

翡翠水庫蓄水範圍保護帶設置對水庫水質改善影響

王佳偉^[1] 陳起鳳^[2] 林鎮洋^{[1]*}

摘要 翡翠水庫係為大臺北地區民生用水重要來源，其污染來源以非點源污染為主。保護帶設置為非點源污染最佳管理作業 (BMP)，也是目前翡翠水庫管理策略之一。本研究應用地理資訊系統 (GIS) 以及暴雨管理模式 (SWMM)，模擬保護帶 (Buffer Strips) 設置後對翡翠水庫集水區非點源污染削減量，模擬水質項目包含懸浮固體 (SS)、總磷 (TP) 及生化需氧量 (BOD)。研究結果顯示，在蓄水範圍四周設置 50 公尺保護帶時，設置保護帶的子集水區 SS 輸出削減率超過 80%，TP 削減率超過 50%，BOD 削減率達到 70%。另外利用 Vollenweider 模式模擬保護帶設置對水庫水質影響，此總磷削減率最高可達 6.1%。若以水庫總磷濃度 10 $\mu\text{g/L}$ 為目標值，則集水區總磷污染量尚需削減 19.0%~22.2%。設置 50 公尺保護帶可削減總磷每年約 800 公斤，佔目標削減量 1/3~1/4。除了設置保護帶外，尚需透過其他非點源污染控制措施才能達到此削減量。

關鍵詞：保護帶、SWMM、Vollenweider 模式、非點源污染。

Effects of Buffer Strips on Reducing Nonpoint Source Pollution and Improving Water Quality in Feitsui Reservoir

Chia-Wei Wang^[1] Chi-Feng Chen^[2] Jen-Yang Lin^{[1]*}

ABSTRACT The Feitsui reservoir is the drinking water source for the Taipei metropolis, and nonpoint source pollution in this reservoir has been considered as an important issue. Buffer Strips are one of the best management practices (BMPs) and are used in Feitsui reservoir management. In this study, we integrate geographic information systems (GIS) and Stormwater Management Model (SWMM) to assess the effects of buffer strips in Feitsui reservoir. The major water quality items contain suspended solids (SS), total phosphorus (TP) and biochemical oxygen demand (BOD). The results show placing buffer strips 50 m in width around the reservoir can reduce 80% of SS, 50% of TP, and 70% of COD for the subwatersheds with buffer strips. In addition, the Vollenweider model is utilized to assess water quality in the reservoir and the results show that a 19-22% pollution reduction rate is required to achieve the goal of 10 $\mu\text{g/L}$ of TP. Buffer strips 50m in width contributed 1/3-1/4 reduction loads, which is 800 kgTP/yr. In addition to buffer strips, more BMPs are necessary in the watershed management of Feitsui reservoir.

Key Words : Buffer strips, SWMM, Vollenweider model, Nonpoint Source Pollution.

一、前言

翡翠水庫提供大臺北地區自來水用水，確保水庫集水區內各項污染控制、水質改善為主管機關的重要任務。各種集水區管理策略中，保護帶的設置被視為理想的策略之一。保護帶屬於「最佳管理作業」(Best Management Practice, BMP) 的一種，任何對非點源污染有效之控制方法及措施皆以「最佳管理作業」稱之，「最佳」是旨「經濟而有效」之意 (余嘯雷等, 1993)。佛羅里達中南部的 Okeechobee 湖及其集水區自 1980 年起實施最佳管理作業後，有效減少集水區總磷負荷量，Okeechobee 湖中的總磷濃度有下降的趨勢 (Anderson and Fling, 1995)。在

美國 LaPlatte River 集水區所實施的各項最佳管理方案中，設置植生緩衝帶能減少地表逕流中 92% 的總懸浮固體、86% 的總磷及 83% 的凱氏氮 (Meals, 1996)。

保護帶即植生過濾帶，基本定義泛指位於潛在之非點源污染與承受水體間，藉由天然植被或人工栽植方式，以減緩暴雨產生之漫地流 (overland flow) 並從逕流中攔截泥砂、營養鹽、農藥等 (林昭遠, 1998; Correll, 2005; O'Driscoll et al., 2014)。其植生過濾帶功能可有效削減非點源污染之外，對於濱水岸生態保育、提供棲地廊道營造生物多樣性、涵養水源、固結土壤、邊坡穩定、攔阻泥砂、過濾有毒物質與營養鹽等緩衝作用皆有良效 (林信輝, 2006)。Chang et al. (2010) 利用淨

[1] 國立臺北科技大學土木工程系
Department of Civil Engineering, National Taipei University of Technology, Taipei, Taiwan.

[2] 中國文化大學土地資源學系
Department of Natural Resources, Chinese Culture University, Taipei, Taiwan.

* Corresponding Author. E-mail: jylin@ntut.edu.tw

現值法分析翡翠水庫集水區設置河岸緩衝帶的成本效益，經過多個方案比較發現設置寬度為 30 公尺及坡度 5% 之河岸緩衝帶有最佳的成本效益。根據水土保持法第 20 條規定，經劃定為特定水土保持區之水庫集水區，其管理機關應於水庫滿水位線起算至水平距離 30 公尺至 50 公尺範圍內，設置保護帶，進而改善水庫水質。

早期單一功能的保護帶評估模式需額外計算入流的水質或泥砂，再輸入模式中模擬出流結果。雖然可模擬較精細的保護帶設計，但屬於單一場址的保護帶效益，無法應用於整個集水區。植生過濾帶對單一場址的污染去除效果已有相當多的研究討論，並有滿足預期的削減效果。但對於大範圍的水庫集水區，保護帶的設置對集水區非點源污染控制，以及對整體水庫水質的改善效果，仍須仰賴模式評估。因此，合適本研究的工具，必須具有集水區模擬功能以及保護帶模擬功能，才能完整評估翡翠水庫集水區內實施保護帶的污染削減效益。余嘯雷 (1993) 整理非點源污染模式比較表，其中 WinVAST、AGNPS 及 VANTU 僅能模擬單場降雨事件，BASINS/HSPF 及 IWMM-TC 需要的資料量極高。黃賢銘 (2005) 應用 WinVAST 模式模擬在不同降雨特性下，並配合不同的降雨型態，探討懸浮固體物污染物的去除效率。翁麗容等 (2009) 使用 SWAT 模式中的保護帶經驗公式，模擬石門水庫植生保護帶對懸浮固體物的削減效果。Chen et al. (2014) 使用 SWAT 模式模擬位於中國長江下游集水區，研究結果證實在農業區設置保護帶，可以透過攔截和吸收營養鹽明顯減少水污染。上述保護帶模擬工具多屬集水區模式，可模擬非點源污染產生量以及經過保護帶後的削減量，但若進一步欲了解保護帶設置對承受水體的水質影響，就須結合水體模式。Kuo et al. (2003) 使用二維橫向平均有限差分水動力和水質模式模擬翡翠水庫水質，模擬結果顯示當總磷減少 50% 時，翡翠水庫水質從普養轉變為貧養狀態。Chou et al. (2007) 使用 Vollenweider 模式模擬翡翠水庫，若達貧養狀態，每年平均需減少 37% 的總磷污染負荷量。SWMM (Storm Water Managment Model) 模式具有完整水文水利理論架構，近年又加上可模擬 BMP/LID (Low Impact Development) 設施的模組。因此本研究考慮模式版權、人機介面有善度、能掌握模擬計畫區及能達成本研究水質管理之目的等特性，結合集水區模式以及水庫模式，討論保護帶設置對最終水庫水質的影響變化。本研究分為二階段進行模擬，第一階段應用 SWMM 模式模擬整個集水區的非點源污染輸出量，並利用其中的 BMP/LID 模組，評估保護帶實施後對非點源污染削減率。第二階段將前開模擬結果結合 Vollenweider 模式，模擬保護帶設置後對水庫水質改善成效。此研究整合集水區模式與水庫水質模式做整體性評估，可提供水庫管理者決策分析參考。

二、研究方法與研究區域概述

1. 研究方法

為了解翡翠水庫蓄水範圍水平距離 50 公尺內保護帶範圍，本研究向經濟部水利署地理資訊倉儲中心申請取得水庫蓄

水範圍數位化圖層資料作為保護帶劃設範圍之依據，再利用 ArcGIS 地理資訊系統，分別對蓄水範圍圖層進行環域分析，建立翡翠水庫保護帶範圍。

評估集水區於暴雨時期所產生之非點源污染量部分，先應用 BASINS (Better Assessment Science Integrating point and Non-point Sources) 系統建立集水區幾何特性資料，包含集水區劃分、坡度計算、面積計算等，再將數位化的集水區特性輸入 SWMM 模式，進行集水區水文與水質模擬。本研究模擬三種非點源污染水質項目分別為懸浮固體 (SS)、總磷 (TP) 及生化需氧量 (BOD)，並根據臺北翡翠水庫管理局所提供之氣象、雨量、水文及水質等各項監測資料，進行集水區水文及水質參數率定 (calibration) 與驗證 (verification)。

經率定驗證後之 SWMM 模式，利用其 LID 模組模擬設置保護帶後對非點源污染削減率，最後再應用 Vollenweider 模式，模擬保護帶設置後水庫總磷濃度變化。本研究流程如圖 1 所示。

BASINS 集水區管理系統具有整合地理資訊系統 (GIS)、集水區資料庫、及多種水質模擬評估工具之特性，且國內曾有多數案例採用 BASINS 模式進行研究，本研究採用 BASINS 集水區管理系統作為環境資料庫之整合系統及子集水區劃分之工具，將翡翠水庫集水區劃分為 43 個子集水區。而 SWMM 模式是一套動態降雨逕流模擬模式，可經由單一或長期水文連續事件的降雨來模擬集水區內的逕流傳輸現象。近年來因為 LID 的推廣，因此美國環保署發展的 SWMM 模式，於 2009 年改版後，加入 LID 模組模擬功能，即包括草溝草帶等源頭水質水量控制單元，因同時具有集水區模擬以及控制設施污染

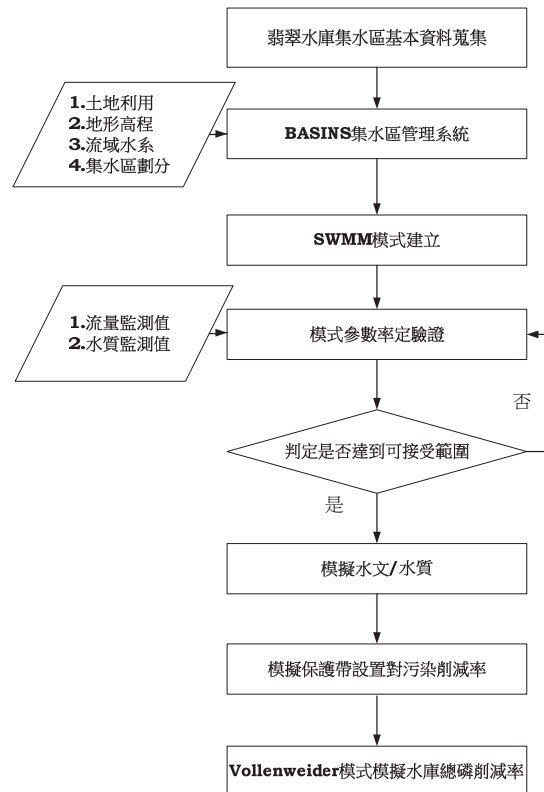


圖 1 研究流程圖

Fig.1 The research flow chart

削減, 因此本研究將採用 SWMM 作為保護帶實施效益評估工具。但 SWMM 需要資料量龐大, 所以利用前述 BASINS 集水區管理系統, 整理所需要之集水區特性及土地利用等地理資訊資料。

在 Vollenweider 模式部份, 假設湖泊水庫內磷的時間變化量等於進到水體的量扣除損失量, 損失量考慮沉降量與隨出流流出量。進到水庫的磷假設為完全混和, 出流磷的濃度與水庫中磷的濃度相同, 經沉降損失的磷量與水庫磷濃度成比例關係, 不考慮水文以及磷負荷的季節變化。其計算式為:

$$\frac{\Delta PV}{\Delta t} = M - (P \times Q) - (PV \times \sigma) \quad (1)$$

式 (1) 中, PV 為水庫總磷重量 (g), P 為總磷濃度 (gm^{-3}), V 為水庫體積 (m^3), t 為時間, M 為年總磷輸入量 (g/yr), Q 為年水流出量 (m^3/yr), σ 為磷沉降係數 (yr^{-1})。假設 steady-state 計算式為:

$$\frac{\Delta PV}{\Delta t} = 0 \quad (2)$$

$$P = \frac{M(1 - R_p)}{Q} \quad (3)$$

$$R_p = \frac{v}{v + q_s} \quad (4)$$

式 (4) 中, R_p 為磷沉降損失的比例 (無因次), q_s (m/yr) 為進到水庫的水量/水庫表面積, v 為沉降速度 (m/yr), 此值需透過率定驗證求得。

2. 研究區域概述

翡翠水庫集水區位於臺灣北部新店溪上游, 集水區面積約 303 平方公里; 集水區內主流為北勢溪、支流為火燒樟溪、後坑子溪、金瓜寮溪、姑婆寮溪、逮魚堀溪及灣潭溪。翡翠水庫集水區之水系分佈圖如圖 2 所示。

翡翠水庫集水區內之氣象及水文測站如圖 3 所示, 集水區內設有綜合氣象站共 1 處 (水庫管理局辦公室) 及雨量站共 6



圖 2 翡翠水庫集水區水系分佈圖
Fig.2 The watershed boundary and river system of Feitsui Reservoir

處 (翡翠、坪林、十三股、九芎根、碧湖、太平), 綜合氣象站提供風速、風向、溫度、氣壓、蒸發量及相對溼度等氣象資料; 流量及水位測站共 3 處 (坪林、金瓜寮溪、逮魚堀溪); 集水區內水質採樣站如圖 4 所示, 水庫水域內採樣站共 9 處 (大壩、火燒樟、後坑子、鷺鷥潭、小格頭、媽祖林、永安、灣潭、黃樺皮寮), 上游各支流水質採樣站共 5 處 (火燒樟溪、後坑子溪、北勢溪、金瓜寮溪、逮魚堀溪), 其水質監測項目包含懸浮固體、總磷、氨氮、生化需氧量、化學需氧量、水溫、導電度、溶氧、濁度及酸鹼度等。林鎮洋 (2012) 蒐集整理近四年 (2008-2011) 地面水體監測站, 歸納出臺北水源特定區水質狀況皆良好, 但偶有水質異常情形發生。以 2011 年為例, 不同水質測站不同測項符合甲類水體水質標準比率, 由低至高依序為大腸桿菌群、總磷、生化需氧量、懸浮固體、氨氮、pH 及溶氧。其中, 氨氮、pH 及溶氧達標準率接近 100%。翡翠水庫屬甲類水體標準, 其中總磷、生化需氧量及懸浮固體為此集水區之特徵污染物, 故為本研究選擇此三項水質為模擬項目。

三、翡翠水庫集水區流量及非點源污染模擬推估及保護帶模擬

本研究應用 BASINS 集水區管理系統整理所需要之集水區特性及土地利用等地理資訊資料, 並蒐集近五年 (2008 年

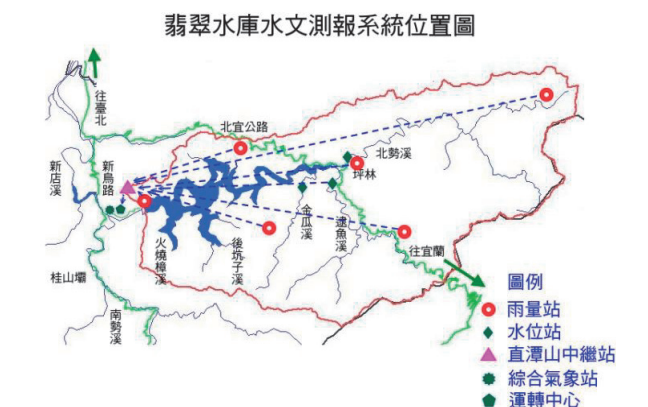


圖 3 翡翠水庫集水區氣象及水文測站分佈圖
Fig.3 The meteorological and hydrological monitoring stations in Feitsui Reservoir watershed



圖 4 翡翠水庫集水區水質採樣站分佈圖
Fig.4 The water quality monitoring stations in Feitsui Reservoir watershed

至 2012 年) 之氣象及雨量監測資料, 作為 SWMM 模式的連續性模擬輸入檔。SWMM 模式中所需要之溫度、風速及蒸發散氣象資料部份, 由翡翠水庫管理局之綜合氣象站提供, 在雨量資料輸入部分, 事實上由於降雨在空間分佈上不平均, 但由於 SWMM 模式可擺放于集水區與雨量站的座標位置並指定各子集水區承接的雨量站資料進行模擬, 因此本研究即依照此方式指定各子集水區鄰近之雨量站承接降雨進行模擬。

1. SWMM 模式污染源模擬機制

SWMM 模式在水質計算理論分為兩部分, 一是晴天累積, 其二為降雨沖刷。此計算來自非點源污染的主要特性: 晴天累積在地面的污染物, 隨降雨沖刷進入水體, 導致水質變化, 所以 SWMM 以兩個函數分別模擬晴天污染物累積量以及降雨沖刷量。本研究選擇冪函數 (power function) 為污染物累積函數, 如式 (5); 降雨沖刷部分則採用事件平均濃度 (event mean concentration)。

$$B = \text{Min}(C_1, C_2 t^{C_3}) \quad (5)$$

式 (5) 中, B 為污染晴天累積率 (buildup rate), C_1 為污染累積上限量 (kg/m^3), C_2 為累積常數, C_3 為時間指數。

2. SWMM 模式參數率定及驗證方法

為了讓 SWMM 模式模擬結果能有效反映出研究區域之水文、水理以及水質之特性, 即需進行模式各項參數的率定及驗證過程, 以提升模式模擬的正確性。正確可靠的操作方式, 必須基於完整的環境資料蒐集, 並配合長期多次觀測資料的率定, 才能表達出適當之物理行為 (李鴻源等, 1991)。

流量參數的率定驗證部分, 本研究採用決定係數 (R^2) 檢視日流量模擬值及日流量觀測值資料間之線性關係, 當自變數與因變數之間的關係可用迴歸式表示時, 其迴歸公式的適合度 (goodness of fit) 可用決定係數 (R^2) 來描述, 因此決定係數值常用來表示迴歸分析中的變數解釋能力。在直線迴歸式下, 決定係數 (R^2) 恰為相關係數 r 的平方值, 若用於模式的模擬值與實測值關係比較, 則可假設模擬值與實測值呈直線關係, 當此線性迴歸的決定係數越接近 1 時, 表示模擬值與實測值越相近, 模擬結果越好。相關係數 (r) 計算方法如式 (6) 所示。

$$r = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{[\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2][\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2]}} \quad (6)$$

式 (6) 中, X_i 為第 i 個模擬值, Y_i 為第 i 個實測值, \bar{X} 為平均模擬值, \bar{Y} 為平均實測值, n 為模擬值與實測值的總樣本數。

水質參數率定驗證部分, 由於水質採樣站之觀測值資料每月僅一筆觀測數據, 因此本研究選用平均絕對誤差百分比 (Mean Absolute Percentage Error, MAPE) 進行水質各項參數的率定驗證, 衡量模擬值與觀測值之間的相關性, 代表模擬值和實測值之間的正相關或負相關。其平均絕對誤差百分比 (MAPE) 計算方法如式 (7) 所示。

$$\text{MAPE} = \frac{\sum_{i=1}^n \left| \frac{(X_i - Y_i)}{Y_i} \right|}{n} \times 100\% \quad (7)$$

式 (7) 中, X_i 為第 i 個模擬值, Y_i 為第 i 個實測值, n 為模擬值與實測值的總樣本數。其水質模式結果之統計指標特性表如表 1 所示。

3. 流量參數率定與驗證

本研究選用集水區內非水庫蓄水範圍, 中上游坪林流量監測站、金瓜寮溪流量監測站及逮魚堀溪流量監測站之日流量監測資料, 進行模式流量參數的率定及驗證依據, 模擬時間為採用近五年 (2008 年至 2012 年) 進行連續模擬, 並選定以 2008 年為率定時間, 2012 年為驗證時間。摘錄北勢溪坪林流量站率定驗證結果圖如圖 5 與圖 6。表 2 為各流量站模擬結果。待流量模擬結果符合率定驗證標準後, 即進行水質參數的率定驗證模擬。

表 1 水質模擬結果之統計指標特性表

Table 1 The statistical indicators for deciding acceptable simulation results

參數	模式判定指標	範圍值	合理接受值	文獻	
水文參數	決定係數 (R^2)	0~1	0.5	Wahyu (2010)	
水質參數	平均絕對誤差百分比 (MAPE)	≥ 0	<10%	高準確預測	Lewis (1982)
			10%~20%	優良預測	
			20%~50%	合理預測	
			>50%	不準確預測	

表 2 流量模擬結果之統計指標特性表

Table 2 Calibration and verification results of flow simulation at different stations

流量測站	坪林	金瓜寮	逮魚堀
率定	0.72	0.90	0.83
驗證	0.70	0.80	0.72

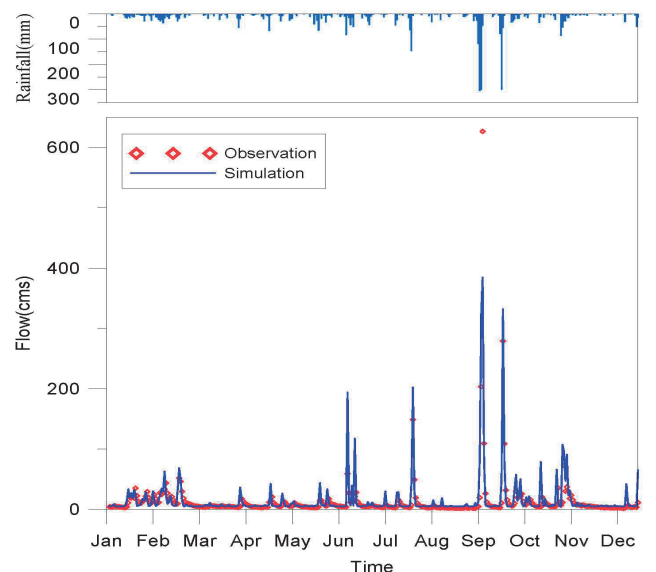


圖 5 2008 年北勢溪坪林流量站率定圖

Fig.5 Flow calibration results of Beishih Creek

前述模式模擬流量結果達到可接受標準後即進行各項水質項目模擬。集水區模式率定驗證之程序，首要為水文流量模擬，其次為泥砂傳輸，再者為水質模擬，因此要有好的水質模擬結果，須先有良好的水文模擬基礎 (林鎮洋等，2005)。

4. 水質參數率定與驗證

本研究在水質率定驗證部份，模擬三種非點源污染物，分別為懸浮固體 (SS)、總磷 (TP) 及生化需氧量 (BOD)，選用翡翠水庫蓄水範圍內之永安水質採樣點，進行模式水質參數之率定驗證。模擬時間同為 2008 年至 2012 年，並選定以 2008 年之模擬結果為率定時間，2010 年之模擬結果為驗證時間。本研究考慮非降雨時期的河川基礎污染量，以歷年觀測值的平均污染濃度作為基礎污染量，反應晴天時集水區內的點源污染

排入河川情形，所以各項水質有其背景濃度。圖 7 至圖 9 即為三個水質項目的驗證結果。表 3 為各項水質模擬結果之統計指標特性表。各水質項目經過上述統計方法皆達到模式可接受範圍內，率定驗證後的模式模擬結果可靠性佳，可用於推估集水區流量及非點源污染量之推估。表 4 至表 5 為各項水質率定驗證之晴天累積及降雨沖刷參數。

表 3 水質模擬結果之統計指標特性表

Table 3 Calibration and verification results of different water quality at Yongan station

MAPE	SS	TP	BOD
率定	40%	38%	36%
驗證	36%	32%	41%

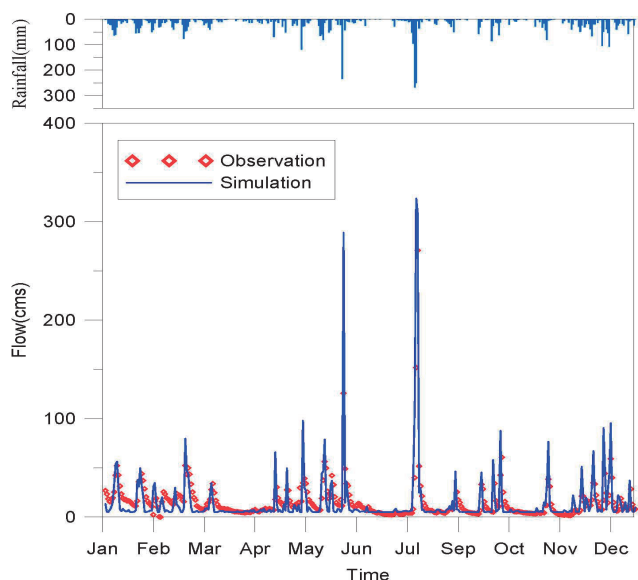


圖 6 2012 年北勢溪坪林流量站驗證圖

Fig.6 Flow verification results of Beishih Creek

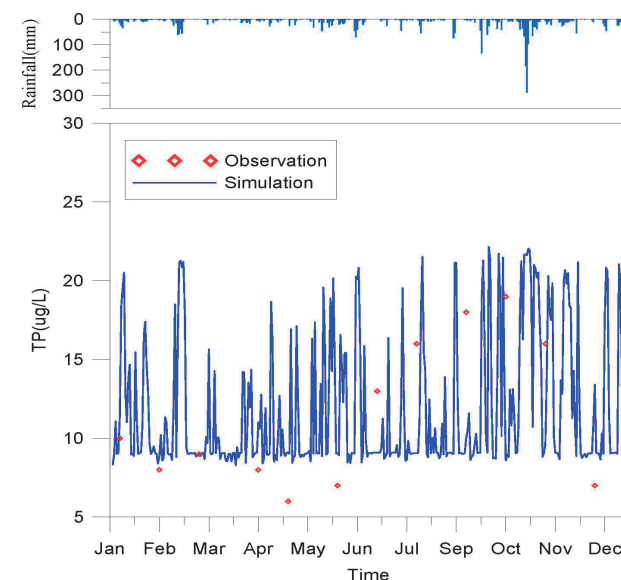


圖 8 2010 年永安總磷 (TP) 驗證圖

Fig.8 Verification result of TP at Yongan station

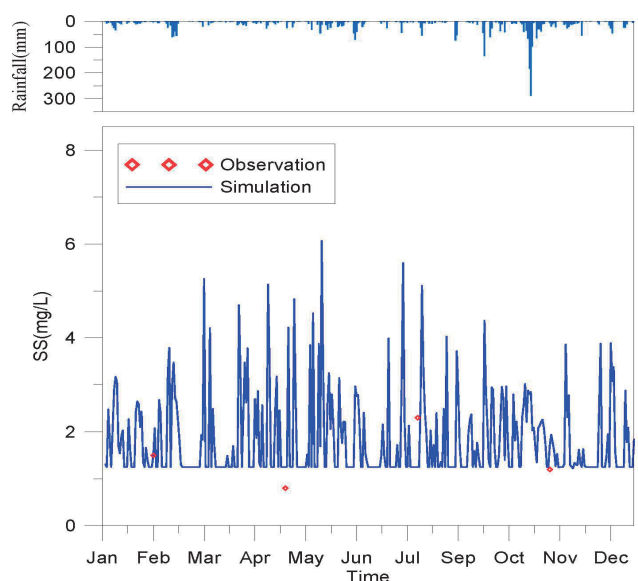


圖 7 2010 年永安懸浮固體 (SS) 驗證圖

Fig.7 Verification result of SS at Yongan station

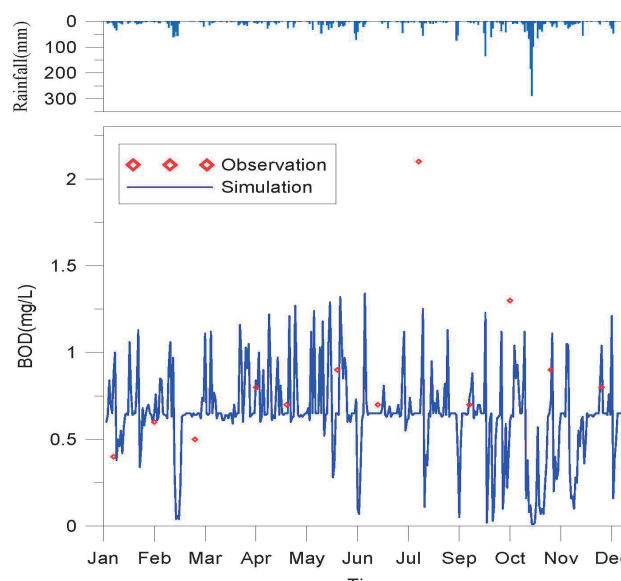


圖 9 2010 年永安生化需氧量 (BOD) 驗證圖

Fig.9 Verification result of BOD at Yongan station

5. 保護帶模擬與參數設計

水庫保護帶屬於入滲型 LID 設施，當降雨沖刷產生污染逕流流經保護帶時即會產生入滲現象，同時保護帶將污染物攔截，並滯留於保護帶範圍內達到污染削減的效果。在此次建立的 SWMM 模式中，設定保護帶的方法即利用 LID 模組設定保護帶設施特性，包括其長寬、坡度、土壤性質以及植生覆蓋比例等。SWMM 模擬保護帶效益的方法，主要來自地表逕流通過保護帶後，水量將被攔截減少，加上逕流滯留在設施內會增加污染物衰減時間，使得出口的流量與水質產生變化。另外，由於設施設置改變原先土地利用與覆蓋特性，也會使源頭的污染產生量降低，連帶造成出口水質濃度降低之效。

根據本研究地理資訊系統分析結果，在水庫蓄水範圍水平距離向外 50 公尺之保護帶範圍涵蓋翡翠水庫集水區其中 15 個子集水區，在圖 10 中，黃色區塊為翡翠水庫集水區，整個翡翠水庫集水區分割成 43 個子集水區，但保護帶設置僅在蓄水範圍內的 15 個子集水區。綠色區塊為涵蓋保護帶之 15 個子集水區，深藍色區塊為翡翠水庫集水區河系分佈，淺藍色區塊為翡翠水庫蓄水範圍，而各子集水區中保護帶分別用不同顏色代表涵蓋範圍。

表 4 各項水質率定驗證後之晴天累積參數

Table 4 The parameter of water quality of buildup rate after calibration and verification

水質項目	SS			TP			BOD		
	C1	C2	C3	C1	C2	C3	C1	C2	C3
參數名稱	C1	C2	C3	C1	C2	C3	C1	C2	C3
建地	80	1	1	1.3	1	1	1.3	1	1
林地	30	0.2	1	25	6	1	0.2	0.5	1
農地	30	0.2	1	0.35	0.2	1	0.5	0.5	1
荒蕪地	30	0.2	1	0.5	0.5	1	0.8	0.5	1
營地	40	0.5	1	0.5	0.5	1	0.8	0.5	1
濕地水域	30	0.2	1	0.35	0.2	1	0.5	0.5	1

表 5 各項水質率定驗證後之降雨沖刷參數

Table 5 The parameter of water quality of washoff after calibration and verification

水質項目	SS			TP			BOD		
	EMC	EMC	EMC	EMC	EMC	EMC	EMC	EMC	EMC
參數名稱	EMC	EMC	EMC	EMC	EMC	EMC	EMC	EMC	EMC
建地	100	0.6	15	100	0.6	15	100	0.6	15
林地	2	25	1.25	2	25	1.25	2	25	1.25
農地	25	0.4	2	25	0.4	2	25	0.4	2
荒蕪地	50	0.3	6	50	0.3	6	50	0.3	6
營地	50	0.3	6	50	0.3	6	50	0.3	6
濕地水域	25	0.01	2	25	0.01	2	25	0.01	2

表 6 保護帶參數設計

Table 6 The design parameters of buffer strips

參數名稱	值
儲存深度 (mm)	500
植生覆蓋率 (%)	0.5
曼寧n值	0.5
保護帶地表面坡度 (%)	1
草溝邊溝坡度 (run/rise)	5

保護帶模擬部份，本研究不考慮削減率與寬度之益本比，以法規規定 50 公尺最大保護帶寬度進行模擬。SWMM 模式中的 LID 模組共有 5 種 LID 設施可選擇，本研究依照保護帶的組成結構、特性及 SWMM 模式中建議的 LID 設施類型選擇草溝 (vegetative swale) 進行模擬，假設保護帶的儲存深度為 500mm，植生覆蓋率為 50%，曼寧 n 值參考 SWMM 手冊建議值的矮灌木為 0.5，保護帶地表面坡度為 1%，草溝邊溝坡度為 5，其參數設計如表 6。

四、結果與討論

本研究應用 SWMM 模式針對研究區域進行水文水質模擬，在模式的率定驗證完成後，即進行 LID 設施的建立進行保護帶對污染的削減評估。

1. 保護帶設置對子集水區非點源污染削減效果

就各別 15 個子集水區探討其保護帶設置對非點源污染削減率，利用 2009 年至 2012 年降雨及氣象資料進行模擬，並比較各年份污染削減率，其模擬結果整理如下表 7 所示，並與集水區各年份總降雨量進行比較。

模擬結果顯示，若個別探討設置保護帶的 15 個子集水區，非點源污染削減率，在懸浮固體 (SS) 部分削減率為 73.1%至 83.0%之間，在總磷 (TP) 部分削減率為 25.7%至 48.2%之間，在生化需氧量 (BOD) 部分削減率為 73.1%至 83.0%之間。進一步與各年份集水區加權平均年總降雨量比較，其對各種非點源污染削減率有隨年總降雨量增加而減少的趨勢，實際上降雨量增加所沖刷出的非點源污染也增加，因此保護帶所能提供的削減率隨之降低，模擬結果屬合理預測。

2. 保護帶設置對水庫水質影響

評估水庫水質變化需應用水庫水質模式，本研究採用 Vollenweider 模式為評估工具。Vollenweider 模式所需參數包含總磷負荷量、水庫入出流體積及水庫表面積 (如表 8)，前述所介紹之總磷沉降率 (v)，此參數任一個水庫皆有所不同，因此需對此參數進行率定驗證，以確認此模式在計算水庫總磷濃度時之參數適用於翡翠水庫。

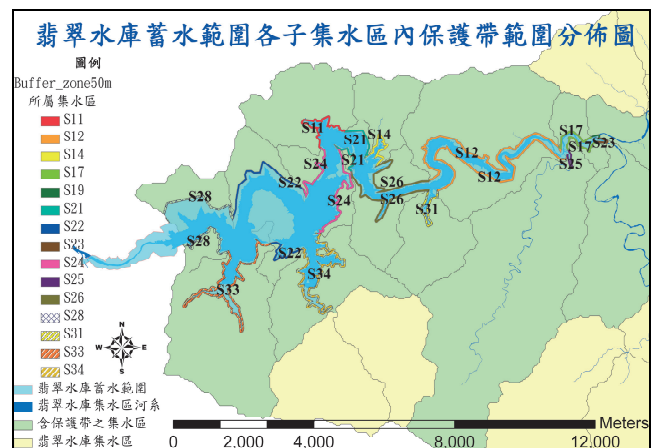


圖 10 翡翠水庫蓄水範圍各子集水區內保護帶範圍分佈圖

Fig.10 Watershed delineation and the designed location of buffer strips in Feitsui Reservoir

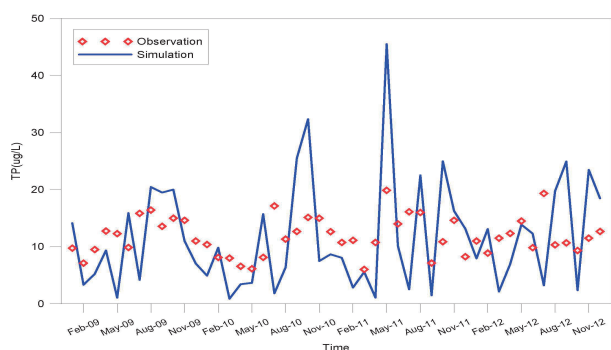


圖 11 Vollenweider 模式率定驗證結果

Fig.11 TP observed and simulated data in Feitsui Reservoir

表 7 2009-2012 年四年降雨情境模擬保護帶 (寬度 50 公尺) 對非點源污染削減結果

Table 7 Simulation results of nonpoint source pollution reduction rate gained by 50m width of buffer strips in 2009-2012

年份/污染物	SS平均削減率 (%)	TP平均削減率 (%)	BOD平均削減率 (%)	集水區全年雨量 (mm)
2009	81.6	41.2	74.6	3453.3
2010	83.0	48.2	74.2	3519.8
2011	79.4	39.8	75.7	4213.7
2012	73.1	25.7	69.2	4577.2
四年平均	78.5	37.9	73.0	4103.6

表 8 Vollenweider 模式所需參數表

Table 8 The used parameters in Vollenweider Model

參數名稱	數值
污染量M (kg/yr)	13285-17689 (2009年至2012年)
總磷沉降率 ν (m/yr)	25
水庫入出流體積 Q_m 、 Q_{out} (m ³)	翡翠水庫管理局提供
水庫表面積 (m ²)	10240000

表 9 50 公尺保護帶設置對翡翠水庫水質總磷濃度削減影響

Table 9 The TP concentration change with 50 m width of buffer strips compared to current water quality

年份	無保護帶 (TP, µg/L)	50m保護帶 (TP, µg/L)	削減率 (%)
2009	12.25	11.50	6.1
2010	11.92	11.19	6.1
2011	12.28	11.68	4.9
2012	12.49	11.95	4.3

表 10 不同情境下翡翠水庫集水區總磷污染量變化

Table 10 TP pollution loads of Feitsui Reservoir under different simulation scenario, including current situation, 50m width of buffer strips setting, and targeted TP concentration (10µg/L)

模擬情境	2009	2010	2011	2012	平均
現況TP污染量kg/yr	13,285	13,666	16,218	17,689	15,518
50m保護帶削減量kg/yr	806	830	778	764	798
水庫總磷目標濃度 10µg/L 下容許污染量kg/yr	10,339	10,885	13,134	14,265	12,551
未設置保護帶前需再削減污染量kg/yr	2,946	2,781	3,084	3,424	2,967
設置保護帶後需再削減污染量kg/yr	2,104	1,951	2,306	2,660	2,169

本研究利用翡翠水庫 2009 年至 2012 年逐月之模擬值進行參數的率定驗證，並用平均絕對誤差百分比 (MAPE) 判定其模擬結果是否可接受。利用 2009 年至 2010 年的資料進行率定 (共 24 筆數據)，其 MAPE 為 9.8%；2011 年至 2012 年的資料作驗證 (共 24 筆數據)，其 MAPE 為 5.2%。模擬結果確定翡翠水庫之總磷沉降率可採用 25m/yr，達到總磷模擬效果。Vollenweider 率定驗證結果如下圖 11 所示。

Vollenweider 模式率定驗證完成後，即開始模擬保護帶實施後對翡翠水庫水質影響。Vollenweider 模式所需參數表中 (表 8)，點源加上非點源污染量 M 由 SWMM 模式求得。應用 SWMM 模式模擬 2009 至 2012 年共四年之翡翠水庫集水區污染量，並在 SWMM 模式中模擬設置 50 公尺保護帶後新的總磷污染量，最後將每組污染量參數代入 Vollenweider 模式中模擬水庫總磷。

模擬結果顯示，四年模擬平均削減率在 4.3% 至 6.1% 之間，其設置保護帶前後水庫總磷濃度模擬結果如表 9 所示。用 2009 至 2012 年 4 年的降雨資料，SWMM 模擬翡翠水庫集水區的總磷年污染量為 13,285kg/yr 至 17,689kg/yr，平均年污染量約為 15,518kg/yr。若在蓄水範圍設置 50 公尺保護帶，設置後之年污染量 12,479kg/yr 至 16,925kg/yr，平均年污染量約為 14,720kg/yr。

若以翡翠水庫水質指標維持在貧養標準以下為管制目標，總磷濃度需維持在 10µg/L (10 ppb) 為水質容許污染濃度。利用 Vollenweider 模式反推水庫容許最大污染量，結果為年污染量為 10,339kg/yr 至 14,265kg/yr。換句話說，設置保護帶前之集水區，每年需再削減 2,781kg/yr 至 3,424kg/yr，需削減比例約為 19.0%~22.2%。蓄水範圍內設置 50 公尺保護帶，可幫助削減總磷每年平均 798 公斤，若扣除保護帶削減量後，則翡翠水庫集水區每年需再削減平均 2,169kg/yr，需再削減比例為 14.7%~15.1%，其評估結果如下表 10 所示。

五、結 論

本研究蒐集翡翠水庫蓄水範圍圖層，利用 BASINS 集水區管理系統整理集水區幾何特性資料及土地利用等地理資訊資料，並依照現行法規界定出翡翠水庫蓄水範圍內保護帶所在位置。選用美國環保署所開發之 SWMM 模式與 Vollenweider 模式進行保護帶效益評估，其結論如下。

1. SWMM 之水文水質率定驗證效果良好。模擬結果 50 公尺保護帶對設置保護帶的子集水區年平均可削減 SS 78.5%，TP 37.9%，BOD 73%。
2. 結合 SWMM 的集水區模擬以及 Vollenweider 模式的水庫水質模擬，模擬結果：蓄水範圍內設置 50 公尺保護帶後，對水庫水質總磷濃度改善 4.3%-6.1% 之間 (2009-2012 年降雨資料)，保護帶可削減集水區總磷污染量每年約 800 公斤。
3. 若要達水庫水質 TP 10µg/L 之目標，水庫集水區總磷污染量需削減 2,781kg/yr 至 3,424kg/yr，削減比例為 19.0%~22.2% (2009-2012 年降雨資料)。

4. 比較水庫水質目標污染需削減量每年約 3,000 公斤，設置保護帶約可貢獻 1/3-1/4 的削減量。

六、誌 謝

本論文承蒙臺北翡翠水庫管理局提供經費補助，僅致謝忱。

參考文獻

- (1) 余嘯雷 (1993)，「台灣地區水庫集水區非點源污染控制技術及策略之研究」，行政院國家科學委員會專題研究報告。(Yu, S.L. (1993). Study on Non-point Source Pollution Control Technology of Watershed in Reservoir of Taiwan, National Science Council 1993 Annual Report, Ministry of Economic Affairs. (in Chinese))
- (2) 李鴻源、黃良雄、郭振泰、許銘熙、楊錦釧 (1991)，「水質保護綱要計畫-非點源污染防治計畫研究 (二)」，行政院環境保護署。(Lee, H.Y., Huang, L.H., Kuo, J.T., Hsh, M.H., and Yang, J.C. (1991). Water Quality Protection Plan – Study on Non-Point Source Pollution Prevention Plan, Environmental Protection Administration, Executive Yuan. (in Chinese))
- (3) 林昭遠 (1998)，「濱水區植生緩衝帶配置之研究」，中華水土保持學報，29(3)，261-272。(Lin, C.Y. (1998). “The Width and Placement of Riparian Vegetated Buffer Strips.” *Journal of Chinese Soil and Water Conservation*, 29(3), 261-272. (in Chinese))
- (4) 林鎮洋、陳彥璋、張玉珊 (2005)，「翡翠水庫集水區非點源污染模擬與防治順序之評估」，臺灣水利季刊，53(3)，25-40。(Lin, J.Y., Chen, Y.C., and Chang, Y.S. (2005). “Simulation of Nonpoint Source Pollution in the Fei-Tsui Reservoir Watershed for Evaluation of Remedy Sequence.” *Journal of Taiwan Water Conservancy*, 53(3), 25-40. (in Chinese))
- (5) 林鎮洋 (2012)，「水體環境水質改善及經營管理規劃與執行計畫」。行政院環境保護署。(Lin, J.Y. (2012). Improvement and Management of water Environment and Master Plan, Environmental Protection Administration, Executive Yuan. (in Chinese))
- (6) 林信輝 (2006)，「水庫濱水帶植生與其保育功能之研究 (1/2)」，經濟部水利署。(Lin, S.H. (2006). Study on Vegetation and Conservation Effect of Reservoir Riparian Zone, Water Resources Agency, Ministry of Economic Affairs. (in Chinese))
- (7) 翁麗容、許盈松、張嘉玲、李秉乾、陳敬慈 (2009)，「石門水庫蓄水範圍保護帶劃設之研究」，農業工程學報，56(2)，44-56。(Weng, L.J., Hsu, Y.S., Chang, C.L., Lee, B.J., and Chen, C.T. (2009). “Designation of Buffer Zone for Reservoir Conservation—Case Study of the Shimen Reservoir.” *Journal of Taiwan Agricultural Engineering*, 56(2), 44-56. (in Chinese))
- (8) 黃賢銘 (2005)，「以 WinVAST 模式探討降雨特性及土地利用對最佳管制作業去除機制影響」，國立臺灣大學環境工程研究所碩士論文。(Hhang, S.M. (2005). *Effects of Rainfall Characteristic and Land Use on BMPs Placement by WinVAST module*, Master Thesis, National Taiwan University, Taiwan, ROC. (in Chinese))
- (9) Anderson, D.L., and Fling, E.G. (1995). “Agriculture Best Management Practices and Surface Water Improvement and Management.” *Water Science and Technology*, 31(8), 109-121.
- (10) Chou, W.S., Lee, T.C., Lin, J.Y., and Yu, S.L. (2007). “Phosphorus Load Reduction Goals for Feitsui Reservoir Watershed,” *Environmental Monitoring and Assessment*, 131, 395-408.
- (11) Chang, C.L., Hsu, T.H., Wang, Y.J., Lin, J.Y., and Yu, S.L. (2010). “Planning for implementation of riparian buffers in the Feitsui reservoir watershed.” *Water Resource Management*, 24(10), 2339-2352.
- (12) Chen, Y., Shuai, J.B., Zhang, Z., Shi, P.J., and Tao, F.L. (2014). “Simulating the impact of watershed management for surface water quality protection: A case study on reducing inorganic nitrogen load at a watershed scale.” *Ecological Engineering*, 62, 61-70.
- (13) O’Driscoll, C., O’Connor, M.O., Asam, Z., Eyto E.d., Rodgers, M., and Xiao, L. (2014). “Creation and functioning of a buffer zone in a blanket peat forested catchment,” *Ecological Engineering*, 62, 83-92.
- (14) Correll, D.L. (2005). “Principles of planning and establishment of buffer zones”, *Ecological Engineering*, 24, 433-439.
- (15) Kuo, J.T., Liu, W.C., Lin, R.T., Lung, W.S., Yang, M.D., Yang, C.P., and Chu, S.C. (2003). “Water quality modeling for the Feitsui Reservoir in Northern Taiwan.” *Journal of the American Water Resources Association*, 39(3), 671-687.
- (16) Lewis, C.D. (1982). *Industrial and Business Forecasting Methods: A practical Guide to Exponential Smoothing and Curve Fitting*. Butterworth Scientific, London.
- (17) Lin, J.Y., and Lee, T.C. (2004). “A study on the improvement of reservoir watershed management practices in Taiwan.” *Journal of Chinese Institute of Environmental Engineering*, 14(3), 151-160.
- (18) Meals, D.W. (1996). “Watershed-Scale Response to Agriculture Diffuse Pollution Control programs in Vermont, USA,” *Water Science and Technology*, 33(4-5), 197-204.
- (19) Vollenweider, R.A. (1968). “Scientific fundamentals of the eutrophication of lakes and flowing waters, with particular reference to nitrogen and phosphorus as factors in eutrophication.” Tech. Report No. DAS/CSI/68.27.
- (20) Wahyu, A., Kuntoro, A.A., and Takao Yamashita. (2010). “Annual and Seasonal Discharge Responses to Forest/Land Cover Changes and Climate Variations in Kapuas River Basin, Indonesia,” *Journal of international development and cooperation*, 16(2), 81-100.
- (21) Worral, F., and Burt, T.P. (1999). “The Impact of Land Use Changes on Water Quality at the Catchments Scale: The Use

of Export Coefficient and Structural Models.” *Journal of Hydrology*, 221, 75-90.

- (22) Yu, S.L., and Zhen, J.X. (2001). “Development of a best management practice (BMP) placement strategy at the watershed scale.” Proceedings of the Third International Conference on Watershed Management, Taipei, Taiwan, 59-72.
-

2014 年 03 月 04 日 收稿

2014 年 03 月 24 日 修正

2014 年 05 月 05 日 接受

(本文開放討論至 2015 年 3 月 31 日)