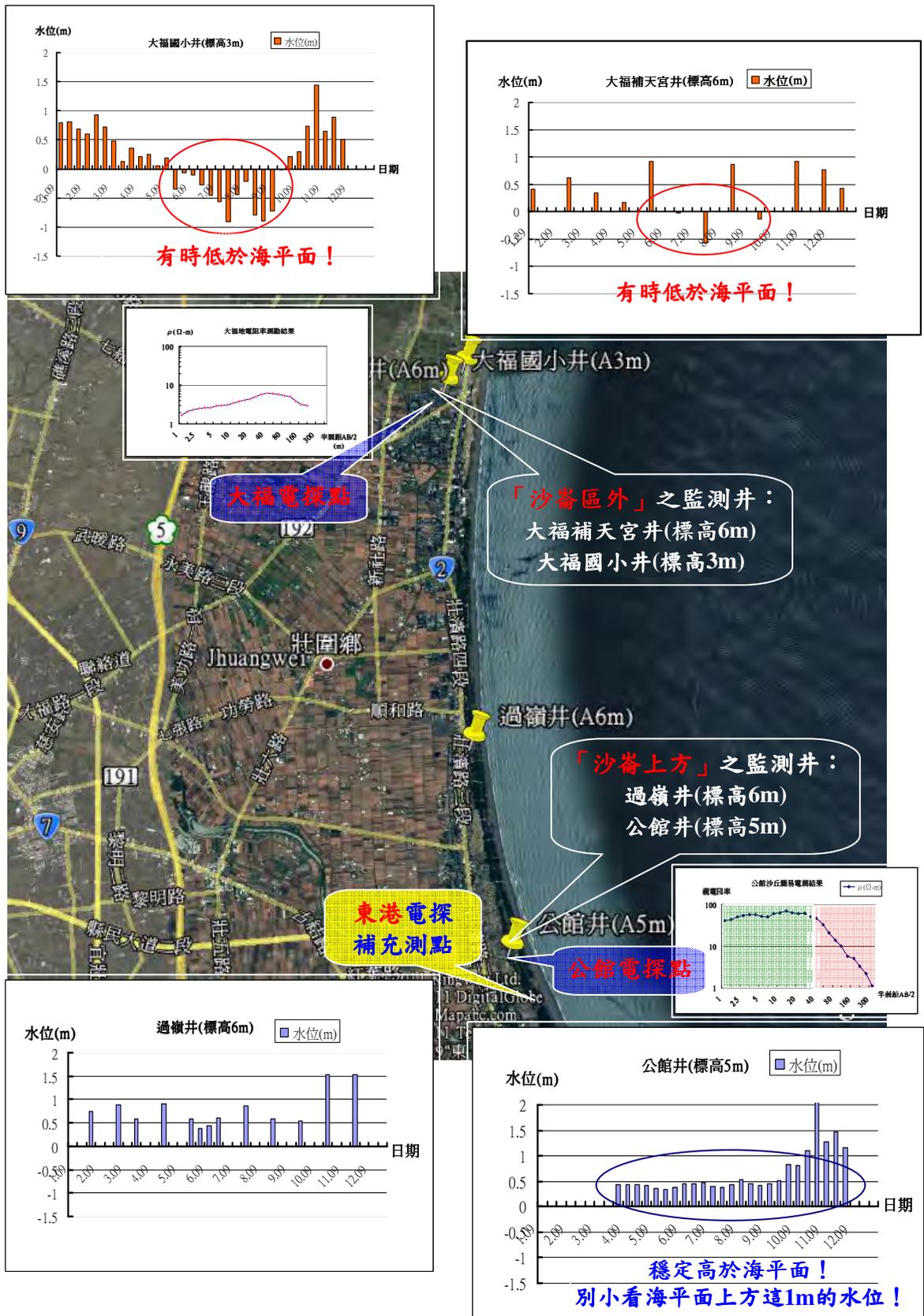


圖6 海岸沙崙附近經濟部水利署監測井位址與水位紀錄



照片 3



照片 4



照片 5



照片 6



照片 7



照片 8

3 公館井位置	4 公館井地層剖面圖
5 東港電探施測實況	6 測勘現場(公館沙崙)
7 沙崙缺口處地下水湧出 (溪口北側東港附近)	8 沙崙旁之人為設施 (大福地區)

(二)簡易地電阻率測勘結果：

由監測井水位資料可知，在沙崙單薄區且位於「沙崙區外」的大福國小井、補天宮井之水位面均甚低(<1m)，有時甚至會低於海平面；反之，在沙崙厚實完整區且位於「沙崙上方」的公館井、過嶺井地下水位面則能穩定的高於海平面 1-2m。至於它們下方的淡/鹹水分布究竟為何？這正是我們所感興趣的問題。為探究此一問題，本研究於 2010 年 12 月分別在此二區監測井鄰近，嘗試進行簡易地電阻率測勘(圖 6、7、8、9)；並於今年 5 月在蘭陽溪北側東港附近選點施測做為補充檢證。電探係使用如「肆.研究方法」中所述的方式(如圖 2)，以不同之「電流極半展距 AB/2」進行施測(參考表 5)並算出視電阻率  $\rho$ ；然後，再以雙對數刻度作「(AB/2)- $\rho$ 」的關係圖(如表 5、6 及圖 10、11)。

例如：在公館測點的施測中(表 5)，當  $AB/2=50m$ ， $MN/2=3m$ ，A、B 間以電流值  $I=50mA$  通電，測得 M、N 間的電位差  $\Delta V=1.26mV$ ；由前述原理之算式可得：

$$K = 2\pi \left[ \left( \frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} \right) - \left( \frac{1}{AN} - \frac{1}{BN} \right) \right]^{-1}$$

$$= 2\pi \left[ \left( \frac{1}{(50-3)} - \frac{1}{(50+3)} \right) - \left( \frac{1}{(50+3)} - \frac{1}{(50-3)} \right) \right]^{-1} = 1304$$

$$\text{故視電阻率 } \rho = K \frac{\Delta V}{I} = 1304 \frac{1.26 \times 10^{-3}}{50 \times 10^{-3}} = 32.8 \approx 33(\Omega \cdot m)。$$

其餘展距可依此法類推；如此根據「(AB/2)- $\rho$ 」的變化，便可推估地層水鹽度  $S\%$  由淺而深之變化趨勢。

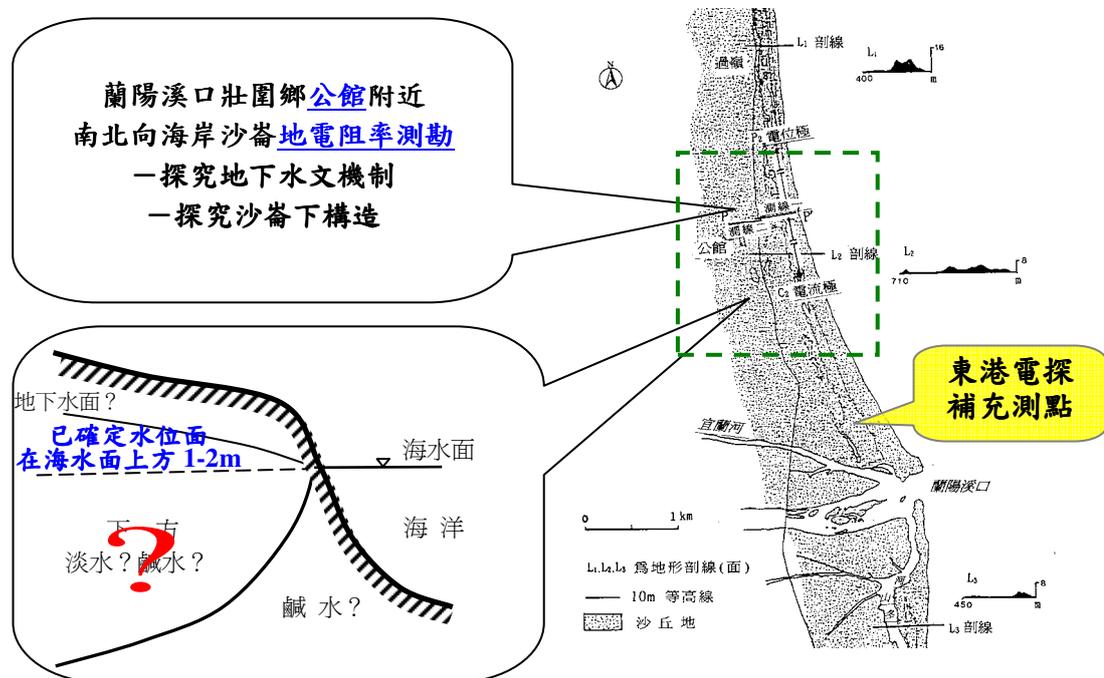


圖7 壯圍鄉公館沿海地電阻測勘位置圖  
(底圖取自張政亮)



圖8 壯圍鄉公館沙崙上地電阻測勘位址與現場實況(公館井附近)

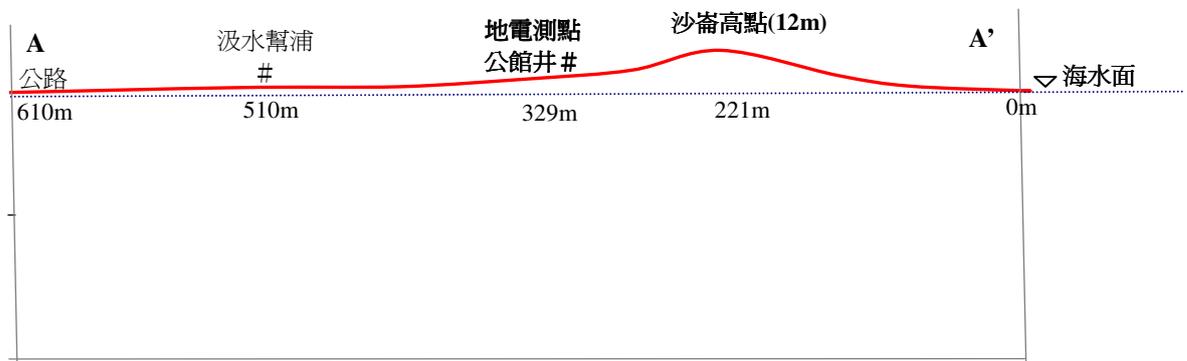


圖9 橫越沙崙東西向AA'剖面之地形地物

表 5 公館地電阻率測勘結果							
AB/2 (m)	MN/2 (m)	K	$\rho$ ( $\Omega$ -m)	AB/2 (m)	MN/2 (m)	K	$\rho$ ( $\Omega$ -m)
1	.5	2.34	41	25	3	323	62
1.5	.5	6.28	43	30	3	467	51
2	.5	11.8	51	40	3	833	47
2.5	.5	18.8	55	50	3	1304	33
3	.5	27.5	58	60	3	1880	21
4	.5	49.5	58	80	33	3346	14
5	.5	77.8	52	100	30	5231	10
6	.5	112	51	130	30	838	5.8
8	.5	200	61	160	30	1293	5.1
10	3	313	63	200	30	2047	3.3
13	3	83.3	70	250	30	3225	2.2
16	3	129	64	300	30	4665	1.1
20	3	205	61	400	30	8330	

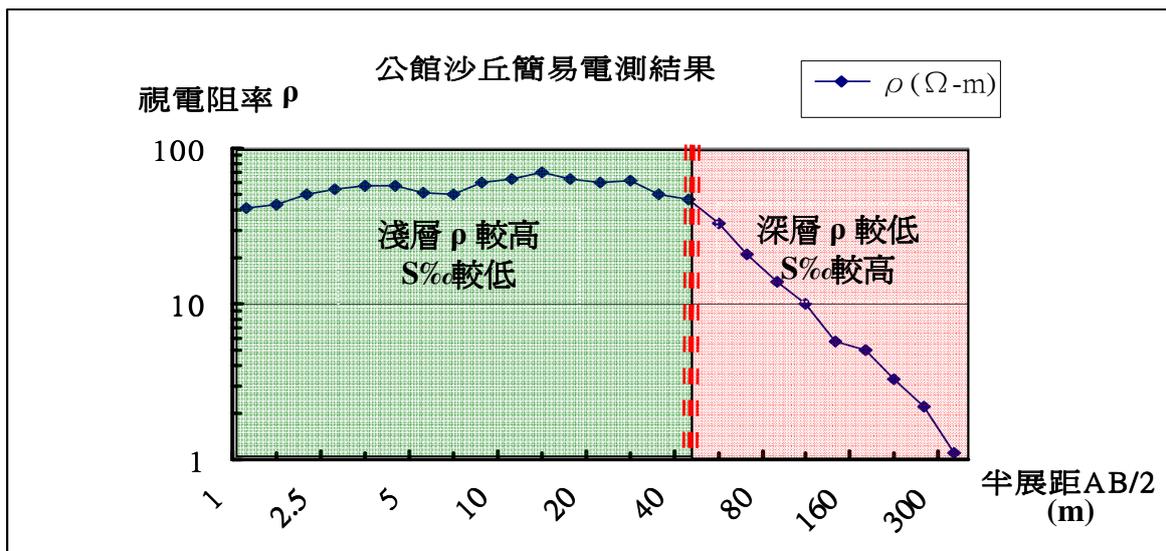


圖 10 公館沙崙地電阻率測勘結果

表 6 大福地電阻率測勘結果							
AB/2 (m)	MN/2 (m)	K	$\rho$ ( $\Omega$ -m)	AB/2 (m)	MN/2 (m)	K	$\rho$ ( $\Omega$ -m)
1	.5	2.34	1.7	25	3	323	5.0
1.5	.5	6.28	2.1	30	3	467	5.8
2	.5	11.8	2.3	40	3	833	6.2
2.5	.5	18.8	2.5	50	3	1304	6.1
3	.5	27.5	2.6	60	3	1880	5.7
4	.5	49.5	2.6	80	33	3346	5.3
5	.5	77.8	2.9	100	30	5231	5.0
6	.5	112	3.0	130	30	838	3.9
8	.5	200	3.1	160	30	1293	3.2
10	3	313	3.4	200	30	2047	3.0
13	3	83.3	3.8	250	30	3225	
16	3	129	4.1	300	30	4665	
20	3	205	4.4	400	30	8330	

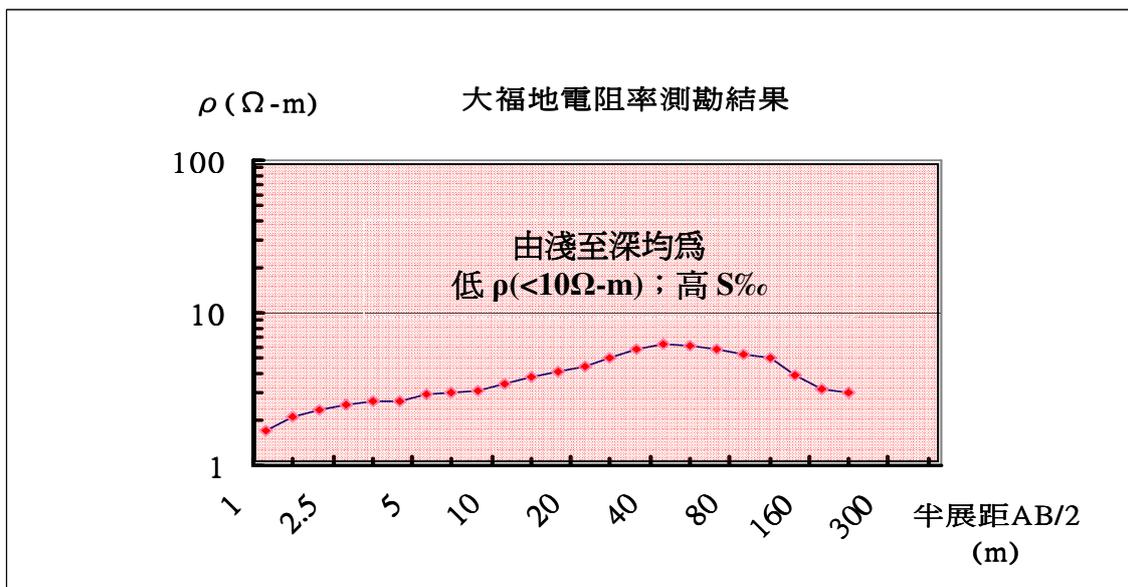


圖 11 大福地區地電阻率測勘結果

由上可見，施測結果經前述關係式計算再取雙對數刻度作圖，可得前述之表 5、6 及圖 10、11；兩區的比較如圖 12，其中可以看出：

- 1.代表「沙崙區外」的大福測點(附近沙崙有較多人為破壞)－由表 6 及圖 11 可見：無論半展距  $AB/2$  為何，其視電阻率  $\rho$  都很低(均小於  $10\Omega\cdot m$ )，代表所對應的地層水鹽度  $S\%$  均較高；可見缺乏沙丘保護加上附近有較多魚塭會導致地下水鹽度偏高。
- 2.代表「沙崙上方」的公館測點(附近沙崙體系相當完整)－由公館井所附的地層剖面圖(如照片 4)本區沙崙下深度在 80m 以內的地層大概均由沙質材料所構成，因此影響地電阻率  $\rho$  的主要因素應為地層水鹽度  $S\%$ 。電探結果如表 5 及圖 10 所示：當半展距  $AB/2$  較小時(主要為淺部地層的信號)其視電阻率  $\rho$  較高(代表應為淡水所在)； $AB/2$  較大達 50m(主要為 50m 深的地層之信號)之後，視電阻率急降，在 100m 時低至小於  $10\Omega\cdot m$ ，其視電阻率甚低(代表應有鹽度較高之地層水)。經此實驗可見，對我們而言，地電阻率測勘對沙崙地下水鹽度分佈形貌的探測，應是一種可行、有效的方法。至於，地電阻率與地層物質(地層水鹽度)之間的對應關係，經查閱相關文獻可見有如下表 7 之關係(陳平護等，1996)。

表7 電阻率分佈與地層物質的對比關係

電阻率( $\Omega\cdot m$ )	地層物質
50-150	位飽和含水帶，岩性為小礫至粗砂
15-50	位飽和含水帶，細砂、粉砂的地層
< 15	顆粒極細的物質或具高鹽度地層水之層次

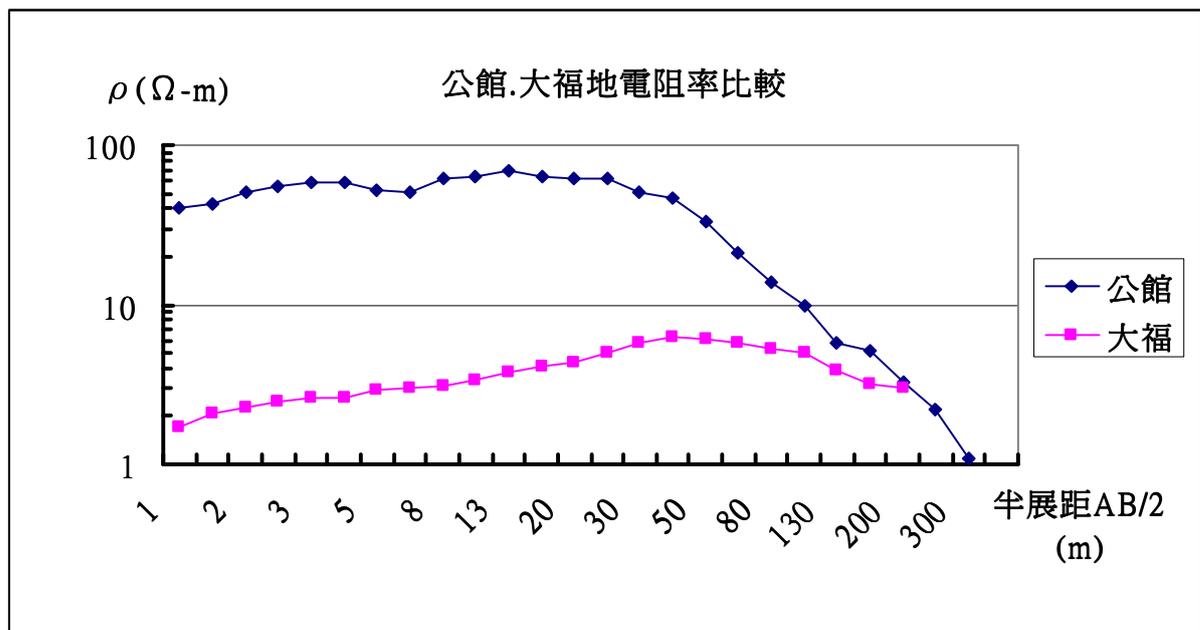


圖 12 公館與大福地區地電阻率比較

3.檢視沙崙區地下水分布的電探補充測點(東港附近；沙崙體系完整)－為進一步充實沙崙區地下水形貌的測勘資料，本研究在今年 5 月於蘭陽溪口北側東港附近安排地電測勘(圖 6、7)。本測點附近雖無水位監測井，但因沙崙體系完整，所得資料與公館測點應具相互檢證之價值。施測結果如表 8 及圖 13 所示：(1)當半展距 AB/2 較小時(<10m)其視電阻率較高(200-300Ω-m)，此乃上部疏鬆粗沙層之未飽和含水帶所表現之性質；(2)稍下方，AB/2 在 10-60m 處，其視電阻率約 40-150Ω-m，推測應為淡水所成之地下水飽和帶；(3)更深處，AB/2 大於 60m，電阻率約 20Ω-m 相對於淺部甚低。可見東港沙崙區與公館的特徵極為相似，在沙崙下方均存在一層淡水，以壓制鹹水上揚。

AB/2 (m)	MN/2 (m)	K	$\rho$ (Ω-m)	AB/2 (m)	MN/2 (m)	K	$\rho$ (Ω-m)
1	.5	2.34	274	25	3	323	107
1.5	.5	6.28	291	30	3	467	105
2	.5	11.8	301	40	3	833	92.4
2.5	.5	18.8	305	50	3	1304	56.8
3	.5	27.5	302	60	3	1880	38.6
4	.5	49.5	300	80	33	3346	22.7
5	.5	77.8	290	100	30	5231	19.2
6	.5	112	266	130	30	838	18.5
8	.5	200	254	160	30	1293	19.2
10	3	313	218	200	30	2047	21.5
13	3	83.3	158	250	30	3225	
16	3	129	132	300	30	4665	
20	3	205	117	400	30	8330	

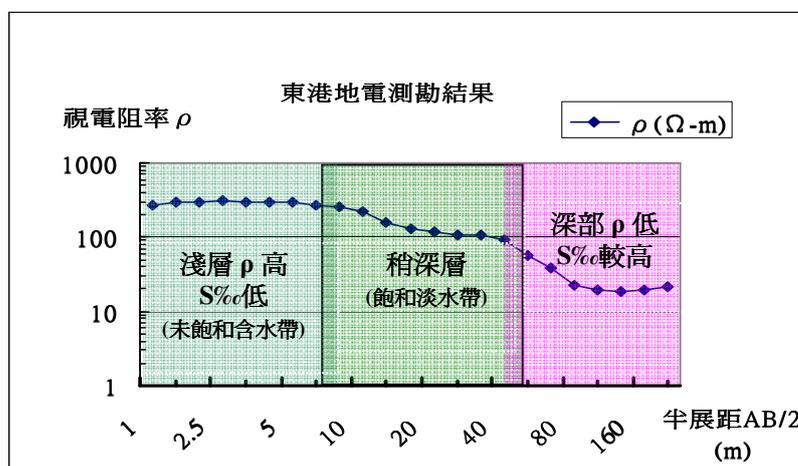


圖 13 東港沙崙電探補充測點測勘結果

### (三)「監測井水位分析結果」與「地電阻率測勘結果」之比對及併合解釋：

如圖 14 所示，監測井水位分析結果可確定，沙崙區內公館井(位址標高 5m)不管任何季節幾乎都可以維持水位在海水面之上 1-1.5 公尺(見表 1—表 5、圖 14)，經我們實察亦可看見在沙崙上西坡有許多地方均可鑽井取(淡)水以灌溉農作物，經多次訪問當地居民也表示沙丘上在淺部即可取得淡水，而在 6-7 根水管的深度(約  $5\text{m} \times 7 = 35\text{m}$ )仍有淡水。故而，沙崙尚可以把持一部分的淡水，這應是可以確定的事實。

而由地電阻率測勘的結果則清楚顯示，淺層物質電阻率  $\rho$  較高可達  $50\text{-}60\Omega\text{-m}$ ，而深部地層則電阻率相當低(可低至  $< 5\Omega\text{-m}$  以下)，可見深部有鹽度  $S\%$  較高的地層水(如圖 12、14)；至於其在水文環保上的意義，將討論於後。

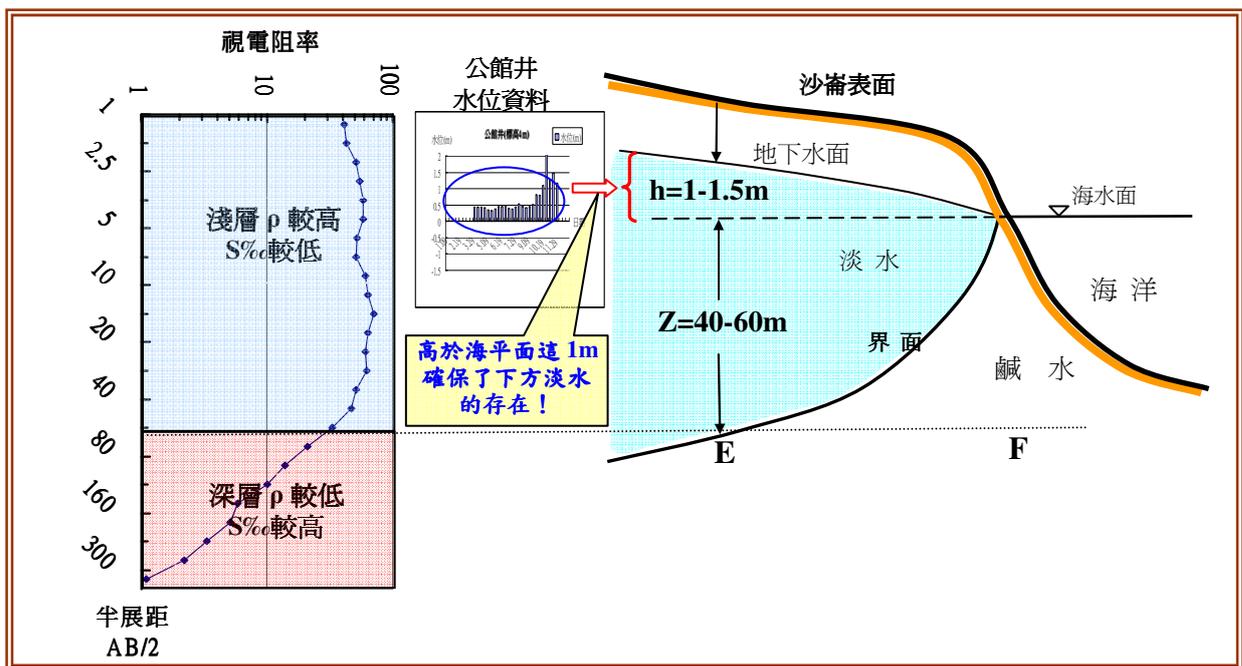


圖 14 「監測井水位紀錄」與「地電阻率測勘結果」之比對及解釋

### (四)關於海岸砂崙下之地下水體分布形貌之進一步探討

#### 1.由流體靜力平衡原理看臨海地區淡/鹹水分布形貌：

根據許多學者研究，在臨海或島嶼地區，地下水體和海洋鹹水原本就應該互相連通，因而也就有淡水與鹹水的交界面。淡水雖然比重較小，但如果陸地上(例如海岸沙崙)的地下水位較海平面為高，則其所累加的總水壓應能與鹹水相互抗衡，使鹹水無法在地下水層中長驅直入，同時也使鹹水與淡水之間能維持一個平衡的界面(Todd, 1980；如圖 14 所示) [8]。

臨海地區淡/鹹水分佈之理想形貌，若由流體靜力平衡的原理來看，理應如圖 13 及 15 所示；圖中之 E 點與 F 點的水壓須滿足  $P_E = P_F$  的條件，亦即  $D_f g(Z+h) = D_s gZ$ ；其中： $D_f$  和  $D_s$  分別表示淡水和鹹水的密度、 $g$  表重力場強度、 $h$  為陸地上(例如沙崙上)地下水面的高度，而  $Z$  則是淡/鹹水交界面的深度。

換句話說， $h$  與  $Z$  之間須保持一個特定關係—可見陸地上地下水面的高度  $h$  中的每一尺都極為重要！至於，這一尺如何重要，我們則可藉由後面的討論來進一步說明。

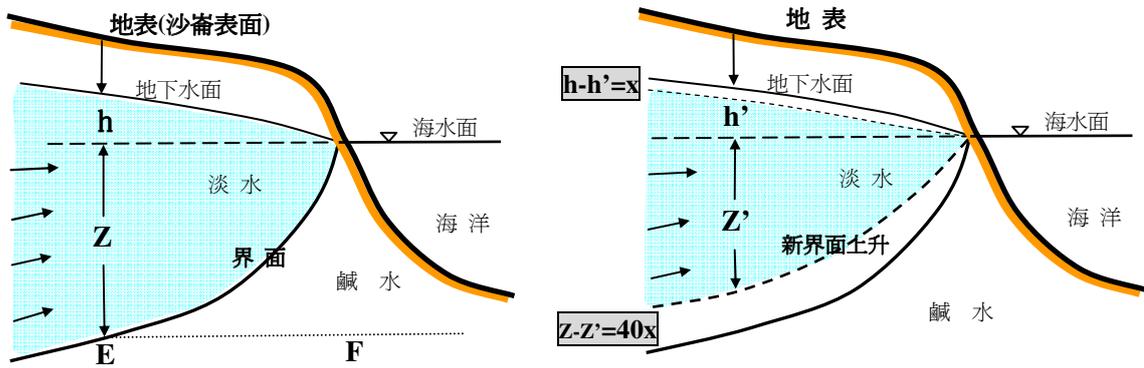


圖 15 沿海地區未受壓含水型的淡/鹹水分布形貌(改繪自 Todd, 1980) [ 8 ]

## 2. 為什麼「這一尺」如此重要？

前面已經談到：理想上臨海地區的淡/鹹水之間，應以  $D_f g(Z+h) = D_s gZ$  的關係維持個平衡界面。一般來講，海水的平均密度  $D_s = 1.025 \text{g/cm}^3$ 、淡水密度  $D_f = 1.000 \text{g/cm}^3$ ，也就是  $D_s/D_f = 1.025/1.000 = 41/40$ ，如果將這個關係代入前述的式子中，則可獲取如下的關係式 [ 8 ]：

$$\begin{aligned} D_s gZ &= D_f g(Z+h) \\ (Z+h)/Z &= D_s/D_f = 41/40 \\ \therefore h/Z &= 1/40 \end{aligned}$$

由此可知，典型的狀況  $Z$  應等於  $h$  的四十倍，亦即淡水體在平均海平面之上的高度和之下的深度，在任意地點均應保持  $h:Z=1:40$  的關係。例如：公館附近沙崙上井水位面在海面上方 1-1.5m，則其下方應可把持 40-60m 的淡水體以抑制鹹水上揚。

從上圖 15 右可見，若地下水面高度由原來的  $h$  降為  $h'$ ，則在其下的水壓將會減少，而由比重較大的鹹水補充以回復平衡。假設地下淡鹹水交界因而自  $Z$  深處升至  $Z'$  處，那這個交界面到底會升高多少呢？

我們可以簡單計算一下： $(Z-Z') \times 41/40 = (Z-Z'+h-h') \times 1$ 。經過移項計算後，上式可變成  $(h-h') : (Z-Z') = 1 : 40 = \Delta h : \Delta Z$ 。換句話說，每超抽一公尺之淡水將會使淡/鹹水的界面升高四十公尺。這是多麼驚人的事情！當然，地下淡水體也並非完全停滯不動，所以淡/鹹水界面的實際形貌並不像前述方程式那般簡單，也不至於像地下水位面隨季節不同有敏銳且立即的改變 [ 8 ]。

然而，無論如何，臨海地區因不當破壞沙崙或過度抽取地下水所造成的海水入侵、土壤鹽化等現象，絕對是極為嚴重的環境問題。故而，對宜蘭人而言，透過對臨海砂崙的研究來了解砂崙、保護砂崙，這應該是一項很有意義的工作。

## 陸. 結論—別小看這「一尺之差」！

綜合以上探討，有關於宜蘭海岸沙崙在水文環保上所扮演的角色，可歸納結論如下：

- 一.海岸沙崙的形成有其獨特的地質與氣候條件；而沙崙的規模、走向適足以影響地面、地下水文，甚至遇海嘯也能形成緩衝，可謂是得天獨厚的產物。
- 二.對於沙崙地下水體的探究，我們嘗試利用「地電阻率測勘」來推估其鹽度  $S‰$  隨深度的變化趨勢，同時發現這是一個相當簡便、可行的方法。
- 三.經由井水位分析與地電阻率測勘，我們發現：「沙崙區外」的大福附近(沙崙有較多人為破壞)井水位面均甚低( $< 1\text{m}$ )，有時甚至低於海平面，其電阻率  $\rho$  也很低(均小於  $10\Omega\text{-m}$ )，代表地層水鹽度  $S‰$  較高(參考圖 6 及 11)；反之，「沙崙區內」的公館附近(沙崙體系較完整)井水位約高於海平面  $1\text{-}1.5\text{m}$ ，其下可把持一部分淡水(由電阻率變化及流體靜力平衡原理推估，地下應有  $40\text{-}60$  公尺低鹽度地層水)形成壓力以抑制沿海地區地下鹹水上揚(參考圖 6、10 及 14)。
- 四.沙崙中的每一尺地下水都極為重要，它對環境的影響不容忽視；所謂「物物相關」，我們對環境的任何一個不當作為，都足以造成大自然嚴重的反撲；故而，籲請善待宜蘭的海岸沙崙，善待海岸沙崙下的每寸地下水資源！

## 柒. 主要參考資料

- 1.呂學麟(2010)，「宜蘭的河川與河口濕地」。
- 2.Google Earth(2011)。
- 3.經濟部水利署(2011)，網址：<http://gweb.wra.gov.tw/wrweb/>
- 4.王乾盈主編(2011)，「高中地球科學(下)」，全華圖書公司。
- 5.經濟部(2000)，「海岸調查報告」，調查專員林明輝。
- 6.洪彥豪(2004)，「應用地電阻影像剖面法於湖口斷層之研究」，中央大學。
- 7.張政亮(1992)，「蘭陽平原海岸沙丘之地形學研究」，台灣師範大學。
- 8.Todd, D.K.(1980), "Groundwater Hydrology", 2nd edition, John Wiley and Son's Inc.

## 【評語】 040508

內容能結合地方環境變遷、環保議題，具鄉土性。但使用電阻率推估鹽度會有相當大的誤差值，應該要有比較可靠的驗證。地下水位的高度變化，除自然地質因素影響外，應還要考慮人為因素的影響，如魚塭抽取地下水。