

國立東華大學自然資源管理研究所

碩士論文

指導教授：張世杰博士

應用 Biome-BGC 模式估算棲蘭山樣區
台灣扁柏森林生態系之碳收支

*Application of Biome-BGC model to simulate the carbon budget
in a yellow cypress forest ecosystem at the Chi-Lan Mountain site*



研究生：吳家欣

中華民國九十七年七月

Abstract

An ecosystem process model, BIOME-BGC, was applied at the Chi-Lan Mountain (CLM) site for the simulation of biogeochemical cycles of a *Chamaecyparis obtusa* var. *formosana* forest ecosystem. The daily meteorological data of the site from 2004 to 2007 were applied repeatedly to the whole simulation period. 13 of the 34 ecophysiological parameters were taken from the results of previous studies at the site, while the rest of the parameters were taken directly from the default values of the model. The sensitivity analysis showed that the ecophysiological parameters that are most sensitive at the site were those related to carbon and nitrogen allocation. On the contrary, the water cycle-related parameters had less influences on GPP. The present biogeochemical cycles of the site were simulated using a sequence of simulations including system spin-up, 100 years of industrialized atmospheric conditions, 90% harvest of the original forest, and 40 years of growth of the regenerated forest. The ecosystem stayed at a condition of carbon-neutral for very long time period and after the harvest practice, the ecosystem became a strong carbon source which lasted for 23 years. At present, the ecosystem GPP, NPP, and NEP was 2.97, 0.89, and 0.33 kg C m⁻² yr⁻¹, respectively. The simulated carbon budget showed no difference when the fog deposition was removed from the total precipitation. A modification of the model to account for the effects of fog is necessary for this site. Furthermore, the simulated soil respiration overestimated the measurement data by far. A limitation of soil respiration under wet hydrological regime should be added to the model.

Keyword: carbon budget, Biome-BGC, Chi-Lan Mountain, *Chamaecyparis obtusa* var. *formosana*

摘要

Biome-BGC 是一個生態系過程模式，用以模擬生態系的生物地化循環。本研究將其應用於棲蘭山樣區台灣扁柏森林生態系。本研究中，使用 2004-2007 的氣象資料；模擬所需的 34 個生態生理常數當中，其中 13 個使用本研究區的前人研究結果，其餘使用模式對常綠針葉林的預設值。敏感度分析的結果顯示，在本研究區較為敏感的生態生理常數皆與碳、氮的分配有關，而與水分收支較無關。碳收支的模擬，先進行系統的初始化，再因應工業化大氣狀況的改變進行 100 年的模擬，接著進行 90% 的砍伐模擬，以及 40 年的森林復原模擬。結果顯示，本研究區在長期發展而未受干擾時，生態系與大氣之間的碳收支約達到平衡；90% 的砍伐干擾，使生態系成為一強烈碳源，淨碳釋出的時間持續 23 年；隨著森林的復原使得碳的淨釋出逐漸減少並轉變為碳匯，目前本生態系之 GPP、NPP 與 NEP 分別為 2.97, 0.89 與 0.33 kg C m⁻² yr⁻¹。比較在模擬所需的氣象資料的總水量部分，包含與不包含霧水時，對於碳收支的模擬結果差異不大，亦顯示在本研究區水分非影響碳收支的重要因子。然 Biome-BGC 並不能反映雲霧籠罩時的長時間潮濕情形，因而對蒸散速率的估算高於實測值；此外，土壤呼吸也有明顯的高估。顯示欲應用在本研究區，應考慮潮濕環境對土壤呼吸的限制，修正模式當中土壤濕度與異營性呼吸之間的關係，並考慮雲霧籠罩時對蒸散作用與光合作用的影響。

關鍵字：碳收支、Biome-BGC、棲蘭山、台灣扁柏

目錄

1. 前言.....	1
1.1 森林中的碳循環.....	2
1.2 碳收支的估算.....	5
1.3 研究目的.....	5
2. Biome-BGC 之探討.....	7
2.1 Biome-BGC 模式的演進.....	7
2.2 Biome-BGC 的參數.....	8
2.2.1 樣區參數.....	8
2.2.2 氣象資料.....	11
2.2.3 生態生理常數.....	13
2.3 Biome-BGC 的模擬過程.....	17
2.3.1 輻射的收支.....	17
2.3.2 水的收支.....	19
2.3.3 碳與氮的收支.....	24
3. 應用 Biome-BGC 於棲蘭山樣區台灣扁柏森林生態系—敏感度分析.....	33
3.1 研究樣區.....	33
3.1.1 樣區參數.....	34
3.1.2 氣象資料.....	38
3.1.3 生態生理常數.....	39
3.2 參數的敏感度分析.....	43
3.2.1 方法.....	43
3.2.2 敏感度分析之結果與討論.....	45
4. 應用 Biome-BGC 於棲蘭山樣區台灣扁柏森林生態系—碳收支之模擬.....	53
4.1 模擬流程.....	53
4.2 模擬結果與討論.....	55
4.2.1 碳通量.....	55
4.2.2 碳存量.....	59

4.2.3	土壤呼吸.....	62
4.2.4	蒸散作用.....	65
5.	結論.....	67
6.	參考文獻.....	69

圖目錄

圖 1	西元 1000 年到 2007 年全球大氣二氧化碳濃度成長趨勢.....	1
圖 2	森林生態系的碳循環過程.....	3
圖 3	世界主要森林的淨初級生產力.....	4
圖 4	BIOME-BGC 模式的演進歷程.....	8
圖 5	Biome-BGC 的碳、氮循環圖.....	25
圖 6	Biome-BGC 枯落物與土壤有機質分解流程圖.....	31
圖 7	研究樣區位置圖.....	34
圖 8	土壤深度與土壤含石率關係圖.....	36
圖 9	參數的敏感度分析流程圖.....	44
圖 10	敏感度分析—整株植物死亡率.....	47
圖 11	敏感度分析—莖對葉片的碳分配比例.....	48
圖 12	敏感度分析—葉片碳氮比.....	49
圖 13	敏感度分析—陰葉 SLA 對陽葉 SLA 比例.....	50
圖 14	敏感度分析—Rubisco 氮含量比葉片氮含量.....	51
圖 15	敏感度分析—生物固氮量.....	52
圖 16	Biome-BGC 模式模擬流程圖.....	54
圖 17	Biome-BGC 模擬台灣扁柏森林 GPP、NPP 與 NEP 的長期變化.....	56
圖 18	總水量中加入霧水與未加入霧水的碳收支比較圖.....	58
圖 19	Biome-BGC 模擬台灣扁柏森林碳存量的長期變化.....	60
圖 20	土壤呼吸速率—模擬與實測值的比較.....	62
圖 21	土壤溫度—模擬與實測值的比較 A.....	64
圖 22	土壤溫度—模擬與實測值的比較 B.....	64
圖 23	蒸散作用—模擬與實測值的比較 A.....	65
圖 24	蒸散作用—模擬與實測值的比較 B.....	66

表目錄

表 1	Biome-BGC 模擬所需的樣區參數	9
表 2	Biome-BGC 的生態生理常數	14
表 3	棲蘭山樣區台灣扁柏森林生態系的樣區參數.....	35
表 4	生態生理常數—更新與死亡.....	40
表 5	生態生理常數—分配.....	41
表 6	生態生理常數—碳氮比.....	41
表 7	生態生理常數—易分解物質、纖維素、木質素比例.....	42
表 8	生態生理常數—葉片與冠層形態.....	42
表 9	生態生理常數—傳導速率.....	43
表 10	參數敏感度分析結果.....	46
表 11	Biome-BGC 模擬棲蘭山樣區台灣扁柏森林生態系的碳收支	55
表 12	Biome-BGC 模擬的碳存量與實測值比較	61

1. 前言

工業革命之後，人類大量使用化石燃料與大規模改變土地利用的方式，直接或間接改變大氣中二氧化碳濃度（圖 1）。二氧化碳是一種溫室氣體，對全球氣候具有暖化效用。這些變化都可能直接或間接使地球上各種生物的生長、生存、死亡、數量分布及生態系組成與功能產生改變，因此全球氣候變遷的問題已經引起國際間高度的關切。近年來世界各國紛紛倡議全球性的溫室氣體減量措施，例如京都議定書的簽訂，對各國提出碳排放量的管制，因此正確的估算碳在大氣與生態系之間的流動與貯存量更顯重要。

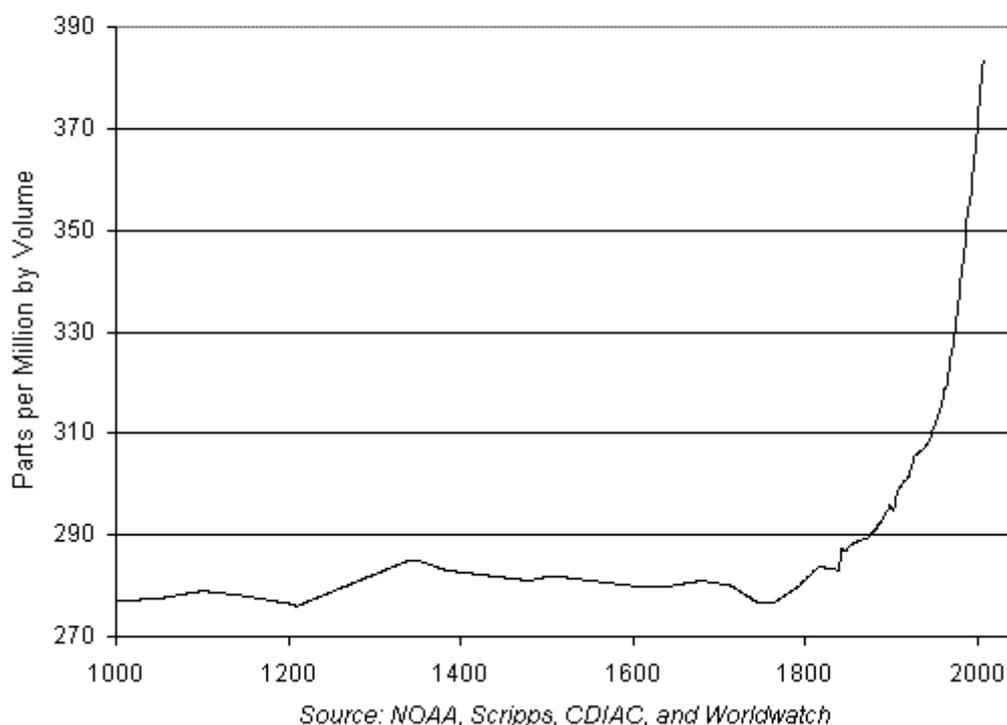


圖 1 西元 1000 年到 2007 年全球大氣二氧化碳濃度成長趨勢¹

橫座標為西元年次，縱座標為大氣中二氧化碳濃度。由圖可見，自 1890 年代之後，大氣二氧化碳濃度急遽上升。

¹ 圖引自：http://www.earth-policy.org/Indicators/CO2/2008_data.htm#fig7

森林生態系的碳循環是全球碳循環的一部分。全球陸地表面，約有 65% 的面積被森林所覆蓋。森林自大氣中吸收的二氧化碳佔陸域生態系的 67%(Gower 2003)，是陸域生態系中主要累積碳的場所，面對全球減碳議題，森林碳收支是不可忽視的一環。

為了解碳在森林生態系中的流動與貯存量，許多相關研究發展模式 (model) 來估算生態系碳收支，Biome-BGC 便是其中之一。Biome-BGC 是一個生態系過程模式 (Thornton 1998)，以每日的氣象資料來模擬生態系中碳、氮、水的流動與貯存，而不受植被類型與氣候類型之限制；除此之外，亦可用於預測全球氣候變遷對生態系統碳收支的影響(Churkina and Running 1998, Kang et al. 2005)。目前國外有許多使用 Biome-BGC 模式模擬與預測生態系的相關研究(White et al. 2000, Coops et al. 2001, Law et al. 2001, Thornton et al. 2002, Jolly and Running 2004, Su and Sang 2004)。而台灣相關研究仍於發展階段。

為了解台灣森林的碳收支情形，相關研究人員於棲蘭山台灣扁柏森林生態系進行長期生態研究，目前已有初步的基礎(陳耀德，2003 葉青峰 2004，朱慧君 2005，Chang et al. 2006)。而棲蘭山台灣扁柏森林生態系是一個雲霧森林，雲霧對森林碳收支的影響亦是此生態系的研究重點。

本研究希望藉由對森林生態系中碳收支的基礎知識，以及 Biome-BGC 的相關文獻，分析此模式的運算過程。並將之應用於棲蘭山樣區台灣扁柏森林生態系，以不同的面向來探討此區的碳收支情形，同時亦探討 Biome-BGC 應用於雲霧森林的適用性。

1.1 森林中的碳循環

大氣中的碳進入森林生態系之中，被生物所利用，再經由呼吸作用或擾動而釋放回大氣的循環過程，稱為森林生態系的碳循環 (圖 2)。以下敘述碳在森林中的循環過程。

植物藉光合作用，利用太陽能將空氣中的二氧化碳固定成碳水化合物，是碳輸入森林生態系中的主要管道。在生態系中，以總初級生產力 (gross primary production, GPP) 來表示單位時間與面積中，植物的光合作用產量。

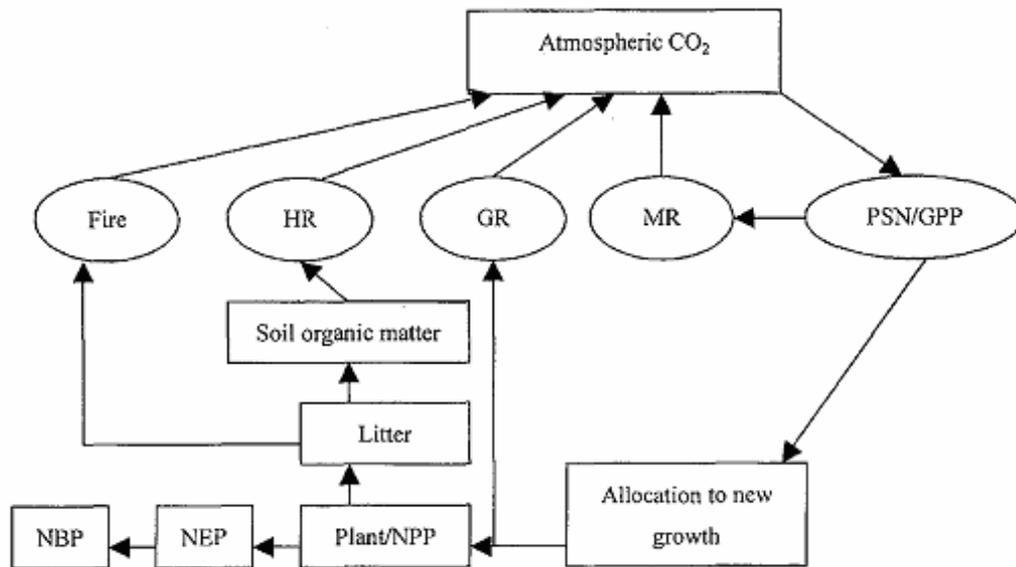


圖 2 森林生態系的碳循環過程 (Su and Sang 2004)

MR：維持性呼吸；GR：生長性呼吸；HR：異營性呼吸；PSN：光合作用

森林生態系中碳的輸出，主要是藉由自營性呼吸 (autotrophic respiration, R_A) 與異營性呼吸 (heterotrophic respiration, R_H) 將二氧化碳釋回大氣中。自營呼吸是植物將本身光合作用產生的有機物質氧化以獲得能量的過程，包括維持性呼吸 (maintenance respiration, R_M) 與生長性呼吸 (growth respiration, R_G)。維持性呼吸用以維持植物的基本代謝，例如離子的獲取、運送與修復受傷的組織。樹木隨著年齡的增加，累積越來越多的葉片與傳導組織，維持性呼吸隨之提高。生長性呼吸是植物利用呼吸作用產生能量，提供植物本身的各種生長所需，以增加其生物量。植物的光合作用產量通常有一半消耗於 R_A (Waring and Running 1998)，剩餘的部份以有機物質形式用於植物的生長和繁殖，稱為淨初級生產力 (net primary production, NPP)。世界主要森林的 NPP，從 $330 \text{ g C m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ 到 $1000 \text{ g C m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ ，以熱帶常綠闊葉林與溫帶常綠闊葉林較高 (Gower 2003) (圖 3)。

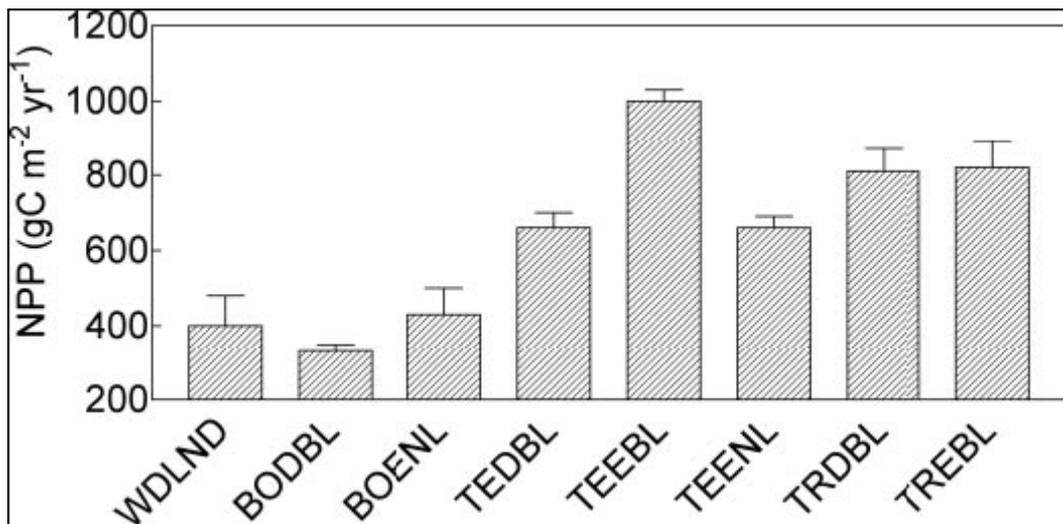


圖 3 世界主要森林的淨初級生產力

其中 WDLND 表示林地(woodlands)；BODBL 表示寒帶落葉闊葉林；BOENL 表示寒帶常綠針葉林；TEDBL 表示溫帶落葉闊葉林；TEEBL 表示溫帶常綠闊葉林；TEENL 表示溫帶常綠針葉林；TRDBL 表示熱帶落葉闊葉林；TREBL 表示熱帶常綠闊葉林。(Gower 2003)

森林中的異營呼吸主要源自於微生物的分解作用。牠們透過呼吸作用，把有機物質分解，碳經由二氧化碳或甲烷的形式釋放離開生態系統。影響微生物分解作用的因子有受質品質、土壤溼度、溫度(Chapin III et al. 2002)。

當森林發生擾動時，如砍伐、火燒、蟲害、風災等，對於森林的碳收支影響甚鉅，例如在加拿大北方森林中，經由森林火災流失的碳大約等於 10%到 30%的森林淨初級生產力(Gower 2003)。遭受擾動的生態系，其復原的狀況取決於當地的氣候、土壤狀況與擾動的程度。近來因人類活動與氣候變遷等因素，擾動發生更為頻繁，因而提高擾動在全球碳收支上的重要性。除此之外，可溶性有機物質溶解於水中，藉由淋洗作用而離開系統，亦是碳輸出的管道之一。

若由 NPP 扣除系統中已移除的碳，如異營呼吸、淋洗以及因擾動而流失的碳，所得的差稱之為淨生態系生產力 (net ecosystem production, NEP)，意指在生態系中淨累積的碳。NEP 與森林的年齡有關，年輕與老的森林的 NEP 可能會等於 0 或負值，而對中等年紀 (mid-aged) 的森林而言，約 60%的 NPP 會成為 NEP(Hamilton et al. 2002)。

1.2 碳收支的估算

森林生態系的碳循環過程中，碳在生態系的輸入與輸出之差，稱為此生態系的碳收支。估算森林生態系碳收支的方法，如實際測量植被的生長量與呼吸量，或是測量植物與大氣之間的淨氣體互換（net gas exchange）。這些實際的測量能夠直接得知此系統的碳收支情形，然而往往耗時費力，並侷限於區域性。

為了解森林生態系中的碳收支，許多相關的生態系模式（ecosystem model）被發展。生態系模式是一種分析生態系的工具，能夠用以預測一個尚未發生的情況的反應。例如，透過模式的模擬，能在森林伐木前，預測伐木對河流的改變可能造成的農作物影響及洪水問題。因此，生態系模式能應用於政策的決定與對生態系的管理上。此外，對於生態過程中難以直接測量的部分，也能利用模式加以模擬(Running 1994)。

生態系過程模式（ecosystem process model）是相較於經驗模式（empirical model）而言。生態系過程模式是以數學為基礎來描述生態過程，這些模式藉由分析基本生理過程，以及物理與環境的影響，來計算生態系過程中互動的結果，提供基本的架構來解釋生態系行為(Waring and Running 1998)。Biome-BGC 即是一個生態系過程模式，其中結合了許多的次模式，能夠模擬多種不同的生態過程，例如葉片的生長與枯落、土壤水經由葉片氣孔的蒸散過程、氮的吸收、枯落物與土壤有機物的分解過程。Biome-BGC 所需的資料是以每日為單位時間，來模擬生態系中碳、氮、水的流動與貯存。有關 Biome-BGC 的模擬概念、所需的參數與模擬過程將探討於後。

1.3 研究目的

本研究試圖應用 Biome-BGC 模式於台灣的森林。由於棲蘭山設有長期生態研究站，已收集四年完整的氣象資料，對於碳收支研究亦有初步成果，因此選擇於此進行本研究。本研究之研究目的可分為下列三點：

- 分析 Biome-BGC 模式的模擬運算過程，作為棲蘭山樣區台灣扁柏森林生態系相關研究之基礎；
- 進行 Biome-BGC 的參數敏感度分析，以了解應用於棲蘭山樣區台灣扁柏森林生態系時各參數的敏感性；
- 應用 Biome-BGC 估算棲蘭山樣區台灣扁柏森林生態系的碳收支，並探討其適用性。

2. Biome-BGC 之探討

Biome-BGC 是一個生態系過程模式，以 C++ 語言編寫，可經由網路取得程式碼。模式當中結合了許多的次模式，能夠模擬多種不同的生態過程。本研究就 Biome-BGC 的演進、參數與模擬過程探討之。

2.1 Biome-BGC 模式的演進

Biome-BGC 由美國蒙大拿大學森林學院陸域動態數值模擬研究團隊(Numerical Terradynamic Simulation Group, NTSG²)所發展。其發展史可追溯到 Waring and Running (1976)所提出的 H2OTRANS 模式(圖 4)，用以計算植物的氣孔控制機制。然而究竟「哪些機制使植物氣孔關閉？」「植物的水分平衡與氣孔開合之間的關連性為何？」，為解決這些問題，Running 以大量的每日氣孔導度與植物水流阻力(hydraulic resistance)資料，將 H2OTRANS 模式發展為能預測每日蒸散速率的 DAYTRANS 模式，能夠解決較大時間尺度的問題。而植物體內的水分收支牽涉水分的使用效益與淨初級生產力(NPP)，因此附加一個冠層光合作用的程式，成為 DAYTRAN/PSN 模式(Running 1984)。但光合作用只是 NPP 的一個部份，要建立完整的碳循環過程，還包括維持性呼吸、成長性呼吸、碳的分配、枯落物分解等。Running and Coughlan (1988)在 DAYTRAN/PSN 模式中加入完整的碳循環部份，便成為第一代的 FOREST-BGC 模式，它連結生態系中的碳循環與水循環，並具有兩種時間尺度：每日的水文平衡與整年的 NPP 估算。1991 年版的 FOREST-BGC 模式則加入了氮循環的部份，成為模擬生態系之中，碳、氮、水三者循環過程與交互影響的模式(Running and Gower 1991)。為了將發展於針葉林中的 FOREST-BGC 模式廣泛的應用於不同生物群系(biomes)中，研究團隊使用 FOREST-BGC 模式的邏輯，發展更具有普遍性的生態過程架構，稱之為 BIOME-BGC 模式(Running and Hunt 1993)。目前普遍使用由 C++ 所編寫的 BIOME-BGC 則出自 Thornton (1998)。此外，BIOME-BGC 模式能與遙測資料結合，應用於全球的空間尺度。

² <http://www.ntsug.umt.edu/>

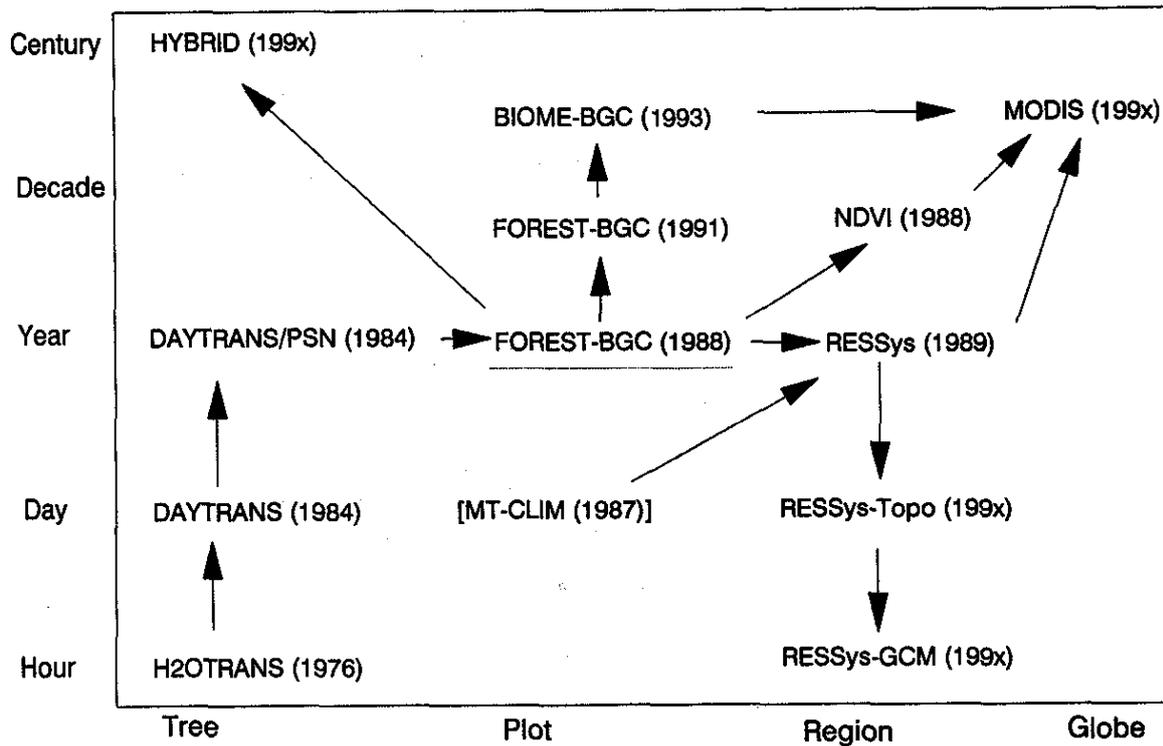


圖 4 BIOME-BGC 模式的演進歷程 (Running and Hunt 1993)

2.2 Biome-BGC 的參數

進行 Biome-BGC 的模擬，所需的參數可分為三類，分別是樣區參數 (site parameter)、氣象資料 (meteorological data) 及生態生理常數 (ecophysiological constants)。以下分別描述這三類參數。

2.2.1 樣區參數

樣區參數包括研究區域的一般資訊 (表 1)，如海拔、緯度、根系深度、土壤質地、反照率、大氣二氧化碳濃度、氮沉降量與生物固氮量，以及模擬起點的狀態。

表 1 Biome-BGC 模擬所需的樣區參數

樣區參數	單位	樣區參數	單位
緯度	degrees	模擬起點的碳狀態：	
海拔高度	m	葉片碳存量	kg C m ⁻²
根系深度	m	莖碳存量	kg C m ⁻²
土壤質地：		粗木質殘體碳存量	kg C m ⁻²
砂粒	%	枯落物碳存量	kg C m ⁻²
粉粒	%	土壤碳存量	kg C m ⁻²
黏粒	%	模擬起點的氮狀態：	
反照率	無	枯落物氮存量	kg N m ⁻²
大氣二氧化碳濃度	ppm	土壤氮存量	kg N m ⁻²
大氣氮沉降量	kg N m ⁻² yr ⁻¹		
生物固氮量	kg N m ⁻² yr ⁻¹		

緯度用以判定模擬的區域位於南半球或北半球；海拔高度則用於計算大氣壓力。根系深度是指植物的根在土壤中所能達到的深度，用以計算土壤中可被植物利用的水，以及土壤的碳存量、氮存量。當土壤中含有石塊時，應依含石率降低根系深度，以避免高估植物可利用的水份。

土壤質地方面，必須輸入研究區域的土壤中，砂粒(sand)、粉粒(silt)、黏粒(clay)含量的百分比，這三者的總和必須等於百分之百，這些參數主要用於計算土壤的含水能力。

反照率(albedo, α)是指入射的短波輻射被地表物質反射的比率，可表示為：

$$\alpha = \frac{\sum R_r}{\sum R_s} \quad (\text{公式 2-1})$$

其中 α 表示反照率， R_s 表示入射的短波輻射， R_r 表示反射的短波輻射。對 NPP 的估算而言，反照率具有其重要性，因為它反應了進入該生態系之輻射量比例。反照率

受地表物質不同而有差異，例如當地表覆蓋白雪時，反照率可達 0.75-0.95，而一般針葉林則為 0.09-0.15(Chapin III et al. 2002)。此外，反照率在一天不同時段也會有所差異，清晨與黃昏時段的反照率會偏高，正午時段則會些微降低(Hock and Holmgren 1996)。

大氣中的氮，以硝酸根 (NO_3) 與銨根 (NH_4) 的形式，經由重力沉降與截留沉降進入生態系中。在非農耕的陸域生態系中，氮的沉降量約為 $1-12 \text{ kg ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ (Boring et al. 1988)。在人類活動頻繁的區域，因石化工業與農業施肥而使氮沉降量增加。

生物固氮是指具有固氮能力的微生物，將大氣中的氮氣 (N_2) 轉變為植物可吸收利用的氨 (NH_3) 與銨根 (NH_4^+)。依微生物與植物的關係，可分為共生固氮 (symbiotic fixation) 與非共生固氮 (nonsymbiotic fixation)。共生固氮生物常出現於氮較缺乏或大量流失的系統中，如受到擾動後正處於演替初期的生態系；非共生固氮生物則偏好溫暖潮濕的氣候，在溫帶針葉林約介於 $1-5 \text{ kg ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ ，在熱帶雨林可達 $2-20 \text{ kg ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ (Boring et al. 1988)。

Biome-BGC 模擬生態系中碳氮存量與通量隨時間的變化，模擬結束的時間點的碳氮狀態取決於模擬起點的狀態。在長期生態研究樣區，可藉由早期的測量資料來取得模擬起始值。但當時間與空間尺度增加時，這些資料往往難以獲得。對此，Biome-BGC 提供了另一種取得這些初始值的方法，稱之為自動初始化過程 (self-initialization process) 或 spin-up。

spin-up 是一種模擬的過程，其作法是對模擬起點的碳與氮存量設定為極低的數值（一般是將葉片碳存量設為 0.001 kg m^{-2} ，其他的碳與氮存量皆為零），根據植被生理參數與樣區特徵，反覆的使用提供給模式的氣象資料來進行長期的模擬。spin-up 的目的是尋求生態系的穩定狀態 (steady-state solution) (Thornton and Rosenbloom 2005)，而穩定狀態的定義是連續兩年土壤碳存量的差異小於 0.5 g m^{-2} (Pietsch et al. 2005)；spin-up 的過程用以累積生態系當中土壤與植被的碳氮存量，直到達穩定狀態為止，一般需反覆的模擬數百到數千年。

spin-up 的意義，可視為一個生態系自初級演替初期開始發展，直到達到動態平衡為止。spin-up 最後所達到的穩定狀態，是綜合當地氣候因子、植被特徵與土壤生理過程的結果，當生態系統在不受外界干擾的自然情況下，會逐漸趨向這個穩定狀態。穩定狀態的碳氮存量，可作為模擬的起始值。

然而當生態系受到擾動時，例如：火災、伐木、移植等，其穩定狀態被打破，碳與氮的存量將受到影響。密集的土地利用與森林經營將使土壤的碳氮存量下降，若未考

慮這些擾動過程，將高估系統中的碳氮存量(Pietsch and Hasenauer 2002)。欲模擬這樣的生態系統時，必須將 spin-up 的結果加以校正。在 Thornton, Law et al. (2002)的研究中，對於森林砍伐的模擬，是將 spin-up 後得到的穩定狀態再做如下的處理：(1)依砍伐的程度來移除特定比例的生物量；(2)被移除的生物量作以下的安排：細根與 10%的葉片成為枯落物，莖與 90%的葉片自系統中移除，粗根移至粗木質殘體(coarse woody debris pool)。

當 Biome-BGC 進行 spin-up 計算生態系的穩定狀態時，視為模擬此生態系的發展過程。模擬所需的各種環境參數，應當儘量符合此生態系發展過程時的環境條件，而相關研究皆以工業化前的環境狀況來表示生態系發展過程中所處在的環境。因此，進行 spin-up 的模擬時，需提供工業化前的大氣二氧化碳濃度與氮沉降量(Pietsch and Hasenauer 2002, Pietsch et al. 2005, Vetter et al. 2005)。

2.2.2 氣象資料

Biome-BGC 所需的氣象資料以每日為單位，包括最高溫度(°C)、最低溫度(°C)、平均溫度(°C)、降水量(cm)、飽和水蒸氣壓差(Pa)、短波輻射通量密度(W m⁻²)、日照長度(sec)。以下分別描述這些氣象資料在 Biome-BGC 中的意義。

■ 溫度

溫度主要影響生態系中的生理與物理反應速率，如分解過程、光合作用、植物的維持性呼吸與蒸發散作用。必須提供給模式的是每日最高溫度(T_{max})、最低溫度(T_{min})與平均溫度(T_{avg})，Biome-BGC 藉由這三個參數來計算白天均溫(T_{day})、夜晚均溫(T_{night})與土壤溫度(T_{soil})：

$$T_{\text{day}} = 0.45 \times (T_{\text{max}} - T_{\text{avg}}) + T_{\text{max}} \quad (\text{公式 2-2})$$

$$T_{\text{night}} = \frac{T_{\text{day}} + T_{\text{min}}}{2} \quad (\text{公式 2-3})$$

土壤溫度是以前十天及當天的日均溫(T_{avg})經過 1-11 的加權後的平均數來表示。

- 降水量

降水量 (precipitation) 表示進入此系統的水分，一般指降雨與降雪。降水量用以計算植物的截留與進入土壤的水量、土壤水勢能。土壤水勢能影響氣孔導度的大小，進而左右蒸散作用與光合作用的速率。

- 飽和水蒸氣壓差

飽和水蒸氣壓差 (vapor pressure deficit, VPD) 是指目前空氣的實際水蒸氣壓與相同溫度下的飽和水蒸氣壓之間的差。飽和水蒸氣壓 (VPD_{sat} , Pa) 隨當時的溫度 (T , °C) 而變動，空氣實際的水蒸氣壓 (VPD_{air} , Pa) 則可由相對濕度 (RH) 與飽和水蒸氣壓計算得之：

$$VPD_{sat} = 0.61078 \times \exp\left(\frac{17.269 \times T}{237.3 + T}\right) \times 1000 \quad (\text{公式 2-4})$$

$$VPD_{air} = RH \times VPD_{sat} \quad (\text{公式 2-5})$$

當 VPD 較大時，表示空氣中尚能容納的水蒸氣較多，有利於蒸發作用。對植物而言，若 VPD 過大時，表示空氣非常乾燥，植物為避免經由蒸散作用流失過多水分，會傾向縮小氣孔；而氣孔亦是二氧化碳進出的管道，進而影響植物的固碳能力。

- 短波輻射

短波輻射是指波長介於 300 到 3000 nm 之間的太陽輻射，在 Biome-BGC 中是驅動系統中物質流動的能量，與碳、水的收支關係密切。有關短波輻射的收支將詳述於後。

- 日照長度

在 Biome-BGC 中，有些過程被定義為只發生於白天，因此必須有日照長度來配合計算，這些過程有蒸發、蒸散與光合作用。

2.2.3 生態生理常數

生態生理常數 (ecophysiological constants) 用來定義研究區域的植被之生態生理特徵 (表 2)。在 Biome-BGC 中將植被類型分為七類：常綠針葉林、常綠闊葉林、落葉針葉林、落葉闊葉林、C3 草本植物、C4 草本植物、灌木林。每一種植被類型具有一套生態生理常數，這些常數的來源是經由搜集許多研究報告加以統計的結果(White et al. 2000)。這些數值亦可由研究者以研究樣區的調查資料來替代。

這些參數依其性質可再分為六個類別：1.更新與死亡；2.分配；3.碳氮比；4.易分解物質、纖維素、木質素比例；5.葉片與冠層形態；6.傳導速率。本研究整理相關文獻(Thornton 1998, White et al. 2000)，並依據 Biome-BGC 4.2 的程式碼，將各參數依類別描述於下。

■ 更新與死亡

更新是指植物體每年置換 (turnover) 的比例，以兩個參數來表示：細根葉片的更新速率 ($T_{\text{leaf-fr}}$) 與活木質組織的更新速率 (T_{lw})。在 Biome-BGC 中，以 $T_{\text{leaf-fr}}$ 來表示葉片與細根的更新速率，即假設兩者更新的速率相同。植物死亡率是指該區平均每年整株植物死亡的比例，描述死亡率的參數有：疾病或老化等因素引起的死亡 (M)，以及火災干擾而引起的死亡 (M_{fire})。

■ 分配

分配參數是指植物不同部位之間碳生長量的比值。在 Biome-BGC 中，光合作用所得的碳主要用於植物四個部份的生長：葉、細根、粗根、莖，這四個部份的生長量便以分配當中的四個參數為依據。植物的種子、果實與防禦性化學物質亦佔植物碳分配量的一部分，但由於 Biome-BGC 是一個比較概括性的模式，因此沒有考慮這些部分。

表 2 Biome-BGC 的生態生理常數

類別	生態生理常數	代號	單位
更新與死亡率	葉片與細根更新速率 (leaf and fine root turnover)	$T_{\text{leaf-fr}}$	%
	活的木質組織更新速率 (live wood turnover)	T_{lw}	%
	整株植物死亡率 (whole plant mortality)	M	%
	植物火燒死亡率 (fire mortality)	M_{fire}	%
分配	細根對葉片的碳分配比例 (new fine root carbon to new leaf carbon allocation)	$C_{\text{fr:l}}$	無
	莖對葉片的碳分配比例 (new stem carbon to new leaf carbon allocation)	$C_{\text{s:leaf}}$	無
	活木質組織對所有木質組織的碳分配比例 (new live wood carbon to new total wood carbon allocation)	$C_{\text{lw:tw}}$	無
	粗根對莖的碳分配比例 (coarse root carbon to stem carbon allocation)	$C_{\text{cr:s}}$	無
碳氮比	葉片碳氮比 (leaf carbon to nitrogen ratio)	CN_{leaf}	kg C kg N^{-1}
	枯落物碳氮比 (litter carbon to nitrogen ratio)	CN_{lit}	kg C kg N^{-1}
	細根碳氮比 (fine root carbon to nitrogen ratio)	CN_{fr}	kg C kg N^{-1}
	活木質組織碳氮比 (live wood carbon to nitrogen ratio)	CN_{lw}	kg C kg N^{-1}
	死木質組織碳氮比 (dead wood carbon to nitrogen ratio)	CN_{dw}	kg C kg N^{-1}
易分解物質、纖維素、木質素比例	細根中易分解物質比例 (fine root labile)	FR_{lab}	%
	細根中纖維素比例 (fine root cellulose)	FR_{cel}	%
	細根中木質素比例 (fine root lignin)	FR_{lig}	%
	葉片枯落物中易分解物質比例 (leaf litter labile)	Lit_{lab}	%
	葉片枯落物中纖維素比例 (leaf litter cellulose)	Lit_{cel}	%
	葉片枯落物中木質素比例 (leaf litter lignin)	Lit_{lig}	%
	死木質組織中纖維素比例 (dead wood cellulose)	DW_{cel}	%
	死木質組織中木質素比例 (dead wood lignin)	DW_{lig}	%
葉片與冠層形態	比葉面積 (specific leaf area)	SLA	$\text{m}^2 \text{ kg C}^{-1}$
	葉表面積指數對投影葉面積指數比例 (all-sided to projected leaf area index ratio)	$L_{A:P}$	無
	陰葉 SLA 對陽葉 SLA 比例 (shaded to sunlit specific leaf area ratio)	$SLA_{\text{shd:sun}}$	無
	截留係數 (water interception coefficient)	k_{int}	mm LAI^{-1}
	光衰減係數 (light extinction coefficient)	k_{light}	無
	Rubisco 氮含量對葉片氮含量比例 (fraction of leaf nitrogen in Rubisco)	f_{Nrub}	無
傳導速率與限制	最大氣孔導度 (maximum stomatal conductance)	$g_{\text{s,max}}$	m s^{-1}
	表皮導度 (cuticular conductance)	g_{c}	m s^{-1}
	邊界層導度 (boundary layer conductance)	g_{bl}	m s^{-1}
	氣孔開始縮小時的葉片水勢 (leaf water potential at initial $g_{\text{s,max}}$ reduction)	ψ_{i}	MPa
	氣孔完全閉合時的葉片水勢 (leaf water potential at final $g_{\text{s,max}}$ reduction)	ψ_{f}	MPa
	氣孔開始縮小時的飽和水蒸氣壓差 (vapor pressure deficit at initial $g_{\text{s,max}}$ reduction)	VPD_{i}	Pa
	氣孔完全閉合時的飽和水蒸氣壓差 (vapor pressure deficit at final $g_{\text{s,max}}$ reduction)	VPD_{f}	Pa

■ 碳氮比

碳氮比參數用以描繪組織中的氮濃度，包括五個參數：葉片、枯落物、細根、活與死的木質組織的碳氮比。

當植物進行碳的分配時，依據植物各個部位的碳氮比參數同時進行氮的分配，因此進行碳分配的時必須考慮可用的氮是否足夠分配。若可用的氮不足以因應碳分配所需的氮量，則在模式中，會藉由降低光合作用所產生的碳量，以維持組織的碳氮比。

葉片碳氮比 (CN_{leaf}) 除了控制葉片生長所需的氮之外，亦左右植物的光合作用能力。由於氮是光合作用所需酵素—Rubisco—的成分之一，因此當葉片氮含量高時，能夠投資較多的氮於光合作用中。

枯落物的碳氮比參數 (CN_{lit}) 能反應植物對氮的再吸收能力。枯落物中的氮經由分解作用回到土壤中，成為可供植物吸收利用的養分。

細根碳氮比 (CN_{fr}) 控制細根生長對氮的需求。Biome-BGC 中，氮在細根的含量與細根對養份與水分的吸收能力並無關聯，但與維持性呼吸速率有關。因此，當細根中的氮含量越高，在模擬中可利用的養分與水分不會改變，而細根的維持性呼吸消耗量隨之增加。

■ 易分解物質、纖維素、木質素比例

指在植物的細根、葉片與木質組織中，含易分解物質、纖維素、木質素的比例。三者的比例影響分解速率，易分解物質的分解速率最快，而木質素則較難分解。

■ 葉片與冠層形態

葉片與冠層形態參數包括：比葉面積 (SLA)、葉表面積指數對投影葉面積指數的比例 ($L_{A:P}$)、陰陽葉的 SLA 比 ($SLA_{shd:sun}$)、截留係數 (k_{int})、光衰減係數 (k_{light})、Rubisco 中氮含量佔葉片氮含量的比例 (f_{Nrub})。

SLA 在 Biome-BGC 裡是指每單位碳質量所對應的葉面積 ($m^2 kg^{-1} C$)。將 SLA 乘以分配於葉片生長的碳量，能夠用以估算葉面積指數 (leaf area index, LAI)。

LAI 是指每單位地面積上的所有葉面積總和，分為葉的所有表面積指數 (all-sided leaf area index, L_A) 與投影葉面積指數 (projected leaf area index, L_P) 兩種。 L_A 與冠層截留有關；而 L_P 則控制冠層對光的吸收與光合作用產量。

Biome-BGC 將冠層分為陽葉與陰葉兩類 (two-layer model)，兩者的差異在於

SLA。由於葉片的碳氮比 (CN_{leaf}) 維持固定，所以當陽葉的 SLA 小於陰葉時，表示每單位葉面積上的氮含量高於陰葉，而有較高的光合作用能力。

截留係數 (k_{int}) 意指每單位葉面積指數所能截留的當日降雨量比例。被冠層所截留的水分，經由蒸發作用回到大氣，或滴落土壤而成為土壤水。在 Biome-BGC 中，蒸散作用只發生於乾燥的冠層。因此，截留的水分與其蒸發速率控制蒸散作用所能進行的時間。

光衰減係數是指光量由樹冠上層往下層減少的常數：

$$k_{light} = -\ln\left(\frac{I_i}{I_o}\right) \quad (\text{公式 2-6})$$

I_o 是冠層上方的光量， I_i 是冠層下方的光量。利用 k_{light} 與 Beer's law 可以計算當光線穿過冠層後所減少的光量，這些減少的光量視為被冠層所吸收。

Rubisco 是光合作用羧化反應所需的酵素。葉片中的氮投資於 Rubisco 的比例 (f_{Nrub}) 能夠控制羧化反應速率，進而影響植物固碳能力。 f_{Nrub} 除了經由實際調查取得之外，亦可由下列方式換算得之：

$$f_{Nrub} = \frac{V_{Cmax} \times SLA \times CN_{leaf}}{7.16 \times ACT} \quad (\text{公式 2-7})$$

V_{Cmax} 是最大羧化速率 ($\mu\text{mol CO m}^{-2} \text{s}^{-1}$)；SLA 是比葉面積 ($\text{m}^2 \text{kg C}^{-1}$)； CN_{leaf} 是葉片碳氮比；7.16 是 Rubisco 的分子量與其所含的氮的質量比；ACT 是 Rubisco 在 25°C 時的活性 ($=60000 \mu\text{mol CO}_2 \text{kg}^{-2} \text{rubisco s}^{-1}$)。

■ 傳導速率

與傳導速率有關的參數有最大氣孔導度 (g_s)、表皮導度 (g_c)、葉片邊界層導度 (g_{bl})、使氣孔開始縮小時的葉片水勢能與飽和水蒸氣壓差 (ψ_i 與 VPD_i)、使氣孔完全閉合時的葉片水勢能與飽和水蒸氣壓差 (ψ_f 與 VPD_f)

葉片的氣體交換被模擬為一電路系統：葉片的氣孔與表皮是氣體進出植物體的管道，氣孔導度 (g_s) 與表皮導度 (g_c) 被視為並聯系統；而氣體離開葉片後尚需通過葉片與大氣之間的葉片邊界層，視為與葉片邊界層導度 (g_{bl}) 串連。

而葉片水勢能與大氣的飽和水蒸氣壓差會限制影響氣孔導度的大小。葉片水勢能反映土壤中可利用水分是否充裕，當水分受到限制時，葉片水勢能隨之降低，導致氣孔逐漸縮小。大氣的飽和水蒸氣壓差能夠反映空氣濕度，當空氣越乾燥時，飽和水蒸氣壓差越高，高於 VPD_i 時，氣孔逐步縮小。藉由 ψ_i 、 VPD_i 、 ψ_f 與 VPD_f 這四個參數，得以因應土壤水分與空氣濕度的變化來調整氣孔導度。

2.3 Biome-BGC 的模擬過程

Biome-BGC 主要模擬進入生態系的短波輻射、碳、氮、水，在系統中流動與轉換的過程，基本的原理是能量與物質不減。進入生態系統的能量及物質，與離開系統的部份相減，相差的部份即留在系統當中。這些留在生態系統中的能量與物質，經由植物的生理與生態過程，分配至各個存量 (pools) 當中，而各個存量之間藉由通量 (fluxes) 相互連結。

短波輻射來自太陽，是驅動整個生態過程的能量，藉由反照率與 Beer's law 來計算被冠層所吸收的輻射量。水則來自於降雨與降雪，進入生態系後貯存於雪堆、土壤及冠層當中，經由蒸發、蒸散、逕流與滲流離開系統，以 Penman-Monteith equation 分別計算蒸發與蒸散量。碳與氮則牽涉到植物的光合作用能力、生長與分解過程，Biome-BGC 將冠層分為陽葉與陰葉兩部份 (two-layer model)，以 Farquhar et al 在 1980 年所提出的光合作用生化模式來模擬，所獲得的碳先用於自營呼吸，剩餘的碳再利用生長速率差異將之分配於植物各部位的生長。

Biome-BGC 具有模擬木本或非木本、常綠或落葉、針葉或闊葉等不同類型的植被之功能，模擬不同的生物群系時，過程略有差異。本研究聚焦於常綠針葉林，藉由參考相關文獻(Thornton 1998)，以及分析 Biome-BGC 的程式碼，將常綠針葉林的短波輻射、水、碳與氮的收支與傳送之模擬過程描述於下。

2.3.1 輻射的收支

輻射的收支主要是計算進入生態系統及被植物冠層所吸收的短波輻射與光合活性輻射 (photosynthetically active radiation, PAR, $W\ m^{-2}$)。短波輻射是指波長介於 300

到 3000 nm 之間的太陽輻射；PAR 是植物能夠用來進行光合作用的光能，波長介於 400 到 700 nm。Biome-BGC 分別計算冠層所吸收的短波輻射與 PAR，因為在此模式當中，這兩者有不同的功能：短波輻射應用於計算植物與土壤的蒸發量；而 PAR 則應用於光合作用與氣孔導度的計算。由於 Biome-BGC 將冠層分為陽葉與陰葉兩部份，因此必須分別計算陽葉與陰葉所吸收的 PAR。

▪ 短波輻射的收支

來自太陽的短波輻射 (daylight average shortwave flux, R_S , $W m^{-2}$) 照射到地表，一部份會被地表物質所反射，反射的比率稱之為反照率 (albedo, α)；剩餘的部份進入生態系當中。當輻射通過冠層時，會被冠層吸收，若將冠層視為均質環境，則可以 Beer's law 來計算被冠層所吸收的輻射量。

$$R_{S,T} = R_S \times (1 - \alpha) \quad (\text{公式 2-8})$$

$$R_{S,C} = R_{S,T} \times [1 - \exp(-k_{light} \times L_P)] \quad (\text{公式 2-9})$$

$R_{S,T}$ 表示進入生態系中的短波輻射， $R_{S,C}$ 是指被冠層所吸收的輻射量， k_{light} 是光衰減係數， L_P 是投影葉面積指數 (projected leaf area index)，意指單位土地面積上植物的總葉面積。

▪ PAR 的收支

能夠被植物用來進行光合作用的 PAR，其波長介於 400 到 700 nm，約佔短波輻射的 45%。地表對於 PAR 的反照率較小，是短波輻射的 1/3，應用 Beer's law 計算被冠層所吸收的 PAR：

$$R_{PAR} = R_S \times 0.45 \quad (\text{公式 2-10})$$

$$R_{PAR,C} = R_{PAR} \times (1 - \alpha/3) \times [1 - \exp(-k_{light} \times L_P)] \quad (\text{公式 2-11})$$

R_{PAR} 是短波輻射中 PAR 的量； $R_{PAR,C}$ 表示冠層所吸收的 PAR。

PAR 是驅動光合作用的能量，而在冠層中，陽葉與陰葉的光合作用能力不同，故

需分別計算陽葉與陰葉所獲得的 PAR：

$$L_{\text{sun}} = 1 - \exp(-L_p) \quad (\text{公式 2-12})$$

$$R_{\text{PAR.sun}} = k_{\text{light}} \times R_{\text{PAR}} \quad (\text{公式 2-13})$$

L_{sun} 是冠層中陽葉的投影葉面積指數； $R_{\text{PAR.sun}}$ 是每單位陽葉所吸收的 PAR。陰葉投影葉面積指數 (L_{shad}) 及每單位陰葉所吸收的 PAR ($R_{\text{PAR.shade}}$) 則分別由 L_p 扣除 L_{sun} 及 $R_{\text{PAR.C}}$ 扣除 $R_{\text{PAR.sun}}$ 即得。

在 Biome-BGC 當中，假設 $4.55 \mu\text{mol PAR}$ 光子的能量是 1 J ， $R_{\text{PAR.sun}}$ 與 $R_{\text{PAR.shade}}$ 分別乘上 4.55 可得陽葉與陰葉的光合光子通量密度 (photosynthetic photon flux density, PPFD, $\text{umol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)，應用於光合作用與氣孔導度的計算上。

2.3.2 水的收支

在 Biome-BGC 當中，水經由降雨與降雪進入生態系中，貯存於雪堆、土壤及冠層當中，經由蒸發、蒸散、逕流與滲流離開系統。當日均溫低於 0°C 時，Biome-BGC 會進行降雪的模擬，由於在本研究樣區降雪情形並不多見，故在此不予描述。以下主要針對模式當中模擬降雨所帶來的水分在生態系中的循環過程。

■ 冠層的截留與蒸發

雨水進入生態系中，一部份會被冠層所攔截，這些水份經由蒸發作用離開系統，或滴落成為土壤水。冠層每日的截留量 (W_{int}) 是假設與降雨量及 L_A (all-sided leaf area index) 呈線性關係：

$$W_{\text{int}} = \text{the lesser of } \{ k_{\text{int}} \times W_{\text{rain}} \times L_A \} \text{ or } \{ W_{\text{rain}} \} \quad (\text{公式 2-14})$$

k_{int} 是截留係數，表示每天每單位葉面積所攔截的雨量佔總雨量的比例。 W_{rain} 是一日的總降雨量，當降雨量小於冠層截留量時，表示所有降雨都會被冠層攔截，此時 W_{int} 等於 W_{rain} 。若降雨量超過冠層截留量，則會有部份未被截留的雨水落入地表成為土壤水

($Q_{\text{rain.soil}}$) :

$$Q_{\text{rain.soil}} = W_{\text{rain}} - W_{\text{int}} \quad (\text{公式 2-15})$$

在模式中，每天貯存在冠層的截留水會歸零重新計算，意即假設當日冠層所截留的水分，若未經由蒸發離開系統，便會滴落進入土壤中，而不會累積至隔天。

被截留在冠層的水分，利用 Penman-Monteith equation 計算蒸發速率 (E_{int} , W m^{-2}) :

$$E_{\text{int}} = \frac{(\Delta \times R_{\text{s.c}}) + \left(\text{rho} \times C \times \frac{\text{vpd}}{r_{\text{ch}}} \right)}{\Delta + \frac{P \times C \times r_{\text{cv}}}{\lambda \times 0.6219 \times r_{\text{ch}}}} \quad (\text{公式 2-16})$$

Δ : 氣壓曲線斜率 ($\text{Pa } ^\circ\text{C}^{-1}$)

$R_{\text{s.c}}$: 冠層所吸收的短波輻射量 (W m^{-2})

rho : 空氣密度 (kg m^{-3})

C : 空氣比熱 ($1010.0 \text{ J kg}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$)

r_{ch} : 空氣輻射熱傳導阻力與冠層可感熱傳導阻力之並聯 (s m^{-1})

VPD : 飽和水蒸氣壓差 (Pa)

P : 大氣壓力 (Pa)

r_{cv} : 冠層水氣傳導阻力 (s m^{-1})

λ : 水的蒸發潛熱 (J kg^{-1})

在 Biome-BGC 中，假設蒸發與蒸散作用僅發生於白天的時間 (t_{light} , s)，並且假設當冠層蒸發作用進行時，蒸散作用會因細胞間隙的 VPD 及葉片邊界層導度過低而不會進行。因此必須計算冠層水分蒸發所需時間，剩下的時間即進行蒸散作用。冠層水分蒸發所需的時間 (t_{E} , s)，等於冠層所截留的水分除以其蒸發速率：

$$t_E = \frac{W_{int}}{E_{int}} \quad (\text{公式 2-17})$$

若 t_E 小於 t_{light} ，表示在白天的時間內所有冠層上的水份皆可被蒸發。剩餘的白天時間便是蒸散作用進行的時間 (t_T, s)：

$$t_T = t_{light} - t_E \quad (\text{公式 2-18})$$

反之若 t_E 大於 t_{light} ，即在白天時間內無法將水分完全蒸發，由於假設蒸發只發生於白天，故冠層蒸發量便等於蒸發速率乘以 t_{light} 。未被蒸發的水分則視為滴落土壤，成為土壤水的一部份。而蒸散作用則不進行 ($t_T = 0$)。

■ 土壤水勢能與水含量

土壤當中的水分取決於進入與離開土壤的水分間的平衡，以當日所累積的土壤水分來計算次日的體積含水量 (volumetric soil water content, θ)。土壤的含水量對氣孔導度會造成影響，在此模式中以土壤水勢能 (soil water potential, ψ , MPa) 這個參數來參與氣孔導度的計算。土壤水勢能以一個經驗式來計算：

$$\psi = \psi_{sat} \times \left(\frac{\theta}{\theta_{sat}} \right)^b \quad (\text{公式 2-19})$$

ψ_{sat} 是飽和土壤水勢能， θ_{sat} 是飽和體積含水量，而 b 則是一個經驗參數，這三個參數皆是由土壤質地參數計算而來。土壤質地參數是指土壤中砂粒、粉粒與黏粒所佔的百分比，定義於樣區參數中。

田間容水量 (volumetric water content at field capacity, θ_{fc}) 是指土壤的飽和含水量扣除重力水的水分含量。在此模式中定義為當土壤水勢能為 -0.015 MPa 時的含水量：

$$\theta = \theta_{sat} \left(\frac{-0.015}{\psi_{sat}} \right)^{\frac{1}{b}} \quad (\text{公式 2-20})$$

土壤的飽和體積含水量以及田間容水量所能貯存的水分 (W_{sat} 與 W_{fc} , kg m^{-2})：

$$W_{\text{sat}} = 1000 \times d_{\text{soil}} \times \theta_{\text{sat}} \quad (\text{公式 2-21})$$

$$W_{\text{fc}} = 1000 \times d_{\text{soil}} \times \theta_{\text{fc}} \quad (\text{公式 2-22})$$

d_{soil} 是指根系深度，定義於樣區參數中，指植物根系在土壤中所能達到的深度。若欲模擬區域的土壤當中含石率高，則必需適量的降低 d_{soil} 來作為校正。

■ 氣孔導度與蒸散作用

氣孔是水氣蒸散的重要門戶。氣孔導度 (g_s) 受日輻射量、低溫凍結、飽和水蒸氣壓差與土壤水勢能的影響，Biome-BGC 計算上述每一個環境因子對 g_s 的影響比例，這些影響比例介於 0 到 1 之間，0 表示使氣孔完全關閉，而 1 表示使氣孔完全打開。

日輻射量對氣孔導度的影響比例表示為：

$$m_{\text{PPFD}} = \frac{\text{PPFD}}{\text{PPFD}_{50} + \text{PPFD}} \quad (\text{公式 2-23})$$

PPFD_{50} 定義為使 m_{PPFD} 等於 0.5 時的 PPFD，視為常數 ($=75 \text{ umol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)。因陽葉與陰葉的 PPFD 不同，需分別計算陽陰葉的 m_{PPFD} 。其他環境因子則無陽葉與陰葉的區別。

當溫度低於冰點時，植物體內水分逐漸凝固而影響氣孔導度。在 Biome-BGC 的設計中，當夜晚均溫低於 -8°C 時，因凍結而使植物的使氣孔導度為 0 ($m_{\text{tmin}}=0$)；夜晚均溫大於 0°C 時，則不受凍結影響， m_{tmin} 為 1；介於 -8 到 0°C 時， m_{tmin} 呈線性的變化。

計算土壤水勢能 (ψ) 與飽和水蒸氣壓差 (VPD) 對氣孔導度的影響 (m_ψ 與 m_{VPD}) 時，使用了四個生態生理常數：使氣孔開始縮小時的葉片水勢能 (ψ_i) 與飽和水蒸氣壓差 (VPD_i)、使氣孔完全閉合時的葉片水勢能 (ψ_f) 與飽和水蒸氣壓差 (VPD_f)：

$$m_\psi = \frac{\psi_f - \psi}{\psi_f - \psi_i} \quad (\text{公式 2-24})$$

$$m_{\text{VPD}} = \frac{\text{VPD}_f - \text{VPD}}{\text{VPD}_f - \text{VPD}_i} \quad (\text{公式 2-25})$$

上述的四個影響比例 (m_{PPFD} , m_{tmin} , m_ψ , m_{VPD}) 相乘所得的總比例 ($m_{\text{total.sun}}$ 與

$m_{total.shade}$ ），與最大氣孔導度（ $g_{s,max}$ ）相乘，所得即表示當日陽葉與陰葉的葉片氣孔導度：

$$g_{s,sun} = g_{s,max} \times m_{total.sun} \quad (\text{公式 2-26})$$

$$g_{s,shade} = g_{s,max} \times m_{total.shade} \quad (\text{公式 2-27})$$

在蒸散過程中，水氣除了經由氣孔離開葉片，亦可經由葉片的表皮，水氣離開葉片後尚需通過葉片邊界層。因此，就葉片尺度而言，其對水氣的傳導必須考慮氣孔導度（ $g_s, m s^{-1}$ ）、表皮導度（ $g_c, m s^{-1}$ ）及葉片邊界層導度（ $g_{bl}, m s^{-1}$ ）。若將水氣的傳導比喻為一電路系統，則 g_s 與 g_c 可視為並聯，再與 g_{bl} 串聯。陽葉、陰葉對水氣的導度（ $g_{Tv}, m s^{-1}$ ）可分別表示為：

$$g_{Tv,sun} = \frac{g_{bl} \times (g_{s,sun} + g_c)}{g_{bl} + g_{s,sun} + g_c} \quad (\text{公式 2-28})$$

$$g_{Tv,shade} = \frac{g_{bl} \times (g_{s,shade} + g_c)}{g_{bl} + g_{s,shade} + g_c} \quad (\text{公式 2-29})$$

葉片邊界層導度（ g_{bl} ）與表皮導度（ g_c ）的數值均視為常數而定義在生態生理常數當中。

蒸散作用也是使用 Penman-Monteith equation，分別計算陽葉與陰葉的蒸散速率（ T_{sun} 與 $T_{shade}, W m^{-2}$ ）：

$$T_{sun} = \frac{(\Delta \times R_{S,sun}) + \left(\rho \times C \times \frac{vpd}{r_{Th}} \right)}{\Delta + \frac{P \times C \times r_{Tv,sun}}{\lambda \times 0.6219 \times r_{Th}}} \quad (\text{公式 2-30})$$

$$T_{shade} = \frac{(\Delta \times R_{S,shade}) + \left(\rho \times C \times \frac{vpd}{r_{Th}} \right)}{\Delta + \frac{P \times C \times r_{Tv,shade}}{\lambda \times 0.6219 \times r_{Th}}} \quad (\text{公式 2-31})$$

Δ ：氣壓曲線斜率 ($\text{Pa } ^\circ\text{C}^{-1}$)

$R_{S,\text{sun}}$ ：陽葉冠層所吸收的短波輻射量 (W m^{-2})

$R_{S,\text{shade}}$ ：陰葉冠層所吸收的短波輻射量 (W m^{-2})

ρ ：空氣密度 (kg m^{-3})

C ：空氣比熱 ($1010.0 \text{ J kg}^{-1} ^\circ\text{C}^{-1}$)

r_{Th} ：空氣輻射熱傳導阻力與葉片可感熱傳導阻力之並聯 (s m^{-1})

VPD ：飽和水蒸氣壓差 (Pa)

P ：大氣壓力 (Pa)

$r_{\text{Tv},\text{sun}}$ ：陽葉的蒸散傳導阻力 (s m^{-1})，是 $g_{\text{Tv},\text{sun}}$ 之倒數

$r_{\text{Tv},\text{shade}}$ ：陰葉的蒸散傳導阻力 (s m^{-1})，是 $g_{\text{Tv},\text{shade}}$ 之倒數

λ ：水的蒸發潛熱 (J kg^{-1})

所求得之蒸散速率分別乘以陽葉與陰葉的葉面積指數與蒸散進行的時間，加總後即為當天的冠層蒸散量。

2.3.3 碳與氮的收支

碳藉由植物的光合作用過程進入生態系統，經由呼吸而釋出，剩餘的部份貯存在植物體、枯落物與土壤的各個碳存量中。而各個有機質都有其對應的氮含量，以維持該物質的碳氮比，因此碳與氮的循環過程有緊密的關係（圖 5）。

氮輸入的來源為大氣沉降與生物固氮。系統中的氮除了存在於有機質中，亦以無機氮的狀態存在於土壤中。植物生長與枯落物及土壤的分解過程必須考慮對土壤中無機氮的需求量。

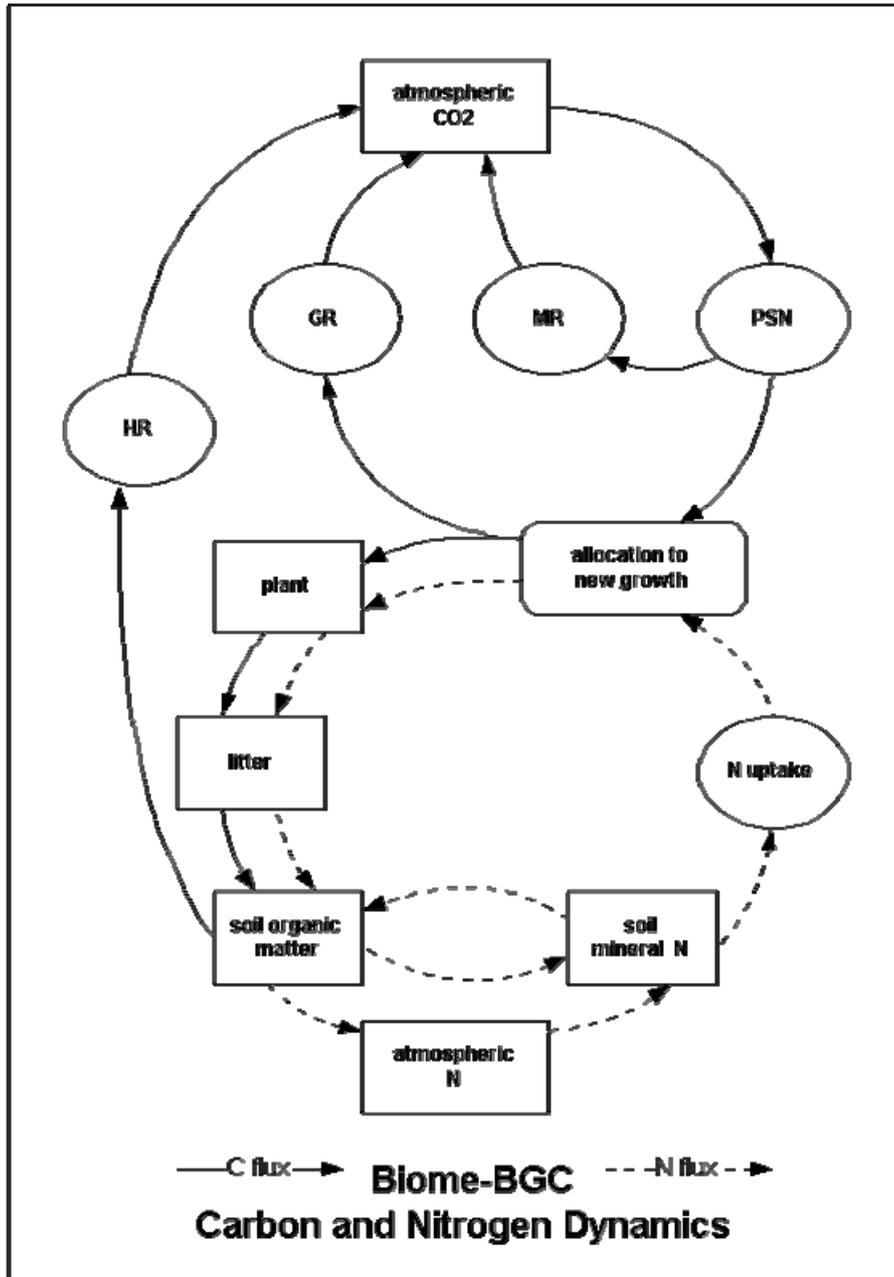


圖 5 Biome-BGC 的碳、氮循環圖³

PSN：光合作用，MR：維持性呼吸；GR：成長性呼吸；HR：異營性呼吸。

³ 圖引自 http://www.ntsg.umt.edu/models/bgc/index.php?option=com_content&task=view&id=15&Itemid=27

▪ 維持性呼吸

在 Biome-BGC 當中，維持性呼吸的計算是使用一個基礎呼吸速率經驗式，即 20°C 時，每天的維持性呼吸消耗量 (CF_{mr20}) 是該組織氮質量 (N) 的 0.218 倍：

$$CF_{mr20} = 0.218 \times N \quad (\text{公式 2-32})$$

每天實際的維持性呼吸消耗量 (CF_{mr}) 需考慮每天的溫度變化：

$$CF_{mr} = CF_{mr20} \times Q_{10}^{(T-20)/10} \quad (\text{公式 2-33})$$

Q_{10} 意指溫度每變化 10°C 時，呼吸速率所變化的倍數，在此假設為 2。而溫度 (T)，在計算莖的維持性呼吸時，使用的是日均溫 (T_{avg})；計算細根與粗根的維持性呼吸時，則使用土壤溫度 (T_{soil})；由於光合作用的運算需要葉片白天維持性呼吸量這項參數，因此葉片部分必須分別計算白天與夜晚的維持性呼吸量，使用的溫度分別是白天均溫 (T_{day}) 與夜晚均溫 (T_{night})。

▪ 光合作用

光合作用發生於冠層。有些模式會將冠層簡化而把所有葉片視為一致 (big leaf model)，然而在冠層不同位置的葉片，因外在環境的差異，對光與水分的反應也會有所不同，因此 big leaf model 對於預測碳與水的收支上容易產生顯著的誤差。為避免上述問題，Biome-BGC 將冠層分為陽葉與陰葉兩部份 (two-layer model)，這兩部份的差異在於比葉面積 (specific leaf area, SLA, $m^2 kg C^{-1}$)，在此指每單位碳重的葉面積大小。SLA 的差異造成葉片氮含量的不同，進而影響葉片光合作用能力。

在 Biome-BGC 中，光合作用是碳進入生態系的唯一途徑。光合作用的模擬主要基於其生化反應過程，其運算所需的參數有葉片 CO_2 導度、白天葉片的維持性呼吸量、每單位投影葉面積的氮含量、每日氣象變數：包括大氣壓力、白天均溫及 PPF。其中葉片 CO_2 導度、葉片氮含量及 PPF 在陽葉與陰葉有所差異，其他參數則視為一致。

在此模式中，假設葉片的蒸散導度是 CO_2 導度 ($g_{Tc}, m s^{-1}$) 的 1.6 倍，同時轉換為莫耳單位 ($g_{mTc}, \mu mol m^{-2} s^{-1} Pa^{-1}$)：

$$g_{mTc} = \frac{10^{-6} \times g_{Tv}}{1.6 \times R \times (T_{day} + 273.15)} \quad (\text{公式 2-34})$$

R 是理想氣體常數 (8.3143 m³ Pa mol⁻¹ K⁻¹)。

白天每單位地面積上的葉片維持性呼吸量 (CF_{ldmr}, kg m⁻² d⁻¹) 亦須轉換為每單位投影葉面積每秒所消耗的莫耳數 (MR_{ld}, μmol m⁻² s⁻¹)：

$$MR_{ld} = \frac{CF_{ldmr}}{12.011 \times 10^{-9} \times L_p \times t_{light}} \quad (\text{公式 2-35})$$

葉片氮含量 (N_{area}, kg m⁻²) 是指每單位投影葉面積中的氮含量。因葉片的碳氮比視為常數，而陽葉與陰葉的比葉面積 (SLA, kg C m⁻²) 不同，所以 N_{area} 在陽葉與陰葉中有所差異。陽葉與陰葉的 SLA 可利用生態生理參數中的陰葉對陽葉 SLA 比值 (SLA_{ratio}) 計算：

$$SLA_{sun} = \frac{L_{sun} + \frac{L_{shade}}{SLA_{ratio}}}{C_1} \quad (\text{公式 2-36})$$

$$SLA_{shade} = SLA_{sun} \times SLA_{ratio} \quad (\text{公式 2-37})$$

SLA_{sun} 與 SLA_{shade} 分別指陽葉與陰葉的 SLA；L_{sun} 與 L_{shade} 是陽葉與陰葉的葉面積指數。C₁ 是每單位地面積上的葉片碳重 (kg C m⁻²)。因 N_{area} 在陽葉與陰葉中不同，可利用 SLA 來分別計算陽葉與陰葉每單位投影葉面積中的氮含量 (N_{sun} 與 N_{shade}, kg m⁻²)：

$$N_{sun} = \frac{N_{mass}}{SLA_{sun}} \quad (\text{公式 2-38})$$

$$N_{shade} = \frac{N_{mass}}{SLA_{shade}} \quad (\text{公式 2-39})$$

N_{mass} 是指葉片中氮與碳的質量比，是生態生理常數中葉片碳氮比的倒數。

在 Biome-BGC 中，使用 Farquhar, von Caemmerer et al. (1980) 當中描述光合作用

的生化模式來做光合作用過程的模擬。實際同化速率 (A , $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) 是由兩個潛在同化速率當中取其較小值，這兩個潛在同化速率分別是取決於羧化酵素 (ribulose-bisphosphate carboxylase-oxygenase, Rubisco) 時的同化速率 (A_V , $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) 及取決於電子再生能力時的同化速率 (A_J , $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)。

Rubisco 的活性 (ACT , $\mu\text{mol CO}_2 \text{ kg}^{-2} \text{ rubisco s}^{-1}$) 及 Rubisco 進行羧化與氧化反應時的動力常數 (K_c 與 K_o , Pa) 均隨白天均溫而變化。二氧化碳補償點 (Γ^* , Pa) 是指當淨同化速率為零時，細胞間隙的二氧化碳分壓。可由下式得知：

$$\Gamma^* = \frac{0.21K_c \times O_2}{2K_o} \quad (\text{公式 2-40})$$

O_2 是指細胞間隙中氧的分壓 (Pa)。

分別計算陽葉與陰葉的最大羧化速率：

$$V_{c \max . \text{sun}} = N_{\text{sun}} \times f_{N_{\text{Rub}}} \times 7.16 \times ACT \quad (\text{公式 2-41})$$

$$V_{c \max . \text{shade}} = N_{\text{shade}} \times f_{N_{\text{Rub}}} \times 7.16 \times ACT \quad (\text{公式 2-42})$$

$f_{N_{\text{Rub}}}$ 是葉片的氮分配在 Rubisco 的比例 (fraction of leaf nitrogen in Rubisco)，是上述生態生理常數之一，在陽葉與陰葉當中使用一樣的數值。7.16 是 Rubisco 與其所含的氮的質量比。

由 $V_{c \max}$ 來計算最大電子傳送速率：

$$J_{\max} = 2.1 \times V_{c \max} \quad (\text{公式 2-43})$$

電子傳送潛在速率 (J , $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) 取決於 J_{\max} 與 PPFD，可由下式求得：

$$0.7J^2 \times \left(J_{\max} + \text{PPFD} \times \frac{\text{Pabs}}{\text{PPE}} \right) J + J_{\max} \times \text{PPFD} \times \frac{\text{Pabs}}{\text{PPE}} = 0 \quad (\text{公式 2-44})$$

Pabs 是指光合作用系統使用 PAR 的效率，在模式中設定為 0.85；PPE 是光合作用系統傳輸每個電子時所需吸收的光子，在 C3 植物中設定為 2.6。因 $V_{c \max}$ 、 J_{\max} 與 PPFD 在陽

葉與陰葉皆有所差異，故計算所得的 J 也會有陽葉、陰葉的區別。

分別計算 A_V 與 A_J ：

$$A_V = \frac{V_{cmax}(C_i - \Gamma^*)}{C_i + K_c \times \left(1 + \frac{O_2}{K_o}\right)} - MR_{ld} \quad (\text{公式 2-45})$$

$$A_J = \frac{J(C_i - \Gamma^*)}{4.5C_i + 10.5 \times \Gamma^*} - MR_{ld} \quad (\text{公式 2-46})$$

以上兩式中，除了 C_i 以外皆為前述已知參數。 C_i 是植物細胞間隙的二氧化碳分壓 (intercellular CO_2 concentration, Pa)， C_i 可由：

$$A_{(V \text{ or } J)} = g_{mTc}(C_a - C_i) \quad (\text{公式 2-47})$$

替換，代入上式，即可求得 A_V 與 A_J ，以兩者之中較小值作為同化速率 (A , $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)。

若欲推估到每天、每單位投影葉面積的光合作用量 (CF_A , $\text{kg m}^{-2} \text{day}^{-1}$)，則分別以陽葉、陰葉的同化速率乘上其投影葉面積、日照長度與分子量，再加上白天維持性呼吸消耗量：

$$CF_A = (A_{sun} \times L_{sun} + A_{shade} \times L_{shade}) \times t_{light} \times 12.011 \times 10^{-9} + CF_{ldmr} \quad (\text{公式 2-48})$$

■ 成長性呼吸

成長性呼吸是指植物在合成各個組織時所消耗的能量。在計算成長性呼吸時，植物組織被分為木質組織 (woody tissue) 與非木質組織 (non-woody tissue)，並且假設植物合成每單位質量的木質組織需消耗 2 倍質量的碳，合成非木質組織則消耗 1.2 倍質量的碳。因此計算成長性呼吸性時只需以這兩個常數乘以其所生長的組織量。

■ 植被的物候

對於常綠植物而言，在 Biome-BGC 中並沒有特別定義其生長季，而是全年皆可生長。植物的更新速率決定於生態生理參數中的葉片、細根以及活的木質組織的更新參

數。葉片與細根依更新的速率移送至枯落物部分，而活木質組織則移送往死木質組織。

■ 植物死亡率

除了固定的更新葉片與細根，在 Biome-BGC 中，還有一個機制將植物體以特定比例送到枯落物部分，這個特定比例是來自生態生理參數中「植物死亡率（Whole plant mortality）」這個參數除以 365 所得，表示植物體平均每日所須移送到枯落物的比例。這個機制同時也是在生態系未受干擾的情況下，木質組織離開植物體而移入枯落物的唯一途徑。

■ 枯落物與土壤有機質的分解過程

枯落物經由分解過程成為土壤有機質；土壤有機質再繼續分解，成為二氧化碳回歸大氣。每一個分解過程皆伴隨釋出特定比例的二氧化碳。

葉片與細根的枯落物被分為三個部份：易分解物質、纖維素與木質素，在此分別以 L1~L3 的代號稱之。由於這三種物質分解的難易程度不同，故須分別處理。死的莖與粗根成為粗木質殘體（coarse woody debris），經物理性的破碎化後，分為纖維素與木質素兩部份。土壤有機質亦依分解速率由快而慢分成的四個部份，在此以 S1~S4 的代號稱之。

枯落物以特定的速率常數將 L1~L3 的物質移送至土壤有機質的 S1~S3。土壤有機質的分解則依特定速率常數將物質由 S1 往 S4 移送（圖 6）。這些分解速率常數，是以 25°C、沒有水份限制時的分解速率常數作為基礎分解速率常數。實際的分解速率常數，需再考慮土壤溫度與溼度。模式當中假設：當土壤溫度低於-10°C 或土壤水勢能低於-10 Mpa 時，分解作用停止。高於上述條件時，則進行下列三式的計算：

$$S_{T_{soil}} = \exp \left[308.56 \times \left(\frac{1}{71.02} - \frac{1}{TK_{soil} - 227.13} \right) \right] \quad (\text{公式 2-49})$$

$$S_{\psi} = \frac{\log \left(\frac{-10}{\psi} \right)}{\log \left(\frac{-10}{\psi_{sat}} \right)} \quad (\text{公式 2-50})$$

$$k_{\text{corr}} = S_{\text{Tsoil}} \times S_{\psi} \times k \quad (\text{公式 2-51})$$

S_{Tsoil} 與 S_{ψ} 分別表示依當日的土壤溫度與溼度對基礎分解速率常數的調整，兩者相乘再分別乘以每個基礎分解速率常數 (k)，即是依當日土壤狀況所調整的分解速率常數 (k_{corr})。

由於分解過程中，當被分解的基質中的氮含量不足時，參與分解的微生物會自土壤中獲取無機氮，固定至基質中；而植物生長亦需從土壤當中吸收無機氮，兩者形成對氮的競爭關係。

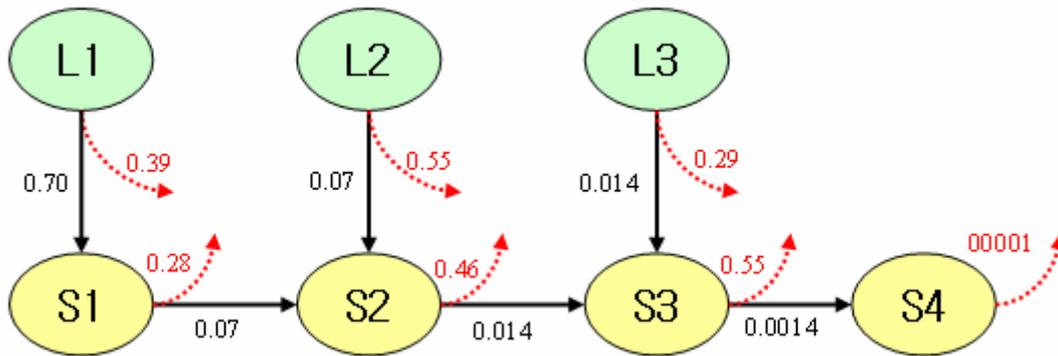


圖 6 Biome-BGC 枯落物與土壤有機質分解流程圖

依分解的難易度，將枯落物分為 L1~L3，土壤有機質分為 S1~S4。枯落物 L1~L3 以特定的分解速率將物質移送至土壤有機質的 S1~S3。土壤有機質依特定分解速率將物質由 S1 往 S4 移送。其中黑色數字（實線）為基礎分解速率常數；紅色數字（虛線）是指碳在分解過程中因異營呼吸而釋出的比例。

若土壤當中的無機氮足夠因應分解與生長所需，則分解能以不受氮限制時的潛勢能分解速率進行。以 L1 分解移至 S1 的過程為例，計算分解對氮的需求：

$$NF_{\min N_L1} = \frac{\left[C_{L1} \times k_{\text{corr}} \times \left(1 - CF_{\text{hr_L1_S1}} - \frac{CN_{S1}}{CN_{L1}} \right) \right]}{CN_{S1}} \quad (\text{公式 2-52})$$

$NF_{\min N_L1}$ 是指 L1 分解過程中對氮的需求。 NF_{L1_minN} 若為負值，表示基質中氮含量過多，分解過程中會釋放至土壤而成為無機氮；若為正值則表示必須吸收氮來協助分解的進行。 C_{L1} 是指 L1 的碳含量； $CF_{\text{hr_L1_S1}}$ 是 L1 分解至 S1 的過程中碳流失於異營呼吸的比例； CN_{S1} 與 CN_{L1} 分別是土壤 S1 與枯落物 L1 的碳氮比。

■ 碳與氮的分配

植物將光合作用所獲得的碳，扣除維持性呼吸與成長性呼吸，剩下的部分用於生長，並依根、莖、葉等不同部位的碳含量比值作生長的分配，同時以各部位的碳氮比來計算對氮的需求。

當土壤當中的無機氮能夠滿足分解與生長所需時，所有用於生長的碳能夠完全的分配。反之，若土壤中的氮不足以支應所需，這些氮則依分解與生長的需求量比例分配。考慮分配於生長的氮加上植物再吸收作用所得的氮是否足夠生長需求，若無法滿足生長所需，則植物將藉由減少光合作用的碳產量來達到碳氮的平衡。

3. 應用 Biome-BGC 於棲蘭山樣區台灣扁柏森林生態系—敏感度分析

本研究以棲蘭山樣區台灣扁柏森林生態系作為研究對象，應用 BIOME-BGC 模擬此生態系。在本章節中，描述此生態系的特徵與模擬所需的各種參數，並進行參數的敏感度分析，以了解對此生態系的碳收支而言，較為敏感的環境與生理因子為何。

3.1 研究樣區

棲蘭山 (Chi-Lan Mountain site, CLM site) 為台灣扁柏森林長期生態樣區，位於台灣東北部 (24°35'N, 121°25'E)，為海拔 1400-1800 公尺，面積約 310 公頃的台灣扁柏 (*Chamaecyparis obtusa* var. *formosana*) 森林 (圖 7)。此區於 1961 年進行檜木天然下種更新造林作業，目前樣區上的林木為當時保留下來的台灣扁柏自然下種，樹齡約在 40 年間(彭令豐 1988)。氣候上，屬於副熱帶山區，年雨量豐沛。2003 年 3 月~2004 年 2 月，雲霧籠罩時數佔全年的 38%，以春、冬雲霧籠罩時間較長，為一典型雲霧森林 (Chang et al. 2006)。

此研究區於 100 號林道 14.5 公里南方約 50 公尺處有一座高 23 公尺的氣象塔，長期監測與紀錄各種氣象資料。為進行長期生態研究，國立東華大學自然資源管理研究所於 2002 年在此畫設 1 公頃長期研究樣區，位於 100 號林道 14.5 公里南方處。目前對於碳收支之研究已有初步的基礎，如生物量的調查(葉青峰 2004, 陳凱欣 2005)、養分的流量與存量(朱慧君 2005)以及土壤呼吸之研究(Chang et al. 2008)。基於上述的基礎，本研究選擇於此進行 Biome-BGC 之模擬，模擬所需的本研究區之參數將詳述於下。

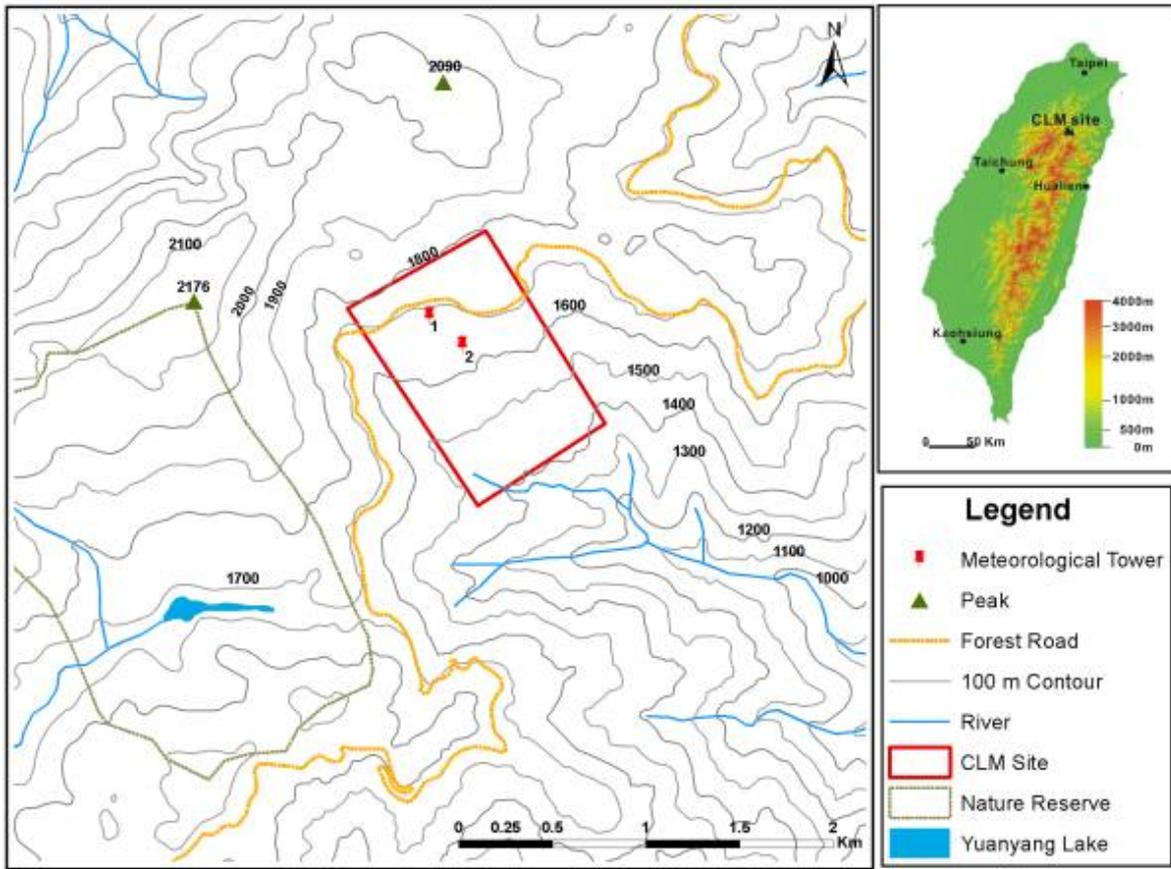


圖 7 研究樣區位置圖

紅色方框為研究樣區，其中標示 1、2 的紅點為氣象塔，在本研究中所使用的氣象資料源自於 1 號氣象塔

3.1.1 樣區參數

樣區參數包括海拔、緯度、根系深度、土壤質地、反照率、大氣二氧化碳濃度、大氣氮沉降量、生物固氮量與模擬起點的狀態。在研究中所使用的樣區參數整理於表 3，並說明於下。

表 3 棲蘭山樣區台灣扁柏森林生態系的樣區參數

樣區參數	
緯度	24° 35' N
海拔高度	1650 m
根系深度	0.25 m
土壤質地：	
砂粒	30%
粉粒	50%
黏粒	20%
反照率	0.1
大氣二氧化碳濃度：	
工業化前	294.842 ppm
工業化後	依照 EPI 所公佈之大氣二氧化碳濃度
生物固氮量	0.0004 kg N m ⁻² yr ⁻¹
大氣氮沉降量：	
工業化前	0.0001 kg N m ⁻² yr ⁻¹
工業化後	2003 年之前依照 NADP 所公佈之大氣氮沉降量，2003 年之後依棲蘭山研究區調查之結果
模擬起點的碳存量：(kg C m ⁻²)	
葉片碳存量	0.001
莖碳存量	0.0
粗木質殘體碳存量	0.0
枯落物碳存量	0.0
土壤碳存量	0.0
模擬起點的氮狀態：(kg N m ⁻²)	
枯落物氮存量	0.0
土壤氮存量	0.0

■ 根系深度

當土壤中含有石塊時，必須依含石率來降低根系深度的數值，以避免高估植物可用水份以及土壤中的碳與氮存量。本研究區台灣扁柏的根系分布約可達 0.6 公尺深(張世杰 未發表)，然而土壤中的含石率很高。其中 0~0.4 公尺的土壤含石率已有調查資料(朱慧君 2005)，調查結果顯示土壤深度與含石率具有正相關 ($r=0.997$, $n=4$) (圖 8)。本研究利用 0~0.4 公尺的土壤深度與含石率之關係，推估 0.5 與 0.6 公尺的含石率分別為 80.85%與 88.69%，再計算 0~0.6 公尺平均含石率為 58.79%。因此本研究區的土壤中，能夠容納根系生長的空間為 41.21%，「根系深度」參數則以 0.6 公尺乘以 41.21%，以 0.25 公尺表示之。

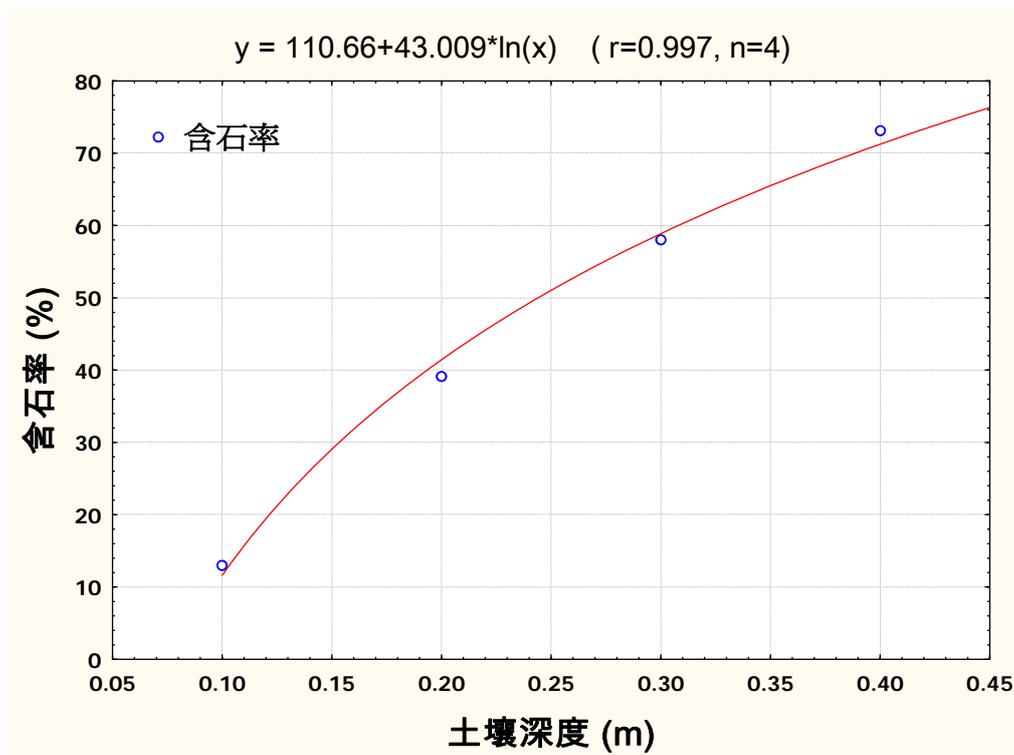


圖 8 土壤深度與土壤含石率關係圖

- 反照率

反照率 (albedo, α) 是指入射的短波輻射被地表物質反射的比率。本研究以 2005 年 6 月至 2006 年 5 月短波輻射入射與反射之數值，計算得到本樣區之反照率為 0.1。而本樣區之反照率在一年之中以夏季較為穩定，秋冬季節變動較大。一日之內，反照率受雲霧影響而有波動，當樣區為雲霧繚繞時，反照率較為偏高，並且隨著能見度的提高而降低、能見度下降而提高；晴朗天氣時，反照率穩定偏低。

- 大氣氮沉降量

大氣中的氮經由重力沉降（如藉由雨水、雪水或以顆粒懸浮物直接落下）與截留沉降（如藉由雲霧沉降）進入生態系中。在本研究區，藉由雨水與霧水中的硝酸根與銨根含量來計算 2003-2007 年的大氣氮沉降量(簡意婷 2008)；2003 年之前則使用 NADP 所公佈之氮沉降量。進行 spin-up 的模擬，需要工業化前的大氣氮沉降量，在此設為 $0.0001 \text{ kg N m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ 。

- 生物固氮量

生物固氮是指具有固氮能力的微生物將大氣中的氮氣 (N_2) 轉變為植物可吸收利用的形式。目前在棲蘭山研究區並無相關研究。文獻中溫帶針葉林的生物固氮量約介於 $0.0001-0.0005 \text{ kg N m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ (Boring et al. 1988)，在溫暖潮濕的氣候區較為偏高，因此在此假設本研究區的生物固氮量為 $0.0004 \text{ kg N m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ ，並對此參數進行敏感度分析。

- 大氣二氧化碳濃度

在本研究中，將工業化前的大氣二氧化碳濃度定義為 294.842 ppm。工業化之後的大氣二氧化碳濃度則依 EPI (Earth Policy Institute⁴) 的報告。

- 模擬起點的狀態

本研究使用 spin-up 模擬取得此生態系的穩定狀態，作為模擬的起點，再依其擾動歷史做後續模擬（敘述於後）。spin-up 的模擬，系統的碳氮存量開始於極低值，在本研究中將葉片碳存量設為 0.001 kg m^{-2} ，其他碳氮存量皆為零。

⁴ http://www.earth-policy.org/Indicators/CO2/2008_data3.htm

3.1.2 氣象資料

本研究以 2004-2007 年棲蘭山氣象塔所測得之氣象資料，作為模擬此區域所需之氣象資料。Biome-BGC 所需的氣象資料包括每日的最高溫度 ($^{\circ}\text{C}$)、最低溫度 ($^{\circ}\text{C}$)、平均溫度 ($^{\circ}\text{C}$)、降水量 (cm)、飽和水蒸氣壓差 (Pa)、短波輻射通量密度 (W m^{-2})、日照長度(sec)。由於本研究區目前並沒有工業化前的氣象資料，因此必須假設 2004-2007 年的氣象資料能夠代表此生態系長期的氣候狀況。

■ 溫度

以氣象塔之溫溼度計(RHT2nl, Delta-T, UK)測量，每 10 分鐘由資料處理器(DL2e, Delta-T, U.K. and CR10x, Campbell, U.S.A.) 記錄 1 筆該時段數據的平均值。

■ 降水量

降水量 (precipitation) 用以表示進入此系統的水分。在 Biome-BGC 相關文獻中，降水量為降雨與降雪之和，並未提及霧水。但在本研究區，雲霧籠罩時數佔 38%，霧水量約為雨水的 6% (簡意婷 2008)，若忽略不計，將低估進入系統的水分與冠層截留量。而降雪事件在本研究區較為罕見，因此在本研究區並沒有針對降雪的收集裝置，故在此忽略之。在本研究中，將降水量視為雨水與霧水之總和。降雨量由設置於距離氣象塔約 500 公尺之林外的傾斗式雨量計 (Rain gauge, RG) (0.5 mm, TIC-1, 竹田計器工業株式會社, Japan) 收集；霧水沈降量由能見度資料套用本樣區的雲霧沈降模式計算之 (Chang et al. 2006)。

■ 飽和水蒸氣壓差

飽和水蒸氣壓是溫度的函數。飽和水蒸氣壓差則是飽和水蒸氣壓與目前的水蒸氣壓之間的差。在本研究中，利用氣象塔之溫溼度計 (RHT2nl, Delta-T, UK) 所測得之溫溼度，以及公式 2-4、2-5 計算得之。

■ 短波輻射流量密度

短波輻射由氣象塔上的輻射計 (Net radiometer CNR-1, Kipp & Zonen, Holland) 測量。

- 日照長度

在本研究中，日照長度是取自於由中央氣象局所公布的 2004-2007 年宜蘭地區日出日落時刻計算得之。

3.1.3 生態生理常數

在 Biome-BGC 中，針對常綠針葉林，提供經由文獻蒐集整理而來的生態生理常數。而生態生理常數用以定義植被之生態生理特徵。為使模擬能更貼近實際狀況，因此若在本研究區已有調查結果之參數，則以之取代模式所提供的數值。以下分類別來描述在本研究中所使用的生態生理常數。

- 更新與死亡

對於葉片的更新，在本研究區已有針對台灣扁柏地上部生物量與枯落物量之調查(葉青峰 2004, 朱慧君 2005)。而在 Biome-BGC 中，細根與葉片的更新以同一個參數來表示 ($T_{\text{leaf-fr}}$)，即假設兩者更新的速率相同。因此本研究以台灣扁柏葉片的年枯落物量除以葉片生物量來表示為葉片的更新速率，並做為 $T_{\text{leaf-fr}}$ 之值 (表 4)。

活木質組織的更新 (T_{lw}) 與整株植物死亡率 (M) 目前並無相關研究，因此以模式所提供針對常綠針葉林的數值表示。而本研究區為雲霧森林，十分潮溼，此將火災干擾而引起的死亡率 (M_{fire}) 設為 0。

- 分配

分配參數描述植物不同部位之間碳的生長量比，在本研究區有實測數值的是「碳分配：莖比葉片」。其他參數尚未有調查結果，因此以模式中的預設值代替 (表 5)。

- 碳氮比

碳氮比參數用以描繪組織中的碳濃度。目前在本研究區已進行的碳氮比分析有葉片、枯落物與細根(朱慧君 2005) (表 6)。

■ 易分解物質、纖維素、木質素比例

易分解物質、纖維素、木質素的比例影響分解的速率。在本研究區，已分析細根當中三者的比例，葉片枯落物與木質組織則尚無研究資料（表 7）。

■ 葉片與冠層形態

在 Biome-BGC 中，SLA 是指每單位碳質量所對應的葉面積 ($\text{m}^2 \text{kg}^{-1} \text{C}$)，本研究區所調查之數值為 $8.23 \text{ m}^2 \text{kg}^{-1} \text{C}$ (朱慧君 2005；賴宜鈴 未發表) (表 8)。截留係數 (k_{int}) 意指每單位葉面積指數所能截留的當日降雨量比例。由於本研究區時常有雲霧籠罩，若將霧水也計入時，截留水佔總沉降量的 34% (林志偉 2007)，再除以總葉面積指數(吳敏如 2003)而得此參數。光衰減係數是指光量由樹冠上層往下層減少的常數。本研究以 2006 年的短波輻射資料，利用 Beer's law 計算而得之。葉片中的氮含量投資於 Rubisco 的比例 (f_{Nrub}) 可計算得之 (公式 2-7)。在本研究區，最大光合作用速率平均約為 $6 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ (賴宜鈴 未發表)，在光飽和時，最大光合作用速率是 V_{cmax} 的 0.19 倍 (Farquhar et al. 1980)，進而推得 V_{cmax} ；SLA 與 CN_{leaf} 則如前述。計算得到本研究區之 f_{Nrub} 為 0.038。

■ 傳導速率

傳導相關參數目前在本研究區尚未有研究資料，因此使用模式預設值 (表 9)。

表 4 棲蘭山樣區台灣扁柏森林生態系的生態生理常數—更新與死亡

「常綠針葉林」指 Biome-BGC 對常綠針葉林所提供的生態生理常數；「棲蘭山台灣扁柏森林」則是本研究區的實測數值，在本研究中用以替換模式的預設值，若此欄位為空白，表示尚無實測資料，在本研究中則使用「常綠針葉林」數值。

參數	代號	單位	常綠 針葉林	棲蘭山 台灣扁柏森林	引用文獻
葉片與細根更新速率	$T_{\text{leaf-fr}}$	%	0.25	0.22	葉青峰 2004 朱慧君 2005
活的木質組織更新速率	T_{lw}	%	0.70		
整株植物死亡率	M	%	0.005		
植物火燒死亡率	M_{fire}	%	0.005	0	

表 5 棲蘭山樣區台灣扁柏森林生態系的生態生理常數—分配

「常綠針葉林」指 Biome-BGC 對常綠針葉林所提供的生態生理常數；「棲蘭山台灣扁柏森林」則是本研究區的實測數值，在本研究中用以替換模式的預設值，若此欄位為空白，表示尚無實測資料，在本研究中則使用「常綠針葉林」數值。

參數	代號	單位	常綠 針葉林	棲蘭山 台灣扁柏森林	引用文獻
細根對葉片的碳分配比例	$C_{fr:l}$	無	1.0		
莖對葉片的碳分配比例	$C_{s:leaf}$	無	2.2	1.08	葉銘哲 未發表
活木質組織對所有木質組織 的碳分配比例	$C_{lw:tw}$	無	0.1		
粗根對莖的碳分配比例	$C_{cr:s}$	無	0.3		

表 6 棲蘭山樣區台灣扁柏森林生態系的生態生理常數—碳氮比

「常綠針葉林」指 Biome-BGC 對常綠針葉林所提供的生態生理常數；「棲蘭山台灣扁柏森林」則是本研究區的實測數值，在本研究中用以替換模式的預設值，若此欄位為空白，表示尚無實測資料，在本研究中則使用「常綠針葉林」數值。

參數	代號	單位	常綠 針葉林	棲蘭山 台灣扁柏森林	引用文獻
葉片碳氮比	CN_{leaf}	kg C kg N ⁻¹	42	62.7	朱慧君 2005
枯落物碳氮比	CN_{lit}	kg C kg N ⁻¹	93	66.6	朱慧君 2005
細根碳氮比	CN_{fr}	kg C kg N ⁻¹	42	81.38	朱慧君 2005
活木質組織碳氮比	CN_{lw}	kg C kg N ⁻¹	50		
死木質組織碳氮比	CN_{dw}	kg C kg N ⁻¹	729		

表 7 棲蘭山樣區台灣扁柏森林生態系的生態生理常數—易分解物質、纖維素、木質素比例

「常綠針葉林」指 Biome-BGC 對常綠針葉林所提供的生態生理常數；「棲蘭山台灣扁柏森林」則是本研究區的實測數值，在本研究中用以替換模式的預設值，若此欄位為空白，表示尚無實測資料，在本研究中則使用「常綠針葉林」數值。

參數	代號	單位	常綠 針葉林	棲蘭山 台灣扁柏森林	引用文獻
細根中易分解物質比例	FR _{lab}	%	0.32	0.588	張世杰 未發表
細根中纖維素比例	FR _{cel}	%	0.44	0.274	張世杰 未發表
細根中木質素比例	FR _{lig}	%	0.24	0.138	張世杰 未發表
葉片枯落物易分解物質比例	Lit _{lab}	%	0.30		
葉片枯落物中纖維素比例	Lit _{cel}	%	0.45		
葉片枯落物中木質素比例	Lit _{lig}	%	0.25		
死木質組織中纖維素比例	DW _{cel}	%	0.76		
死木質組織中木質素比例	DW _{lig}	%	0.24		

表 8 棲蘭山樣區台灣扁柏森林生態系的生態生理常數—葉片與冠層形態

「常綠針葉林」指 Biome-BGC 對常綠針葉林所提供的生態生理常數；「棲蘭山台灣扁柏森林」則是本研究區的實測數值，在本研究中用以替換模式的預設值，若此欄位為空白，表示尚無實測資料，在本研究中則使用「常綠針葉林」數值。

參數	代號	單位	常綠 針葉林	棲蘭山 台灣扁柏森林	引用文獻
比葉面積	SLA	m ² kg C ⁻¹	12	8.23	朱慧君 2005 賴宜鈴 未發表
葉片表面積指數對投影 葉面積指數比例	L _{A:P}	無	2.6		
陰葉 SLA 對陽葉 SLA 比例	SLA _{shd:sun}	無	2		
截留係數	k _{int}	mm LAI ⁻¹	0.041	0.023	吳敏如 2003 林志偉 2007
光衰減係數	k _{light}	無	0.27	0.47	本研究
Rubisco 氮含量對葉片氮 含量比例	f _{Nrub}	無	0.04	0.038	朱慧君 2005 賴宜鈴 未發表

表 9 棲蘭山樣區台灣扁柏森林生態系的生態生理常數—傳導速率

「常綠針葉林」指 Biome-BGC 對常綠針葉林所提供的生態生理常數；「棲蘭山台灣扁柏森林」則是本研究區的實測數值，在本研究中用以替換模式的預設值，若此欄位為空白，表示尚無實測資料，在本研究中則使用「常綠針葉林」數值。

參數	代號	單位	常綠 針葉林	棲蘭山 台灣扁柏森林	引用文獻
最大氣孔導度	$g_{s,max}$	$m\ s^{-1}$	0.005		
表皮導度	g_c	$m\ s^{-1}$	0.00001		
邊界層導度	g_{bl}	$m\ s^{-1}$	0.01		
氣孔開始縮小時的葉片水勢	ψ_i	MPa	-0.6		
氣孔完全閉合時的葉片水勢	ψ_f	MPa	-3.9		
氣孔開始縮小時的飽和水蒸氣壓差	VPD_i	Pa	1800		
氣孔完全閉合時的飽和水蒸氣壓差	VPD_f	Pa	4100		

3.2 參數的敏感度分析

參數的敏感度分析是指當其他條件不變下，一次變動一個參數的值，分析變動此參數對模擬結果的影響程度。透過敏感度分析，能夠發現在此生態系中，對模擬結果影響力較大的參數。

3.2.1 方法

本研究進行的參數敏感度分析，主要針對用以描述植被特徵的生態生理常數來進行測試。另外樣區參數中的「生物固氮量」，在本研究區中並未有相關研究，而使用參考自文獻的數值，因此也對此進行敏感度分析。

模擬設計說明於下。首先以 spinup 達到系統的穩定狀態，使用的是工業化前的大氣氮沉降量與二氧化碳濃度。接著以 1858-2007 年的大氣氮沉降量與二氧化碳濃度進行 150 年的模擬，用以表示工業化後的環境（圖 9）。所有的模擬皆使用 2004-2007 年氣象資料。

對每個進行敏感度分析的參數，變動 80%—120%（除了葉片碳氮比與枯落物碳氮比之外，這兩個參數分別變動 100%—60%，以及 100%—140%），並進行上述的模擬過

程。將每次參數變動所模擬得到的 NPP 進行下列的計算，以表示 NPP 對此參數的敏感度：

$$\text{敏感度} = \frac{\Delta y}{\Delta x}$$

Δx 表示參數變動的百分比； Δy 表示 NPP 因參數變動而改變的百分比。依敏感程度將參數分類：考慮敏感度的絕對值，（1）若大於 0.2，表示 NPP 對此參數有高敏感性；（2）若介於 0.1~0.2，則表示中敏感性；（3）若小於 0.1，則視為低敏感性。

由上述的方法挑選出高敏感性的參數，在±20%之間，參數每變動 1%即進行一次模擬，以觀察在這段變動範圍內 NPP 與 GPP 被影響的情形。

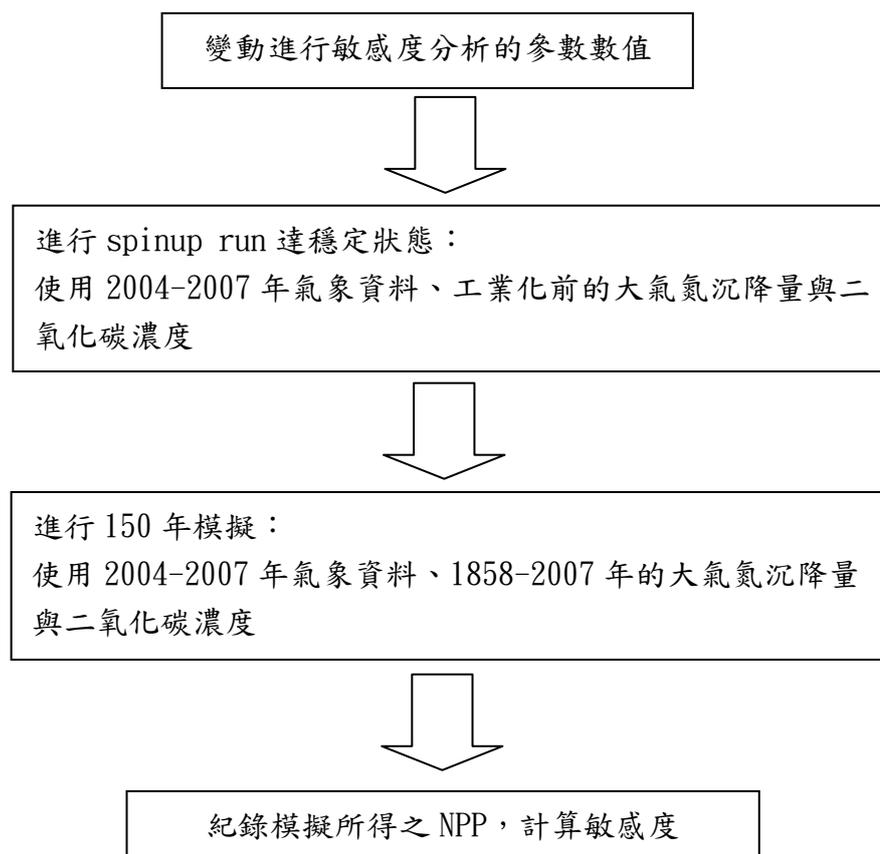


圖 9 參數的敏感度分析流程圖

3.2.2 敏感度分析之結果與討論

就本研究進行敏感度分析的參數中，具有高度敏感性的參數有「整株植物死亡率」、「莖對葉片的碳分配比例」、「葉片碳氮比」、「陰葉 SLA 對陽葉 SLA 比例」、「光衰減係數」與「生物固氮量」（表 10）。

在本研究區較為敏感的參數皆與碳或氮的獲取與分配相關，而與水分傳導相關的參數皆不敏感。推測是由於本研究區水分充足，水分不是限制本生態系生產力之主因，故有關水分傳導的參數皆較為不敏感。

針對這六個在本研究中具高敏感性的參數，分別進行更細緻的敏感度分析，在 $\pm 20\%$ 之間，每改變 1%即進行一次的模擬。這六個參數的敏感度分析結果，GPP 與 NPP 都出現驟升或驟降的現象（圖 11~ 圖 15）；本研究也發現，當 GPP 與 NPP 出現驟然升降的前後次模擬，其進行 spin-up 運算所需的年數也有很大差異。

由於這些參數是用以反應此一生態系的植被生理特徵與樣區特性，參數的改變會影響此生態系的碳、氮、水與輻射之收支，進而改變此系統的長期穩定狀態。在 Biome-BGC 中，利用 spin-up 運算系統達到穩定狀態所需的年數，也會因參數的改變而改變。spin-up 的功能，是用以計算此生態系長期發展之下的穩定狀態； spin-up 進行的年數若不同，所運算之穩定狀態也不同，當年數差異越大，其穩定狀態的差異也越大。因此，本研究認為，GPP 與 NPP 的驟然升降，是源於 spin-up 進行的年數有所差異，而 spin-up 年數的差異則是因參數的改變，影響系統的碳、氮、水與輻射收支，改變了系統判斷穩定狀態的時間點。

表 10 參數敏感度分析結果

類別	參數	敏感度
更新與死亡率	葉片與細根的更新速率	-0.024
	木質組織的更新速率	0.012
	整株植物死亡率	-0.270**
分配	細根對葉片的碳分配比例	0.178*
	莖對葉片的碳分配比例	0.385**
	活木質組織對所有木質組織的碳分配比例	0.002
	粗根對莖的碳分配比例	0.032
碳氮比	葉片碳氮比	0.285**
	枯落物碳氮比	-0.195*
	細根碳氮比	-0.135*
	活木質組織碳氮比	-0.007
	死木質組織碳氮比	0.006
葉片與冠層形態	比葉面積	-0.004
	葉表面積指數對投影葉面積指數比例	-0.002
	陰葉 SLA 對陽葉 SLA 比例	-0.252**
	截留係數	-0.002
	光衰減係數	0.218**
	Rubisco 氮含量對葉片氮含量比例	-0.182*
傳導速率與限制	最大氣孔導度	0.005
	表皮導度	0
	邊界層導度	0.001
	氣孔開始縮小時的葉片水勢	0
	氣孔完全閉合時的葉片水勢	0
	氣孔開始縮小時的飽和水蒸氣壓差	0
	氣孔完全閉合時的飽和水蒸氣壓差	0
樣區參數	生物固氮量	0.657**

*表示中度敏感性，**表示高度敏感性

以下分別呈現這六個參數的敏感度分析之結果與討論。

■ 整株植物死亡率 (M)

整株植物死亡率進行-20%到+20%的變動時，GPP 由 101%減少至 88%；NPP 由 101%減少至 90% (圖 10)。當 M 介於 0.0055 到 0.00555 之間時，GPP 與 NPP 對此參數具極高的敏感性。

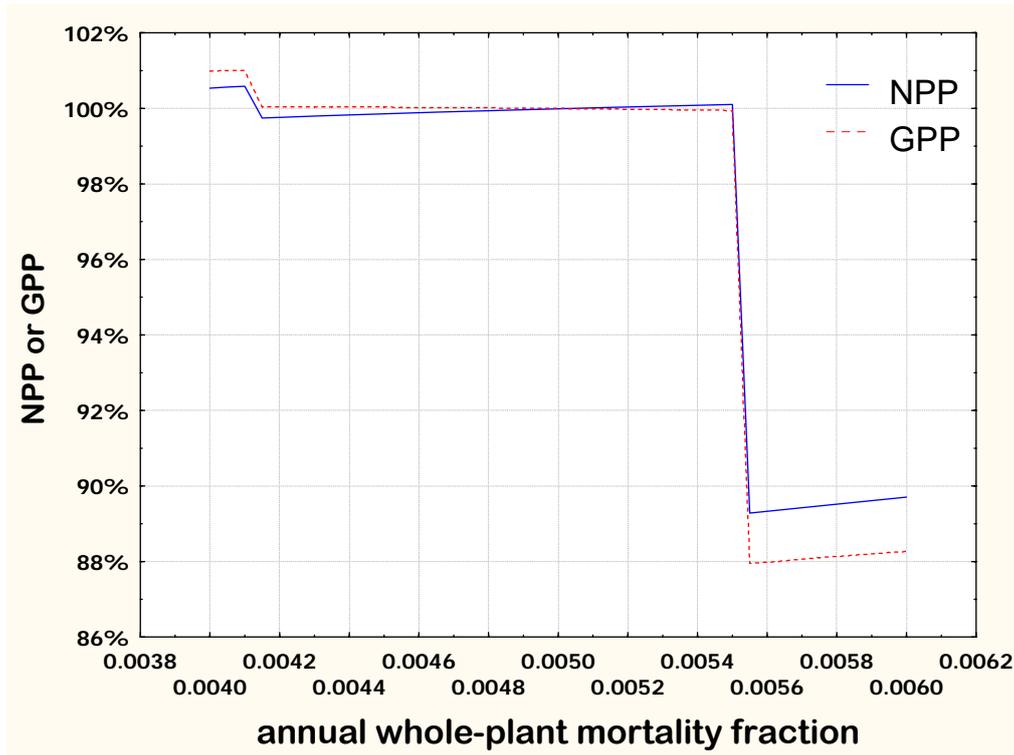


圖 10 敏感度分析—整株植物死亡率

橫座標表示此參數進行敏感度分析所變動的範圍，縱座標表示參數變動後模擬所得的 GPP 與 NPP 相較於參數未變動時的百分比。

■ 莖對葉片的碳分配比例 ($C_{s:leaf}$)

當 $C_{s:leaf}$ 由 80% 增加到 120% 時，GPP 的變動範圍為 89%–101%，NPP 的變動範圍為 87%–102% (圖 11)。莖對葉片的碳分配比值增加時，表示植物將較多的碳分配於莖，較少的碳分配於葉，造成光合作用的能力降低，使 GPP 下降。在 Biome-BGC 中，自營呼吸分為成長性呼吸 (GR) 與維持性呼吸 (MR)。MR 取決於組織中的氮濃度，莖的氮濃度 (活木質組織+死木質組織) 小於葉片的氮濃度，使 MR 降低，NPP 上升。

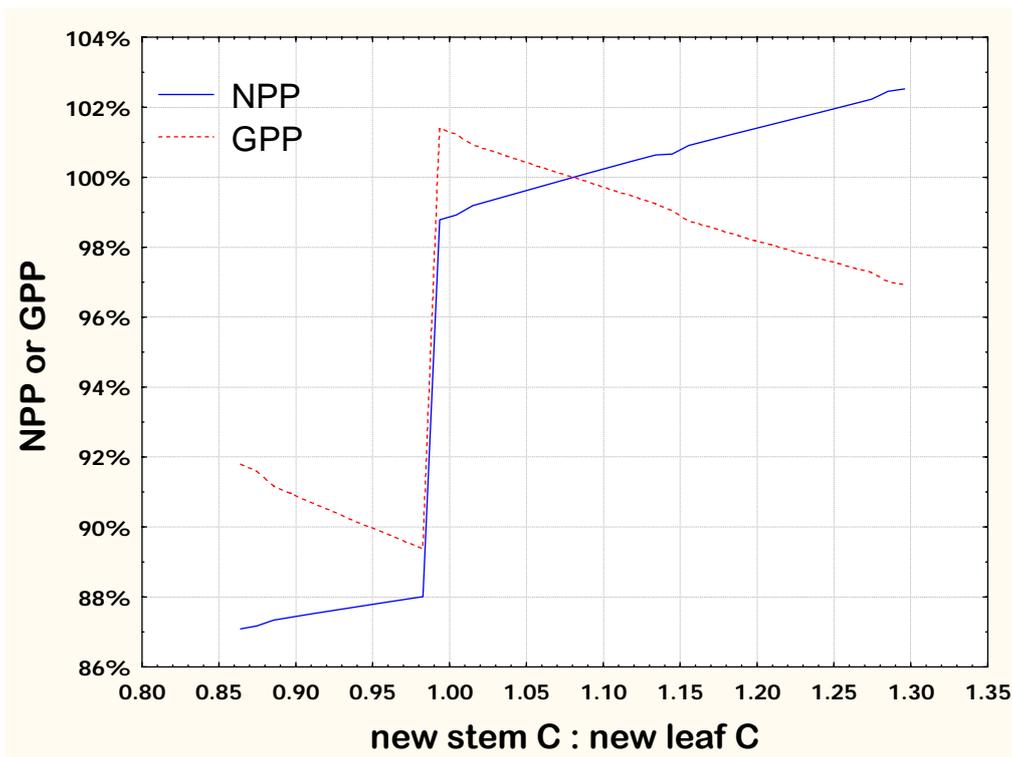


圖 11 敏感度分析—莖對葉片的碳分配比例

橫座標表示此參數進行敏感度分析所變動的範圍，縱座標表示參數變動後模擬所得的 GPP 與 NPP 相較於參數未變動時的百分比。

■ 葉片碳氮比 (CN_{leaf})

「葉片碳氮比」參數由 60% 增至 100% 時，GPP 的變動範圍為 89%–113%，NPP 的變動範圍為 88%–100% (圖 12)。 CN_{leaf} 增加時，表示葉片中的氮含量降低。而氮是 Rubisco 的成分。因此葉片中的氮減少降低光合作用的能力，使 GPP 下降。除此之外，組織中的氮濃度決定其維持性呼吸速率，葉片維持性呼吸隨著氮含量的減少而降低，使 NPP 上升。

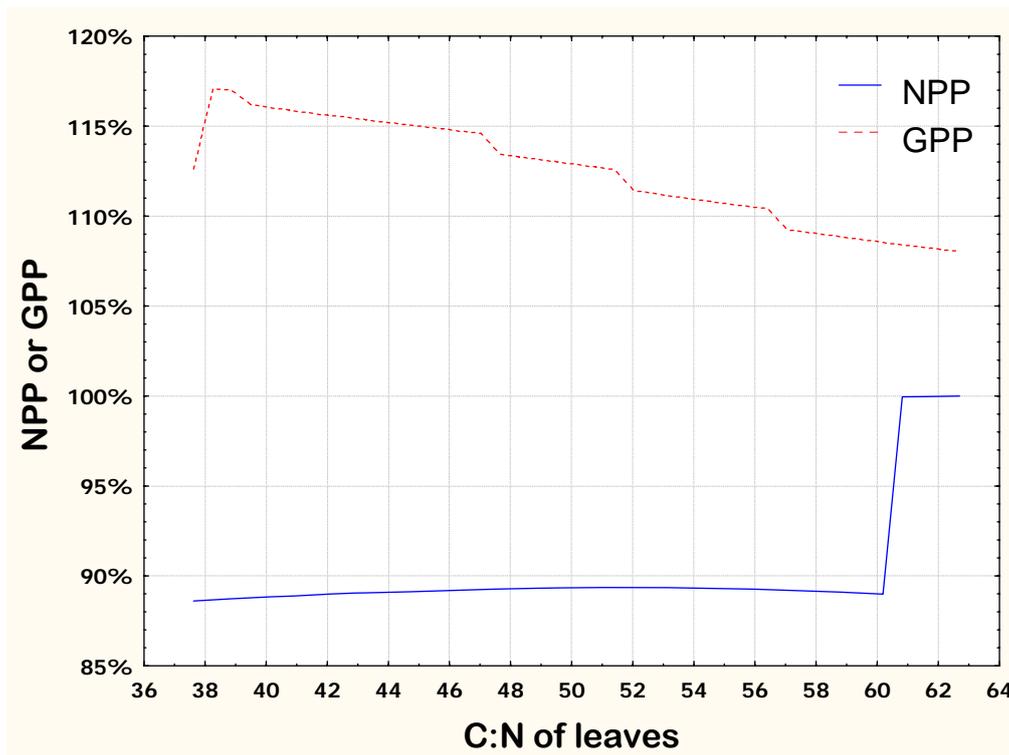


圖 12 敏感度分析—葉片碳氮比

橫座標表示此參數進行敏感度分析所變動的範圍，縱座標表示參數變動後模擬所得的 GPP 與 NPP 相較於參數未變動時的百分比。

■ 陰葉 SLA 對陽葉 SLA 比例 ($SLA_{shd:sun}$)

當 $SLA_{shd:sun}$ 由 80% 增加到 120% 時，GPP 與 NPP 的變動範圍為 89%—100% (圖 13)。 $SLA_{shd:sun}$ 越高時，表示陰葉的 SLA 越大，即單位碳重所對應的葉面積越大，而投資於葉片的氮取決於碳重。因此當陰葉的 SLA 越大，投資於陰葉的氮越少，有較多的氮可利用於其他有利的地方。

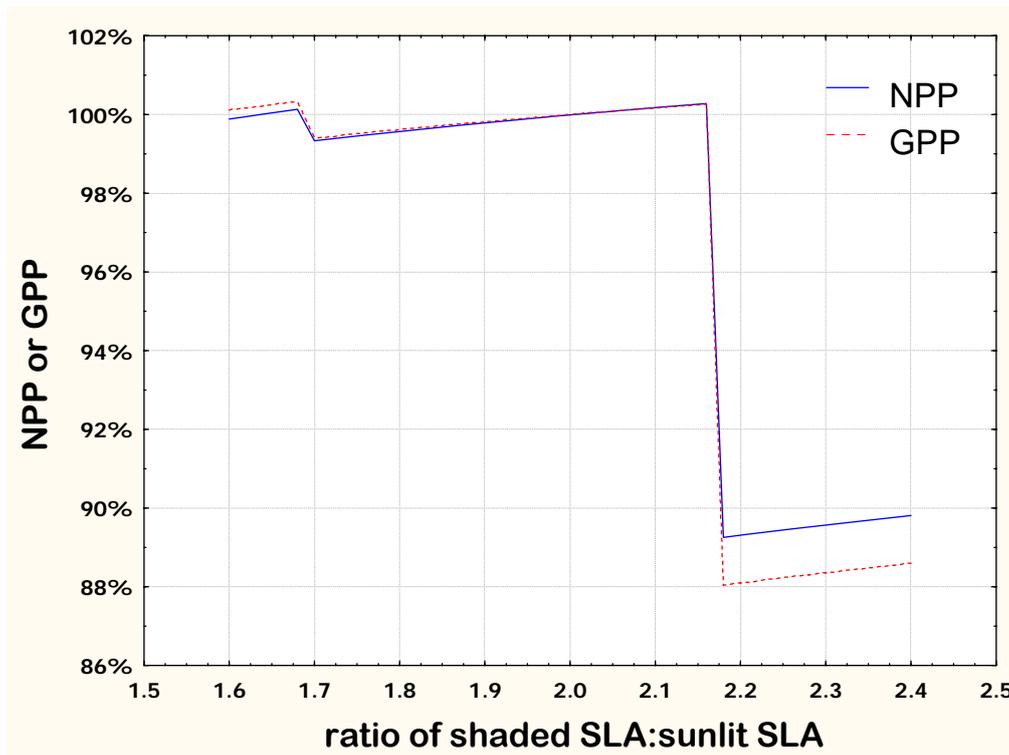


圖 13 敏感度分析—陰葉 SLA 對陽葉 SLA 比例

橫座標表示此參數進行敏感度分析所變動的範圍，縱座標表示參數變動後模擬所得的 GPP 與 NPP 相較於參數未變動時的百分比。

■ 光衰減係數 (k_{light})

當 k_{light} 參數由 80% 增加到 120% 時，GPP 的變動範圍為 88%–100%，NPP 的變動範圍為 89%–100% (圖 14)。

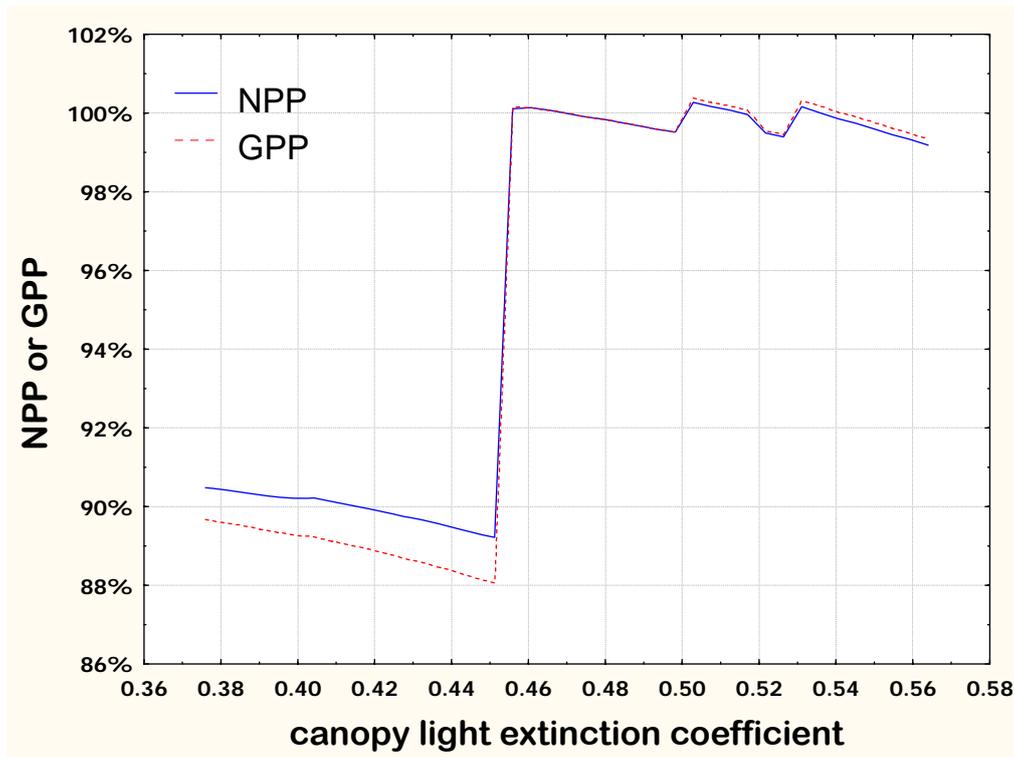


圖 14 敏感度分析—Rubisco 氮含量比葉片氮含量

橫座標表示此參數進行敏感度分析所變動的範圍，縱座標表示參數變動後模擬所得的 GPP 與 NPP 相較於參數未變動時的百分比。

■ 生物固氮

當生物固氮量由 80%增加到 120%時，GPP 的變動範圍為 83%—111%，NPP 的變動範圍為 84%—110%（圖 15）。生物固氮量的增加，表示系統中可利用的氮增加，使 GPP 與 NPP 提高。

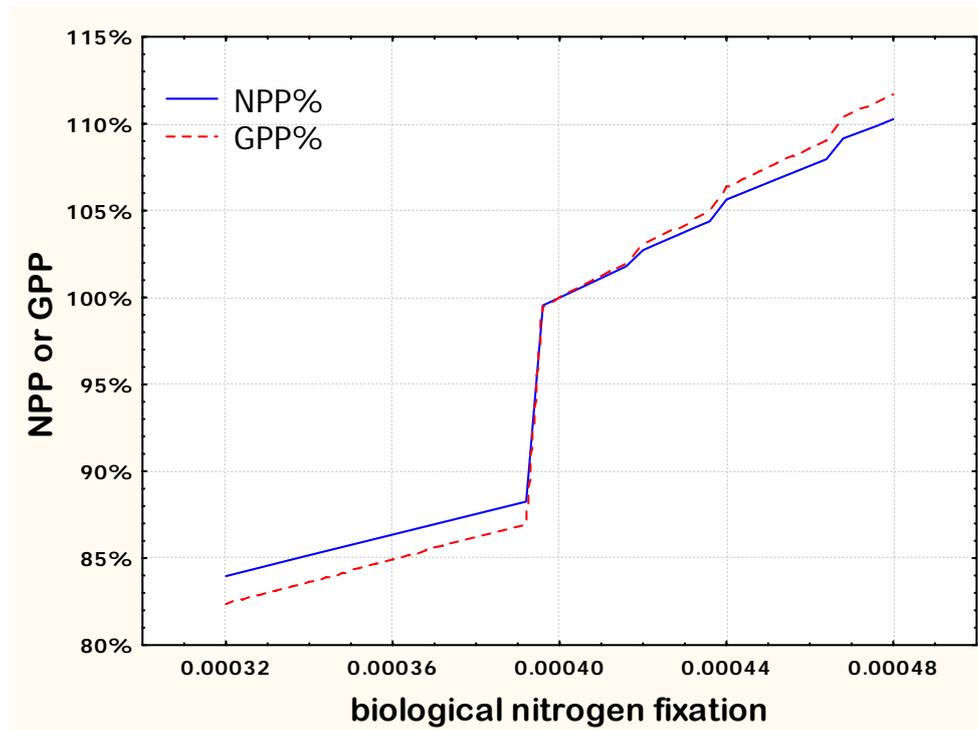


圖 15 敏感度分析—生物固氮量

橫座標表示此參數進行敏感度分析所變動的範圍，縱座標表示參數變動後模擬所得的 GPP 與 NPP 相較於參數未變動時的百分比。

4. 應用 Biome-BGC 於棲蘭山樣區台灣扁柏森林生態系—碳收支之模擬

本章呈述 Biome-BGC 對棲蘭山樣區台灣扁柏森林生態系的模擬，主要針對碳收支部分加以討論，包括此生態系在砍伐前後碳通量與碳存量的變化、土壤呼吸速率與蒸散作用的模擬與實測值比較。而棲蘭山樣區台灣扁柏森林生態系為一雲霧森林，雲霧所帶來的物理環境變化，包括輻射量的降低與長時間的潮濕。在 Biome-BGC 模式的相關研究中尚未有應用於雲霧林的例子，因此本章亦就 Biome-BGC 的模擬設計，討論其應用於此生態系的適用性與限制。

4.1 模擬流程

本研究應用 Biome-BGC 模擬棲蘭山樣區台灣扁柏森林生態系目前的碳收支情形。模擬所需的樣區參數、氣象資料與生態生理常數的彙整已於上述。由目前已知的文獻，本研究區於 1960 年間進行伐木與天然下種更新作業(彭令豐 1988)。由於外在的干擾會改變系統的穩定狀態，若以 spinup 計算系統的穩定狀態，需再考慮擾動所帶來的影響，對於系統中的碳存量必須加以調整。因此本研究採用 Thornton et al. (2002)的方式進行 90%的伐木模擬，其內容如下：(1) 地上部木質組織減少 90% (自系統中移除)；(2) 葉片碳存量減少 90%，其中 85.5%轉移至枯落物中，4.5%系統中移除；(3) 細根碳存量減少 90%，皆轉移至枯落物中；(4) 地下部木質組織減少 90%，皆轉移至粗木質殘體(coarse woody debris)中。

本研究進行模擬的流程如下：(1) 以 spinup 取得系統的穩定狀態，使用的是工業化前的 CO₂ 濃度與氮沉降量；(2) 進行 1860-1959 年的模擬，使用 1860~1959 年的 CO₂ 濃度與氮沉降量；(3) 進行 90%伐木模擬；(4) 進行 1960-2059 年模擬，使用 1960-2059 年的 CO₂ 濃度與 1960-2007 年氮沉降量 (圖 16)。所有的模擬皆使用 2004-2007 年氣象資料。

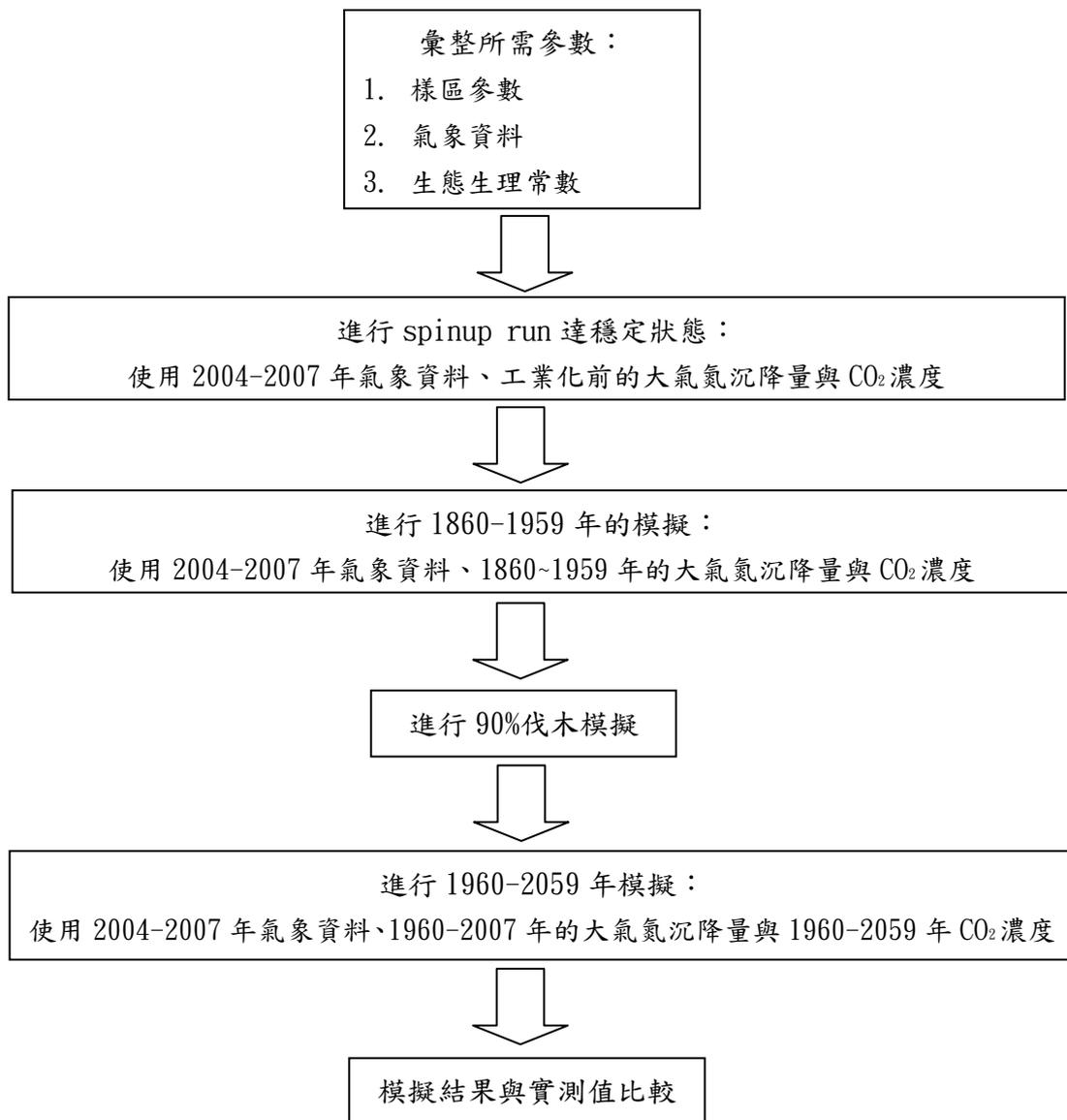


圖 16 Biome-BGC 模式模擬流程圖

4.2 模擬結果與討論

4.2.1 碳通量

■ 未受擾動時的碳通量

spinup 之後 100 年的模擬 (1860-1959 年)，總初級生產力 (GPP)、淨初級生產力 (NPP) 與淨生態系生產力 (NEP) 呈現平穩狀態，其平均值分別為 $1.89 \text{ kg C m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ 、 $0.56 \text{ kg C m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ 與 $0.0001 \text{ kg C m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ (表 11)。模式所運算之結果，顯示此生態系在未受擾動前對碳的吸附與釋出約略相等。

表 11 Biome-BGC 模擬棲蘭山樣區台灣扁柏森林生態系的碳收支

1860~1959 年之平均值代表擾動發生前的情形，而 2004~2007 年平均值則為此生態系目前的狀況

	GPP	NPP	NEP
1860~1959 年平均值 (spinup 之後 100 年模擬的平均值)	1.89	0.56	0.0001
2004~2007 年平均值 (伐木模擬之後第 45~48 年的平均值)	2.97	0.89	0.33

單位： $\text{kg C m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$

■ 擾動對碳通量的影響

於 1960 年進行 90% 砍伐的模擬，其後二十年間，GPP 與 NPP 與皆十分偏低，但之後急速增加，模擬砍伐後約經 60 年即呈現較穩定趨勢，此時 GPP 約介於 $3.04\sim 3.05 \text{ kg C m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ ，NPP 約 $0.9 \text{ kg C m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ ，皆高於砍伐前的穩定狀態。GPP 與 NPP 分別於砍伐模擬後的第 63 年與 64 年達到最大值，其數值分別為 $3.053 \text{ kg C m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ 與 $0.905 \text{ kg C m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ 。NEP 在模擬砍伐後的 23 內為負值，最低值為 $-0.96 \text{ kg C m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ ，出現在模擬砍伐

後第 3 年;於第 24 年由負值成為正值,模擬砍伐後第 48 年達最大值為 $0.61 \text{ kg C m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ 。
GPP、NPP 與 NEP 在達最大值後呈皆緩慢的下降(圖 17)。

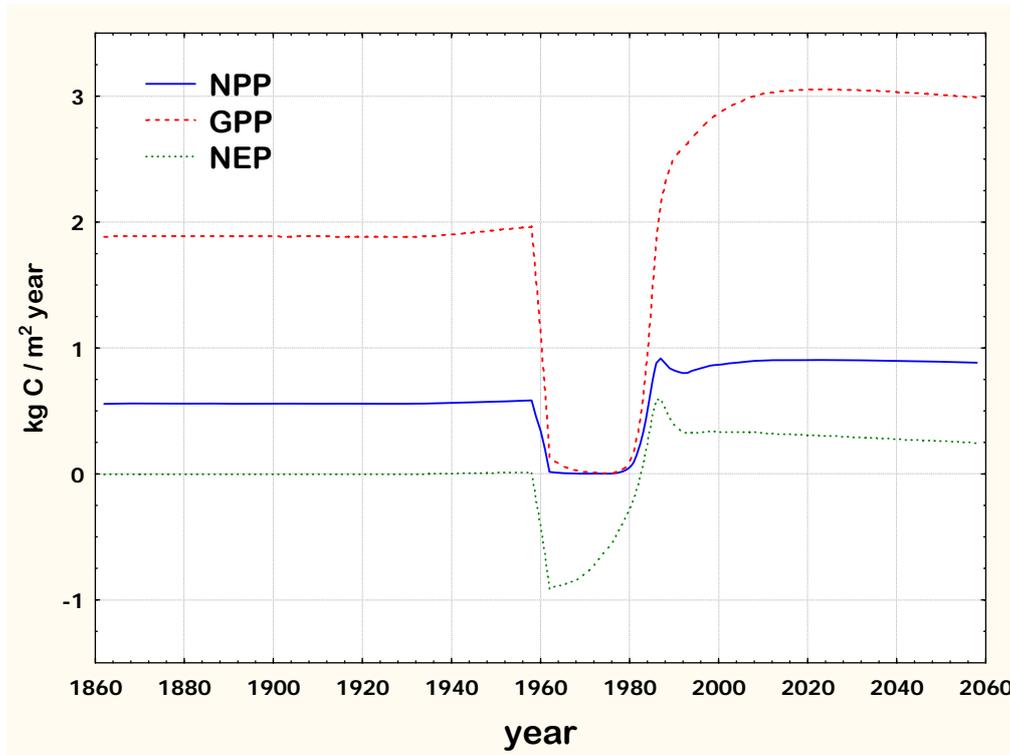


圖 17 Biome-BGC 模擬台灣扁柏森林 GPP、NPP 與 NEP 的長期變化

擾動發生之後,此生態系即成為強烈之碳源,隨後碳的淨釋出逐漸減少而成為碳匯,對碳的吸收能力隨擾動修復狀況提升而下降。自擾動發生之後的 23 年之間,此生態系所釋出的碳為 15 kg C m^{-2} 。擾動使生態系成為碳源,再轉變為碳匯的過程,在文獻中也有相同的情形(Thornton et al. 2002)。然而在該文獻中,美國的溫帶針葉林在砍伐後,生態系從碳源轉變為碳匯所需的時間為 4—6 年,這期間所釋出的碳介於 $1.4—3.1 \text{ kg C m}^{-2}$,相較之下本研究區顯然高了許多。Thornton et al. (2002)亦指出:當擾動發生之後,若生態系中枯落物碳存量大於土壤碳存量,則從碳源轉變為碳匯所需的時間較長。其原因為枯落物分解的過程,微生物會自土壤中固定無機氮至分解基質中,使得分解過程與植物生長之間具有對氮的競爭關係,因此枯落物存量高時會進而影響植物固碳的能力;

而土壤當中的有機物質分解，使氮經由礦化作用回歸植物可利用的形式，有利於植物的生長。因此枯落物碳存量與土壤碳存量的比值 (litter C / soil C) 較高時，表示系統中可利用的氮較受限制。在本研究中，經過擾動模擬之後，枯落物碳存量與土壤碳存量的比值約為 1.67 (圖 19)。因此推論，在本研究區中枯落物因擾動而大量增加，使得植物生長受到氮的限制，進而使擾動之後的二十年間 GPP 與 NPP 值極低、NEP 值為負。此外，土壤呼吸的高估，亦可能拉低 NEP。有關碳存量以及土壤呼吸的模擬結果與討論將敘述於後。

■ 霧水對碳通量的影響

本研究進行模擬所使用的氣象資料，在總降水量部分是以 2004-2007 年降雨量加上霧水來表示。霧水的估算，由於是使用 2004-2007 年的能見度套用本研究區的雲霧沈降模式(Chang et al. 2006)，因此亦是以 2004-2007 的葉片生物量來估算其沉降量。對於砍伐擾動之後的模擬而言，使用上述的霧水沉降量應為一高估的數值。若要較真切的模擬雲霧所帶來的影響，必須附加一個描述雲霧的子程式，建立雲霧與各種氣象資料間的關係，以及葉生物量或葉面積指數與雲霧沉降量的關係。

在本研究所中，若提供給 Biome-BGC 模擬所需的總降水量之中不包含霧水，模擬結果顯示碳收支的情形與包含霧水時相似 (圖 18)。霧水的加入，在模式中所呈現的意義是總水量的增加，而本研究區由於水分充足，水量的增加不會提升碳吸存的能力。因此，就 Biome-BGC 的設計而言，在本研究區，霧水的有無對於模擬結果沒有太大差異。

然而雲霧對於生態系的效應並不同於雨水。對 Biome-BGC 而言，在總降水量中加入霧水僅能反應進入此生態系的總水量增加，不能適當的反應由雲霧所帶來的長時間潮濕情形。因此 Biome-BGC 對於雲霧的模擬，目前仍有待進一步的相關研究。

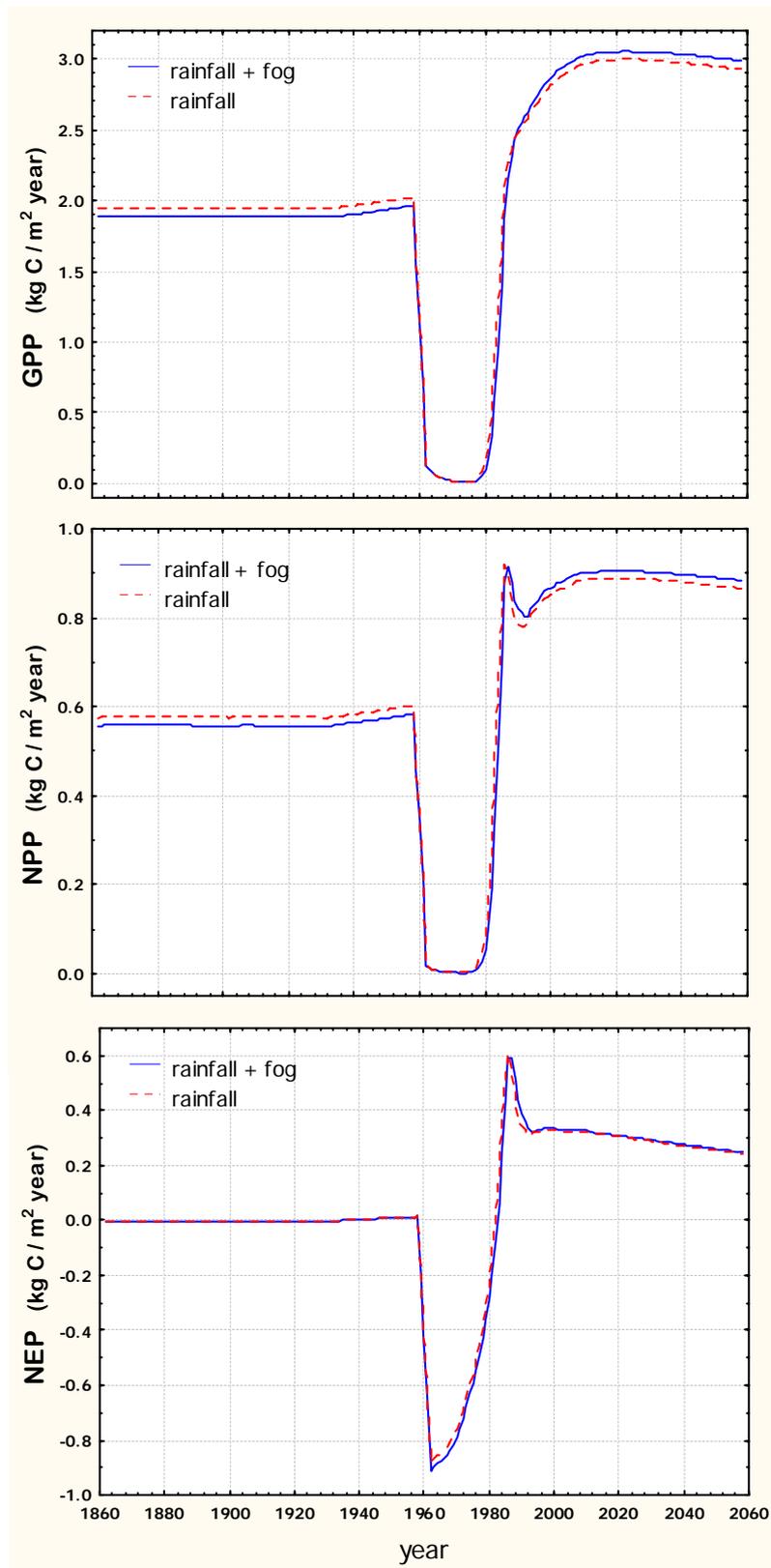


圖 18 總水量中加入霧水與未加入霧水的碳收支比較圖

藍色實線為在總降水量中包含降雨量與霧水時所模擬的碳收支情形，紅色虛線是總降水量僅包含降雨量時所模擬的碳收支情形。結果顯示在總水量中加入霧水與否對於碳收支的估算影響不大。

4.2.2 碳存量

▪ 未受擾動時的碳存量

各碳存量的變化情形，spinup 之後 100 年的模擬皆呈現穩定狀態（圖 19）。貯存於植物體的碳存量（veg C）、枯落物碳存量（litter C）、土壤碳存量（soil C）與粗木質殘體的碳存量（CWD C）平均值分別為 $48.02 \text{ kg C m}^{-2}$ 、 1.8 kg C m^{-2} 、 6.9 kg C m^{-2} 與 1.56 kg C m^{-2} 。

▪ 擾動對碳存量的影響

進行砍伐 90% 的擾動模擬後，植物體、枯落物、土壤與粗木質殘體等各部份的碳存量有不同的變化。貯存於植物體的碳存量於砍伐模擬後急速下降，之後二十年的時間呈緩慢減少，於擾動後第 20 年開始上升；枯落物與粗木質殘體的碳存量，最大值出現於砍伐模擬初期，乃因模擬砍伐產生大量的落葉與枯根所造成，隨著系統進行分解作用使其碳存量逐步下降；土壤碳存量於擾動後第 18 年達到最高，源於大量枯落物的分解。模擬砍伐之後再經 100 年的結果，植物體、枯落物與粗木質殘體的碳存量皆低於模擬砍伐前的狀態，土壤碳存量則高於模擬砍伐之前（圖 19）。

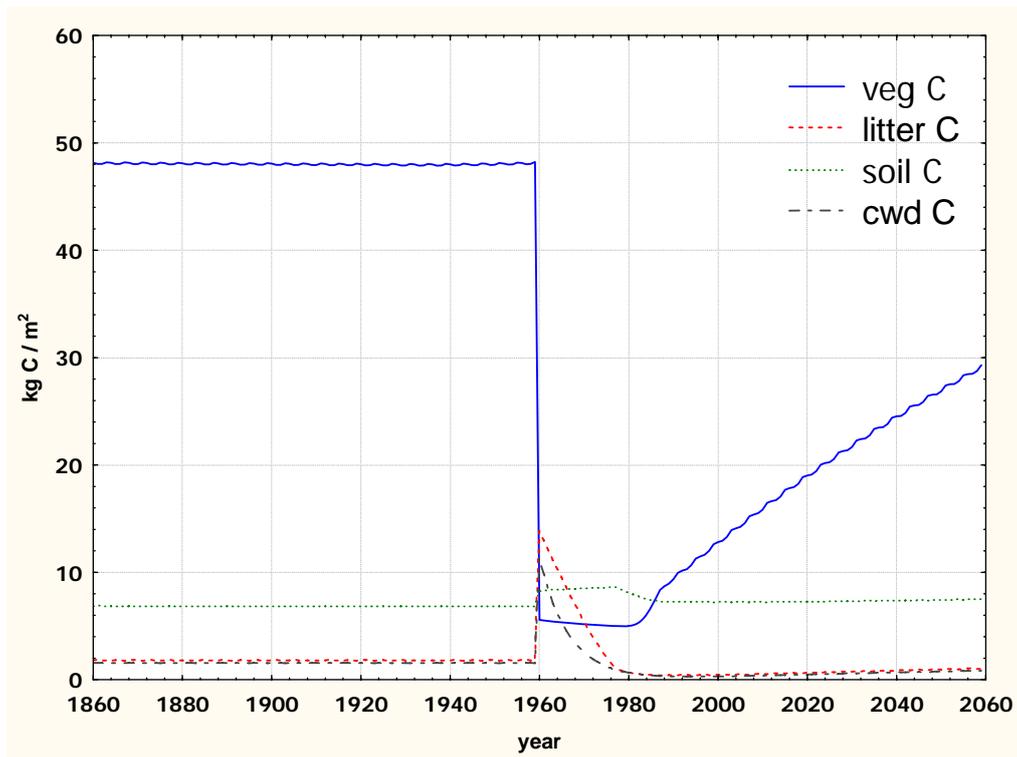


圖 19 Biome-BGC 模擬台灣扁柏森林碳存量的長期變化

■ 實測與模擬的碳存量比較

為與本研究區已有實際調查研究的各種碳存量進行比較，本研究選擇與該研究同一時期（2005 年，砍伐模擬後第 45 年）的模擬結果來驗證之（表 12）。就整個生態系中累積於植物體內的碳存量而言，模擬的結果高估 28%。若分別看碳在植物體各個部份的分配情形，則以細根碳存量有較大的差異。土壤碳存量部分也有明顯高估的情形。至於枯落物與粗木質殘體的碳存量，在本研究區目前尚無可供比較之調查，故在此不予討論。

表 12 Biome-BGC 模擬的碳存量與實測值比較

碳存量	模擬值 (伐木模擬後第 45 年)	實測值	模擬值與 實測值差異	實測值引用文獻
植物體				
葉片	1.146	0.862	+32.9%	朱慧君 2005
莖	8.802	6.128	+43.6%	朱慧君 2005
細根	1.146	0.314	+265.0%	朱慧君 2005
粗根	2.653	3.436	-22.8%	朱慧君 2005
合計	13.747	10.74	+28.0%	朱慧君 2005
枯落物	0.503	無		
粗木質殘體	0.340	無		
土壤	7.24	2.728	+165.41%	張世杰 未發表

單位：kg C m⁻²

細根碳存量的估算，與植物的碳分配、更新的過程有關。Biome-BGC 的模式設計中，葉片與細根的更新速率使用的是同一個參數，也就是兩者的更新速率必須使用相同數值，在本研究區目前尚無細根更新的調查研究，因此在本研究中以已調查之葉片更新速率來代表此參數；而「細根對葉片的碳分配比例」參數在本研究區中為未知，因此使用模式預設值為 1。綜合之，在本研究的模擬中，細根與葉片有相同的碳分配量與更新速率，故模擬結果中，兩者的數值相同。由於本研究區土壤含石率高，細根生長不易，細根與葉片的碳分配是否相等，有待進一步的相關研究來回答。文獻中指出森林的細根更新速率平均為 0.56 year⁻¹(Gill and Jackson 2000)，顯然高於本研究所使用的數值 (0.22 year⁻¹)，有可能因本研究中使用的細根更新速率較低而高估細根碳存量。Tatarinov and Cienciala (2006)在對雲杉的研究中，修改 Biome-BGC 的程式碼，將細根與葉片的更新分為兩個參數，其細根更新參數是葉片更新的 2.2 倍，相較於未修改的模式，模擬結果使細根碳存量下降，枯落物量上升，進而提高地上部生產力。因此，本研究認為，將細根與葉片的更新速率分開成為各自獨立的兩個參數，有助於提高模式模擬的準確性。

4.2.3 土壤呼吸

相較於本研究區所進行之土壤呼吸研究(Chang et al. 2008), Biome-BGC 的模擬結果高估約 13 倍(圖 20)。土壤呼吸的實際測量是以 LI-COR 公司的 LI-8100 自動土壤二氧化碳通量系統作長期監測, 在此比較所使用的數據是自 2005 年 12 月 14 日至 2006 年 9 月 28 日。

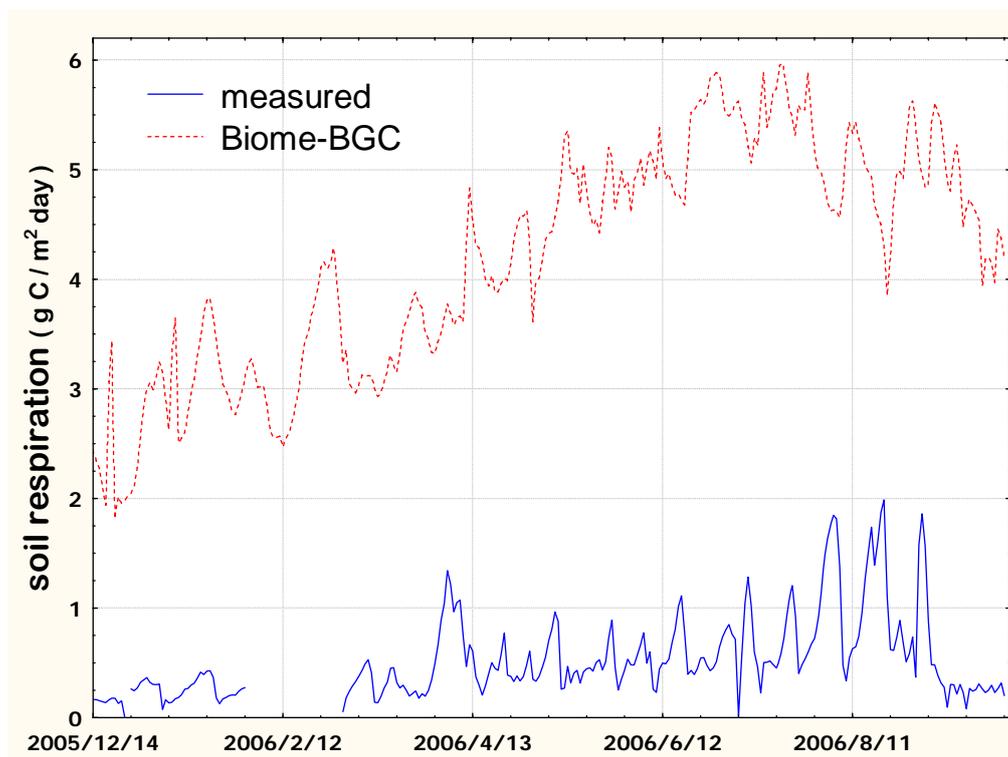


圖 20 土壤呼吸速率—模擬與實測值的比較

藍色實線為使用 LI-8100 自動土壤二氧化碳通量系統所測量之土壤呼吸速率；紅色虛線為 Biome-BGC 所模擬之土壤呼吸速率。模擬結果比實際測量要高估許多。

土壤呼吸包括植物地下部的自營性呼吸，以及源自於分解作用的異營性呼吸。在前述的細根碳存量部份，Biome-BGC 的模擬已有高估狀況，使地下部自營性呼吸的估算較高。Biome-BGC 對於分解過程的模擬，假設為當土壤溫度低於 -10°C 或土壤水勢能低於 -10 Mpa 時，分解作用停止；若高於上述條件，則以土壤溫度與水勢能調整分解速率(公式 2-49~2-51)，當土壤溫度與水勢能越高時，所估算之異營性呼吸速率也越高。在本研究區，土壤長期潮濕，相關研究指出在非常潮濕的土壤中，高含水率使土壤通風不良，會抑制土壤的呼吸作用(Smith et al. 2003)。而 Chang et al 於 2008 年的研究也指出本研究區的土壤呼吸速率與土壤水含量呈負相關。因此本研究認為在 Biome-BGC 當中，對於十分潮濕的土壤並無抑制土壤呼吸速率之設計，是造成土壤呼吸速率高估的原因之一。

土壤溫度也會影響土壤呼吸速率。Biome-BGC 的模擬中，土壤溫度 (T_{soil}) 是以前十天及當天的日均溫 (T_{avg}) 經過 1-11 的加權後的平均數來表示。相較於 2005 年 12 月 14 日至 2006 年 9 月 28 日之實測值，兩者的變化有類似的格局(圖 21)。模擬的土壤溫度多為高估(圖 22)，但在 12 月份有 5 天出現低估的情形，都是在較為低溫的狀況下。文獻指出土壤含水量會影響土壤溫度的變化幅度，當土壤含水量較高時，因水的高比熱，會減緩外在環境對土壤溫度所造成的波動，使溫度的變化幅度降低(Brady and Weil 2002)。因此本研究認為，本研究區土壤的高含水量減緩土壤溫度的波動，是造成模擬結果與實測值差異的原因。而土壤溫度的高估亦加劇土壤呼吸速率。

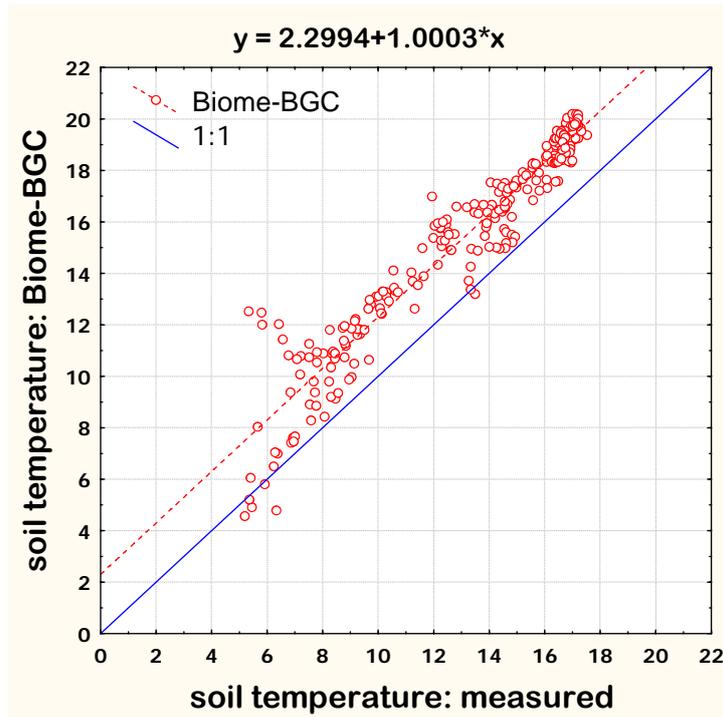


圖 21 土壤溫度—模擬與實測值的比較 A

藍色實線為 1:1 線。結果顯示兩者的變化有類似的格局。

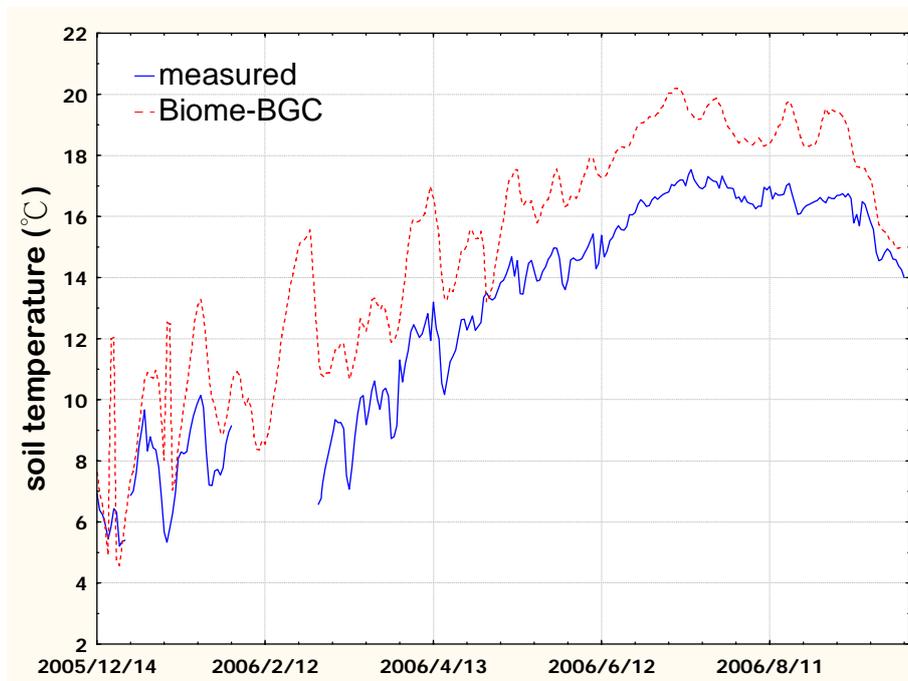


圖 22 土壤溫度—模擬與實測值的比較 B

藍色實線為實際測量之土壤溫度；紅色虛線為 Biome-BGC 所模擬之土壤溫度。模擬結果約高估 2°C。

4.2.4 蒸散作用

比較 2004/1/1~2004/11/30 量測與模擬的蒸散作用(羅勻謙 2004, 張世杰 未發表), 模式的預測值有明顯的高估(圖 23、圖 24)。在 Biome-BGC 中, 使用日輻射量、日低溫、土壤水勢能與飽和水蒸氣壓差等環境因子來調整氣孔導度(公式 2-23~2-29), 利用 Penman-Monteith equation 來計算蒸散量(公式 2-30~2-31), 並假設蒸散作用僅發生於白天、冠層乾燥的狀況下, 即冠層上截留的水分已蒸發完畢時。而本研究區為一雲霧森林, 雖然霧水僅佔總輸入水的 6%, 但雲霧壟罩時數高達 38%, 使得冠層長時間處於潮濕狀況, 而潮濕的冠層使水分的蒸散較為困難。在 Biome-BGC 的模擬, 雖然在本研究中將霧水加入總降水量之中, 但以每日為時間單位將各種氣象資料加以平均所計算的冠層水分蒸發速率, 無法顯示在本研究區因少量的霧水卻使冠層長時間潮濕的狀況。因此, 本研究認為由於 Biome-BGC 並未考慮雲霧的效應, 低估冠層潮濕的時間, 使得蒸散作用得以進行的時間較長, 因而高估了蒸散量。

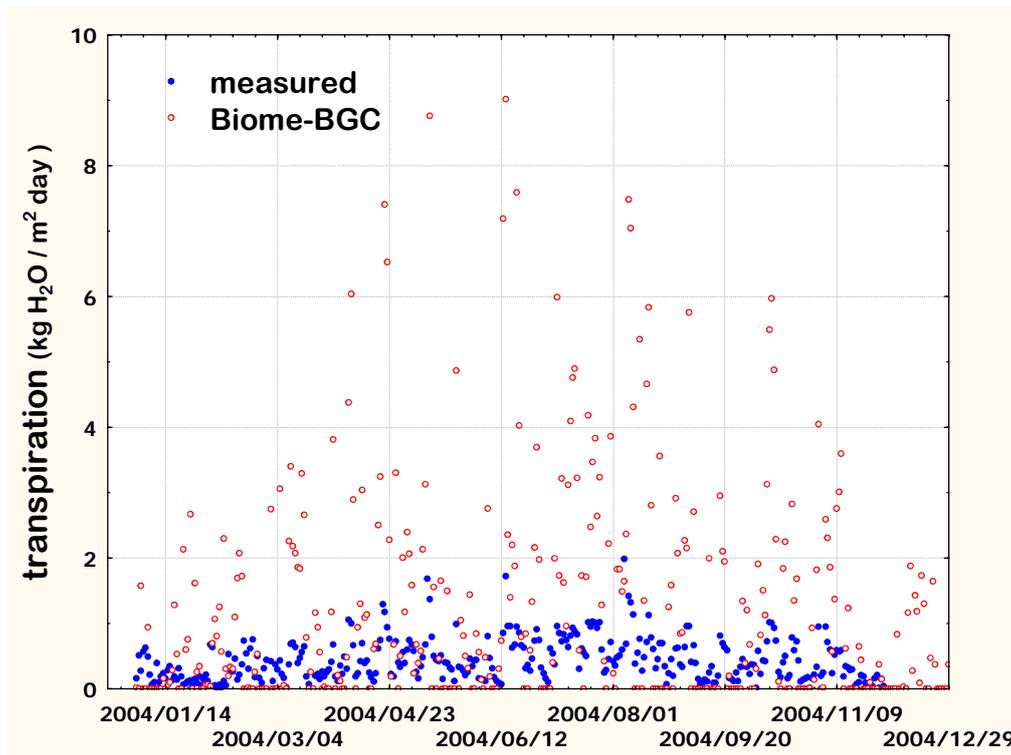


圖 23 蒸散作用—模擬與實測值的比較 A

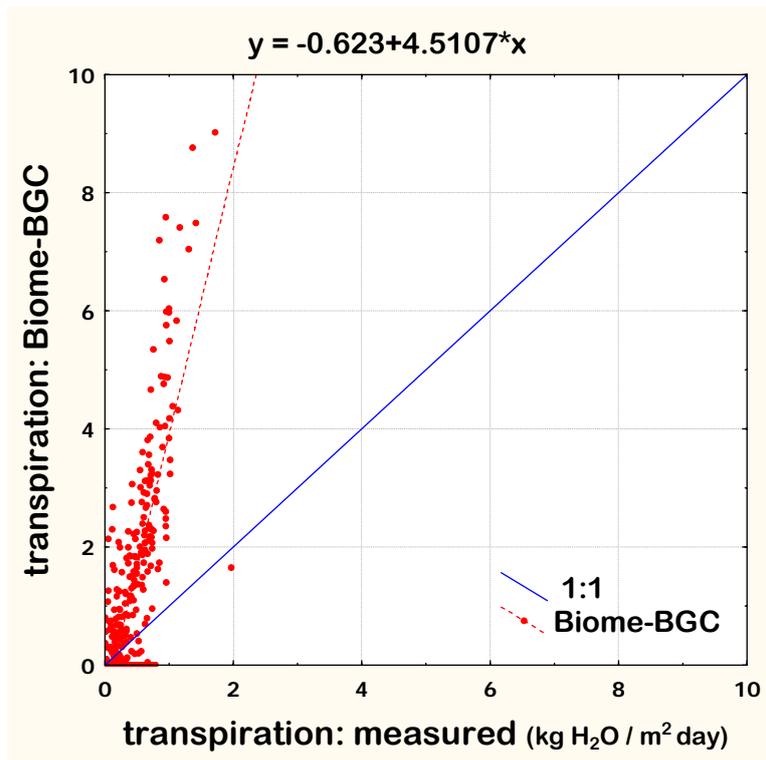


圖 24 蒸散作用—模擬與實測值的比較 B

實線為 1 : 1 線

5. 結論

本研究分析 Biome-BGC 模式，了解其模擬的運算過程，陳述於第二章。並將 Biome-BGC 應用於棲蘭山樣區台灣扁柏生態系，進行參數的敏感度分析與生態系的模擬。敏感度分析的結果，顯示在此生態系中影響 NPP 甚鉅的因子，與碳、氮的分配、獲取有關，而水份則較不具影響力。

應用 Biome-BGC 於棲蘭山樣區台灣扁柏生態系，模擬的結果顯示，砍伐的干擾使此生態系成為強烈之碳源，隨著森林的復原使得碳的淨釋出逐漸減少並轉變為碳匯；而模擬所需的氣象資料中，在總水量部分包含與不包含霧水，對於碳收支的模擬結果差異不大。經由 Biome-BGC 的估算，目前本生態系的總初級生產力與淨初級生產力分別約為 $2.97 \text{ kg C m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ 與 $0.89 \text{ kg C m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ ，淨生態系生產力為 $0.33 \text{ kg C m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ 。然而 Biome-BGC 對於土壤呼吸與蒸散速率的高估，顯示其對於潮濕環境模擬的能力不足。若欲應用在本生態系，應修正土壤濕度與異營性呼吸之間的關係，並考慮雲霧所帶來的長時間潮濕對蒸散作用與光合作用的抑制效應。

6. 參考文獻

- 朱慧君。2005。台灣扁柏森林生態系養分存量與枯落物養份流量之研究。國立東華大學自然資源管理研究所。碩士論文。
- 吳敏如。2003。以微氣候模式估算雲霧森林中台灣扁柏的雲霧沉降量。國立東華大學自然資源管理研究所。碩士論文。
- 林志偉。2007。鴛鴦湖地區台灣扁柏老齡林及更新林穿落水量之研究。國立東華大學自然資源管理研究所。碩士論文。
- 陳凱欣。2005。鴛鴦湖台灣扁柏森林生物量與冠層結構。國立東華大學自然資源管理研究所。碩士論文。
- 陳耀德。2003。鴛鴦湖森林生態系大氣養份輸入之探討。國立東華大學自然資源管理研究所。碩士論文。
- 彭令豐。1988。棲蘭山檜木天然下種更新造林之實施及現況。現代育林 3:20-23。
- 葉青峰。2004。台灣扁柏森林的生物量及雲霧沉降量估算。國立東華大學自然資源管理研究所。碩士論文。
- 簡意婷。2008。棲蘭山樣區大氣沉降之五年研究。國立東華大學自然資源管理研究所。碩士論文。
- 羅勻謙。2004。鴛鴦湖地區台灣扁柏森林生態系蒸散作用之研究。國立東華大學自然資源管理研究所。碩士論文。
- Boring, L. R., W. T. Swank, J. B. Waide and G. S. Henderson. 1988. Sources, fates, and impacts of nitrogen inputs to terrestrial ecosystems: review and synthesis. *Biogeochemistry* 6:119-159.
- Brady, N. C. and R. R. Weil. 2002. *The nature and properties of soils*. thirteenth edition. Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey.
- Chang, S. C., K. H. Tseng, Y. J. Hsia, C. P. Wang and J. T. Wu. 2008. Soil respiration in a subtropical montane cloud forest in Taiwan. *Agricultural and Forest Meteorology* in press.
- Chang, S. C., C. F. Yeh, M. J. Wu, Y. J. Hsia and J. T. Wu. 2006. Quantifying fog water deposition by in situ exposure experiments in a mountainous coniferous forest in Taiwan. *Forest Ecology and Management* 224:11-18.
- Chapin III, F. S., P. A. Matson and H. A. Mooney. 2002. *Principles of Terrestrial Ecosystem Ecology*. Springer-Verlag, New York.
- Churkina, G. and S. W. Running. 1998. Contrasting climatic controls on the estimated productivity of global terrestrial biomes. *Ecosystems* 1:206-215.

- Coops, N. C., R. H. Waring, S. R. Brown and S. W. Running. 2001. Comparisons of predictions of net primary production and seasonal patterns in water use derived with two forest growth models in southwestern Oregon. *Ecological Modelling* 142:61-81.
- Farquhar, G. D., S. von Caemmerer and J. A. Berry. 1980. A biochemical model of photosynthetic CO₂ assimilation in leaves of C₃ species. *Planta* 149:78-90.
- Gill, R. A. and R. B. Jackson. 2000. Global patterns of root turnover for terrestrial ecosystems. *The New Phytologist* 147:13-31.
- Gower, S. T. 2003. Patterns and mechanisms of the forest carbon cycle. *Annual review of environment and resources* 28:169-204.
- Hamilton, J. G., E. H. DeLucia, K. George, S. L. Naidu, A. C. Finzi and W. H. Schlesinger. 2002. Forest carbon balance under elevated CO₂. *Oecologia* 131:250-260.
- Hock, R. and B. Holmgren. 1996. Some aspect of energy balance and ablation of storglaciaren, northern sweden. *Geografiska annaler* 78A:121-131.
- Jolly, W. M. and S. W. Running. 2004. Effects of precipitation and soil water potential on drought deciduous phenology in the Kalahari. *Global and Planetary Change* 10:303-308.
- Kang, S., J. S. Kimball and S. W. Running. 2005. Simulating effects of fire disturbance and climate change on boreal forest productivity and evapotranspiration. *Science of The Total Environment* In Press, Corrected Proof.
- Law, B. E., P. E. Thornton, J. Irvine, P. M. Anthoni and S. V. Tuyl. 2001. Carbon storage and Fluxes in ponderosa pine forests at different developmental stages. *Global Change Biology* 7:755-777.
- Pietsch, S. A. and H. Hasenauer. 2002. Using mechanistic modeling within forest ecosystem restoration. *Forest Ecology and Management* 159:111-131.
- Pietsch, S. A., H. Hasenaure and P. E. Thornton. 2005. BGC-model parameters for tree species growing in central European forests. *Forest Ecology and Management* 211:264-295.
- Running, S. W. 1984. Microclimate control of forest productivity: Analysis by computer simulation of annual photosynthesis/ transpiration balance in different environments. *Agricultural and Forest Meteorology* 32:267-288.

- Running, S. W. 1994. Testing FOREST-BGC ecosystem process simulations across a climatic gradient in Oregon. *Ecological Applications* 4:238-247.
- Running, S. W. and J. C. Coughlan. 1988. A general model of forest ecosystem processes for regional applications I. Hydrologic balance, canopy gas exchange and primary production processes. *Ecological Modelling* 42:125.
- Running, S. W. and S. T. Gower. 1991. FOREST-BGC, A general model of forest ecosystem processes for regional application. II. Dynamic carbon allocation and nitrogen budgets. *Tree Physiology* 9:147-160.
- Running, S. W. and E. R. J. Hunt. 1993. Generalization of a forest ecosystem process model for other biomes, BIOME-BGC, and an application for global-scale models. Academic Press, San Diego.
- Smith, K. A., T. Ball, K. Conen, E. Dobbie, J. Massheder and A. Rey. 2003. Exchange of greenhouse gases between soil and atmosphere: interactions of soil physical factors and biological processes. *European Journal of Soil Science* 54:779-791.
- Su, H. X. and W. G. Sang. 2004. Simulations and analysis of net primary productivity in *Quercus liaotungensis* forest of Donglingshan Mountain Range in response to different climate change scenarios. *Acta Botanica Sinica* 46:1281-1291.
- Tatarinov, F. A. and E. Cienciala. 2006. Application of BIOME-BGC model to managed forests 1. Sensitivity analysis. *Forest Ecology and Management* 237:267-279.
- Thornton, P. E. 1998. Regional ecosystem simulation: combining surface- and satellite- based observations to study linkages between terrestrial energy and mass budgets. The University of Montana, Missoula.
- Thornton, P. E., B. E. Law, H. L. Gholz, K. L. Clark, E. Faleg, D. S. Ellsworth, A. H. Goldstein, P. K. Monson, D. Hollinger, M. Falk, J. Chen and J. P. Sparks. 2002. Modeling and measuring the effects of disturbance history and climate on carbon and water budgets in evergreen needleleaf forests. *Agricultural and Meteorology* 113:185-222.

- Thornton, P. E. and N. A. Rosenbloom. 2005. Ecosystem model spin-up: estimating steady state conditions in a coupled terrestrial carbon and nitrogen cycle model. *Ecological Modelling* 189:25-48.
- Vetter, M., C. Wirth, H. Bottcher, G. Churkina, E. D. Schulze, T. Wutzler and G. Weber. 2005. Partitioning direct and indirect human-induced effects on carbon sequestration of managed coniferous forests using model simulations and forest inventories. *Global Change Biology* 11:810-827.
- Waring, R. H. and S. W. Running. 1998. *Forest Ecosystems Analysis at Multiple Scales*. Academic Press, California.
- White, M. A., P. E. Thornton, S. W. Running and R. R. Nemani. 2000. Parameterization and sensitivity analysis of the BIOME-BGC Terrestrial ecosystem model: net primary production controls. *Earth Interactions* 4:1-85.

附錄1 本研究模擬棲蘭山樣區台灣扁柏森林生態系的初始檔案 (initialization file)

Biome-BGC v4.2 (CLM)

MET_INPUT	(keyword)	start of meteorology file control block
D:\model\biomebgc-4.2\metdata\CLM2004-2007.mtc41		meteorology input filename
4	(int)	header lines in met file
RESTART	(keyword)	start of restart control block
1	(flag)	1 = read restart file 0 = don't read restart file
1	(flag)	1 = write restart file 0 = don't write restart file
0	(flag)	1 = use restart metyear 0 = reset metyear
restart/CLM_dis.endpoint		input restart filename
restart/CLM_now.endpoint		output restart filename
TIME_DEFINE	(keyword - do not remove)	
4	(int)	number of meteorological data years
48	(int)	number of simulation years
1960	(int)	first simulation year
0	(flag)	1 = spinup simulation 0 = normal simulation
6000	(int)	maximum number of spinup years (if spinup simulation)
CLIM_CHANGE	(keyword - do not remove)	
0.0	(deg C)	offset for Tmax
0.0	(deg C)	offset for Tmin
1.0	(DIM)	multiplier for Precp
1.0	(DIM)	multiplier for VPD
1.0	(DIM)	multiplier for shortwave radiation
CO2_CONTROL	(keyword - do not remove)	
1	(flag)	0=constant 1=vary with file 2=constant, file for Ndep
294.842	(ppm)	constant atmospheric CO2 concentration
D:\model\biomebgc-4.2\co2\new_co2\co2_1950_2090.txt	(file)	annual variable CO2 filename
SITE	(keyword)	start of site physical constants block
0.25	(m)	effective soil depth (corrected for rock fraction)
30.0	(%)	sand percentage by volume in rock-free soil
50.0	(%)	silt percentage by volume in rock-free soil
20.0	(%)	clay percentage by volume in rock-free soil
1650.0	(m)	site elevation
24.35	(degrees)	site latitude (- for S.Hem.)
0.1	(DIM)	site shortwave albedo
0.0001	(kgN/m2/yr)	wet+dry atmospheric deposition of N
0.0004	(kgN/m2/yr)	symbiotic+asymbiotic fixation of N
RAMP_NDEP	(keyword - do not remove)	
1	(flag)	do a ramped N-deposition run? 0=no, 1=yes
2007	(int)	reference year for industrial N deposition
0.001229	(kgN/m2/yr)	industrial N deposition value
EPC_FILE	(keyword - do not remove)	
epc/clm/clm.epc	(file)	evergreen needleleaf forest ecophysiological constants
W_STATE	(keyword)	start of water state variable initialization block
0.0	(kg/m2)	water stored in snowpack
0.8	(DIM)	initial soil water as a proportion of saturation

附錄1 (續)

C_STATE	(keyword)	start of carbon state variable initialization block
0.001	(kgC/m2)	first-year maximum leaf carbon
0.0	(kgC/m2)	first-year maximum stem carbon
0.0	(kgC/m2)	coarse woody debris carbon
0.0	(kgC/m2)	litter carbon, labile pool
0.0	(kgC/m2)	litter carbon, unshielded cellulose pool
0.0	(kgC/m2)	litter carbon, shielded cellulose pool
0.0	(kgC/m2)	litter carbon, lignin pool
0.0	(kgC/m2)	soil carbon, fast microbial recycling pool
0.0	(kgC/m2)	soil carbon, medium microbial recycling pool
0.0	(kgC/m2)	soil carbon, slow microbial recycling pool
0.0	(kgC/m2)	soil carbon, recalcitrant SOM (slowest)
N_STATE	(keyword)	start of nitrogen state variable initialization block
0.0	(kgN/m2)	litter nitrogen, labile pool
0.0	(kgN/m2)	soil nitrogen, mineral pool
OUTPUT_CONTROL	(keyword - do not remove)	
outputs/CLM/harvest/CLM_harvest_0.9_100year	(text)	prefix for output files
1	(flag)	1 = write daily output 0 = no daily output
1	(flag)	1 = monthly avg of daily variables 0 = no monthly avg
1	(flag)	1 = annual avg of daily variables 0 = no annual avg
1	(flag)	1 = write annual output 0 = no annual output
1	(flag)	for on-screen progress indicator
DAILY_OUTPUT	(keyword)	
11	(int)	number of daily variables to output
628	NPP	
631	GPP	
629	NEP	
632	mr	
633	gr	
634	hr	
636	vegetation C	
637	litter C	
70	CWD C	
638	soil C	
639	total C	
ANNUAL_OUTPUT	(keyword)	
11	(int)	number of annual output variables
628	NPP	
631	GPP	
629	NEP	
632	mr	
633	gr	
634	hr	
636	vegetation C	
637	litter C	
70	CWD C	
638	soil C	
639	total C	
END_INIT	(keyword)	indicates the end of the initialization file

附錄2 棲蘭山樣區台灣扁柏森林生態系的生態生理常數

ECOPHYS	CLM		
1	(flag)	1 = WOODY	0 = NON-WOODY
1	(flag)	1 = EVERGREEN	0 = DECIDUOUS
1	(flag)	1 = C3 PSN	0 = C4 PSN
1	(flag)	1 = MODEL PHENOLOGY	0 = USER-SPECIFIED PHENOLOGY
0	*(yday)	yearday to start new growth (when phenology flag = 0)	
0	*(yday)	yearday to end litterfall (when phenology flag = 0)	
1.0	*(prop.)	transfer growth period as fraction of growing season	
0.1	*(prop.)	litterfall as fraction of growing season	
0.22	(1/yr)	annual leaf and fine root turnover fraction	
0.7	(1/yr)	annual live wood turnover fraction	
0.005	(1/yr)	annual whole-plant mortality fraction	
0.0	(1/yr)	annual fire mortality fraction	
1.0	(ratio)	(ALLOCATION) new fine root C : new leaf C	
1.08	(ratio)	(ALLOCATION) new stem C : new leaf C	
0.1	(ratio)	(ALLOCATION) new live wood C : new total wood C	
0.3	(ratio)	(ALLOCATION) new croot C : new stem C	
0.5	(prop.)	(ALLOCATION) current growth proportion	
60.8	(kgC/kgN)	C:N of leaves	
66.6	(kgC/kgN)	C:N of leaf litter, after retranslocation	
81.38	(kgC/kgN)	C:N of fine roots	
50	(kgC/kgN)	C:N of live wood	
729	(kgC/kgN)	C:N of dead wood (needs more data)	
0.588	(DIM)	leaf litter labile proportion	
0.274	(DIM)	leaf litter cellulose proportion	
0.138	(DIM)	leaf litter lignin proportion	
0.30	(DIM)	fine root labile proportion	
0.45	(DIM)	fine root cellulose proportion	
0.25	(DIM)	fine root lignin proportion	
0.76	(DIM)	dead wood cellulose proportion	
0.24	(DIM)	dead wood lignin proportion	
0.023	(1/LAI/d)	canopy water interception coefficient	
0.47	(DIM)	canopy light extinction coefficient	
2.6	(DIM)	all-sided to projected leaf area ratio	
8.23	(m ² /kgC)	canopy average specific leaf area (projected area basis)	
2	(DIM)	ratio of shaded SLA:sunlit SLA	
0.038	(DIM)	fraction of leaf N in Rubisco	
0.005	(m/s)	maximum stomatal conductance (projected area basis)	
0.00001	(m/s)	cuticular conductance (projected area basis)	
0.01	(m/s)	boundary layer conductance (projected area basis)	
-0.6	(MPa)	leaf water potential: start of conductance reduction	
-3.9	(MPa)	leaf water potential: complete conductance reduction	
1800.0	(Pa)	vapor pressure deficit: start of conductance reduction	
4100.0	(Pa)	vapor pressure deficit: complete conductance reduction	

附錄3 本研究所使用的大氣二氧化碳濃度⁵

年	大氣 CO ₂ 濃度 (ppm)	年	大氣 CO ₂ 濃度 (ppm)
1858	288.5	1891	293.5
1859	288.6	1892	293.8
1860	288.6	1893	294.1
1861	288.7	1894	294.3
1862	288.8	1895	294.6
1863	288.9	1896	294.9
1864	288.9	1897	295.2
1865	289	1898	295.5
1866	289.1	1899	295.8
1867	289.2	1900	295.6
1868	289.2	1901	295.3
1869	289.3	1902	295.1
1870	289.3	1903	294.8
1871	289.4	1904	295.9
1872	289.4	1905	296.9
1873	289.5	1906	297.5
1874	289.5	1907	298.1
1875	289.7	1908	298.6
1876	289.9	1909	299.2
1877	290.1	1910	299.4
1878	290.3	1911	299.6
1879	290.5	1912	299.9
1880	290.7	1913	300.1
1881	291	1914	300.3
1882	291.2	1915	300.5
1883	291.4	1916	300.7
1884	291.6	1917	300.9
1885	291.9	1918	301.1
1886	292.1	1919	301.2
1887	292.3	1920	301.4
1888	292.6	1921	301.6
1889	292.9	1922	302.3
1890	293.2	1923	302.9

⁵ 資料來源：http://www.earth-policy.org/Indicators/CO2/2006_data3.htm

附錄3 (續)

年	大氣 CO ₂ 濃度 (ppm)	年	大氣 CO ₂ 濃度 (ppm)
1924	303.6	1957	314.8
1925	304.2	1958	315.3
1926	304.9	1959	316
1927	305.5	1960	316.9
1928	305.6	1961	317.6
1929	305.8	1962	318.5
1930	305.9	1963	319
1931	306.1	1964	319.5
1932	306.2	1965	320.1
1933	306.3	1966	321.3
1934	306.5	1967	322.1
1935	306.6	1968	323.1
1936	306.8	1969	324.6
1937	306.9	1970	325.7
1938	307.1	1971	326.3
1939	307.3	1972	327.5
1940	307.4	1973	329.6
1941	307.6	1974	330.3
1942	307.7	1975	331.2
1943	307.9	1976	332.2
1944	308.4	1977	333.9
1945	308.9	1978	335.5
1946	309.3	1979	336.9
1947	309.8	1980	338.7
1948	310.3	1981	340
1949	310.8	1982	341.1
1950	311.3	1983	342.8
1951	311.7	1984	344.4
1952	312.2	1985	345.9
1953	312.7	1986	347.1
1954	313.2	1987	349
1955	313.7	1988	351.4
1956	314.3	1989	352.9

附錄3 (續)

年	大氣 CO ₂ 濃度 (ppm)	年	大氣 CO ₂ 濃度 (ppm)
1990	354.2	2025	424.81
1991	355.6	2026	426.98
1992	356.4	2027	429.16
1993	357.1	2028	431.36
1994	358.9	2029	433.56
1995	360.9	2030	435.78
1996	362.6	2031	438.01
1997	363.8	2032	440.25
1998	366.6	2033	442.5
1999	368.3	2034	444.76
1999	369.5	2035	447.03
2000	369.4	2036	449.32
2001	371	2037	451.62
2002	373.1	2038	453.93
2003	375.8	2039	456.25
2004	377.5	2040	458.58
2005	379.6	2041	460.92
2006	381.9	2042	463.28
2007	383.71	2043	465.65
2008	389.53	2044	468.03
2009	391.52	2045	470.42
2010	393.52	2046	472.83
2011	395.53	2047	475.25
2012	397.56	2048	477.68
2013	399.59	2049	480.12
2014	401.63	2050	482.57
2015	403.68	2051	485.04
2016	405.75	2052	487.52
2017	407.82	2053	490.01
2018	409.91	2054	492.52
2019	412	2055	495.04
2020	414.11	2056	497.57
2021	416.23	2057	500.11
2022	418.36	2058	502.67
2023	420.5	2059	505.24
2024	422.65	2060	507.82

附錄4 本研究所使用的大氣氮沉降量 (Thornton et al. 2002)

年	大氣氮沉降量 (kg N m ⁻² yr ⁻¹)	年	大氣氮沉降量 (kg N m ⁻² yr ⁻¹)
1858	0.0001	1891	0.0001
1859	0.0001	1892	0.0001
1860	0.0001	1893	0.0001
1861	0.0001	1894	0.0001
1862	0.0001	1895	0.0001
1863	0.0001	1896	0.0001
1864	0.0001	1897	0.0001
1865	0.0001	1898	0.0001
1866	0.0001	1899	0.0001
1867	0.0001	1900	0.0001
1868	0.0001	1901	0.0001
1869	0.0001	1902	0.0001
1870	0.0001	1903	0.0001
1871	0.0001	1904	0.0001
1872	0.0001	1905	0.0001
1873	0.0001	1906	0.0001
1874	0.0001	1907	0.0001
1875	0.0001	1908	0.0001
1876	0.0001	1909	0.0001
1877	0.0001	1910	0.0001
1878	0.0001	1911	0.0001
1879	0.0001	1912	0.0001
1880	0.0001	1913	0.0001
1881	0.0001	1914	0.0001
1882	0.0001	1915	0.0001
1883	0.0001	1916	0.0001
1884	0.0001	1917	0.0001
1885	0.0001	1918	0.0001
1886	0.0001	1919	0.0001
1887	0.0001	1920	0.0001
1888	0.0001	1921	0.0001
1889	0.0001	1922	0.0001
1890	0.0001	1923	0.0001

附錄4 (續)

年	大氣氮沉降量 (kg N m ⁻² yr ⁻¹)	年	大氣氮沉降量 (kg N m ⁻² yr ⁻¹)
1924	0.0001	1957	0.000434286
1925	0.0001	1958	0.000447143
1926	0.0001	1959	0.00046
1927	0.0001	1960	0.000472857
1928	0.0001	1961	0.000485714
1929	0.0001	1962	0.000498571
1930	0.0001	1963	0.000511429
1931	0.0001	1964	0.000524286
1932	0.000112857	1965	0.000537143
1933	0.000125714	1966	0.00055
1934	0.000138571	1967	0.000562857
1935	0.000151429	1968	0.000575714
1936	0.000164286	1969	0.000588571
1937	0.000177143	1970	0.000601429
1938	0.00019	1971	0.000614286
1939	0.000202857	1972	0.000627143
1940	0.000215714	1973	0.00064
1941	0.000228571	1974	0.000652857
1942	0.000241429	1975	0.000665714
1943	0.000254286	1976	0.000678571
1944	0.000267143	1977	0.000691429
1945	0.00028	1978	0.000704286
1946	0.000292857	1979	0.000717143
1947	0.000305714	1980	0.00073
1948	0.000318571	1981	0.000742857
1949	0.000331429	1982	0.000755714
1950	0.000344286	1983	0.000768571
1951	0.000357143	1984	0.000781429
1952	0.00037	1985	0.000794286
1953	0.000382857	1986	0.000807143
1954	0.000395714	1987	0.00082
1955	0.000408571	1988	0.000832857
1956	0.000421429	1989	0.000845714

附錄4 (續)

年	大氣氮沉降量 (kg N m ⁻² yr ⁻¹)
1990	0.000858571
1991	0.000871429
1992	0.000884286
1993	0.000897143
1994	0.00091
1995	0.000922857
1996	0.000935714
1997	0.000948571
1998	0.000961429
1999	0.000974286
1999	0.000987143
2000	0.001
2001	0.001012857
2002	0.001144
2003	0.001003
2004	0.001129
2005	0.001229
2006	0.001229

