

地下水環境限制水位與可用水量分析 -以濁水溪沖積扇為例

ANALYSIS OF ENVIRONMENTAL LIMITING LEVEL AND AVAILABLE YIELD OF GROUNDWATER
IN CHOSHUICHI ALLUVIAL FAN

多采工程顧問有限公司
水利技師/博士

葉明生
Ming-Sheng Yeh

多采工程顧問有限公司
水利技師

簡金龍
Jing-Long Chian

多采工程顧問有限公司
博士

李文生*
Wen-Sen Lee

摘要

為達到地下水資源永續經營目標，地下水使用應避免地下水超抽發生地層下陷或海水入侵等不良影響，合理的地下水抽用為地下水管理重要課題。

本研究目的為分析濁水溪沖積扇之地下水環境限制水位與可用水量，而其中可用水量符合永續利用的原則即滿足生態基流量與地層下陷等環境限制。地層下陷限制水位乃利用 MODFLOW-SUB 模組，建立垂向一維單井地層下陷模式分析而得。再進一步建置地下水數值模式配合各限制水位，推估濁水溪沖積扇各分層之可用水量。經初步分析在 2009 年至 2014 年期間，濁水溪沖積扇每月的可用水量約在 0.81~1.15 億噸之間，而年總可用水量約為 11.50 億噸，比現況平均年抽水量 13.44 億噸約少 1.94 億噸，此可提供管理單位在水權管理之參考。

關鍵詞：地下水環境限制水位、地層下陷、地下水可用水量。

* 通訊作者，多采工程顧問有限公司

台北市文山區景文街 43 號 5 樓 · wslee@manysplendid.com

ANALYSIS OF ENVIRONMENTAL LIMITING LEVEL AND AVAILABLE YIELD OF GROUNDWATER IN CHOSHUICHI ALLUVIAL FAN

Ming-Sheng Yeh
Manysplendid Engineering
Consultants Co., Ltd.

Jing-Long Chian
Manysplendid Engineering
Consultants Co., Ltd.

Wen Sen Lee*
Manysplendid Engineering
Consultants Co., Ltd.

ABSTRACT

To achieve the goal of sustainable groundwater management, groundwater pumping should avoid inducing the environmental impacts such as land subsidence or seawater intrusion caused by over-pumping. Operation rules to guide adequate groundwater pumping are important issues.

This study established a groundwater numerical model and computed the amount of groundwater available yield in Choshuichi Alluvial Fan based on groundwater level constraints. The groundwater level constraints are the minimum groundwater level to avoid creating an impact on ecological stream flow and inducing land subsidence. In this study, several one-dimensional land subsidence models for each well were constructed by using MODFLOW Subsidence and Aquifer-System Compaction (SUB) package. Each SUB model was calibrated and used to evaluate the minimum groundwater level to avoid land subsidence. A regional groundwater numerical model of Choshuichi Alluvial Fan was developed, and the available groundwater yield of the whole Alluvial Fan was simulated basing on the groundwater level constraint. The results showed that, in 2009~2014, Choshuichi Alluvial Fan, the available groundwater yield of the month is about 0.081~0.115 billion tons, and the annual available groundwater yield is about 1.150 billion tons, which is about 0.194 billion tons less than the current annual groundwater usage (about 1.344 billion tons). These results are a valuable reference for future groundwater analysis and policy assessment.

Keywords: Environmental limiting level, Land subsidence, Available groundwater yield.

一、緒論

地下水是臺灣重要的水資源之一，為達到地下水資源永續經營目標，於地下水使用應避免地下水超抽發生地層下陷或海水入侵等不良影響，合理的地下水抽用，為地下水管理重要課題。

本研究參考經濟部水利署水利規劃試驗所「臺灣地下水區可用水量調查分析參考手冊(草案)」(2015，以下稱為可用水量調查分析參考手冊(草案))，再根據濁水溪沖積扇地下水環境特性，探討抽用地下水是否造成河川流量低於生態基流量、及地層下陷等，分析而得地下水環境限制水位。另外，所推估之可用水量為能符合永續利用，在非地下水環境限制區，本研究再輔以地下水位之「下限水位」作為非環境限制區之水位限制條件，濁水溪沖積扇地下水之下限水位初步以歷年地下水位超越機率 65%計算。並配合地下水數值模式建置，推估時空分布之濁水溪沖積扇各分層可用水量分析。

掌握可靠的地下水可用水量，可提供管理單位在水權管理及進行地面地下水聯合運用等水資源規劃之參考，達成保育與利用兼顧之水資源永續發展目標。

二、研究區域與分析方法

2.1 濁水溪沖積扇地下水區概述

濁水溪沖積扇地下水區位於臺灣西部海岸之中段，北起烏溪，南至北港溪南岸，東以八卦台地及斗六丘陵山脊線為界，並沿兩丘陵間之隘口向東擴及竹山、名間一帶，西臨臺灣海峽，面積約 2,079 平方公里，範圍如圖 1 所示。濁水溪沖積扇最主要之溪流為濁水溪，其主流發源自中央山脈西翼、合歡山以南與玉山山脈北側之間地區，向西切穿雪山—玉山帶、麓山帶與八卦—斗六丘陵區，在丘陵區西側形成沖積扇系統，主流流經沖積扇之中央，向西注入臺灣海峽。其他位於沖積扇之河川，自北而南尚有舊濁水溪、新虎尾溪、舊虎尾溪及北港溪等。濁水溪沖積扇地勢平緩，高程約介於海拔 0~100 公尺之間。

2.2 分析方法

本研究依據可用水量調查分析參考手冊(草案)，考量避免發生如生態基流量減少、地層下陷及海水入侵等不良影響為限制條件，以求得不同時間及不同分區

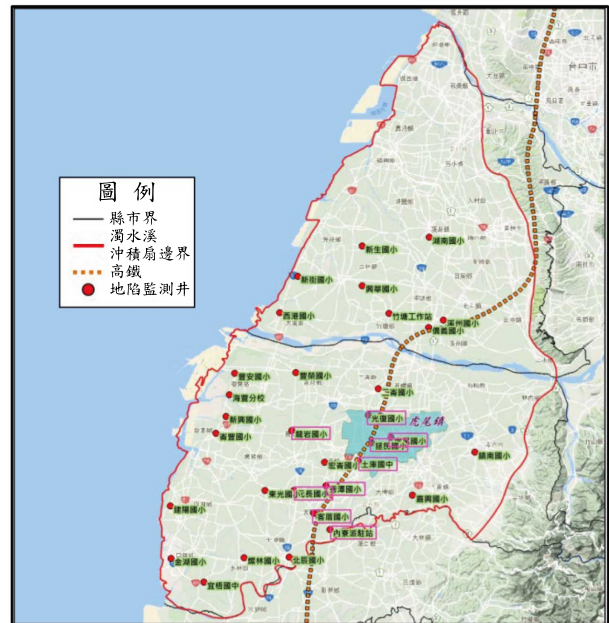


圖 1 濁水溪沖積扇範圍及地陷監測井位置圖

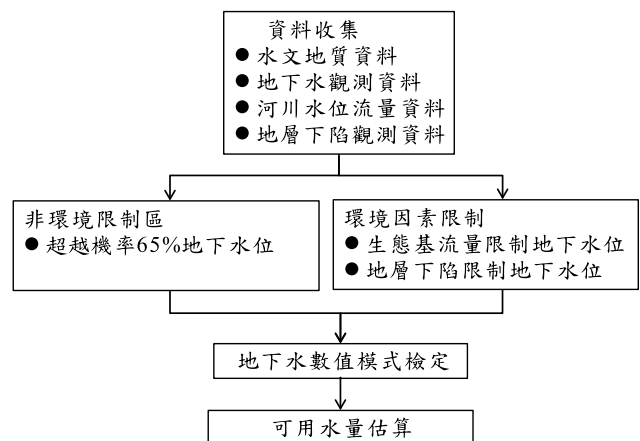


圖 2 本研究地下水可用水量推估流程圖

之可用水量。另外，本研究考量於某些地區，可能無生態基流量減少、地層下陷及海水入侵等因素限制，為非地下水環境限制區。為達地下水永續利用，本研究參考於 2011 年經濟部水利署「臺灣地區濁水溪沖積扇及屏東平原地下水分區合理出水量分析」報告之「下限水位」成果，而濁水溪沖積扇地下水之下限水位初步以歷年地下水位超越機率 65%計算。地下水可用水量推估流程如圖 2 所示，茲說明如下：

- (1) 蒐集歷年濁水溪沖積扇相關研究文獻及相關觀測資料(包括地下水位、河川水位流量及地層下陷等)。
- (2) 分析濁水溪沖積扇環境因素之環境限制水位，並計算非環境限制區的觀測井之下限水位(超越機

率 65%水位)。

- (3)彙整濁水溪沖積扇最新地下水文地質參數，建置並檢定濁水溪沖積扇地下水數值模式。
- (4)利用數值模式之以假設抽水量(現況抽水量×各地下水區調整倍數)，進行多年模擬，當模擬水位最終可接近且不低於水位限制條件，此抽水量即為可用水量。

三、地下水環境限制水位分析

本研究先針對濁水溪沖積扇之生態基流量與地層下陷之地下水環境限制水位進行分析。

3.1 生態基流量限制水位分析

依據可用水量調查分析參考手冊(草案)，於緊鄰河川之分區應分析生態基流量限制水位。本研究採用美

國地質調查所發展之 PART 程式進行基流分離，而圖 3 為 2005~2014 年濁水溪(彰雲橋以下)各流量站枯水期河川流量與地下水位關係圖，由圖中初步判斷，在濁水溪(彰雲橋以下)於枯水期河川流量與地下水位之關係並不明顯。由於河川流量歷線為降水進入河川之綜合行為表現，利用基流分離法分析所獲得之成果通常僅可視為地下水補注量之近似估計值；此外，由於枯水期的河川流量受到上游堰壩操作及沿岸人為取水的影響較大，這些因素皆為河川流量與地下水位的關係不甚明顯的可能原因。

考量上述原因，初步假設河川的最低流量應受到地下水位的影響較大，因此進一步分析各流量站在相同地下水位時與最低流量的關係如圖 4，由圖中可看出濁水溪(彰雲橋以下)各流量站可歸納出最低流量與地下水位的關係。依據「臺灣地區水資源開發綱領計畫」，臺灣地區保育用水建議值採每 100 平方公里，河川生態基流量為 0.135 cms，以濁水溪流域面積約 3,155 平方公里估算，生態所需之基流量約 4.26 cms，由前述濁

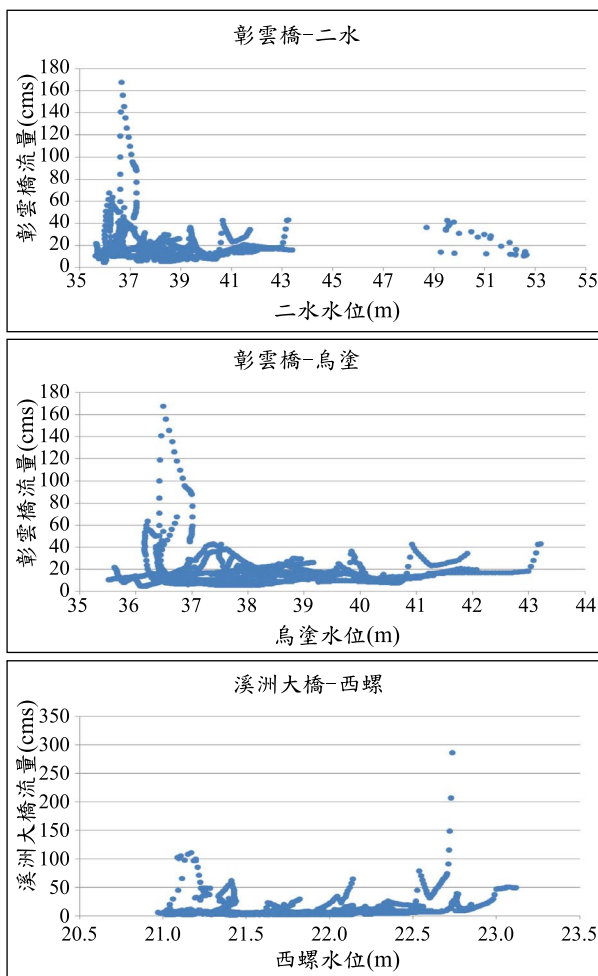


圖 3 濁水溪(彰雲橋以下)枯水期基流量與地下水位關係圖

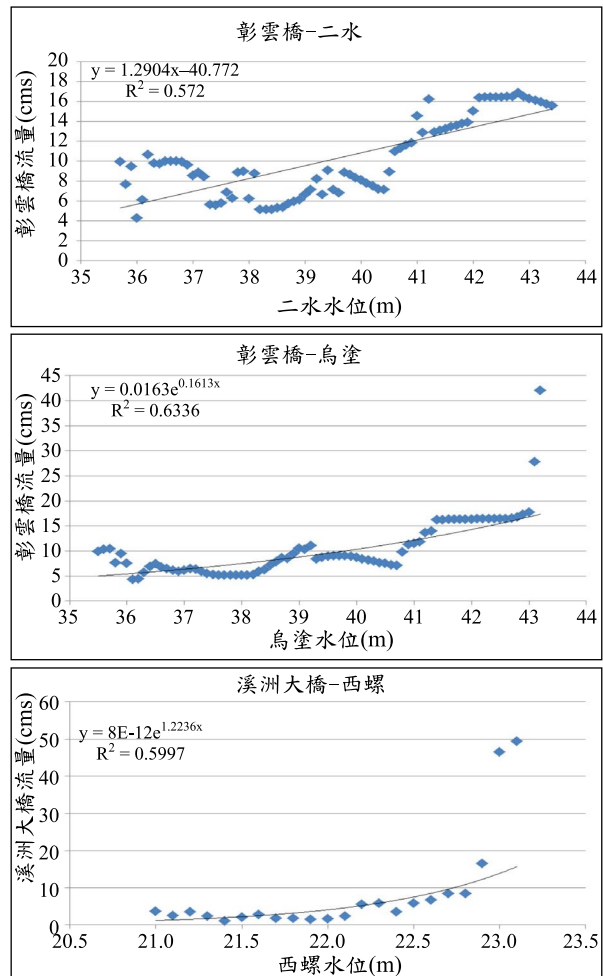


圖 4 濁水溪(彰雲橋以下)枯水期最低流量與地下水位關係圖

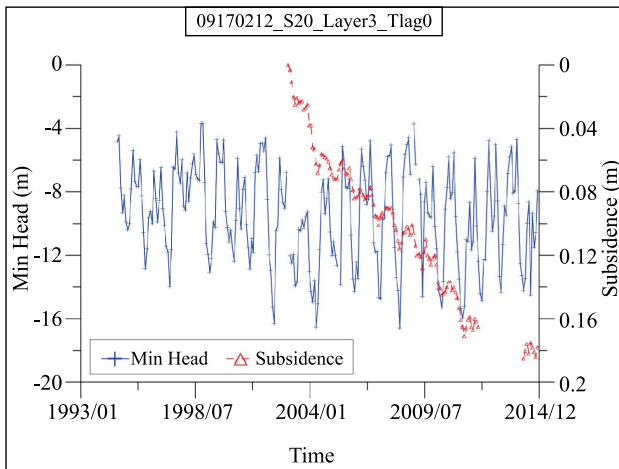


圖 5 觀測井元長(1)月最低水位與地陷監測井元長國小含水層二累積下陷量歷線圖

水溪流量與地下水位關係估算，二水站之生態基流限制水位為 34.89 公尺；烏塗站之生態基流限制水位為 34.51 公尺；西螺站之生態基流限制水位為 21.58 公尺。

3.2 地層下陷限制水位分析

3.2.1 單井地層下陷模式建置與未來情境模擬

為分析地下水位與地層下陷關係，本研究蒐集濁水溪沖積扇分層觀測井與磁環分層式地層下陷監測井(以下稱為地陷監測井)觀測資料。32 口地陷監測井(相關位置如圖 1 所示)各磁環下陷量，比對含水層分層厚度，將地陷監測井各磁環下陷量分別歸層。圖 5 為觀測井元長(1)月最低水位與地陷監測井元長國小於含水層二累積下陷量歷線，元長國小由 2003 年開始監測，至 2014 年於含水層二累積下陷量 17.8 公分。

為建立地層下陷與地下水位關係，以分析地層下陷限制水位，本研究採用 MODFLOW-SUB (Höffmann *et al.* 2003) 模組，以單井地層下陷模式，建立地層下陷與分層地下水位關係(葉明生等 2017)。以下以位於含水層二觀測井元長(1)與地陷監測井元長國小為例說明分析流程：

由於觀測井元長(1)位於含水層二(模式第 3 層)，為能模擬觀測井元長(1)之觀測水位，於單井模式第 3 層之四周網格，設定為時變水頭(Time-Variant Specified-Head package, CHD 模組)。因地陷監測井元長國小於 2003 年開始監測，時變定水頭網格輸入元長(1)2003-2015 年各旬觀測水位，單井模式第 3 層中間網格即可模擬出元長(1)觀測水位。接著於模式第 3 層中間網格輸入 SUB 模組參數及進行檢定。經由檢定，彈性儲水係數 5×10^{-5} (1/m)，非彈性儲水係數 9.5×10^{-4} (1/m)。地

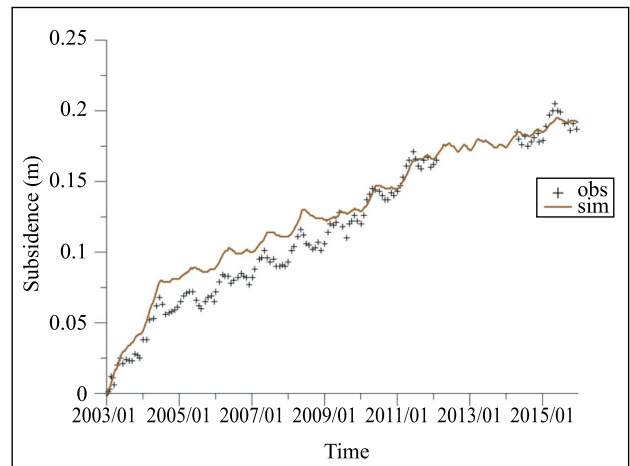


圖 6 地陷監測井元長國小含水層二(模式第 3 層)觀測與模擬下陷量

陷監測井元長國小於含水層二(模式第 3 層)2003-2015 觀測累積下陷量 0.187m，模擬之下陷量如圖 6 所示，均方根誤差為 0.01303m。

於完成 MODFLOW-SUB 模組檢定，再配合觀測井元長(1)不同超越機率水位作為未來地下水位情境，模擬未來各種情境之下陷量，可作為決定限制水位的依據，地陷監測井元長國小於含水層二(模式第 3 層)之未來情境模擬如圖 7 所示。

3.2.2 地層下陷限制水位建立

地層下陷限制水位訂定，同時滿足下列條件：

條件 1：近年(2011-2015 年)下陷明顯趨緩，未來以限制水位長期操作情境(至 2050 年)，須能維持近 5 年趨緩的下陷率。

條件 2：若有持續下陷之虞，未來以限制水位長期操作情境(至 2050 年)，下陷速率改善率以 80%為原則，其中

$$\text{下陷速率改善率} = 1 - (\text{情境下陷速率} / \text{觀測下陷速率})$$

依據元長國小含水層二不同超越機率水位情境之模擬下陷量，參照上述建議的地層下陷限制水位訂定原則，由於在超越機率 50%水位長期操作情境，下陷速率改善率為 78.95%(原則上接近 80%，同時亦滿足條件 1)，故取超越機率 50%水位作為元長國小含水層二(即觀測井元長(1))的地層下陷限制水位，而超越機率 50%水位範圍為 -12.04m ~ -4.69m，如圖 8 所示。

由於沿海地區地層下陷已減緩，以下以彰化縣芳苑鄉新街國小為例，說明其地層下陷限制水位分析結果：

新街國小地陷井之含水層二所對應觀測井為芳苑

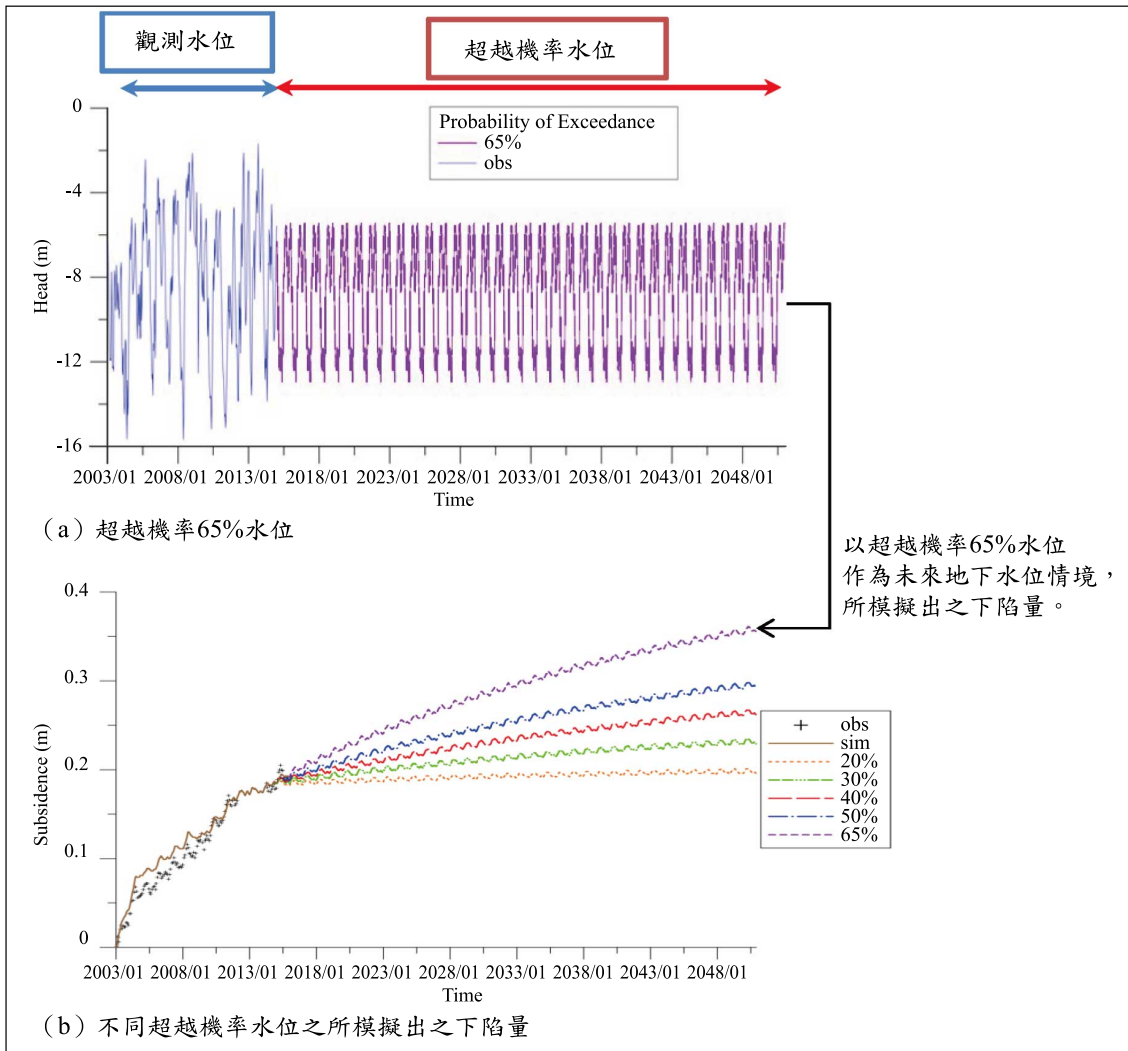


圖 7 地陷監測井元長國小含水層二(模式第 3 層)未來各種情境之模擬下陷量

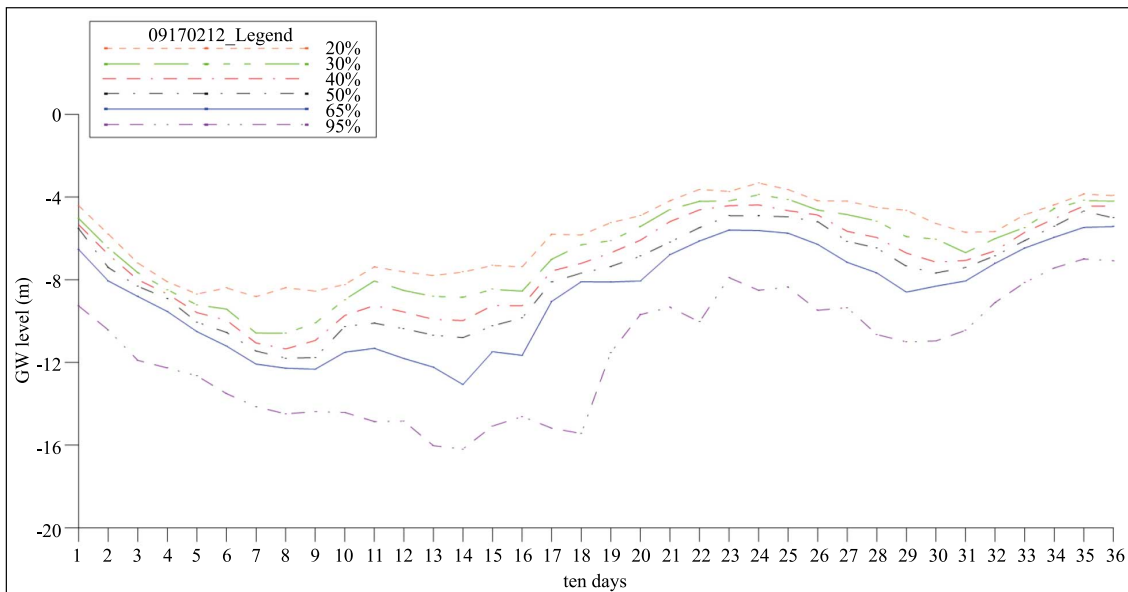


圖 8 觀測井元長(1)不同超越機率水位

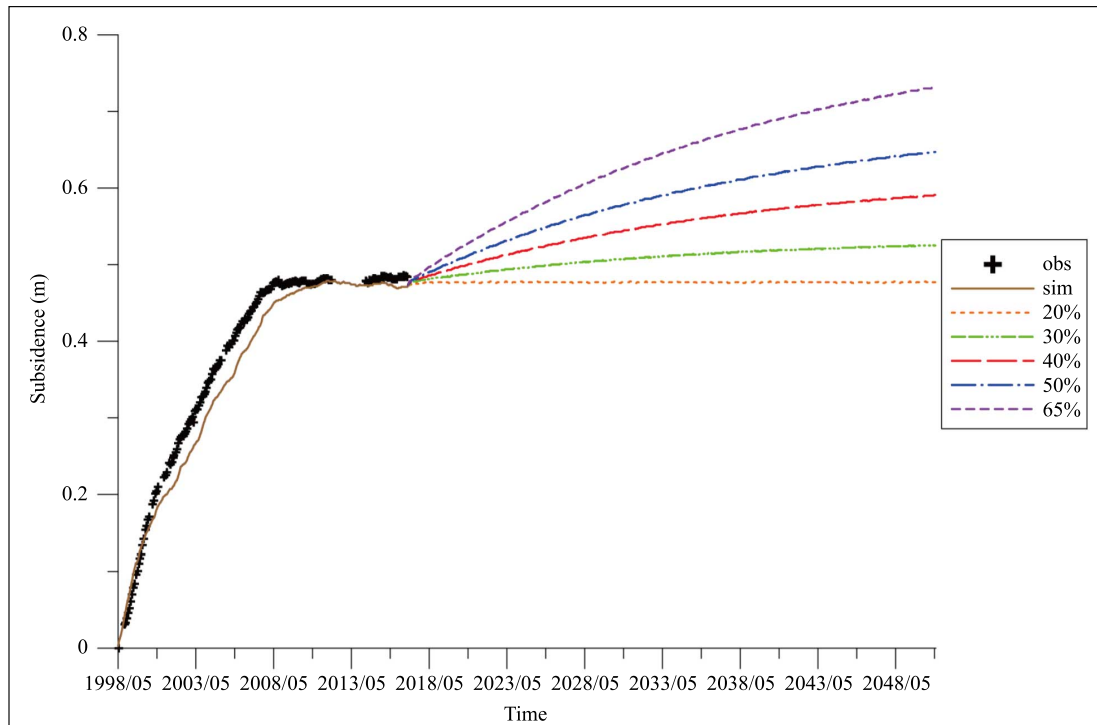


圖 9 地陷監測井新街國小含水層二(模式第 3 層)未來各種情境之模擬下陷量

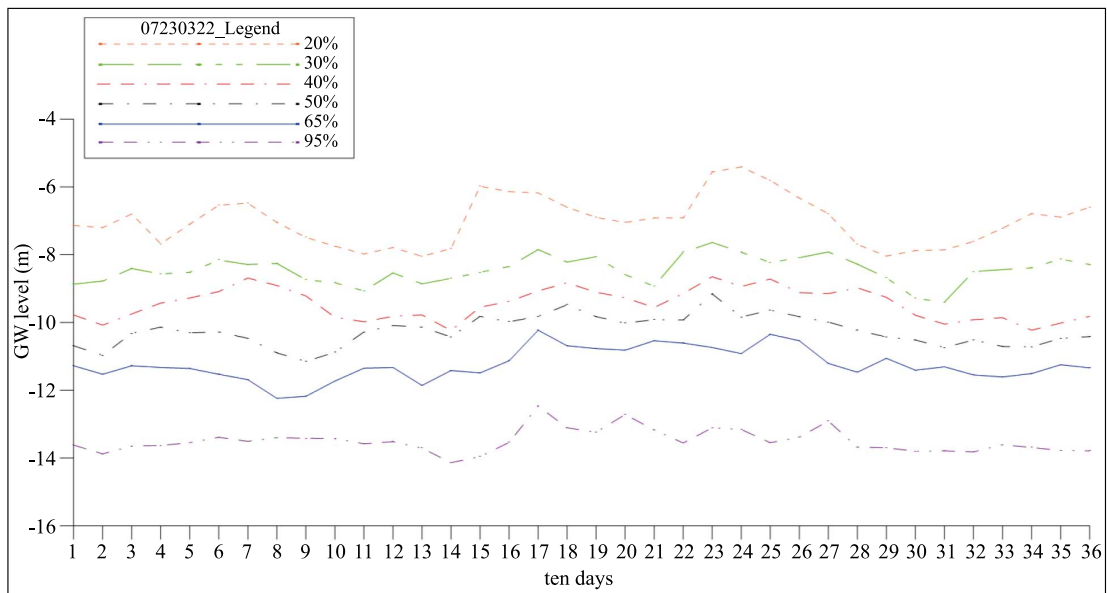


圖 10 觀測井芳苑(2)不同超越機率水位

(2)，芳苑(2)不同超越機率水位情境之模擬下陷量如圖 9 所示，由於在超越機率 50%水位長期操作情境，下陷速率改善率為 79.09%(原則上接近 80%)，但為符合條件 1 之維持近 5 年趨緩的下陷率(下陷速率 0.0008 (m/year))，建議取超越機率 20%水位作為新街國小含水層二(即觀測井芳苑(2))的地層下陷限制水位，而其超越機率 20%水位範圍為-8.05m ~ -5.41m，如圖 10 所示。

依據上述流程，本研究已分析之地層下陷限制水位，如表 1 所示。

四、地下水可用水量分析

本研究係以建置地下水數值模型方式估算地下水可用

表 1 地層下陷限制水位分析結果

編號	井名	含水層別	地層下陷 限制水位 (超越機率%)	編號	井名	含水層別	地層下陷 限制水位 (超越機率%)
1	元長(1)	二	50	13	後安(1)	二	20
2	秀潭	二	50	14	後安(2)	三	20
3	虎尾(2)	二	50	15	竹塘(2)	二	40
4	田洋(2)	二	50	16	溪湖(1)	二	50
5	金湖(1)	一	30	17	溪湖(3)	三	40
6	金湖(2)	二	50	18	趙甲(1)	二	40
7	和豐(2)	三	40	19	趙甲(3)	三	20
8	箔子(1)	一	50	20	西港(1)	一	30
9	箔子(2)	二	50	21	香田(2)	三	30
10	海豐(1)	二	40	22	芳苑(2)	二	20
11	海豐(2)	三	40	23	芳苑(3)	三	40
12	豐榮(2)	二	40	--	--	--	--

水量，同時考量濁水溪沖積扇範圍內地下水下限水位及環境限制水位，以地下水模式估算濁水溪沖積扇之地下水可用水量。

4.1 濁水溪沖積扇地下水數值模式建置

濁水溪沖積扇地下水數值模式採用 MODFLOW (Harbaugh 2005) 建置，模式格網以 1 公里乘 1 公里之格網建構，南北方向 85 列與東西方向 75 行，共五層格網。而邊界條件設定，東部之八卦山地區有八卦山背斜，斗六丘陵有內林背斜及斷層經過，以此為東邊界，且設為零流量之邊界條件。北部邊界為烏溪，南部邊界為北港溪，各層皆為零流量之邊界，模擬區域如圖 1 所示。西邊含水層一以海岸線向外延伸 1 公里設為定水頭邊界，其餘含水層延伸 5 公里後尖滅，設為零流量之邊界條件。濁水溪沖積扇模式共分為第 1 至 7 分層，依深度分別為含水層一、阻水層一、含水層二、阻水層二、含水層三、阻水層三及含水層四，模擬期間為 2009~2014 年，為旬模擬。

本研究之數值模式，除了以「臺灣地區地下水觀測網整體計畫」資料為基礎，並納入「用水調查統計暨地下水可用水量調查分析試辦計畫」(經濟部水利署水利規劃試驗所，2017)用水調查及現地補充試驗。依據模式模擬成果，計算濁水溪沖積扇之水文收支，模擬期間各年降雨入滲量及各分層抽水量分析。濁水溪沖積扇

自 2009 年至 2014 年期間，各年的降雨入滲量大約在 7.77~9.40 億噸之間，平均補注量約 8.61 億噸；年總抽水量則在 12.50~14.36 億噸之間，年平均抽水量約 13.44 億噸。而以各層抽水量來看，年抽水量大多呈現出模式第 1 層的抽水量最大而模式第 5 層的抽水量最小。

4.2 濁水溪沖積扇可用水量

本研究利用 132 個抽水分區，重覆 12 年進行模擬，以完成參數檢定之現況抽水量作為年初始抽水量，為了解不同水文條件下之可用水量，此 12 年模擬期間的水文條件分別以 2009~2014 循環 2 次(共 12 年)，調整各抽水分區之抽水量，使模式之最後 1 年的模擬水位最接近但不低於各抽水分區之水位限制條件。

在利用 2009~2014 年之水文條件組合後，經初步分析濁水溪沖積扇之可用水量估算如圖 11 所示，濁水溪沖積扇每月的可用水量約在 0.81~1.15 億噸之間，而年總可用水量約為 11.50 億噸，比現況平均年抽水量 13.44 億噸約少 1.94 億噸，亦即可用水量與現況抽水量約相差 14.43%。

五、結論與建議

本研究依據濁水溪沖積扇地下水環境特性，分析

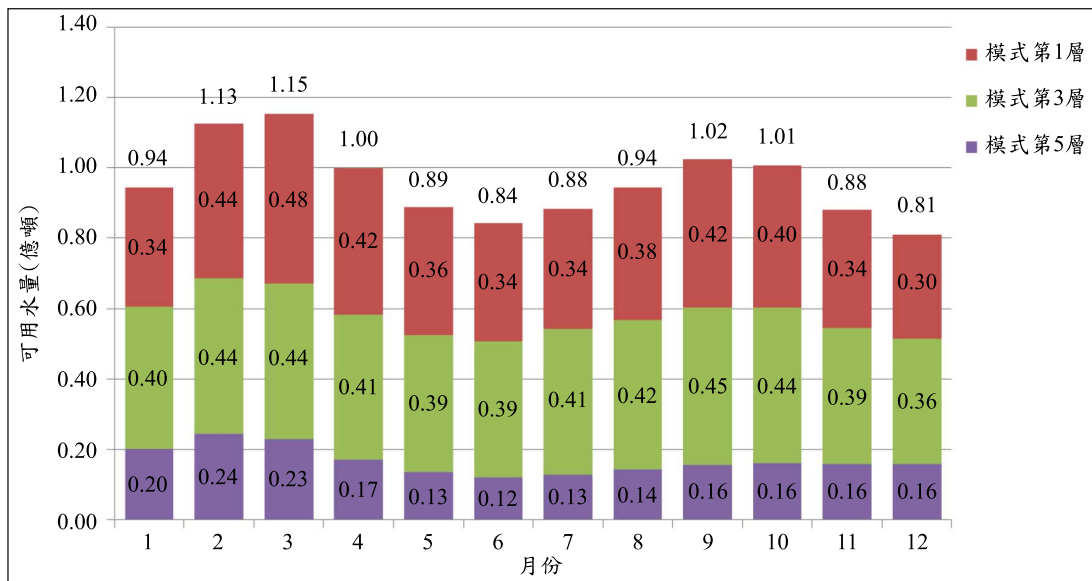


圖 11 濁水溪沖積扇可用水量估算

生態基流量與地層下陷之地下水限制水位，而對於非環境限制區初步以超越機率 65% 水位為限制條件，並配合地下水數值模式建置，分析濁水溪沖積扇可用水量分析，以提供管理單位在水權管理之參考。

由於可用水量的估算建立在各種環境條件與地下水位之關係，建議未來應先進行觀測地下水位記錄檢核，提升其可靠度。目前國內地下水實際抽水量較不易掌握，建議可用水量估算可配合地下水抽水量調查，以提升其推估成果的準確性。

誌謝

本研究承蒙經濟部水利署水利規劃試驗所「用水調查統計暨地下水可用水量調查分析試辦計畫」(2017) 經費支持，使本研究可以順利完成。

參考文獻

1. 經濟部水利署水利規劃試驗所：「臺灣地下水區可用水量調查分析參考手冊(草案)」，2015。

2. 經濟部水利署：「臺灣地區濁水溪沖積扇及屏東平原地下水分區合理出水量分析，2011。

3. 經濟部水利署水利規劃試驗所：「用水調查統計暨地下水可用水量調查分析試辦計畫」，2017。

4. 葉明生、簡金龍、劉文堯、陳春宏、蔡展銘、畢嵐杰：「地層下陷與地下水位關係分析-以濁水溪沖積扇為例」，第 23 屆水利工程研討會，2017。

5. Höffmann, J., Leake, S.A., Galloway, D.L., and Wilson, A.M., MODFLOW-2000 Ground-Water Model--User Guide to the Subsidence and Aquifer-System Compaction (SUB) Package: U.S. Geological Survey Open-File Report 03-233, 44 p., 2003.

6. Harbaugh, Arlen W., MODFLOW-2005, the US eological Survey modular ground-water model: The ground-water flow process. U.S. Geological Survey Techniques and Methods 6-A16, 2005.

收稿日期：民國 108 年 06 月 18 日
修正日期：民國 109 年 01 月 07 日
接受日期：民國 109 年 02 月 07 日