

水中光強度檢測方法

中華民國 94 年 3 月 1 日環署檢字第 0940015409 號公告
自中華民國 94 年 6 月 15 日起實施
NIEA W224.50C

一、方法概要

水面上方的日光 (Sunlight) 與天光 (Skylight) 的總輻射能量穿透進入水面以後在不同深度下的光強度稱為水中光強度。環境水體生態的監測與應用上，通常是以測量可見光波長範圍 (400~700 nm) 內的總輻射能量 (Total irradiance) 為代表，在此波段範圍內的總能量是水體中浮游植物進行光合作用的有效能量 (Photosynthetic active radiation；簡稱 PAR)。水中光強度的資料在水體生態的環境影響評估上是一項重要因子 (註 1)。

二、適用範圍

本方法適用於湖泊、水庫、河川、海洋等不同深度的水中光強度測量。

三、干擾

- (一) 測量時間以當季日出後及日落前一小時為較合適測量的時段，日光過暗時不宜測量。
- (二) 測量時應在向陽方向進行，應避免測量平台 (如船體) 陰影所造成的遮蔽效應。
- (三) 天氣狀況不穩定時 (如多雲狀況)，會造成所測量之水中光強度隨深度的衰減情形，不符合理想化光衰減模式；此狀況建議加裝可同時測量水面上的可見光強度的偵測計，具以標準化所測量到的水下光強度變化資料。
- (四) 在同一水體不同水層裡所含的介質成份及/或濃度有所不同時，量測到的水中光強度隨深度的衰減程度也會呈現不一致的情形。
- (五) 即使同一天不同時間時，太陽的入射角度會有所差異，此差異會造成在同一地點測量所得到的結果可能會有約 20% 的差異。

四、設備

測量水中光強度的儀器，依其用來接收入射光能量偵測計的構造形狀可分為平面式、半球形及球形等三種（圖一）。平面式與半球形接收器可接收到離接收器中心點往上的垂直線上角度 65 度範圍內的所有光，亦即光的有效接收角度為 130 度，平面式的接收器亦稱之為 2π Cosine irradiance collector（圖一 A）；半球形式的接收器亦稱之為 2π Scalar irradiance collector（圖一 B）；球形接收器可接收到的有效角度較大約為 170 度，該類型的接收器亦稱之為 4π Scalar irradiance collector（圖一 C）。這三種型式的接收器在同一時間同一地點所接收到的光強度，以球形接收器測量到的光強度最高，其儀器下放速度依儀器操作說明書而定。三種接收器測量到的光強度並無一定的互換公式，但是同一水體中平均光衰減係數的測量結果則相似。

五、試劑

無。

六、採樣及保存

本方法為現場測定方法。

七、步驟

參考儀器操作說明書。

八、結果處理

（一）、水中光強度的單位：

可見光強度的單位一般用莫耳（mol）、愛因斯坦（einstein；E）、量子（quanta）或是光子（photons）的單位來表示：

$$\mu\text{mol s}^{-1} \text{ m}^{-2}、\mu\text{E s}^{-1} \text{ m}^{-2}、\text{quanta s}^{-1} \text{ m}^{-2}、\text{photons s}^{-1} \text{ m}^{-2}$$

其中 μ 、 s^{-1} 、 m^{-2} 分別指百萬分之一（ 10^{-6} ）、秒分之一、米平方分之一。

不同單位的相互關係如下：

$$1 \mu\text{mol s}^{-1} \text{ m}^{-2} = 1 \mu\text{E s}^{-1} \text{ m}^{-2} = 6.022 \times 10^{17} \text{ quanta s}^{-1} \text{ m}^{-2}$$

$$1 \mu\text{mol s}^{-1} \text{m}^{-2} = 1 \mu\text{E s}^{-1} \text{m}^{-2} = 6.022 \times 10^{17} \text{ photons s}^{-1} \text{m}^{-2}$$

(二)、平均光衰減係數的計算方式：

水中光強度 (PAR) 在水體中隨深度的的衰減情形 (如圖二)，基本上可使用以下的公式來模擬：

$$\text{PAR}(z) = \text{PAR}(0^-) \times \exp(-K_d \times z) \quad (1)$$

其中 z 代表測量的水體深度 (單位是公尺；m)； $\text{PAR}(z)$ 是指水面下某一深度測量到的 PAR 值； $\text{PAR}(0^-)$ 是指剛好在水面下測量到的 PAR 值； K_d 是整個水層的平均光衰減係數，單位是 m^{-1} 。

由測量到的 PAR 值隨深度的變化資料 (如圖二 A)，再以上述公式進行最小平方差法的趨勢迴歸 (Least square regression)，即可求得整個水層平均的 K_d 值，迴歸結果如圖二 B 的虛線所示。

(三)、有光層深度的計算方式：

有光層深度 (Z_e) 的定義是指水下某一深度測量到的 PAR 值等於正好在水面下 PAR 值 ($\text{PAR}(0^-)$) 的 1% 時的深度 ($z=Z_e$)，即公式(1)改寫成，

$$\begin{aligned} \text{PAR}(Z_e) / \text{PAR}(0^-) &= 1\% = \exp(-K_d \times Z_e) \\ -K_d \times Z_e &= \log_e(1\%) = -4.605 \\ Z_e &= 4.605 / K_d \end{aligned} \quad (2)$$

九、品質管制

光強度儀器需進行定期校正 (Calibration) 的工作，至少每兩年送原廠校正一次。操作前可使用鎢絲燈泡檢查儀器是否有訊號反應。

十、精密度與準確度

略。

十一、參考資料

(一) Gong, G.-C., J. Chang and Y.-H. Wen, Estimation of

annual primary production in the Kuroshio waters northeast of Taiwan using a photosynthesis-irradiance model. Deep-Sea Research Part I, 46, 93-108, 1999.

- (二) Gong, G.-C., J. Chang and M.-S. Liang, A photosynthetic-irradiance model for the upwelling region northeast of Taiwan and its application to the East China Sea. Journal of Geophysical Research, 106, C9, 19957-19968, 2001.
 - (三) Gong, G.-C. and G.-J. Liu, An empirical primary production model for the East China Sea. Continental Shelf Research, 23, 213-224, 2003.
 - (四) Kirk, J. T. O., Light & photosynthesis in aquatic ecosystems. Cambridge University Press, 509pp, 1994.
 - (五) Smith, R. C., The optical characterization of natural waters by means of an 'extinction coefficient'. Limnology and Oceanography, 13, 423-429, 1968.
- (註1)：水中光強度的強弱受到水分子本身、無機懸浮顆粒、浮游植物及其碎屑物顆粒、以及溶解性有機物，對入射光的吸收與散射效應所影響。一般而言，當水面上之光合作用有效能量進入水體後，其強度會隨著深度增加而呈現指數衰減的情形（圖一），此水中光強度隨深度衰減情形可以使用一個所謂的平均光衰減係數（Mean downwelling attenuation coefficient for downward irradiance of PAR；簡稱 K_d ），以及光衰減方程式（如公式（1））作為量化指標。光衰減係數值的變化可做為瞭解水中浮游植物可以利用的可見光能量多寡，或是水中浮游植物可以進行光合作用的深度（如公式（2）），稱之為有光層深度（Euphotic depth；簡稱 Z_e ）。未受陸源物質影響的自然水體中，懸浮顆粒（主要成份為浮游植物及其碎屑物顆粒）的濃度愈高，則光的衰減係數值就愈大，有光層的深度會愈淺。以台灣鄰近海域而言，東邊的黑潮水由於水體中所含的懸浮顆粒以及浮游植物數量（或是葉綠素濃度）均很稀微，因此測量到的光衰減係數很小，約在 $0.038\sim 0.046\text{ m}^{-1}$ 之間，有光層深度

約在 100~120 m 之間；在營養鹽較豐富的黑潮湧升流區，由於浮游植物數量或是葉綠素濃度的增高，相對測量到的光衰減係數 ($0.069\sim 0.102\text{ m}^{-1}$) 也較黑潮水來得高，有光層深度也較淺 (45~67 m)；但是在受陸源物質影響的河口海域，由於受到較高無機懸浮顆粒以及溶解性有機物的影響，其光衰減係數可以高到 0.3 m^{-1} 以上，有光層深度也就更淺。

十二、實例介紹

(一) 使用國內研究船上配備之光強度測量儀海上現場觀測結果

測量地點：基隆八斗子碧砂漁港外近海

測量時間：1994 年 6 月 26 日

測站位置： $121^{\circ} 47.904' \text{ E}$, $25^{\circ} 10.081' \text{ N}$

研究船隻：國立台灣海洋大學 海研二號 (Ocean Researcher No. 2)

航次編號：海研二號 第 031 航次

儀器型號：連接於海鳥牌溫鹽深儀 (簡稱 SBE CTD 9/11plus, SeaBird Inc. USA) 系統上可以自動記錄之水面上可見光偵測計 (QSR-240, Biospherical Inc. USA) 與水下可見光亮度偵測計 (QSP-200L, Biospherical Inc. USA)

測量結果：在此範例中是使用研究船上的水文絞機下放觀測儀器設備進行 50 公尺水深內海水水中光強度變化的測量，儀器以每秒一公尺的標準作業速度下放，整個測量費時約 2 分鐘，測量過程中海面上光強度也同步進行測量。測量過程中天氣狀況良好，海面上光強度變化約介於 $2320\sim 2501\text{ }\mu\text{E s}^{-1}\text{ m}^{-2}$ 之間，變化幅度約在 7% 以內，水面下水中光強度的變化由接近海面的 $1071\text{ }\mu\text{E s}^{-1}\text{ m}^{-2}$ 降低至水深 50 公尺時的 $6.9\text{ }\mu\text{E s}^{-1}\text{ m}^{-2}$ ，呈現出指數衰減的趨勢。詳細結果如表一及圖三所示。

若直接將測量到之水中強度隨深度的變化資料利用公式 (1) 統計迴歸後，可以得到該觀測點平均之光消散係數 (K_d) 為 0.103 m^{-1} ，相當於有光層深度 (Z_e) 為 44.7 m (圖三 A)。如將測得資料除上同步測得之水面上光強度變化資料得到水下水中光強度變化百分率後再以

公式(1)進行統計迴歸，得到之 K_d 及 Z_e 值分別為 0.104 m^{-1} 、 44.3 m (圖三 B)，與未考慮測量過程中海面上光強度變化所得到之結果差異甚微，原因是由於測量過程中，海面上光強度的變化很小，顯示在測量過程中如天候狀況穩定而且使用可以自動記錄的測量儀，在短時間可以完成測量工作，海面光強度的資料可以忽略。

(二) 使用手提式可見光強度測量儀現場觀測結果

測量地點：基隆八斗子碧砂港港內悠遊館邊遊艇碼頭

測量時間：2004年5月13日15:00

儀器型號：Biospherical Inc.廠牌之 QSP-200D、QSR-240、QSP-170BD

測量結果：在此範例中是使用人手下放觀測儀器進行當地水深6公尺深度內水中光強度的變化，平均約每隔0.4公尺記錄當時測量到之水面上及水面下水中光強度的資料，整個測量費時約5分鐘，測量過程中天氣由晴逐漸轉多雲，海面上光強度變化由 $1041 \mu\text{E s}^{-1} \text{ m}^{-2}$ 降至測量結束時的 $679 \mu\text{E s}^{-1} \text{ m}^{-2}$ 。變化幅度可高達約35%，水面下水中光強度的變化由接近海面的 $432 \mu\text{E s}^{-1} \text{ m}^{-2}$ 降低至水深5.9公尺時的 $53.2 \mu\text{E s}^{-1} \text{ m}^{-2}$ ，呈現指數衰減的趨勢。詳細結果如圖四所示。

若直接將測量到之水中光強度隨深度的變化資料利用公式(1)統計迴歸後，可以得到該觀測點平均之光消散係數 (K_d) 為 0.367 m^{-1} ，相當於有光層深度 (Z_e) 為 12.5 m (圖四 A)。如將測得資料除上同步測得之水面上光強度變化資料得到水下水中光強度變化百分率後，再以公式(1)進行統計迴歸，可以得到的值分別為 0.290 m^{-1} 、 15.9 m (圖四 B)，與未考慮測量過程中海面上光強度變化所得到之結果差異可達約21%，顯示當測量過程中天候狀況不穩定時，應同時測量水面上光強度變化才能獲得可靠的結果。本例說明多雲狀況需使用海面光強度資料標準化後，才能得到估算出正確的水中光強度。

(三) 使用國內研究船上配備之光強度測量儀海上現場觀測結果

測量地點：基隆八斗子外海

測量時間：2003年10月3日

測站位置：121° 54.431' E, 25° 7.722' N

研究船隻：國立台灣海洋大學 海研二號 (Ocean Researcher No. 2)

航次編號：海研二號 第 1144 航次

儀器型號：連接於海鳥牌溫鹽深儀 (簡稱 SBE CTD 9/11plus, SeaBird Inc. USA) 系統上可以自動記錄之水下可見光亮度偵測計 (PAR irradiance sensor, Chelsea Technology Group, CANADA)

測量結果：在此範例中是使用研究船上的水文絞機下放觀測儀器設備進行 40 公尺水深內海水水中光強度變化的測量，儀器以每秒一公尺的標準作業速度下放，整個測量費時約 1.5 分鐘，測量過程中天氣狀況良好，水面下水中光強度的變化由接近海面的 $1214 \mu\text{E s}^{-1} \text{m}^{-2}$ 降低至水深 40 公尺時的 $2.5 \mu\text{E s}^{-1} \text{m}^{-2}$ ，呈現出指數衰減的趨勢。詳細結果如圖五所示。

若將測量到之水中光強度隨深度的變化資料利用公式 (1) 統計迴歸後，可以得到該觀測點整個水層平均之光消散係數 (K_d) 為 0.158 m^{-1} ，相當於有光層深度 (Z_e) 為 29.1 m (圖五)。不過值得注意的是在水深 14 公尺上下所呈現出水中光強度的消散程度並不相同，水深淺於 14 公尺可見光的消散程度較大，平均之 K_d 值為 0.210 m^{-1} ，水深深於 14 公尺可見光的消散程度較小，平均之 K_d 值為 0.139 m^{-1} (圖五)。造成在不同深度範圍內可見光消散程度的差異，主要是由於在不同水層裡可見光光譜的變化所造成的自然現象，詳細緣由可進一步參閱 Kirk (1994)。在此種狀況之下，由於吾人是希望獲取整個水層平均之可見光強度的變化趨勢，因此應以整個水層平均趨勢的結果為代表值。但需注意的是測量時量測的深度應足以涵蓋整個水層為適當，一般的作業規範應是以量測到可見光偵測儀的偵測極限或是量測到離海底約 1~3 公尺的距離為原則，但若海面狀況不佳時，為避免儀器碰觸海底造成損害，可視情況調整觀測儀器離海底的距離。



A

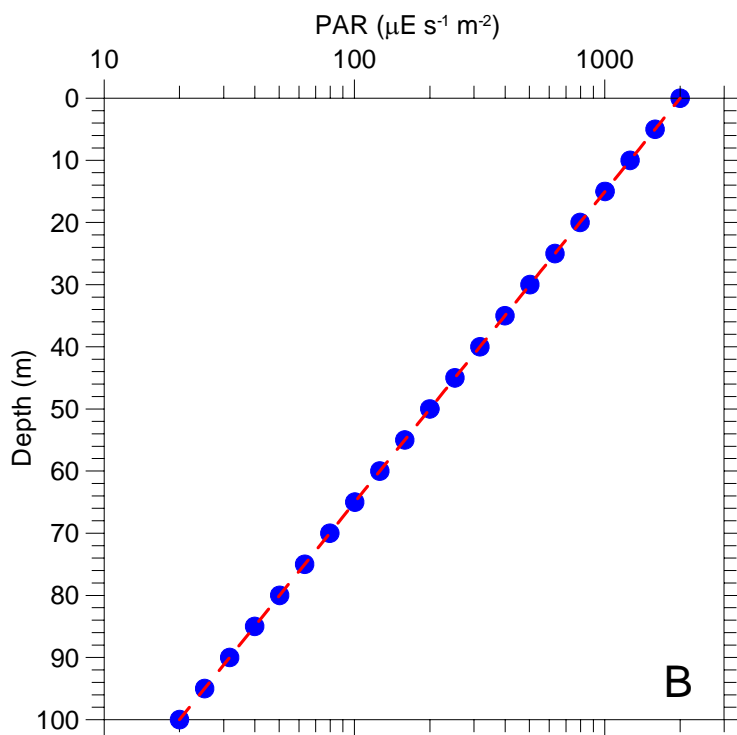
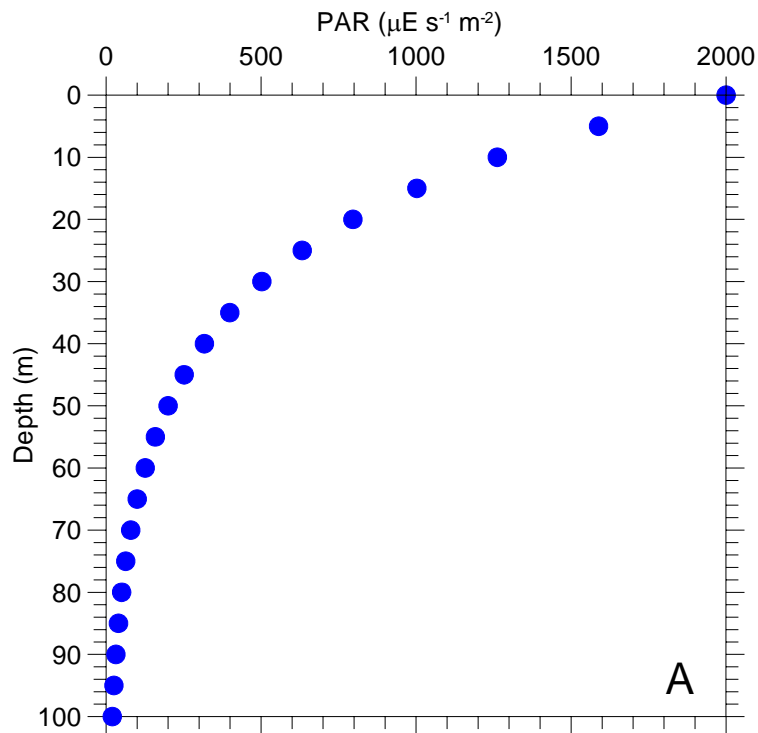


B

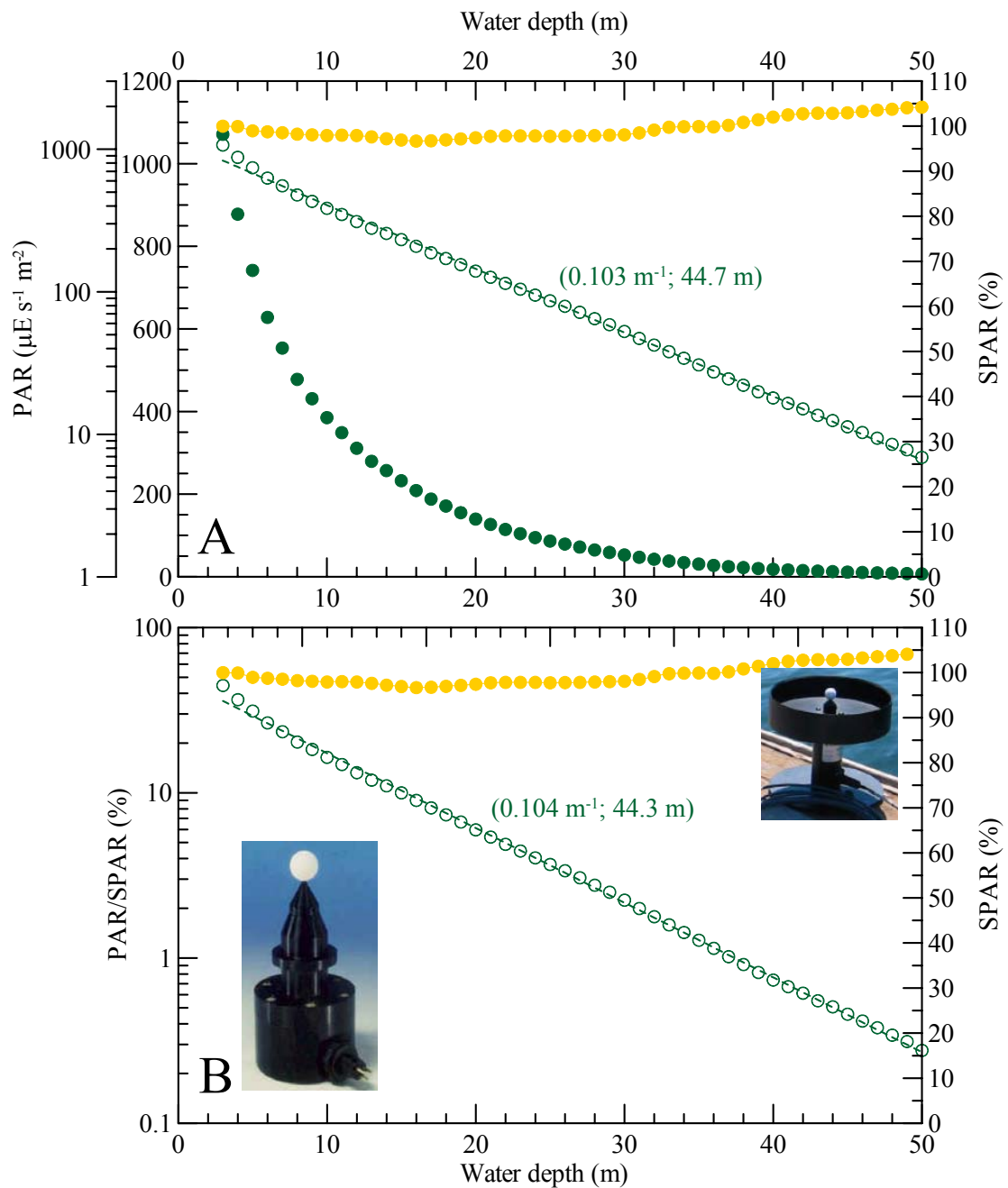


C

圖一、不同型式的可見光光強度偵測計。(A) 美國某公司生產之平面式偵測計；(B) 美國某公司生產之半球形式偵測計；(C) 英國某公司生產之球形式偵測計。

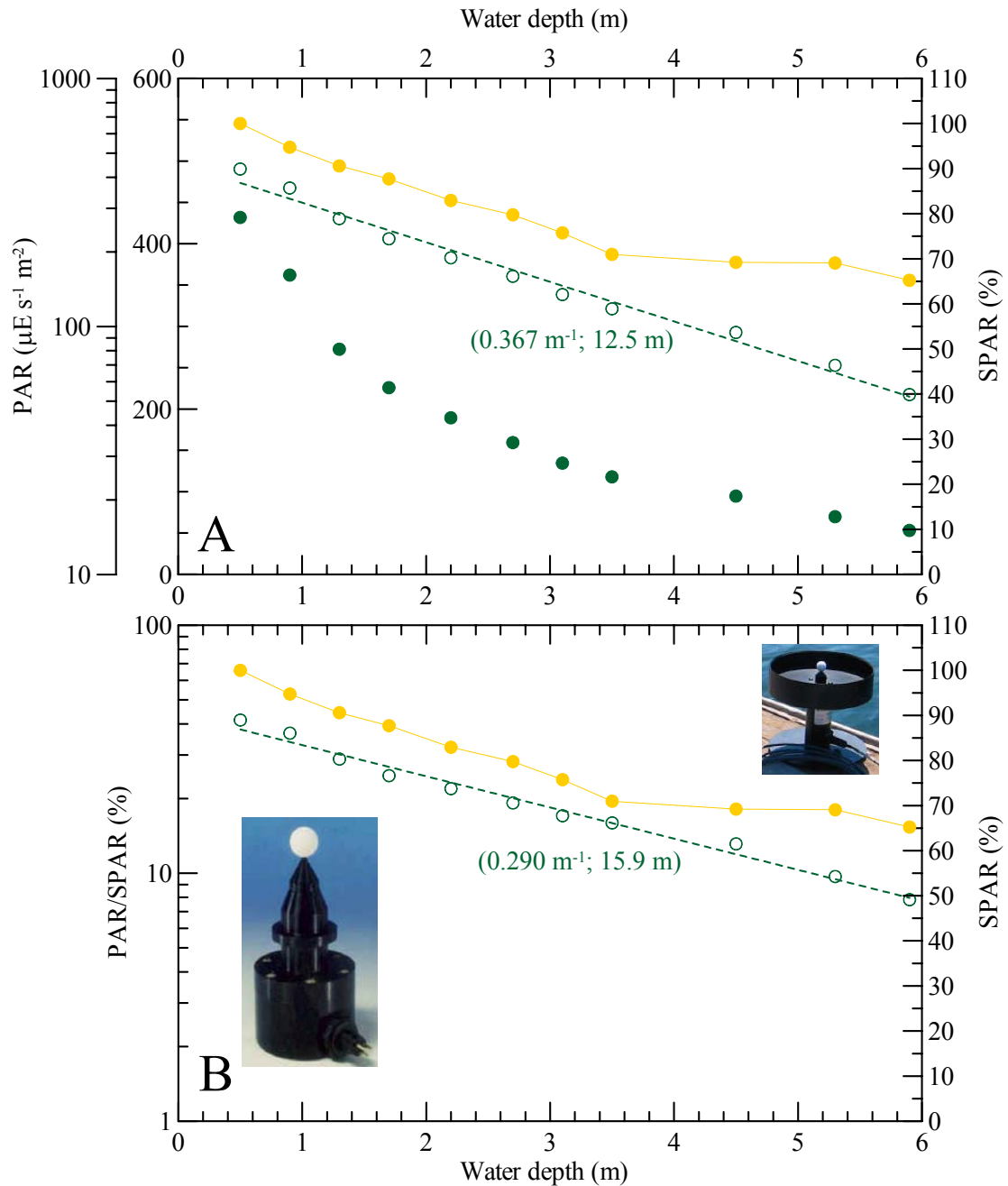


圖二、水中可見光光強度隨深度的理想化指數衰減曲線。(A) 當橫軸為線性軸時的情形；(B) 當橫軸變換為對數軸時的情形，該圖中的虛線是經由最小平方差法統計迴歸後的趨勢線。



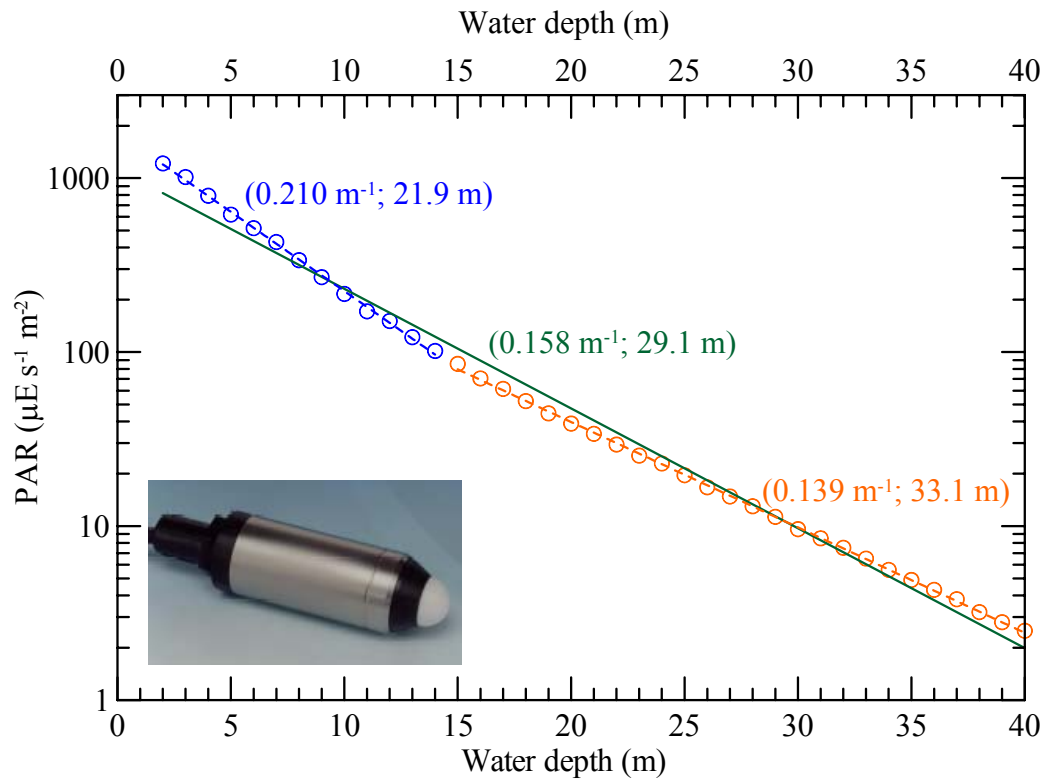
圖三、(A) 使用 Biospherical Inc. 廠牌之可見光測量計於海上現場測量到之水中光強度 (PAR) 隨深度的變化。(●) 縱軸為線性座標軸作圖的結果，(○) 縱軸以對數座標軸作圖的結果，虛線是利用公式 (1) 統計迴歸後得到之趨勢線結果；(●) 指水面上光強度 (SPAR) 在測量過程中的變化百分比。括符內的數字分別代表計算出之 K_d 與 Z_e 值。

(B) 水下水中光強度變化百分率隨深度的變化。虛線是利用公式 (1) 統計迴歸後得到之趨勢線結果。括符內的數字分別代表計算出之 K_d 與 Z_e 值。



圖四、(A) 使用 Biospherical Inc. 廠牌之可見光測量儀於基隆八斗子碧砂港內現場測量到之水中光強度 (PAR) 隨深度的變化。(●) 縱軸為線性座標軸作圖的結果，(○) 縱軸以對數座標軸作圖的結果，虛線是利用公式 (1) 統計迴歸後得到之趨勢線結果；(●) 指水面上光強度 (SPAR) 在測量過程中的變化百分比。括符內的數字分別代表計算出之 K_d 與 Z_e 值。

(B) 水下水中光強度變化百分率隨深度的變化。虛線是利用公式 (1) 統計迴歸後得到之趨勢線結果。括符內的數字分別代表計算出之 K_d 與 Z_e 值。



圖五、使用 Chelsea Technology Group 廠牌之可見光測量計於基隆八斗子外海附近現場測量到之水中光強度 (PAR) 隨深度的變化。直線是代表所有資料點利用公式 (1) 統計迴歸後得到之趨勢線；(○) 及藍色虛線是水深 14 公尺以淺資料點的結果；(○) 及虛線是水深 14 公尺以深資料點的結果。括符內的數字分別代表計算出之 K_d 與 Z_c 值。