

鯉魚潭水庫集水區最佳管理作業成效評估之研究

林昭遠⁽¹⁾ 鍾圻琮⁽²⁾ 周文杰⁽³⁾

摘要

鯉魚潭水庫為臺灣中部地區重要水庫，果園為該集水區主要農業土地利用型態，為維護水庫壽命及水質，本研究利用 AGNPS 模式模擬鯉魚潭水庫集水區上游子集水區現況，並另行配置最佳管理作業（Best management practices, BMPs）之後，再以 AGNPS 模式模擬，比較最佳管理作業配置前後集水區內逕流洪峰流量、泥砂生產量及營養鹽等情形。分析結果顯示水系周邊配置緩衝帶效益最為明顯，逕流洪峰可減少 1.37%，泥砂產量可減少 21.54%，泥砂吸附總氮減少 10.65%，泥砂吸附總磷減少 10.71%；陡峭區位農地回收效益次之，逕流洪峰減少 0.78%，泥砂產量減少 3.03%，泥砂吸附總氮減少 2.37%，泥砂吸附總磷減少 2.38%；崩場地植生復育效益最差，逕流洪峰減少 0.62%，泥砂產量減少 1.37%，泥砂吸附總氮減少 1.18%，泥砂吸附總磷減少 1.19%。但以各方案單位面積的改善效率而言，則以陡峭區位農地回收最佳。

關鍵字：最佳管理作業、水庫集水區、AGNPS 模式

The Evaluation Study of the Best Management Practices for the Leeyutan Reservoir Watershed

Chao-Yuan Lin⁽¹⁾

Professor, Department of Soil and Water Conservation,
National Chung Hsing University

Chi-Hu Chung⁽²⁾

Graduate Student, Department of Soil and Water Conservation,
National Chung Hsing University

Wen-Chieh Chou⁽³⁾

Associate Professor, Department of Civil Engineering and Engineering Informatics
Chung Hua University

-
- (1) 國立中興大學水土保持學系教授
 - (2) 國立中興大學水土保持學系碩士班研究生
 - (3) 中華大學土木與工程資訊學系副教授

ABSTRACT

The Leeyutan Reservoir is one of the most important reservoirs in Central Taiwan. Orchard is the main landuse pattern for the watershed. In order to maintain the reservoir lifespan and water quality, the Agricultural Non-Point Source (AGNPS) model was used to simulate the Leeyutan reservoir watershed conditions. The best management practices were also used to simulate the effects on the peak discharge reduction, sediment yield control, and nutrient transportation. The analyzed results indicate the riparian buffer zones receive the most significant benefits by decreasing 1.37% peak flow, 21.54% sediment yield, 10.65% total nitrogen, 10.71% total phosphorus, separately. The farmland retrieve for reforestation at steep areas received the second significant benefits by decreasing 0.78% peak flow, 3.03% sediment yield, 2.37% total nitrogen, 2.38% total phosphorus, separately. The vegetation restoration receives the worst significant benefits by decreasing 0.62% peak flow, 1.37% sediment yield, 1.18% total nitrogen, 1.19% total phosphorus, separately. The best efficiency of every scheme per unit's area is the farmland retrieve for reforestation at steep areas.

(Keywords: Best management practices, Reservoir watershed, Agricultural Non-Point Source (AGNPS model))

前言

鯉魚潭水庫為中部地區一重要水庫，位於大安溪支流景山溪下游，集水區面積 5,258 公頃，橫跨苗栗縣大湖鄉和卓蘭鎮，總蓄水量達 1 億 2 千 6 百萬立方公尺，果園為集水區主要農業土地利用型態。水庫為供應苗栗縣及大台中地區的公共給水及工業用水，並同時兼具發電、防洪、灌溉及觀光等功能（資料來源：鯉魚潭水庫管理中心全球資訊網 <http://210.69.22.200/index.html>）。

鯉魚潭水庫地區自 921 震災後，山坡地土砂災害層出不窮，整體產業發展備受山崩、地滑及土石流威脅，土砂災害不僅對區內居民生命財產造成威脅，土砂遞移進入水庫更對水庫水質及容積造成直接傷害。

為探討水庫集水區內土砂對水庫影響，本研究利用 AGNPS 模式，推估集水區現況。考慮水系周邊配置緩衝帶、崩場地植生復育及陡峭區位農地回收等三種最佳管理作業方案後之土壤流失量及營養鹽傳輸情形，並評估各種作業實施效益，以期尋求對水庫最有利的策略。

研究地區

研究範圍為鯉魚潭水庫上游集水區，位於苗栗縣大湖鄉及卓蘭鎮（圖 1），面積約 5,258 公頃，受限於 ANPGS 模式網格數目限制，篩選出一上游子集水區進行模擬。選取地區位於集水區東側，地形較陡，有零星崩塌，對子集水區下游之果園與居民等保全對象產生威脅，且區內果園沖刷情形嚴重，產生之坡面泥砂產量亦會對水庫容積造成傷害。

子集水區面積約為 390.56 公頃，高程集中於 750 ~1000 公尺之間，占集水區面積 58.85%（圖 2）；坡度集中於五級坡和六級坡，占集水區面積 63.87 %（圖 3）；坡向以西坡向最多，占集水區面積 32.40%（圖 4）。土地利用型態以果園及闊葉林分布最為廣泛，分別占研究範圍 18.90%及 68.98%，其分布情形如圖 5。

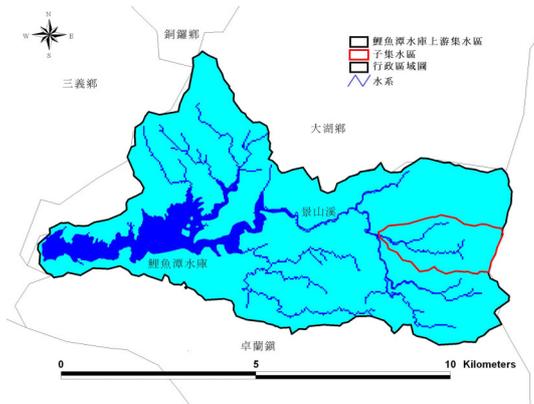


圖 1 研究地區位置圖
Fig. 1 The study area

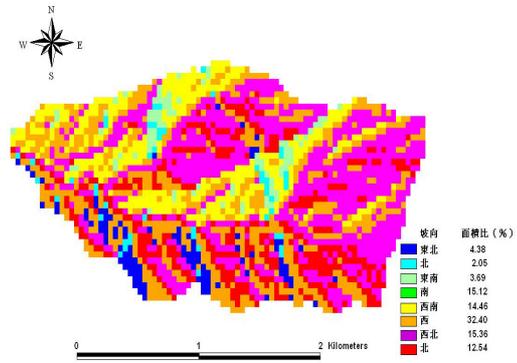


圖 4 坡向分布圖
Fig. 4 The spatial distribution of aspect

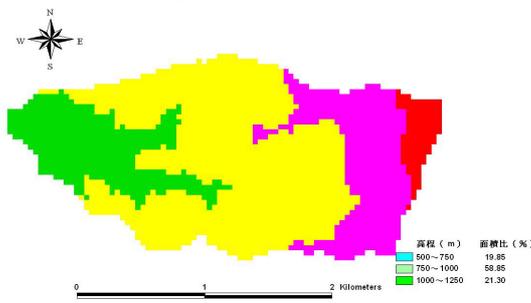


圖 2 高程分布圖
Fig. 2 The spatial distribution of elevation

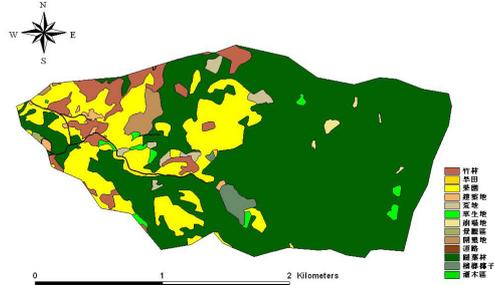


圖 5 土地利用型態圖
Fig. 5 The spatial distribution of landuse pattern

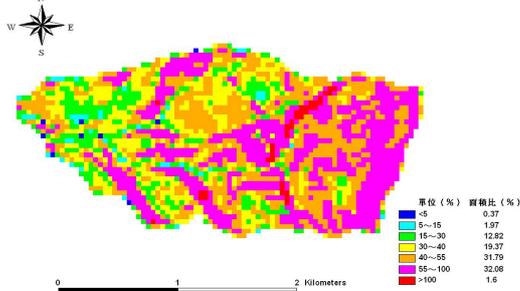


圖 3 坡度分布圖
Fig. 3 The spatial distribution of slope

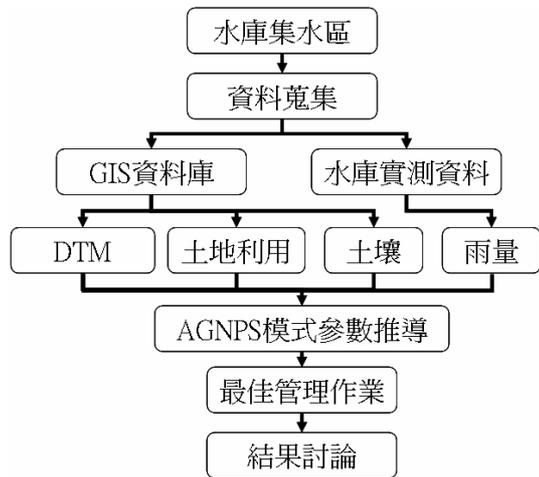


圖 6 研究流程圖
Fig. 6 The flowchart of this study

研究材料與方法

一、研究流程

本研究選定鯉魚潭水庫上游子集水區，利用 AGNPS 模式模擬子集水區現況及最佳管理作業配置後的土壤流失量與營養鹽傳輸情形，探討最佳管理作業配置效益，研究流程如圖 6。

二、研究材料

(一) 數值地形模型

以林務局農林航測所製作的 40m×40m 解析度之數值地形模型(Digital Terrain Model, DTM)。以此資料進行地形分析、水系網萃取以及動態集水區萃取。

(二) 土壤及土地利用分布圖

土壤及土地利用係依水土保持局所建立之圖資，萃取研究範圍內土壤及土地利用資料供 AGNPS 模型參數輸入。

(三) SPOT 衛星影像

衛星影像採用 1999 年 4 月 1 日(地震前)法國 SPOT level 10 之衛星影像，萃取地表植物覆蓋因子(C)供 AGNPS 模式參數輸入。

(四) 雨量資料

採用經濟部水利署三義(2)、大湖(1)、卓蘭(2)、象鼻(1)及雙崎(2)等五雨量站 1960~2005 年雨量資料。

三、分析方法

(一) AGNPS 模型

AGNPS 為 1987 年由美國明尼蘇達州的污染控制局(MPCA)及美國農部(USDA)土壤保育中心(SCS)為分析集水區的水質和逕流而發展出來(Young et al., 1989)。AGNPS 模式是分布型參數模式，基本由水文、沖蝕、泥砂和營養物質輸送三部分構成。

水文模式主要利用美國發展的 SCS 曲線(Soil Conservation Service Curve Number)法計算逕流量及洪峰流量。沖蝕模式利用修正的通用土壤流失公式(RUSLE)加入坡型修

正因子(SSF)估算土壤流失量。營養物質輸送則是利用 CREAM 模式得出氮(N)、磷(P)及化學需氧量(COD)的模擬結果。彙整 AGNPS 模式使用的原理及方法，如表 1 所示：

(二) AGNPS 模式參數輸入

1. 集水區參數

- (1) 集水區識別：集水區之識別名。
- (2) 小區面積：每一網格之面積，本研究所用之網格為 40m×40m。
- (3) 小區總數：為分析網格之總數。
- (4) 降雨量：採用經濟部水利署測站三義(2)、大湖(1)、卓蘭(2)、象鼻(1)及雙崎(2)資料，依甘保氏極端值分布，求出 10 年頻率之最大日雨量為 424.18 mm。
- (5) 暴雨能量強度：由 AGNPS 模式依據所輸入之降雨延時(24hr)與降雨型態自動計算而得。

2. 小區參數

- (1) 小區編號：每一網格之編號。
- (2) 排水流向的小區編號：為各網格中逕流水排向之小區編號，集水區排水口所在之小區其排水流向編號必須比其它小區之編號要大。
- (3) 坡向：每一網格之坡向，利用軟體「集水區資訊系統(WinGrid)」之地形分析而得。
- (4) 逕流曲線值：推求直接逕流量所需之水文參數，為土壤之水文特性及土地使用種類之組合(表 2~表 4)。
- (5) 平均坡度：每一網格之坡度，利用軟體「集水區資訊系統(WinGrid)」之地形分析而得。
- (6) 坡型因子：有三種參數值，即凸型坡、均勻坡及凹型坡，本研究所切取之網格面積不大，以均勻坡來計算。

表 1 AGNPS 模式原理
Table 1. The model concepts of AGNP

AGNPS 演算方法	參考
地表逕流-逕流曲線法(CN)	USDA-SCS (1972)
尖峰流量	Smith <i>et al.</i> (1980)
逕流流速	Manning's equation (1889)
土壤流失 - 修正後 RUSLE	Wischmeier <i>et al.</i> (1978)
泥砂傳輸能力-溪流動力方程式	Bagnold (1966)
泥砂傳輸 - stationary 連續方程式	Foster <i>et al.</i> (1981)和 Lane (1982)
營養傳輸(N,P)	Frere <i>et al.</i> (1980)

資料來源：<http://grunwald.ifas.ufl.edu/Projects/AGNPS/agnps.htm>

表 2 逕流曲線數
Table 2. The summary of CN values for runoff simulation

*土壤水文特性 土地利用	A	B	C	D
建地	74	84	90	92
針葉林	25	55	77	77
地表水	94	93	95	96
旱田	62	71	78	81
公園、墓地	39	61	74	80
保安林	25	55	70	77
荒地	77	86	91	94
濕地	92	93	94	95
闊葉林	36	60	73	79
水田	70	79	84	88
果園	45	66	77	83
其他林地	38	62	74	80

註：*：土壤水文特性為土壤排水性及土壤質地之組合

資料來源：Dunne and Leopold, 1978

表 3 水土保持局土壤質地分類
 Table 3. The soil classification of the Soil and Water Conservation Bureau

分類	土壤質地
0	粗砂土、砂土
1	細砂土、壤質砂土、壤質粗砂土
2	壤質細砂土、粗砂質壤土、砂質壤土、細砂質壤土
3	極細砂土、壤質極細砂土、極細砂質壤土
4	坊質壤土、坊土
5	壤土
6	砂質黏壤土
7	黏質壤土、坊質黏壤土
8	坊質黏土、砂質黏土
9	黏土

資料來源：胡毓解，2004

表 4 水土保持局土壤分類對應之 SCS 土壤分類
 Table 4. The summary of soil classification vs. SCS soil classification recommended by the Soil and Water Conservation Bureau

台灣水土保持局	SCS
0、1、2、3	A
5、4	B
6	C
7、8、9	D

資料來源：胡毓解，2004

表 5 土地利用相關之參數參考表
 Table 5. The summary of landuse pattern and Manning's roughness coefficient

土地利用種類	森林	草地	果園	茶園	檳榔園	農地	建築用地	裸露地	水體
曼寧粗造係數 n	0.1	0.1	0.2	0.2	0.2	0.06	0.03	0.2	0.99

資料來源：夏禹九、陳萱蓉，2000

- (7) 坡長因子(漫地流之流路長度)：依照 AGNPS 手冊之說明，此值為該小區所屬單一坡面之坡長，即水流自頂端至集中處之長度，其最大值不超過 300ft。坡長因子(L)係以 Wischmeier 及 Smith(1965)對坡長因子 L 之建議，計算式為： $L=(1/22.13)^m$ ，式中 l 為地表漫地流之流長(m)， m 隨著坡地的坡度而改變。Wischmeier And Smith(1978)分析指出：當坡地坡度小於 1%時， $m=0.2$ ；當坡度介於 1%與 3%之間時， $m=0.3$ ；當坡度介於 3%與 5%之間時， $m=0.4$ ；而當坡度大於 5%時， $m=0.5$ 。地表漫地流之流長 l 乃是自地表逕流開始發生的地點量起算，至地面坡度減緩到沖蝕的土壤發生明顯淤積或至排放匯集逕流水之渠道為止，其間的水平投影距離。由於受到自然或人為之地面窪蓄、入滲等作用以及山溝、道路排水側溝等之截流，地表漫地流之流長甚少超過 100m。本研究之網格大小為 40m×40m，若以地表水流向為指標，累計流長在兩個網格大小以下者可視為漫地流，以此來估算集水區之坡長分布。
- (8) 曼寧粗糙係數：曼寧公式之 n 值，係依植生密度及種類有所不同(表 5)。(9) 土壤沖蝕性因子：為土壤內在特性所反應抗蝕能力之定量值，亦稱為土壤沖蝕率指數。採用萬鑫森、黃俊義(1981、1989)所調查之台灣坡地土壤沖蝕指數值，利用地理統計可求算台灣地區土壤沖蝕指數等值圖，本研究區域之土壤沖蝕指數值以克利金法(Kriging)內插計算求得。
- (9) 土壤沖蝕性因子：為土壤內在特性所反應抗蝕能力之定量值，亦稱為土壤沖蝕率指數。採用萬鑫森、黃俊義(1981、

1989)所調查之台灣坡地土壤沖蝕指數值，利用地理統計可求算台灣地區土壤沖蝕指數等值圖，本研究區域之土壤沖蝕指數值以克利金法(Kriging)內插計算求得。

- (10) 地表植物覆蓋因子(C)：利用植生指標之方法來考慮地表植物覆蓋因子，本研究以遙測衛星影像之常態化差異植生指標(NDVI)推估地表植物覆蓋因子，NDVI 為一標準常態化之指標，其計算方法如下所示：

$$NDVI = \frac{(NIR - R_b)}{(NIR + R_b)}$$

式中，NIR 為近紅外光波段； R_b 為紅光波段 NDVI值介於-1~1之間，其值小於零，屬非植生之雲層、水域及陰影等；值愈大時，代表地表植物生育愈旺盛、植被覆蓋佳(Burgan and Hartford, 1993)。將NDVI線性反向配置為地表植物覆蓋因子，其公式為 $C = (1 - NDVI) / 2$ 。

- (11) 水土保持措施因子：水土保持措施因子 P 值係指現有田間之耕作方式、措施或水土保持方法下與標準試區之土壤流失量之比值，本研究以最差之狀況(P=1)來評估。
- (12) 地表狀況常數：表示地表之另一參數，參考 AGNPS 使用手冊，將森林定為 0.59，果園定為 0.29，水域為 0。
- (13) 土壤質地：依土壤顆粒大小而概分為三類，即砂粒、粉粒及黏粒。
- (14) 施肥程度：依照農地施肥程度概分四級，分別為低，中，高及使用者自定，本研究將森林之施肥量定為低，果園定為高等級。
- (15) 肥料有效因子：肥料留存在表土之百分比。

- (16) 點源污染指標：區內是否有點源污染，以 0(無)與 1(有)表示，本研究區域為 0。
- (17) 蝕溝源程度：區內是否有蝕溝，以 0(無)與 1(有)表示。
- (18) 化學需氧量因子：依照區內土地利用狀況而分，森林之 COD 值以中等值 65 代入，果園以 170 代入，水域則為 0。
- (19) 積水地指標：區內是否有積水地，以 0(無)與 1(有)表示，本研究區域為 0。
- (20) 渠道指標：區內是否有渠道，以 0(無)與 1(有)表示。

(三) 最佳管理作業

考慮水庫集水區內農業行為對水庫水質影響甚鉅，又果園為集水區內主要農業土地利用型態，如何有效減少營養流失及控制農業排放污水，使其在環境所能承受的範圍內，為最重要的課題。

最佳管理作業係以最少成本，達到控制非點源污染的最佳效果。其中利用一些自然或人為的構造物，來控制非點源污染的方法，為結構性最佳管理作業；利用各種管理上的措施，如變更耕作方式等，則為非結構性最佳管理作業（胡毓解，2004）。

為維護水庫水質，延長水庫壽命，提出以下方案並以 AGNPS 模式加以模擬：

- 方案 0 集水區現況。
- 方案 1 陡峭區位（坡度 55%）以上農業用地皆回收轉換為林地。
- 方案 2 水系周邊配置 40 公尺緩衝帶。
- 方案 3 對崩塌裸露之地區進行植生復育。

AGNPS 模式參數輸入方面，三種最佳管理作業方案均為將選取區域之原有土地利用變更為林地，故在逕流曲線值、曼寧粗糙係數、地表植物覆蓋因子、地表狀況常數、施肥程度及化學需氧量因子等參數進行調整。

結果與討論

一、最佳管理作業配置

子集水區內所配置最佳管理作業如圖 7~9 所示。方案 1（陡峭區位農地回收）於子集水區所占面積約為 5.92 公頃，方案 2（水系周邊配置緩衝帶）所占面積約為 48.96 公頃，方案 3（崩塌地植生復育）所占面積約為 8.8 公頃，其崩塌地主要分布偏向上游之林班地。

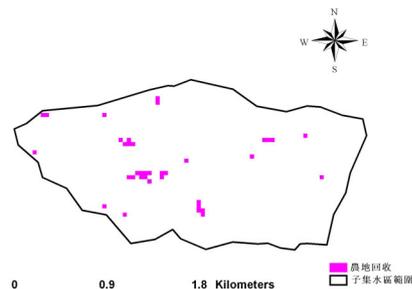


圖 7 陡峭區位農地回收

Fig. 7 The farmland retrieve areas at the steep slopeland

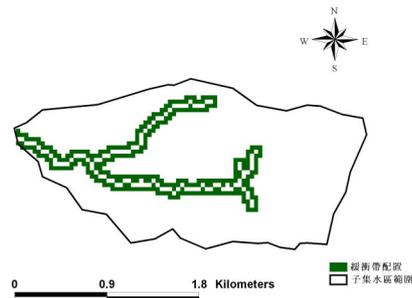


圖 8 水系周邊緩衝帶配置

Fig. 8 The placement of riparian buffer zone

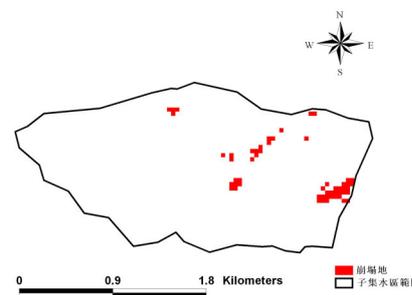


圖 9 崩塌裸露地植生復育

Fig. 9 The vegetation recovery for landslide areas

二、AGNPS 模式輸出結果

各方案經 AGNPS 模式模擬，結果如表 6。

表 6 AGNPS 模擬成果
Table 6. The simulation results in AGNPS

集水區現況	水系周邊配置緩衝帶 (改善效益)	崩場地植生復育 (改善效益)	陡峭區位農地回收 (改善效益)
逕流洪峰量(cms)	131.55	129.75 (1.37%)	130.73 (0.62%)
泥砂產量(ton)	1437.32	1127.78 (21.54%)	1417.62 (1.37%)
泥砂吸附總 N(kg/ha)	1.69	1.51 (10.65%)	1.67 (1.18%)
泥砂吸附總 P(kg/ha)	0.84	0.75 (10.71%)	0.83 (1.19%)

方案 1：

依據山坡地土地可利用限度分類標準，將坡度 55% 以上之土地利用變更為林地，相對於方案 0(集水區現況)，逕流洪峰減少 0.78%，泥砂產量減少 3.03%，泥砂吸附總氮減少 2.37%，泥砂吸附總磷減少 2.38%。其中泥砂產量的衰減較為明顯，而洪峰量也略微減少，說明農業行為的減少及林地的增加對集水區的正面影響。

方案 2：

陳尊賢、劉楨祺（1996）經由研究結果指出，僅需 10 公尺左右之森林緩衝帶，即可將大部分營養鹽截取滯留。但若有效截取各類營養鹽以確保水質不受影響，植生緩衝帶至少要 30 公尺以上。故將水系周邊配置 40 公尺緩衝帶，相對於方案 0（集水區現況），逕流洪峰減少 1.37%，泥砂產量減少 21.54%，泥砂吸附總氮減少 10.65%，泥砂吸附總磷減少 10.71%。其中泥砂產量及泥砂吸附的營養鹽衰減情形顯著，洪峰流量衰減率也較

方案 1 明顯，顯示水系周邊配置緩衝帶對集水區內的泥砂及營養鹽控制均有明顯的成效。

方案 3：

將崩場地進行植生復育，假設崩場地治理完成，植生覆蓋良好之情形，相對於方案 0（集水區現況），逕流洪峰減少 0.62%，泥砂產量減少 1.37%，泥砂吸附總氮減少 1.18%，泥砂吸附總磷減少 1.19%。其中泥砂產量的衰減較為明顯，而洪峰量也略微減少，顯示崩場地治理減少集水區洪峰、泥砂產量及營養鹽，對保全對象有正面影響。

整理各方案實施後之效益，如圖 10，結果顯示方案 2 改善效果遠大於方案 1 及方案 3；但最佳管理作業之構想為以最少成本達到控制非點源污染的最佳效果，而方案 2 所占面積大於方案 1 及方案 3，因此另行整理各方案單位面積的改善效率，如圖 11。觀察出方案 1 的各方面改善效益均大於方案 2 及方案 3；而方案 2 與方案 3 相比，方案 2 僅逕流洪峰改善效益略低，其餘效益亦大於方案 3。

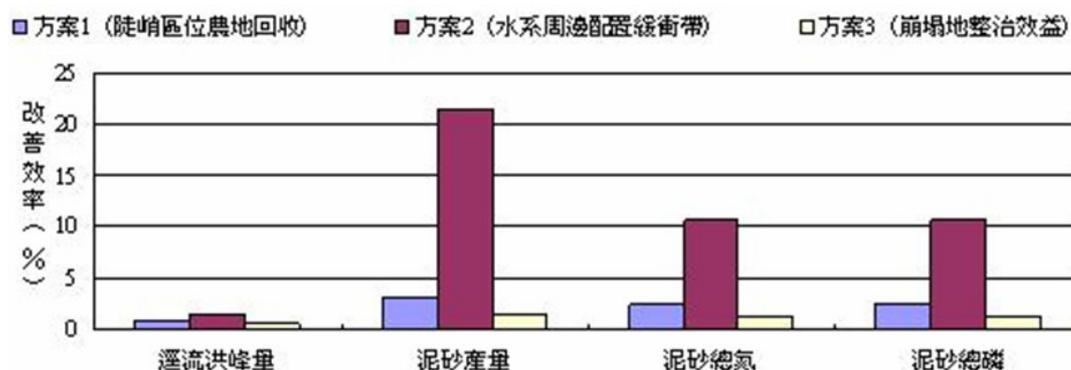


圖 10 最佳管理作業改善效率
 Fig. 10 The benefits result in different BMPs

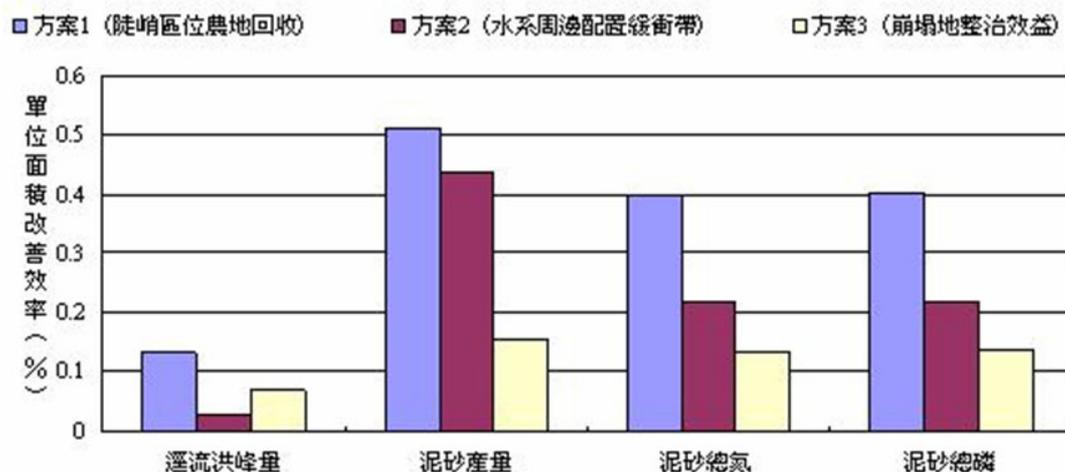


圖 11 最佳管理作業單位面積改善效率
 Fig. 11 The improvement percentage per unit area result in different BMPs

結論

臺灣地區降雨雖多，但因降雨分布不均及地形特性，仍有水資源匱乏的問題，故水庫的設置為調節水資源的重要方式，因此水庫的維護管理刻不容緩。水庫集水區內的天然災害及人為活動均會對水庫的壽命及水質造成影響，本研究利用 ANPGS 可推估營養鹽及泥砂產量的特性，嘗試對集水區進行最佳管理作業的配置，期望能尋求最好的效益供

管理者參考。

AGNPS 模式評估各種最佳管理作業成果，以鯉魚潭水庫集水區內上游坡度較陡峻，且發生崩塌之子集水區為例進行模擬。研究成果顯示農地回收為本研究三種最佳管理作業中可最有效降低集水區內逕流、泥砂產量及營養鹽傳輸之方案。

本文提出三種最佳管理作業以供參考，均能達到一定成效，若能針對水庫集水區提

出更多方案進行評估，應可找出更適合、更有效的方法來延長水庫壽命，並對水庫水質造成正面影響。

參考文獻

1. 胡毓解(2004)「農業非點源污染模式之應用—以萬安集水區為例—」。國立屏東科技大學水土保持學系碩士論文，p71-75。
2. 夏禹九、陳萱蓉(2000)，「農業非點源污染模式應用於河川保護帶配置之探討」，中華水土保持學報，30(1)：1-12。
3. 陳尊賢、劉楨祺(1996)，「施肥施用及河岸森林保護帶對翡翠水庫水質之影響」，計畫編號八四科技-2.9-糧-03(2-2)，pp1-12。
4. 萬鑫森、黃俊義(1981)，「台灣溪北部土壤沖蝕及流失量之估算」，中華水土保持學報，12(1)：57-67。
5. 萬鑫森、黃俊義(1989)，「台灣坡地土壤沖蝕」，中華水土保持學報，20(1)：17-45。
6. Burgan, R.E. and R.A. Hartford (1993), "Monitoring Vegetation Greenness with Satellite Data," USDA Forest Service Intermountain Research Station General Technical Report INT-297.
7. Dunne, T. and L.B. Leopold (1978), "Water in environmental planning," New York: WH Freeman.
8. University of Florida (2006)「Sabine Grunwald Soil and Water Sciences」，網址：
<http://grunwald.ifas.ufl.edu/Projects/AGNPS/agnps.htm>
9. Wischmeier, W.H. and D.D. Smith (1965), "Predicting Rainfall-erosion Losses from Cropland East of the Rocky Mountains," Agricultural Handbook 282, Agricultural Research Service, United States Department of Agriculture.
10. Wischmeier, W.H. and D.D. Smith (1978), "Predicting Rainfall erosion losses," Agricultural Handbook 537, Agricultural Research Service, United States Department of Agriculture.
11. Young, R. A., C. A. Otstad, D. D. Bosch, and W. P. Anderson (1989), "AGNPS: A Nonpoint-Source Pollution Model for Evaluating Agricultural Watersheds," J. of Soil and Water Conservation, 44(2): 168-173.

水土保持學報 38(2) : 195-206 (2006)
Journal of Soil and Water Conservation, 38(2) : 195-206 (2006)