

行政院國家科學委員會專題研究計畫成果報告

非點源污染控制補助方案之效益分析

Effectiveness of alternative subsidy policies for watershed non-point source pollution control

計畫編號：NSC 90-2211-E-009-019

執行期限：90年08月01日至91年07月31日

主持人：高正忠 國立交通大學環境工程研究所

計畫參與人員：胡嘉齡 國立交通大學環境工程研究所

一、中文摘要

水庫集水區污染控制一般採用最佳管理作業 (Best Management Practice, BMP) 來進行控制，然而由於實行 BMP 初期可能造成成本負擔或農產量減少，導致農民實施意願低，補助方案是鼓勵農民實行 BMP 的一個有效經濟誘因手段之一，唯一個適當的補助方案，除了能鼓勵農民實施 BMP 外，更需考量控制非點源污染之效率及公平性。本研究針對德基水庫集水區採用 AGNPS 模式模擬分析非點源污染負荷及不同 BMP 之效益，依所得結果及考量公平性指標、農民損失、農民總花費、補助比例、總磷污染負荷降低量、水庫淤積沈澱污染負荷降低量擬定補助全額損失、等成本補助比例、等總花費補助比例、等單位污染去除當量補助金額及等單位面積補助金額等五個補助方案，並建立混合整數規劃模式，用以分析比較不同方案之差異性、優劣點及成本、總磷、沈澱與公平性各目標間的折衷關係。結果顯示，補助全額損失方案的水質效益與公平性均接近最佳，等補助成本比例及等補助總損失比例方案之水質效益及公平性與補助全額損失方案差異不大。

關鍵詞：非點源污染、補助方案、環境系統分析

Abstract

Non-point source pollution (NPSP) generated from the upstream watershed of a reservoir can be effectively controlled by Best Management Practices (BMPs). However, at the initial stage of implementing a BMP for a cropland may cause extra cost load and decreasing harvest. Therefore, the farmer may be reluctant to adopt the BMP. Subsidy is one of effective strategies to encourage the farmer to adopt a proper BMP. An appropriate subsidy policy, in addition to encouraging the farmer to adopt a proper BMP, should be fair and effective in reducing NPSP. This study applied the AGNPS model to simulate NPSP loading and BMP efficiencies. Four indexes for evaluating equity were established based on four subsidy rates of loss, BMP cost, total cost (loss+cost), and pollution

reduction equivalence unit, respectively. Five subsidy policies of subsidy of loss (SL), uniform cost sharing rate (UCSR), uniform total cost sharing rate (UTCSR), fixed subsidy per pollution reduction equivalence unit (FSPREU), and fixed subsidy per unit area (FSUA), were proposed based on the equity indexes, loss, BMP cost, and BMP effectiveness in reducing NPSP. A mixed-integer programming model was developed for evaluating the effectiveness of each subsidy policy in terms of cost, phosphorus and sediment reduction, and equity. The watershed of the Derchi reservoir located in central Taiwan was the area studied. The proposed policies and model were applied to the watershed. The result shows that the SL policy has best water quality efficiency with a proper level of equity. The UCSR and UTCSR policies perform slightly, but not significantly, worse than the SL policy.

Key words: nonpoint source pollution, subsidy, environmental systems analysis.

二、緣由與目的

台灣地區水庫集水區由於受到過量的氮、磷營養鹽進入水庫內，使得集水區內污染量大增，而這些污染物大都屬於非點源污染。水庫集水區的非點源污染控制一般採用最佳管理作業 (Best Management Practice, BMP) 來進行控制 [1]，在農地上實行 BMP，雖然長時間來說對農民及整體環境而言是有益的，但在實施時，農民除須負擔 BMP 成本外，且可能造成農作物產量減少之情況 [2]，而為鼓勵農民自願實行 BMP，補助方案是一個有效的策略 [3]，因此如何訂定適當地補助方式是誘導農民自願在農地上實行 BMP 的一個重要因素。

理想的補助方案，是希望同時達到削減污染以淨化水質、農民接受度高、公平性及容易實施的目的，Park and Sawyer [4] 及 Park and Monteith [5] 所提出的補助方案模式考慮到農地和 BMP 的最小補助比例及沈澱污染去除量，但並未考慮農民損失和總磷污染量的部份，且其所提出的補助方案較複雜，決策單位不易推行；Kozloff et al. [6] 指出補

助金額要大於單位面積所定的補助金額(RP, reservation price)，若在低污染負荷的地區，成本效益顯著降低；而這些研究都未考慮到公平性的問題，一般而言，公平性高的策略較易推行 [7]；此外，這些非點源控制策略相關之研究中大部分只考慮沈澱 [8]；[9]；[10])，並未考慮到水質部份，然而以沈澱為管制目標分析所得的結果，可能對水質不見得有相同效果，台灣地區受優養污染的水庫中，一般以磷為藻類生長的主要限制因子，故有必要將總磷削減效益列入管制目標及優選模式中，以作為評估補助方案的一項重要因子。

基於上述需求，本研究提出補助金額與農民實行 BMP 後的損失比例相當、補助金額與 BMP 的成本比例相當、補助金額與農民總花費(BMP 的成本+農民實行 BMP 後的損失) 比例相當、補助金額與污染去除當量比例相當四個公平性指標，並根據公平性指標及依 AGNPS [11] 模式模擬分析非點源污染負荷及不同 BMP 之效益所得結果，考量農民損失、農民總花費、補助比例、沈澱污染負荷、總磷污染負荷等因子，擬定補助全額損失、等成本補助比例、等總花費補助比例、等單位污染去除當量補助金額及等單位面積補助金額等五個補助方案，進而建立混合整數規劃優選模式，並以補助金額、公平性、總磷污染負荷降低量、水庫淤積沈澱污染負荷降低量等目標評估方案之差異性及優劣點，期望達到削減污染以淨化水質、農民接受度高、公平性且容易實施的目的，並進一步探討成本、總磷與沈澱各目標間之折衷(Trade off)關係。

本研究案例區德基水庫集水區位於台灣中部大甲溪的上游，主要供應大台中地區飲水和工業用水，集水區面積 601.61 平方公里，蓄水量約 2.5x 10⁸ 立方公尺；集水區內的土地利用主要以果園居多，約佔 2,620 公頃，大量的沈澱和營養鹽進入水體，總磷濃度在 40 ~ 140 ppb 間，依陳 [12] 分析屬於優養狀態，淤積量依陳等 [13] 推估為 1.674 x 10⁶ 立方公尺/年，總磷負荷依陳 [12] 為 40,734 公斤/年，有必要採取適當管制策略以改善水質，本研究將針對此案例區，建立所發展的模式，並依據案例區資料模擬分析不同補助方案下之水質效益、公平性、成本等因子之差異性，以期提供適當地資訊供決策者決定適當地補助方案。本研究管理單位為土地管理群單位(Group Land Management Unit, GLMU)，乃採用類似陳 [12] 的方法，GLMU 乃是結合蔡 [14] 之子集水區分區管制及 Bouzaher et al.([9]；[10])之 LMU 觀念，將同一子集水區之相同作物依同樣之補助原則而區分。

三、模式

非點源污染模擬

補助方案之可能成效需依非點源污染減少量來評估，本研究採用 AGNPS 3.65 版模式 [11] 來模擬不同 BMP 下非點源污染之流布，以作為評估各方案污染減量效率之依據。本研究運用此模式以

推估不同 GLMU 產生的磷和沈澱非點源污染負荷量。

BMP 選擇及效益分析

選擇適當的 BMP 可有效的降低逕流所帶來的污染負荷以達到削減非點源污染，本研究 BMP 之選擇主要依據污染削減的能力、經濟效益、案例區土地利用與農作物(主要為果園及菜園)及國內相關研究[15]等選擇較為適用的五種 BMPs：植草、平台階段、草帶、平台階段+草帶、草溝。

公平性指標

一般而言，公平性高的策略較易推行(Kao and Tsai, 1997)，然而觀點不同時，公平性之定義亦會隨之不同，為了比較不同方案之公平性程度，本研究基於補償、補助及污染去除效率等基準，提出了四種公平性指標，包括 (1) 補助金額與農民實行 BMP 後的損失比例相當 (EISRL)；(2) 補助金額與 BMP 的成本比例相當 (EISRBC)；(3) 補助金額與農民總花費(BMP 的成本+農民實行 BMP 後的損失) 比例相當 (EISRTC)；(4) 補助金額與污染去除當量比例相當 (EISRPRE)。

補助方案

補助方案必需根據地區之特性建立，且為將方案能順利推廣，亦不宜太過複雜，因而本研究根據德基水庫等集水區特性、現有的資料及上述四個公平性指標，建立考量農民損失、農民總花費、BMP 補助比例、污染去除當量與較易推行的五個補助方案：

- (1) 補助全額損失:此方案令補助金額都等於 BMP 對 GLMU 所造成的損失，是根據上述 EISRL 公平性指標所建立的，此方案類似 Kozloff et al.(1992) 所提出的 RPOFF(offers match reservation price)方案，由於實行 BMP 初期可能造成農作物產量減少，導致農民實施意願低，因此本研究將 RP 修改成農民損失，希望藉由此方案達到公平性、改善水質及提高農民意願的目的。
- (2) 等成本補助比例:此方案令每種 BMP 成本補助比例都相等，是根據上述 EISRBC 公平性指標所建立的，Park and Sawyer (1987)及 Park and Monteith (1989)曾提出一個基於 BMP 的最小補助比例的方案，但其提出的方案較為複雜，不易實施，因此，本研究採用單一補助比例，較簡單且易於實施。
- (3) 等總花費補助比例:此方案令每種 BMP 總花費的補助比例都相等，是根據上述 EISRTC 公平性指標所建立的，此方案類似 Park and Sawyer (1987)及 Park and Monteith (1989)的最小補助比例的方案，不過其未考慮到農民損失，因此本研究結合農民損失和 BMP 的成本，希望能適當補償農民總花費，以提高農民意願。

- (4) 等單位污染去除當量補助金額:此方案之補助金額是以每一 GLMU 的單位污染去除當量補助固定金額,是根據上述 EISRPRE 公平性指標所建立的,此方案原由 Park and Sawyer (1987) 所提出,但其污染量只考慮沈澱,忽略了總磷,因此本研究同時考慮沈澱及總磷污染負荷量,提出污染去除當量(Pollution Reduction Equivalent, PRE),其定義如下:

$$PRE = 10^7 \times [w_1 \times (S_{lc} / COST_{lc}) / \text{MAX}(S_{lc} / COST_{lc}) + w_2 \times (P_{lc} / COST_{lc}) / \text{MAX}(P_{lc} / COST_{lc})]$$

其中 S_{lc} 是指第 l 個 GLMU 下第 c 種 BMP 的沈澱去除量(噸)、 $COST_{lc}$ 是指第 l 個 GLMU 下第 c 種 BMP 的成本(元)、 P_{lc} 是指第 l 個 GLMU 下第 c 種 BMP 的總磷去除量(公斤)。 w_1 及 w_2 為權重且 $w_1 + w_2 = 1$ 。經由不同組合的(w_1, w_2)權重值,採用下一節所述之優選模式分析,可發現當 $w_1 = 0.7$ 及 $w_2 = 0.3$ 時之沈澱與總磷之去除效率最佳,故本研究採用此組權重作為計算 PRE 之依據。

- (5) 等單位面積補助金額:此方案令單位面積補助金額固定,類似 Kozloff et al. (1992) 所提出的 reservation price(RP)的定義,雖未考量不同 GLMU 之 BMP 成本及造成的損失,但此方案簡單易實施,若其能達到決策者所期望的水質效益且不致太不公平時,此方案不失為一個好方案。

以上五種補助方案,均假設補助金額都須大於農民的損失,且希望由對下游污染負荷量最大的先補助。

優選模式之建立

為了分析四個方案,本研究所建立混合整數規劃模式,通式如下:

$$\text{Max} \sum_{l=1}^L \sum_{c=1}^C S_{lc} x_{lc} \quad (\text{去除沈澱污染負荷})$$

$$\text{Max} \sum_{l=1}^L \sum_{c=1}^C P_{lc} x_{lc} \quad (\text{去除總磷污染負荷})$$

$$\text{Min} \sum_{l=1}^L u_{li} + v_{li} \quad (\text{公平性指標和})$$

S.T.

$$x_{lc} \in \{0,1\}$$

$$\sum_{c=1}^C x_{lc} = 1 \text{ for } l=1, \dots, L \text{ and } c=1, \dots, C$$

$$\sum_{l=1}^L \sum_{c=1}^C (\text{OFFER}_{lc}) (x_{lc}) \leq \text{BUDGET}$$

$$[\sum_{c=1}^C (E_{ilc}) (x_{lc})] - u_{li} + v_{li} = e_{i,ave} \text{ for } l=1, \dots, L$$

$$e_{i,ave} = \frac{\sum_{l=1}^L \sum_{c=1}^C (E_{ilc}) (x_{lc})}{L}$$

$$(\text{OFFER}_{lc} - \text{LOSS}_{lc})(x_{lc}) \geq 0 \text{ for } l=1, \dots, L, \text{ and } c=1, \dots, C$$

$$(\text{COST}_{lc} + \text{LOSS}_{lc} - \text{OFFER}_{lc})(x_{lc}) \geq 0 \text{ for } l=1, \dots, L, \text{ and } c=1, \dots, C$$

其中, l 為集水區的土地管理群單位(GLMU)代號,共有 $L=41$ 個; c 為 BMP 的種類,共有 $C=6$ 個; x_{lc} 為 0,1 的決策變數,決定網格是否要採取 BMP; S_{lc} 為第 l 個 GLMU 實施第 c 種 BMP 沈澱的去除量; P_{lc} 為第 l 個 GLMU 實施第 c 種 BMP 總磷的去除量; i 為公平性指標編號,共有 $I=4$ 個, u_{li}, v_{li} 為第 l 個 GLMU 之第 i 種公平性指標距平均值之正負偏離量; OFFER_{lc} 為第 l 個 GLMU 實施第 c 種 BMP 補助農民的經費; BUDGET 為補助預算; E_{ilc} 為第 l 個 GLMU 實施第 c 種 BMP 之第 i 種公平性指標; $E_{i,ave}$ 為第 i 種公平性指標之平均值; LOSS_{lc} 為第 l 個 GLMU 實施第 c 種 BMP 之農民損失; COST_{lc} 為第 l 個 GLMU 實施第 c 種 BMP 所須負擔的成本。

上述目標式分別為沈澱與總磷去除量之目標式及為公平性的目標式,以偏離平均值之差異量表示公平性程度。限制條件中則分別為限制每一個 GLMU 只能採取一項 BMP 方案、補助總金額須小於預算、計算公平性指標距平均值之正、負偏離值、限制補助金額要大於農民的損失、限制補助金額須小於農民總花費。

四、結果與討論

四個公平性指標下,五種補助方案中,發現沈澱去除率與補助金額,可以看出 SL 方案在四種公平性指標及 70% 去除效率下,其所須的補助金額為五種補助方案中最少的,大約在 14 億元左右;其次為 UCSR 及 UTCSR 方案,兩者所須的補助金額相差不多,均略高於 SL 方案。FSPREU 與 FSUA 方案在 EISRL - EISRTC 指標下,兩者所需的補助金額在去除率 70% 以下為 FSUA 方案略少於 FSPREU 方案,超過 70% 後有逆轉的趨勢,大致上來說兩者均相差不多,但明顯的多於 SL、UCSR 與 UTCSR 方案。由研究中,可以發現出 FSUA 方案在 EISRPRE 指標及 70% 的污染去除率下,其所需的補助金額明顯小於 FSPREU 方案,大約少了 5 億元,但在污染去除率達 80% 時,兩者所需的補助金額又呈現差不多的趨勢,但均多於 SL、UCSR 與 UTCSR 方案。由以上可知,五種補助方案在四種公平性指標下,其沈澱水質效益大致上為 $SL > UCSR \approx UTCSR > FSUA \geq FSPREU$ 。

整體來說,在四個公平性指標下,總磷污染去除率達 70% 時,SL 所需的補助金額為最少的,大約在 10 億元左右;而 UCSR、UTCSR 與 FSUA 方案在四個指標下,總磷污染去除率達 70% 時,其所需的補助金額均相差不多,但其中 UCSR 方案在 EISRL 與 EISRBC 指標下,所需的補助金額略少於 UTCSR 與 FSUA,FSUA 方案在 EISRPRE 指標下,其所需的補助金額由略多於 UCSR 與 UTCSR 方案,在污染去除率超過 70% 後,逆轉為所需補助金額少於 UCSR 與 UTCSR 方案;FSPREU 方案在四個公平性指標下,總磷污染去除率達 70% 時,所需的補助金額都為最多的。由以上所知,五種補助方案在四種公平性指標及去除率達 70%

下，其總磷水質效益大致為 $SL > UCSR \geq UTCSR \approx FSUA > FSPREU$ 。

在四個公平性指標下，五種補助方案之公平性與總磷去除率，個別來說，依據各指標所提出的各方案，其公平性未能最佳的原因和前述均相同；整體來說，SL、UCSR 與 UTCSR 方案在 EISRL、EISRBC 與 EISRTC 公平性指標下，其公平性指標和大致隨著污染去除率增加而減少，顯示其公平性有越來越佳的趨勢，在去除率為 70% 時，三方案之公平性幾乎處於最佳，由於公平性指標定義不同的關係，使得每一指標下公平性最佳之方案都不同，在 EISRL 指標下，公平性最佳的為 SL 方案，在 EISRBC 指標下最佳的為 UCSR 方案，在 EISRTC 指標下最佳的為 UTCSR 方案，但在三個指標下，其餘兩方案的公平性程度和最佳的均相差不多；而 FSPREU 與 FSUA 方案，在 EISRL、EISRBC 與 EISRTC 指標下，在去除率為 70% 時，其公平性指標和與 SL、UCSR 與 UTCSR 方案相比，均有很大的差距，顯示兩者的公平性均不佳。SL、UCSR、UTCSR 與 FSUA 方案之公平性指標和大致上隨著污染去除率提高而升高，顯示其公平性有越來越差的趨勢，但 SL 方案之公平性在 EISRPC 指標下為最佳的，其次為 UCSR 與 UTCSR 方案，FSUA 方案之公平性為最差；而 FSPREU 方案之公平性指標和在污染去除率接近 70% 時驟降，使得其公平性指標和在去除率超過 70% 後接近 UCSR 與 UTCSR 方案。由以上可知，五種補助方案在四種公平性指標及總磷去除率達 70% 下，其公平性大致為 $SL \geq UCSR \approx UTCSR > FSPREU > FSUA$ 。

根據本研究的模擬結果，可得到以下結論：SL 的補助方案，其水質效益最佳及公平性接近最佳，其預算在 10 至 15 億元時，其污染去除率可達到 70%。UCSR 與 UTCSR 方案，其水質效益及公平性都和 SL 方案均差異不大，建議 UCSR 方案預算為 15 億元時，每 GLMU 之成本補助比例為 40% 至 45%，UTCSR 方案預算為 15 至 20 億元，每 GLMU 之總損失補助比例為 30% 至 40%，其污染去除率可達到 70%。

五、成果自評

本研究針對 BMP 補助方案建立了一個優選分析模式，並以四個指標及五個方案作分析，所得結果相信可改善補助方案之擬定，所採用之方法及模式雖然是針對台灣中部德基水庫集水區而建立，但方法及模式亦可用於其他集水區，不過相關模式參數必須修正。唯非點源模式 AGNPS 的本土適用性尚不佳，此部分有賴發展本土化的模式來解決，亦將是未來研究的主要目標之一。

六、參考文獻

- [1] U.S. EPA. (1991). *EPA Guidance for Water Quality-based Decisions: The TMDL Process*, EPA 440/4-91-00.
- [2] 陳慶雄、徐森雄、黃俊德、吳嘉俊、謝杉舟、

黃國禎 (85 年)，水土保持處理對陡坡果園水土流失及果樹生長勢之影響(二)，85 年度水土保持及集水區經營研究計畫成果匯編，85 科技-1.11-林-08(1-1)之 4，129-142。

- [3] Featherstone, A. M., Goodwin, B. K. (1993). "Factor Influencing a Farmer's Decision to Invest in Long-term Conservation Improvements," *Land Economics*, 69(1), 67-81.
- [4] Park, W. M., and Sawyer, D. G. (1987). "Cost Effectiveness of Alternative Subsidy Strategies for Soil Erosion Control," *Southern Journal of Agricultural Economics*, December, 21-32.
- [5] Park, W. M. and Monteith, S. E. (1989). "Cost-effectiveness of the variable cost-sharing option in the Agricultural Conservation Program", *Journal of Soil and Water Conservation*, March-April, 173-176.
- [6] Kozloff, K., Taff, S. J., and Wang, Y.,(1992). "Microtargeting the Acquisition of Cropping Rights to Reduce Nonpoint Source Water Pollution," *Water Resour. Res.*, 28(3), 623-628.
- [7] Kao, J.-J., and Tsai, C.-C. (1997). "Multiobjective Zone TP Reduction Analysis for an Off-stream Reservoir," *J. Water Resources Planning and Management*, 123(4), 208-15.
- [8] Tice, T. F. and Epplin, F. M., (1984). "Cost-Sharing to Promote Use of Conservation Tillage," *Journal of Soil and Water Conservation.*, November-December, 395-397.
- [9] Bouzaher, A., Braden, J. B., and Johnson, G. V. (1990). "A Dynamic Programming Approach to a Class of Non-point Source Pollution Control Problems," *Management Science*, 36(1), 1-15.
- [10] Bouzaher, A., Braden, J. B., Johnson, G. V., and Murley, S. E. (1994). "A Efficient Algorithm for Non-point Source Pollution Management Problems", *J. Operational. Res. Soc.*, 45(1), 39-46.
- [11] Young, R. A., Onstad, C. A., Bosch, D. D., and Anderson, W. P. (1987). *AGNPS: Agricultural Non-Point-Source Pollution Model: A Watershed Analysis Tool*, Conservation Research Report No. 35, USDA, Washington, DC.
- [12] 陳威仲 (86 年)，寶山水庫非點源污染控制多目標模式之建立，國立交通大學，碩士論文。
- [13] 陳秋揚、陳伯中、王敏昭、林昭遠、陳慶和、林基烈、洪惠祥、王廷哲 (85 年)，德基水庫集水區第三期整體治理計畫水質監測與管理，經濟部水資源局，85-EC-2B-370022。
- [14] 蔡政賢(82 年)，多目標非點源污染總量管制策略分析—以寶山水庫的總磷管制為案例，國立交通大學，碩士論文。
- [15] 范正成、張尊國、鄭克聲、劉文堯、林冠宇(87 年)，非點源污染調查及最佳管理作業之功能研究—農業用地非點源污染調查及最佳管理作業之研究(二)，行政院環保署，EPA-87-EISRTCG1-03-07。