

應用聲波都卜勒流速儀之底追蹤功能 量測動床速度

Application of ADP Bottom Tracking to Bed Velocity Measurement

國立台灣大學生物環境系統工程學系
研究助理

石 武 融

Wu-Rung Shi

國立台灣大學生物環境系統工程學系
特聘教授

吳 富 春*

Fu-Chun Wu

摘 要

本研究應用聲波都卜勒流速儀之底追蹤功能量測動床速度，以等速全運移之動床水槽實驗評估底追蹤量測誤差，並探討脈衝長度、動床速度、與床面類型對底追蹤量測準確度與精度之影響。研究結果顯示，床面顆粒之均質性與粒徑大小均為影響底追蹤量測準確度之因素，床面顆粒愈均質、粒徑愈小時，床面不平整性所造成之反射訊號變異性愈小，底追蹤之量測準確度愈高，增長量測時間以增加資料筆數，其平均效果能有效降低誤差，提高資料準確性。底追蹤量測之準確度與精度均隨脈衝長度或動床速度增加而提升，對混合床面之提升效果尤為顯著。本實驗在等速全運移之動床條件下，非均質床面之不平整性造成聲波反射狀態變異為儀器雜訊之主要來源。底追蹤之整體量測水準隨脈衝長度增加而提高，但量測水準之提升有其上限，約為 85%。根據本研究結果，應用底追蹤量測砂、礫質之動床速度時，可以 30 ~ 60 cm 之脈衝長度進行量測，以確保整體量測水準在 80% 以上，並配合現地懸浮載濃度再調整至最佳脈衝長度。

關鍵詞：聲波都卜勒流速儀，底追蹤，脈衝長度，動床速度，床面類型，全運移。

ABSTRACT

In this study we applied the Bottom Tracking (BT) of Acoustic Doppler current Profiler (ADP) to measure the bed velocity. Flume experiments were conducted with a mobile-bed carrier moving in a constant-velocity full-transport mode. The effects of pulse length, bed velocity, and bed type on the accuracy and precision of BT were investigated.

*通訊作者，國立台灣大學生物環境系統工程學系特聘教授，10617 台北市羅斯福路四段 1 號，fcwu@ntu.edu.tw

The results indicated that the homogeneity and grain size of bed material affects the accuracy of BT. For homogeneous fine material, the variability of signal reflections induced by the irregularity of bed surface became less and thus raised the accuracy. The averaging effects associated with the increase of measurement time and data quantity would effectively reduce the BT error. The accuracy and precision of BT became higher as the pulse length or bed velocity increased, especially for mixed bed. For the current experiments in a constant-velocity full-transport mode, the instrument noises induced by the heterogeneous bed material were the primary source of error. The overall performance of BT improved with the increase of pulse length; however, there exists an upper limit of ~85%. According to our study, when BT is applied to measuring the apparent velocity of sand and gravel bed, the pulse length of 30~60 cm could be used to ensure an 80% overall performance, an optimal pulse length could be further sought if adjusted to suit the in-situ condition of suspended material.

Keywords: ADP, Bottom Tracking, Pulse length, Bed velocity, Bed type, Full transport.

一、前言

天然河川之輸砂造成河道之沖淤現象，因此輸砂率之量測對於研究河道形貌演變及水域棲地動態變化而言，都是不可或缺的資料。然而，傳統採砂器量測輸砂率有其限制性存在，包括：(1)河川輸砂是一種具有時、空變異性之連續過程，傳統採砂器僅能提供特定時段內之總輸砂量及平均輸砂率，無法提供連續變動資訊；(2)採砂器會對局部流況造成干擾，因此可能偏估真實輸砂率；(3)大規模之輸砂事件及河床變動常發生於洪氾期，以傳統採砂器量測輸砂率，不但難度高，而且有安全顧慮。因此，發展非接觸式之輸砂遙測技術，實有其迫切需要。

Rennie 等人(2002)首先利用聲波都卜勒測流儀 ADP (Acoustic Doppler current Profiler)之底追蹤功能(Bottom Track, BT)量測天然河道之動床顆粒速度，並與傳統採砂器量測所得之輸砂資料比對，發現底追蹤測得之動床視速度(Apparent velocity)與床載輸砂率(Bedload transport rate)具有高度相關性，確認 ADP 量測河床輸砂之可行性。Rennie and Villard (2004)亦曾以剪力模式(Shear stress model)及運動模式(Kinematic model)配合 ADP 量測值，模擬砂床及礫床之輸砂率。

Rennie and Millar (2004)以底追蹤量測結果分析底床輸砂之空間分佈特性，並指出動床視速度分佈與近床區流速分佈及水深平均流速分佈均具高度相關性。Gaeuman and Jacobson (2006)使用現有輸砂模式評估床速，並與底追蹤量測值比較，進一步了解近床區水流及顆粒特性與底追蹤量測值之關係；Gaeuman and Jacobson (2007)比較四種估計床載輸砂率之方法，發現砂丘追蹤法與動床速度法所得結果比傳統採砂器所得結果更為準確。Mueller and Wagner (2007)提出迴圈法用來修正動床對 ADP 量測流速所造成之偏估。另外，由於現地量測干擾因素甚多，Rennie and Millar (2007)利用去迴旋積(Deconvolution)演算法將儀器雜訊與真實底床訊號分離；Rennie *et al.* (2007)則曾使用即時卡曼濾波(Real-time Kalman filter)修正差分全球定位系統 DGPS (Differential Global Positioning System)之觀測誤差，避免因 DGPS 誤差傳遞造成動床速度之估算失準。有關 ADP 之操作原理、發展過程及應用範圍，可參閱 Kostaschuk *et al.* (2005)之詳細報導與回顧。

由於現地實測參雜許多不確定性與變異性，以致在動床速度之資料分析上，難以將儀器誤差與實際輸砂之變異性分離。目前對 ADP 使用者而言，尚無具體準則可據以研判不同條件下

之底追蹤量測水準，因此急需一套明確之科學數據用來建立這樣的使用準則。

本研究之主要目的是以條件控制良好之動床水槽試驗來評估 ADP 底追蹤之量測水準，以提供現地量測使用之準則依據。本研究將探討三項變因對底追蹤量測準度與精度(Accuracy and precision)之影響，此三項變因包括：(1)底追蹤脈衝長度(Pulse length, PL)，(2)動床速度，與(3)底床粒徑，其中第一項結果可做為使用底追蹤時調整脈衝長度之依據；而後兩項結果可做為預測儀器誤差範圍之依據。本研究結果不僅可使 ADP 使用者對底追蹤量測動床速度之水準有進一步認識，亦有利於後續建立動床速度與床載輸砂率之精確量化模式。

二、底追蹤量測原理簡介

2.1 動床速度量測原理

ADP 之原設計用途為河川斷面流速量測，使用時須裝置於動力載具或是以河貓系統(River Cat)拖曳橫移使測區涵蓋河道全斷面。在量測過程中，ADP 本身具有移動速度，因此其所測得之水流速度為相對於 ADP 之速度，而非絕對流速。為了獲取絕對流速以計算斷面實際流量，ADP 附加底追蹤功能(其原理說明參見 2.2 節)用以量測載具相對於底床之移動速度 \bar{V}_{BT} ，或以差分全球定位系統 DGPS 量測載具之移動速度 \bar{V}_{DGPS} ，藉此修正量測值 \bar{V}_{obs} ，其關係式表示如下：

$$\bar{V}_{abs} = \bar{V}_{obs} + \bar{V}_{BT} \quad \text{or} \quad \bar{V}_{abs} = \bar{V}_{obs} + \bar{V}_{DGPS} \dots (1a, 1b)$$

式中 \bar{V}_{abs} = 絕對流速，式(1a)須在定床(即無床速)前提下方能使用，在動床條件下，底追蹤所量測到之載具速度 \bar{V}_{BT} ，會因底床移動而有所偏差。然而，此種偏差值卻可用來代表動床之運移速度，可表示如下：

$$\bar{V}_A = \bar{V}_{DGPS} - \bar{V}_{BT} \dots (2)$$

式中 \bar{V}_A = 動床運移之視速度。若 ADP 載具靜止不動(即 $\bar{V}_{DGPS} = 0$)，則由式(2)可知，底追蹤量測到之載具速度 \bar{V}_{BT} 即為動床視速度 \bar{V}_A 。依此原理，便可利用 ADP 底追蹤功能量測底床顆粒移動速度，進而可發展量測河床輸砂之遙測技術。

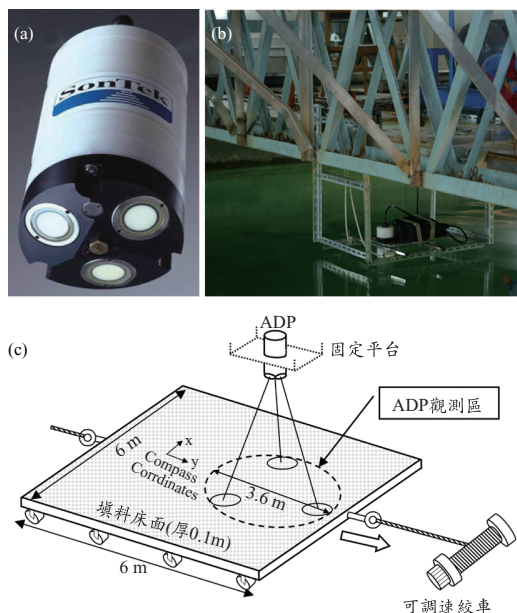


圖 1 (a) ADP 三個發射音鼓轉換器；(b) ADP 裝置於實驗水槽上方之固定平台；(c)動床車實驗佈置圖

2.2 底追蹤脈衝長度與觀測體積

所謂脈衝長度是指 ADP 發射音鼓(Drum)振動持續時間與水中聲速之乘積，其長度影響底追蹤之量測水準(Brumley *et al.*, 1991)。由於 ADP 之三個發射音鼓轉換器(Transducer)與中心垂線向外夾 25°角(圖 1(a))，故底追蹤聲波脈衝自 ADP 發射至底床面時，會形成類似橢圓之投射面積(圖 1(c))，稱為觀測面積(Sampling area)，此觀測面積即為底追蹤訊號來源之範圍。然而，當近床區有懸浮顆粒存在時，這些懸浮顆粒亦會造成聲波散射(Rennie *et al.*, 2002)，使得底追蹤之訊號來源範圍向上方近床區擴充涵蓋某一高度，成為一觀測體積(Sampling volume)。

為估算觀測體積高度(圖 2)，Rennie and Millar (2004)提出下列兩項假設：(1)反射訊號同時具有前緣(Leading edge)及後緣(Trailing edge)之部份方可被接受，以確保最佳訊號品質；(2)觀測體積為脈衝前進段與反射段重疊部份(圖 2 黑色部份)，即懸浮散射訊號(前進段)與底床反射訊號(反射段)同時被接受之部份，以確保訊號最大強度。根據此假設，觀測體積高度在底追蹤聲

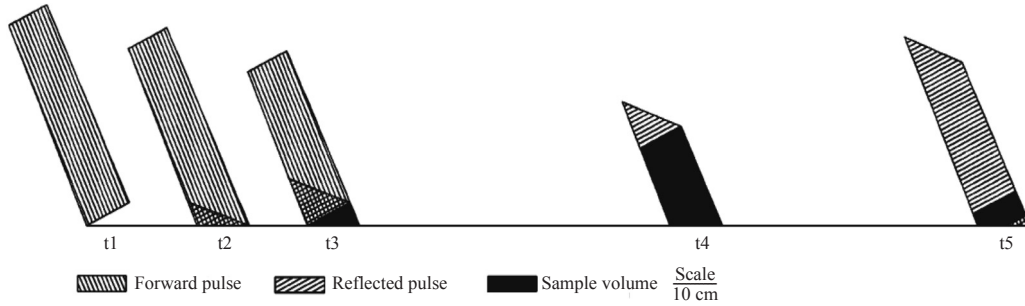


圖 2 底追蹤聲波脈衝長度與觀測體積高度變化(Rennie and Millar, 2004)，圖中前進脈衝與反射脈衝重疊且同時具有前緣及後緣部份(黑色部份)為觀測體積。

波脈衝前進及反射過程中，將先增而後減(圖 2)。觀測體積大小與脈衝長度及水深有關，脈衝愈長則前進段與反射段重疊部份高度愈大，使觀測體積增大；而水深愈大(或 ADP 距底床愈遠)則觀測面積愈大，亦會使觀測體積增大。

利用底追蹤量測動床速度時，因觀測體積涵蓋近床區之懸浮顆粒，脈衝長度增大造成觀測體積高度增大，則會增加懸浮顆粒散射訊號所佔之比例，而使量測之動床速度有偏高疑慮(因懸浮顆粒速度通常較大)；另一方面，脈衝長度增大亦會使底床反射訊號數量增多，可降低資料不確定性，故脈衝長度之選用須謹慎。

三、動床實驗

3.1 實驗設備及佈置

本研究使用之 ADP 聲波頻率為 1.5 MHz (SonTek, Inc.)，其底追蹤脈衝每秒發射一次，每隔 5 秒輸出平均值(包括水深及相對於底床之載具速度)。由於 1.5 MHz 頻率之 ADP 須在水深大於 1 m 之條件下方可使用，本研究利用台大工科海洋所之大型靜水槽進行實驗。此水槽長 100 m、寬 8 m、深 4 m，水深約 3.7 m，為一非循環式靜水槽，因此本研究採用移動式盒車營造一個全運移(Full transport)之動床，盒車長 6 m、寬 6 m、深度 0.1 m，由可調控轉速之絞車拉動(圖 1(c))，此種裝置可使盒車內所有顆粒皆以一致等速度移動，避免因各粒徑分區可動性(Fractional mobility)差異造成顆粒速度差異(Wu and Yang, 2004)，影響後續分析。動床實驗時，ADP 裝置

於靜水槽上方之固定平台(圖 1(b))，三個聲波脈衝轉換器完全沒入水中，三個脈衝聲束(Beam)之觀測面積圍成直徑 3.6 m 之 ADP 觀測區，其中聲束一(Beam 1)指向動床盒車前進方向(圖 1(c))。觀測區前方預留 20 m 加速距離，以確保動床盒車以所設定之速度等速通過 ADP 觀測區。

3.2 實驗條件

本研究評估 ADP 底追蹤功能在不同脈衝長度、動床速度、及底床粒徑條件下，量測動床速度之觀測水準。總共進行 75 組實驗，實驗條件說明如下：

(1) 脈衝長度

本研究採用五種脈衝長度進行動床實驗，除預設值 30 cm 之外，由儀器內附之 SonUtil 軟體更改選用另四種底追蹤脈衝長度，分別為 4、8、16、60 cm。

(2) 動床速度

動床速度可藉由調控絞車頻率而改變，在轉動功率許可範圍內，本研究採用五種車速進行動床實驗，分別為 10、15、20、25、30 cm/s。表 1 所示為國外文獻相關研究之量測條件比較，表 1 數據顯示目前河川現地量測到之輸砂事件中，礫床之動床速度範圍介於 2~15 cm/s，砂床之動床速度最高約 60 cm/s，因此本研究採用之動床速度皆在上述範圍內，符合一般河川輸砂事件之動床條件。

(3) 底床粒徑

本研究採用三種不同床面進行動床實驗，分

表 1 國外文獻相關研究之量測條件比較

文獻作者年份	量測地點	底床類型	粒徑範圍(mm)	動床速度(cm/s)
Rennie (2002)	實驗水槽	礫床	20 ~ 50	15 (max)
Rennie <i>et al.</i> (2002)	野外現地	礫床 礫砂混床	20 ~ 50 0.34 ~ 16	4.5 ~ 8 3 ~ 11
Rennie and Villard (2004)	野外現地	礫床 砂床 砂床	$D_{50} = 25$ $D_{50} = 0.25$ $D_{50} = 0.35$	2 ~ 12 16 (max) 6 (max)
Gaeuman and Jacobson (2006)	野外現地	砂床	$D_{50} = 0.55$	60 (max)

表 2 動床實驗底追蹤量測結果之準確度統計

統計項目	實驗條件			
	砂床	礫床	礫砂混床	各組實驗平均速度
量測資料總筆數	95	104	106	75
誤差在±10%以內之資料所佔比例(%)	80	78	76	99
包絡線範圍(%)	47.5	56.1	63.9	—
高估之資料所佔比例(%)	60	51	42	45
低估之資料所佔比例(%)	40	49	58	55

別為均勻砂床($D_{50} = 1.41 \text{ mm}$)、均勻礫床($D_{50} = 20 \text{ mm}$)、以及混合床面(砂礫各佔約 50%)。本研究採用之砂、礫粒徑，亦與表 1 所列之河床粒徑範圍相符。

3.3 資料篩選

如前所述，底追蹤每隔 5 秒輸出一筆時間平均值，5 秒亦為現地搭配 DGPS 之最佳時距(Kostaschuk *et al.*, 2005)，而三個脈衝聲束所量測資料之平均值代表三個聲束所圍觀測區之空間平均值。底追蹤所輸出之時間平均數據共有五項，包括三個聲束各自量測之水深、觀測區平均水深、以及觀測區平均動床速度。

當動床盒車未完全進入 ADP 觀測區或部份盒車已離開觀測區範圍時，三個聲束未同時量測到盒車運動，因此須將未量測到盒車運動之聲束資料剔除。由於動床盒車高度距地面約 20 cm，接觸到盒車之聲束將測得較小水深，故可由水深變化研判各聲束是否接觸到盒車。分析時，以未受盒車影響之長時間平均水深為基準值(即 ADP 至水槽底之深度)，若某一聲束量測之水深變化超過基準值量測誤差之 3% 以上者，則判定此聲

束已接觸到盒車，其量測資料將予以保留。

四、結果與討論

4.1 底追蹤量測之準確性

4.1.1 床面種類對量測準確性之影響

為了評估底追蹤量測動床速度之準確性，本研究針對底追蹤量測之動床速度(u_{Measured})與動床盒車真實速度(u_{True})進行比較，比較結果如圖 3 所示，表 2 則為底追蹤量測結果之準確度統計。

圖 3(a~c)分別為三種床面之量測值與真值比較，圖中每一資料點均代表底追蹤所輸出之 5 秒平均速度與動床真實速度之比較，圖中 45 度線代表量測值與真值完全吻合，資料點愈集中於 45 度線則表示量測之準確性愈高。圖 3(a)~(c)顯示量測誤差大都落在±10%以內(圖中虛線內)，砂床、礫床及混合床面量測誤差落在±10%以內之資料所佔比例呈現遞減趨勢，分別為 80%、78% 及 76% (表 2)，而量測誤差之包絡線(最大誤差)範圍則呈遞增趨勢，分別為 47.5%、56.1% 及 63.9% (圖 3)，顯示均勻粒徑床面之量測準確度較混合粒徑床面之準確度為高，而均勻細顆粒之量

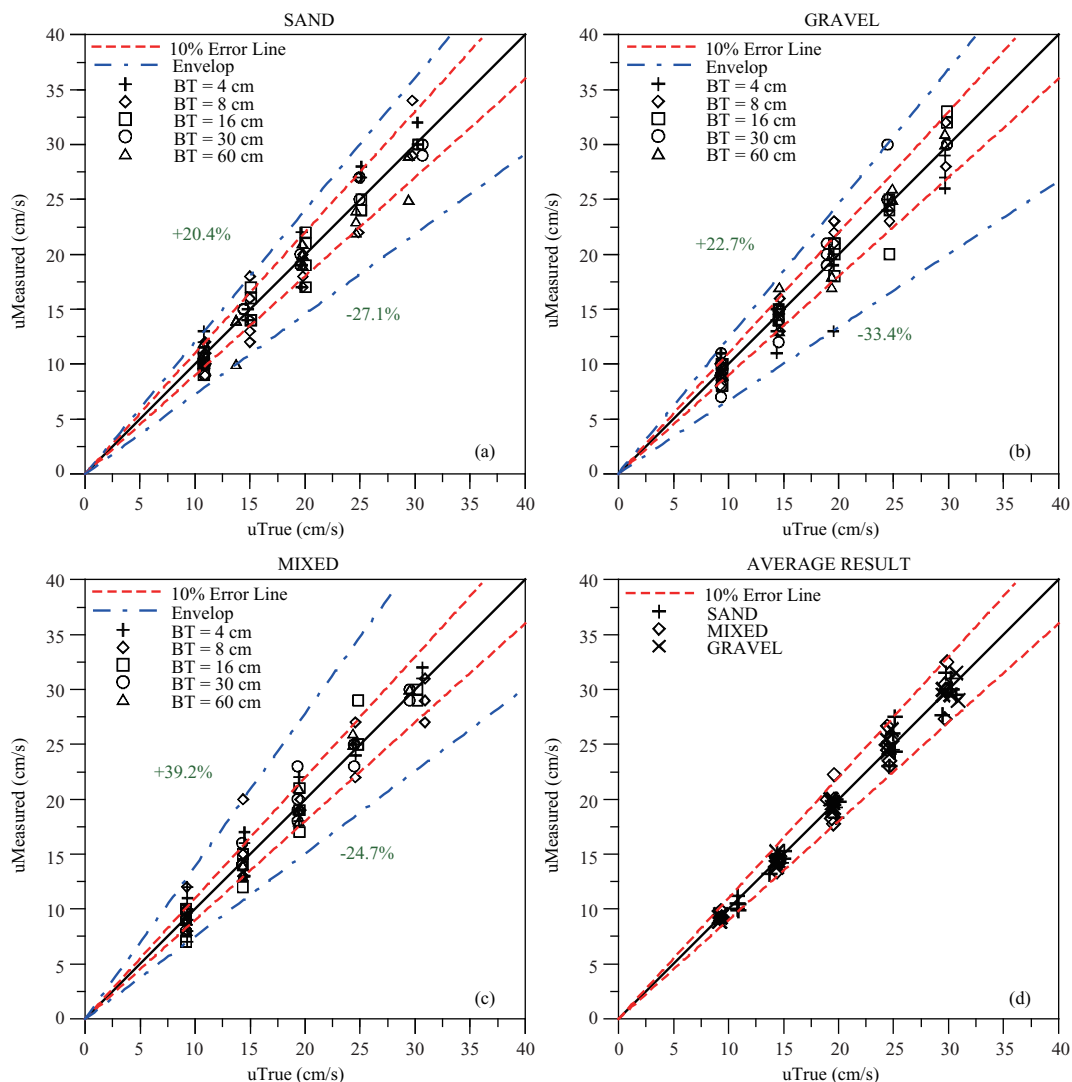


圖 3 (a)砂床、(b)礫床、及(c)混合床面之量測值與動床真實速度比較；(d)各組實驗平均速度與動床真實速度比較

測準確度又較均勻粗顆粒之準確度為高，此結果顯示床面顆粒之均質性與粒徑大小均為影響底追蹤量測準確度之因素，可能與反射訊號之變異性大小有關，當床面顆粒愈均質、粒徑愈小時，因床面不平整性而產生之反射訊號變異性則愈小，故底追蹤之量測準確度愈高。

另外，量測值高估與低估床速所佔之比例大致相同，均在 40 ~ 60% 之間(表 2)，砂床之高估值所佔比例最大(60%)，而混合床面之高估值所

佔比例最小(42%)，礫床之高估與低估值所佔比例各約 50%，此結果顯示床面顆粒愈均質、粒徑愈小時，反射訊號變異性愈往高估方向偏移，而非均質床面之不平整性會使反射訊號變異性往低估方向偏移。

上述底追蹤量測之系統性誤差(Systematic error)，可藉由長時間多筆資料之平均程序使其降低，將各組實驗輸出之所有 5 秒平均速度加以平均，所得各組平均速度與動床真實速度比較如

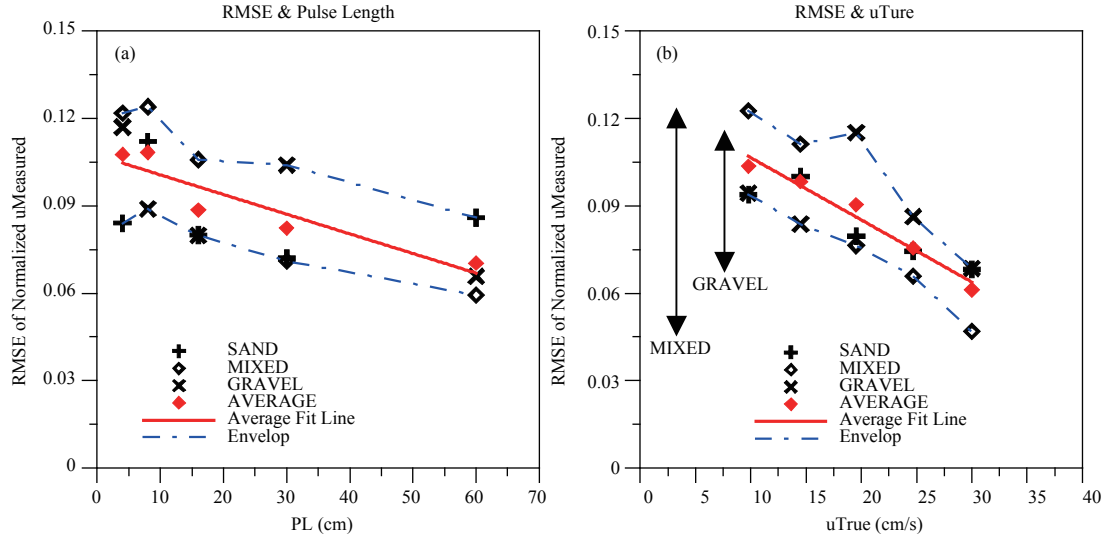


圖 4 (a)脈衝長度對量測誤差之影響；(b)動床速度對量測誤差之影響

圖 3(d)所示，圖中顯示三種床面之量測誤差皆大幅降低，有將近 99% 之量測值，其誤差落在 $\pm 10\%$ 以內(表 2)，僅有一點混合床面平均速度之誤差落在 $\pm 10\%$ 以外。此結果顯示，利用底追蹤量測動床速度時，若能增長量測時間以增加資料筆數，其平均效果將能有效降低誤差，提高資料之準確性。

4.1.2 量測誤差之定量分析

前節中已就不同床面對底追蹤準確性之影響進行評估，本節將定量探討脈衝長度與動床速度對量測誤差之影響。由於各組實驗條件均有差異，在單一變因對量測誤差之影響分析上不易統一呈現其變化趨勢，例如在同一脈衝長度下有五組不同動床速度，若就原始數據進行分析，不易比較脈衝長度改變對量測準確性之影響。因此，本研究以各組實驗之真實速度 u_{True} 為參考值，針對其量測值 $u_{Measured}$ 進行常規化(Normalize)，將相同變數條件下之所有數據置於同一基準，再計算其所有數據之方均根誤差值(Root Mean Square Error, RMSE)，以代表此一變數條件下之平均誤差，進而可探討各項實驗變因與量測誤差之定量關係。

(1)脈衝長度對量測誤差之影響

聲波脈衝長度會影響 ADP 之量測水準，以

量測流速而言，脈衝長度愈長則準確性愈高，但聲束方向之空間解析度則會降低(Brumley *et al.*, 1991)。同樣地，在底追蹤量測方面，脈衝長度之選用亦具有衝突性，脈衝長度增加會使底床觀測體積增大，則反射訊號量提高而使量測水準獲得改善，但觀測體積增大同時會使懸浮顆粒之比例增高，不利於床速之量測(Rennie *et al.*, 2002)。

本研究之動床實驗是以盒車等速全運移方式進行，無懸浮顆粒散射之干擾，並不會因為脈衝長度增加及觀測體積增大而導致量測誤差增大之問題，因此可以預期脈衝長度增加將會使量測準確性提高(可視為聲波脈衝量測底床之時間增長)。圖 4(a)為不同床面條件下，方均根誤差與脈衝長度之關係，中間實線為三種床面之方均根誤差平均值趨勢線。綜觀其趨勢，可發現增加脈衝長度確實會使量測誤差降低，與上述預期結果相符。三種床面之常規化床速方均根誤差分佈在 6~12% 之間，圖中結果亦顯示脈衝長度之增加對混合床面之量測誤差降低功效最為顯著。

(2)動床速度對量測誤差之影響

圖 4(b)為不同床面條件下，方均根誤差與動床速度之關係，中間實線亦為三種床面之方均根誤差平均值趨勢線。綜觀其趨勢，可發現底追蹤量測誤差隨動床速度之增加而減小，應與儀器本

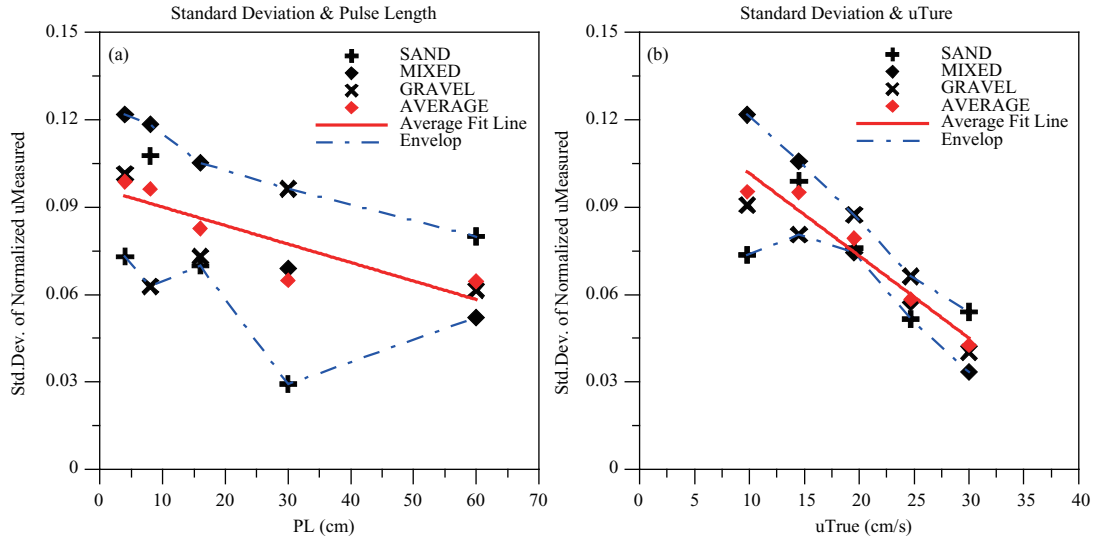


圖 5 (a)脈衝長度對標準偏差之影響；(b)動床速度對標準偏差之影響

身之敏感度有關。動床速度較低時，聲波反射之都卜勒頻移(Doppler shift)較不顯著，容易造成訊號判讀之誤差，但床速較高時，訊號判讀之誤差會相對降低。總體而言，砂床之量測誤差降幅最小，混合床面之量測誤差降幅最為顯著，當床速由 10 cm/s 增至 30 cm/s 時，混合床面之常規化床速方均根誤差降幅約 7.5%。另外，圖 4 結果亦顯示包絡線範圍在脈衝長度增大或床速增大時，大致維持不變，表示不同床面之誤差變異性並不因脈衝長度或床速之變化而有顯著改變。

4.2 底追蹤量測之精確性

儀器量測水準之檢驗，除須探討其準確性之外，尚須瞭解資料之集中程度，亦即儀器量測之精確性。為進行底追蹤量測之精度分析，本研究改採各組實驗之實測速度平均值(uMean)為基準，針對各組實驗之量測值進行常規化，並計算各組常規化速度之標準偏差(Standard deviation)，以代表資料之偏離(變異)程度，進而可評估各項實驗變因與儀器精確性之關係。

圖 5 所示分別為脈衝長度與動床速度對常規化速度標準偏差之影響，圖中顯示脈衝長度與動床速度之增加，均會降低資料之變異程度(亦即提高量測精度)。圖 5 所呈現之結果與圖 4

類似，主要因為動床真實速度(uTrue)與實測速度平均值(uMean)相當接近(見圖 3(d))。綜合而論，底追蹤量測之誤差與標準偏差均隨脈衝長度增加或動床速度增加而呈遞減趨勢，亦即實驗變數之變化對底追蹤之量測準度與精度具有一致性之影響。另外，圖 5 亦同樣地顯示，脈衝長度或動床速度之增加對混合床面之量測精度提升功效最為顯著。

4.3 誤差來源探討

應用底追蹤功能量測動床速度時，可能之誤差來源有五種，包括：(1)差分全球定位系統(DGPS)誤差，(2)羅盤(Compass)誤差，(3)傾斜(Tilting)誤差，(4)儀器雜訊(Instrument noise)，與(5)平均運算(Averaging process)誤差。其中前三者在本實驗中並不存在，儀器雜訊可進行定量比較，而平均運算過程所產生之誤差則僅能定性探討。

(1)差分全球定位系統誤差

當 ADP 裝置於動力載具或河貓系統上，以底追蹤功能量測動床速度時，需要 DGPS 量測之船速 \bar{V}_{DGPS} 做為計算床速 \bar{V}_A 之依據(見式(2))。然而，DGPS 本身具有精確度之限制，在床速不高之情形下，會因 DGPS 精度不足而造成誤差傳遞

及放大之效應，此種誤差對底追蹤量測之精確性影響程度可達 11% (Rennie *et al.*, 2007)。本研究之動床實驗中，ADP 固定於水槽上方之觀測平台而保持靜止狀態，無須依賴 DGPS 系統提供船速，由底追蹤測得之速度 \bar{V}_{BT} 即為動床視速度 \bar{V}_A (僅方向相反)，故無 DGPS 精度限制所產生之誤差。

(2) 羅盤誤差

現地量測時，由於船載 ADP 之航向並非固定，故須藉由內建羅盤將流速與底追蹤資料投影至東－北－上(East-North-Up, ENU)座標系統，以恒定之地球方位座標(Earth coordinates)做為觀測基準(SonTek, 2001)。如同 DGPS 一般，內建羅盤具有 $\pm 2\%$ 誤差亦會傳遞至底追蹤量測之床速，其影響程度可達 3.5% (Rennie *et al.*, 2002)。由於本實驗將 ADP 以固定方向裝置於觀測平台，聲束一指向動床盒車前進方向(見圖 1(c))，因此不須將底追蹤資料轉換至 ENU 座標系統，操作時選用羅盤座標(Compass coordinates)標示底追蹤速度即可，故無羅盤方位誤差。

(3) 傾斜誤差

現地量測過程中，若 ADP 受水流作用而發生搖晃，則聲束將因傾斜轉動而有角速度產生，角速度之產生會使 ADP 誤判底追蹤床速而造成量測誤差，其誤差大小隨角速度及水深而改變(Rennie *et al.*, 2002)。本實驗中 ADP 處於靜置狀態，因此並無傾斜誤差產生。

(4) 儀器雜訊

以單一聲波脈衝量測底床之過程中，若動床顆粒速度不斷變化，則此脈衝將因不同程度之都卜勒效應而具有連續變動之頻率。對於以窄頻(Narrow-band)技術處理反射訊號之 ADP 而言，在頻率分佈廣泛的單一脈衝中，僅有振幅最大(即能量最大)之回音段頻率被篩選出來，用以計算都卜勒頻移(Brumley *et al.*, 1991)，故僅能獲取某一時間之顆粒速度而非脈衝量測過程之平均速度。因此，當顆粒較大之礫石底床發生局部性或隨機性運移現象時，因底追蹤缺乏較細微之解析度處理而產生誤差，稱之為儀器雜訊(Rennie *et al.*, 2002)。

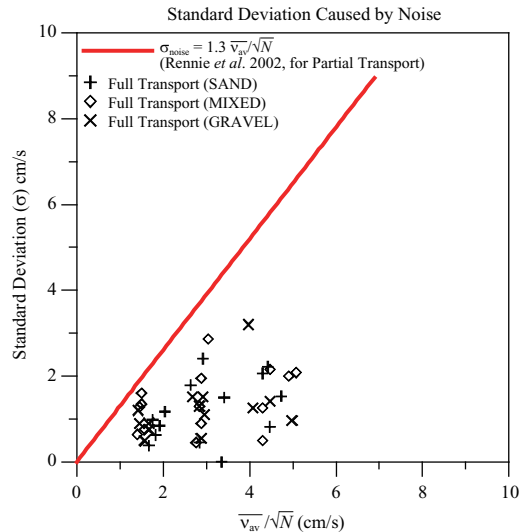


圖 6 全運移與部份運移床面所產生之儀器雜訊比較

本實驗採用動床盒車等速全運移條件，亦即所有顆粒之運動具有一致性，並無上述部份運移(Partial transport)所造成之誤差。然而，盒車床面雖由均勻顆粒鋪設而成，但對聲束而言並非光滑平坦表面，故在量測過程中，聲波脈衝入射床面之狀態(例如位置、涵蓋顆粒範圍等)會隨其移動而改變，導致單一脈衝因反射條件差異而具有不同頻移，因此在全運移條件下仍會有儀器雜訊存在。

Rennie *et al.* (2002)根據其水槽試驗結果指出，部份運移床面所產生之儀器雜訊使底追蹤量測資料具有下列標準偏差：

$$\sigma_{\text{noise}} = 1.3 \bar{V}_A / \sqrt{N} \quad \dots\dots\dots (3)$$

式中 \bar{V}_A = 平均視床速； N = 脈衝資料筆數(Ping number)。雖然式(3)中並未明示部份運移床面異質可動性(Heterogeneous mobility)因素之影響，但此項因素已包含於平均視床速之計算過程中，事實上部份運移床面之可動性差異對儀器雜訊有很大之影響。為比較本實驗等速全運移床面所產生之儀器雜訊與部份運移床面所產生之儀器雜訊，將本實驗之全運移床面量測結果與式(3)預測之部份運移床面結果繪於圖 6，圖中全運移床面

之儀器雜訊皆分佈於部份運移床面之儀器雜訊預測線下方，表示在相同平均視床速與資料筆數條件下，部份運移床面之異質可動性可能使底追蹤量測床速之儀器雜訊相較於全運移床面之儀器雜訊而言，平均增加一倍以上。

(5) 平均運算誤差

由於 ADP 將所測得平行聲束方向之速度投影至平面座標計算平均速度時，三聲束所佔比重並不相同(Theriault, 1986; Rennie *et al.*, 2002)，因此在底床部份運移情況下，平均運算過程將會產生速度誤差，尤其礫床受此影響最甚(Rennie and Villard, 2004)。雖然本研究之動床實驗並無部份運移現象，但儀器雜訊在不同聲束之差異性仍然存在，因此在平均運算過程中仍將產生不同程度之誤差。

由上述各項誤差討論可知，本實驗之量測誤差主要來自儀器訊號解析度限制所產生之雜訊，此項誤差在寬頻(Broad-band)處理技術下將可獲得改善(Brumley *et al.*, 1991)。在天然河道中，以底床部份運移所產生之儀器雜訊為主要誤差來源；而在本實驗之等速全運移條件下，非均質床面之不平整性造成聲波反射狀態變異應為儀器雜訊之主要來源(參見表 2 統計數據)，就本實驗所採用之三種床面而言，其相互間之誤差差異均在 5% 以內。

4.4 底追蹤脈衝長度之選用

由圖 4(a)與圖 5(a)所呈現之結果可知，底追蹤量測之準度與精度均隨脈衝長度之增大而升高，因此在理論上脈衝長度應選用較大值為佳。然而實際上，脈衝長度之持續增大是否使誤差持續減小尚有待進一步釐清；而底追蹤應用於河川動床量測時，過大之脈衝長度反而會增加懸浮顆粒所造成之干擾效應，因此有必要針對脈衝長度之選用進行探討。

本研究以三種床面之整體量測水準探討不同脈衝長度之效果。圖 7 所示為脈衝長度與底追蹤量測水準之關係，其中縱軸為常規化速度誤差小於 10% 之資料所佔百分比，其值愈大表示量測水準愈高。圖中顯示底追蹤之整體量測水準

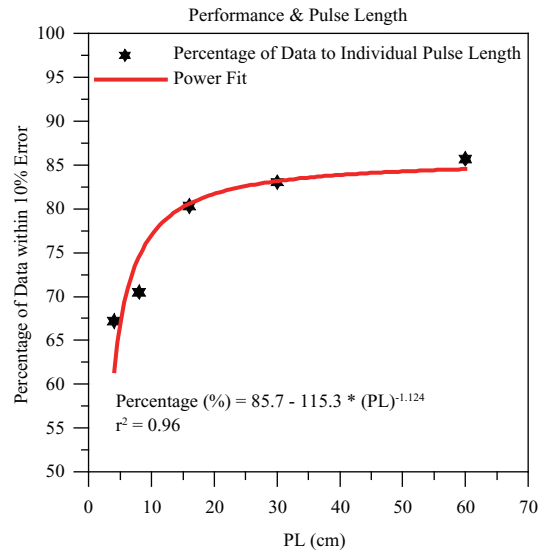


圖 7 脈衝長度與底追蹤量測水準之關係

隨脈衝長度之增加而提高，但並非無限制升高。短脈衝(4、8 cm)之整體量測水準約為 70%，在脈衝長度由 8 cm 增為 16 cm 時，整體量測水準已達 80%，但脈衝長度持續由 16 cm 增為 30 cm 及 60 cm 時，整體量測水準僅提升至 85%，量測水準之提升似有其上限，資料經迴歸可得下列關係式：

$$P (\%) = 85.7 - 115.3 \times PL^{-1.124} \dots\dots\dots(4)$$

式中 P = 常規化誤差小於 10% 之資料所佔百分比， PL = 底追蹤之脈衝長度(cm)。由式(4)可知，持續增大脈衝長度不僅無法持續提升量測水準，反而有升高懸浮顆粒干擾誤差之可能性，因此在選用脈衝長度時，先依可接受之量測水準選定脈衝長度，並計算相對應之觀測體積高度，再配合現地懸浮顆粒特性、濃度及近床區流速，評估量測水準之影響程度(Rennie and Villard, 2004)，若結果不符使用者需求，則另選脈衝長度再行評估量測水準，直到符合需求為止。根據本研究結果，應用底追蹤量測砂、礫質(粒徑 1.41~20 mm)之動床速度時，建議以 30~60 cm 之脈衝長度進行量測，以確保整體量測水準在 80% 以上，並配合現地懸浮載(Suspended load)濃度，再調整至最佳脈衝長度。

五、結論與建議

5.1 結論

本研究應用聲波都卜勒流速儀之底追蹤功能量測動床速度，以等速全運移之動床水槽實驗評估底追蹤量測誤差，並探討脈衝長度、動床速度、與床面粒徑對底追蹤量測準度與精度之影響。透過本研究，可進一步瞭解底追蹤之量測水準，亦有助於後續建立動床速度與床載輸砂率之精確量化模式。本研究結論如下：

- (1)床面顆粒之均質性與粒徑大小均為影響底追蹤量測準確度之因素，床面顆粒愈均質、粒徑愈小時，床面不平整性所造成之反射訊號變異性愈小，底追蹤之量測準確度愈高。床面顆粒愈均質、粒徑愈小時，反射訊號變異性愈往高估方向偏移，而非均質床面之不平整性使反射訊號變異性往低估方向偏移。利用底追蹤量測動床速度時，增長量測時間以增加資料筆數，其平均效果能有效降低誤差，提高資料準確性。
- (2)研究結果發現，增加脈衝長度可使量測誤差降低，三種床面之常規化床速方均根誤差分佈在6~12%之間，脈衝長度之增加對混合床面之量測誤差降低功效最為顯著。研究結果亦發現，底追蹤量測誤差隨動床速度之增加而減小，其中砂床之量測誤差降幅最小，混合床面之量測誤差降幅最為顯著。另外，包絡線範圍在脈衝長度增大或床速增大時，大致維持不變，表示不同床面之誤差變異性並不因脈衝長度或床速之變化而有顯著改變。
- (3)研究結果顯示，脈衝長度與動床速度之增加，均會降低資料之變異程度(即提高量測精度)。底追蹤量測之誤差與標準偏差均隨脈衝長度或動床速度增加而呈遞減趨勢，亦即實驗變數之變化對底追蹤之量測準度與精度具有一致性之影響。研究結果亦顯示，脈衝長度或動床速度之增加對混合床面之量測精度提升功效最為顯著。
- (4)本實驗之量測誤差主要來自儀器訊號解析度限制所產生之雜訊。在天然河道中，以底床部

份運移所產生之儀器雜訊為主要誤差來源；而在本實驗之等速全運移條件下，非均質床面之不平整性造成聲波反射狀態變異應為儀器雜訊之主要來源。全運移床面之儀器雜訊皆小於部份運移床面之儀器雜訊，表示在相同條件下，部份運移床面之異質可動性會使底追蹤量測床速之儀器雜訊增大，平均增加一倍以上。

- (5)底追蹤之整體量測水準隨脈衝長度之增加而提高，脈衝長度持續增為30 cm及60 cm時，整體量測水準僅能提升至85%，顯示量測水準之提升有其上限。根據本研究結果，應用底追蹤量測砂、礫質之動床速度時，可以30~60 cm之脈衝長度進行量測，以確保整體量測水準在80%以上，並配合現地懸浮載濃度再調整至最佳脈衝長度。

5.2 建議

- (1)本研究僅針對等速全運移之動床底追蹤量測進行探討，未來可針對部份運移之動床底追蹤量測進行後續研究。
- (2)未來可利用ADP底追蹤進行現地量測，針對大尺度動床顆粒及脈衝長度進行後續研究，亦可針對現地懸浮載及砂丘(Dune)之影響進行進一步探討。

六、誌謝

本研究為國科會補助三年期整合型計畫「多功能河川環境流量設計：水文、地貌、生態健康與監測技術研究—地形貌為基準之河川環境流量」(計畫編號 NSC 96-2628-E-002-137-MY3)之部分成果。動床水槽實驗由邵允銓與顧尙真協助規劃設計與執行完成，特此致謝。

參考文獻

1. Brumley, B. H., Cabrera, K. L. D., and Terray, E. A. (1991). Performance of a broadband acoustic Doppler current profiler. *IEEE J. Ocean. Eng.*, 16(4), 402-407.
2. Gaeuman, D. and Jacobson, R. B. (2006). Acoustic bed velocity and bed load dynamics in a large

- sand bed river. *J. Geophys. Res.*, 111, F02005.
3. Gaeuman, D. and Jacobson, R. B. (2007). Field assessment of alternative bed-load transport estimators. *J. Hydraul. Eng.*, 133(12), 1319-1328.
 4. Kostaschuk, R., Best, J., Villard, P., Peakall, J., and Franklin, M. (2005). Measuring flow velocity and sediment transport with an acoustic Doppler current profiler. *Geomorphology*, 68, 25-37.
 5. Mueller, D. S. and Wagner, C. R. (2007). Correcting acoustic Doppler current profiler discharge measurements biased by sediment transport. *J. Hydraul. Eng.*, 133(12), 1329-1336.
 6. Rennie, C. D. (2002). Non-invasive measurement of fluvial bedload transport velocity using an acoustic Doppler current profiler. Ph.D. thesis, University of British Columbia, 232pp.
 7. Rennie, C. D., Millar R. G., and Church, M. A. (2002). Measurement of bed load velocity using an acoustic Doppler current profiler. *J. Hydraul. Eng.*, 128(5), 473-483.
 8. Rennie, C. D. and Millar, R. G. (2004). Measurement of the spatial distribution of fluvial bedload transport velocity in both sand and gravel. *Earth Surf. Process. Landforms*, 29, 1173-1193.
 9. Rennie, C. D. and Villard, P. V. (2004). Site specificity of bed load measurement using an acoustic Doppler current profiler. *J. Geophys. Res.*, 109, F03003.
 10. Rennie, C. D., Rainville, F., and Kashyap, S. (2007). Improved estimation of ADCP apparent bed-load velocity using a real-time Kalman filter. *J. Hydraul. Eng.*, 133(12), 1337-1344.
 11. Rennie, C. D. and Millar, R. G. (2007). Deconvolution technique to separate signal from noise in gravel bedload velocity data. *J. Hydraul. Eng.*, 133(12), 845-856.
 12. SonTek, Inc. (2001). SonTek ADP acoustic Doppler profiler technical documentation. San Diego, California, USA.
 13. Theriault, K. B. (1986). Incoherent multibeam Doppler current profiler performance: Part II - Spatial response. *IEEE J. Ocean. Eng.*, 11(1), 16-25.
 14. Wu, F-C and Yang, K-H (2004). A stochastic partial transport model for mixed-size sediment: Application to assessment of fractional mobility. *Water Resources Research*, 40(4): W04501.

收稿日期：民國 98 年 4 月 20 日

修正日期：民國 98 年 5 月 22 日

接受日期：民國 98 年 6 月 2 日