

第三章 未來氣候變遷情境設定及風險評估

一、調適應用情境設定

(一)「國家調適應用情境」設定

氣候情境為風險評估之依據，IPCC AR6 本次報告同時呈現排放情境（社會經濟共享情境，SSP）與全球暖化程度（Global Warming Level, GWL）。綜整 IPCC AR6 各情境推估與科學模擬依據，並考量前期行動計畫推動經驗檢討與操作之可行性，本期調適行動方案/計畫優先採「全球暖化程度」作為「國家調適應用情境」，以作為各部門進行風險評估與辨別調適差距之共同參考情境。

國家調適應用情境原則，相關情境說明如圖 3-1 所示：

1. 0°C：工業革命時期（1850-1900 年），為全球暖化的起始點，作為固定暖化情境的參考基準。
2. 1°C：現階段氣候基期（1995-2014 年），可作為現有風險評估及其未來缺口的參考基準。
3. 1.5°C：近期（nearterm, 2021-2040 年）的增溫情境。
4. 2°C：中期（midterm, 2041-2060 年）的增溫情境。
5. 3°C~4°C：考量 21 世紀末減碳失敗的增溫情境，將增溫 3°C~4°C（longterm, 2081-2100 年）之極端情境。

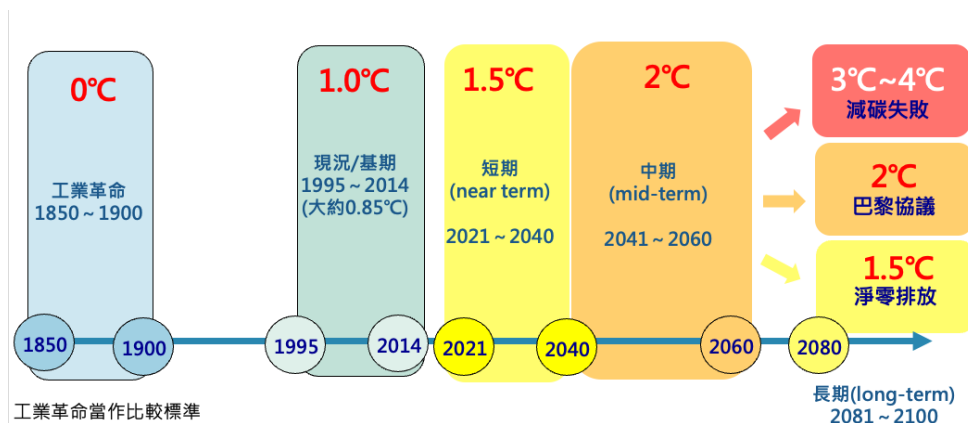


圖3-1全球暖化程度之參考基準、基期與增溫情境與時程

本期「國家氣候變遷調適行動計畫(116-119)」依據最新氣候變遷科學數據，將「國家調適應用情境」優先設定為「2021-2040 年升溫 1.5°C、2041-2060 年升溫 2°C」，作為各部門進行風險評估與辨別調適差距之共同參考基本情境，以兼顧施政期程規劃與降低調適差距之目標設定，並強化國家整體風險評估之一致性，助於跨部門風險評估應用與整合。

二、風險評估作業說明

本期本領域之氣候變遷風險評估，係依《氣候變遷因應法》第十八條第三項授權訂定之《氣候變遷風險評估作業準則》（以下簡稱《作業準則》）辦理。本節依《作業準則》之法定步驟，說明本領域辦理氣候變遷風險評估之方法、過程與後續規劃；本節之科學資訊來源以《科學報告 2024》、聯合國政府間氣候變化專門委員會第六次評估報告第二工作小組報告（以下簡稱「IPCC AR6 WGII」），以及本領域顧問學者之同儕審查文獻為主。

（一）法源依據與評估定位

依《氣候變遷因應法》第十九條規定，中央目的事業主管機關應就易受氣候變遷衝擊之權責領域擬定四年為一期之領域調適行動方案，並依《作業準則》使用氣候變遷科學報告進行氣候變遷風險評估。

本領域為本期國家氣候變遷調適行動方案中，自前三期「農業生產與生物多樣性領域」獨立分項而成立之新領域，過往尚未獨立辦理氣候變遷風險評估，相關評估工作主要承接自前期合併方案中與生態系相關之既有研究與監測成果。本領域屬首次獨立辦理氣候變遷風險評估之情形，本期定位為「依《作業準則》辦理之第一階段工作」，以建立評估架構、辨識風險主軸與盤點資料缺口為主。

（二）評估步驟與本領域之辦理對應

依《作業準則》第四條規定，氣候變遷風險評估應包括下列三項事項：界定範疇、檢視資源及氣候衝擊現況，以及評估未來氣候變遷風險。本領域依此三步驟之辦理對應如下。

1. 界定範疇

依《作業準則》第五條，本領域辦理範疇界定之事項如下：

（1）確認易受氣候變遷影響對象、對應之業務範疇及權責機關：本領域易受氣候變遷影響對象為臺灣陸域、內陸水域及海域之自然生態系及其

生物多樣性。權責機關包括農業部林業及自然保育署、生物多樣性研究所、林業試驗所、漁業署、農村發展及水土保持署、防檢署、動物保護司、資源永續利用司，並協同海洋委員會海洋保育署及內政部國家公園署等相關機關共同推動。

(2) 評估易受氣候變遷影響對象之氣候危害類型、可能受影響之時間、空間尺度及範圍：本領域納入評估之氣候危害類型，依《科學報告 2024》及 IPCCAR6WGII 所揭示者為主，包括高低溫、乾旱、極端降雨及海平面上升等四大氣候衝擊面向。空間尺度涵蓋臺灣陸域、內陸水域及海域之自然生態系，時間尺度依本章第一節所訂「國家調適應用情境」，以全球暖化程度 1.5°C（2021 至 2040 年）及 2°C（2041 至 2060 年）為共同基準。

(3) 邀集有關機關、學者、專家及民間團體共同界定評估範疇：本期於本案執行期間邀請生態領域之專家學者，提供本領域氣候變遷風險評估之文獻基礎及方法建議；本期並規劃辦理本領域氣候變遷風險評估專家會議及利害關係人公聽會，邀集相關機關、學者、專家及民間團體共同檢視評估範疇，建立後續滾動修正之機制。

2. 檢視資源及氣候衝擊現況

依《作業準則》第六條，本領域辦理資源盤點與現況衝擊評估之事項如下：

(1) 盤點權責機關及易受氣候變遷影響對象之可掌握資源：本領域既有之資料與監測機制，包括臺灣生物多樣性觀測網 (TaiBON)、國家生物多樣性氣候變遷指標、臺灣繁殖鳥類調查 (BBS Taiwan)、eBird Taiwan、臺灣物種名錄 (TaiCOL)、臺灣生物多樣性網絡 (TBN)、臺灣生物多樣性資訊機構 (TaiBIF)、臺灣生物多樣性資訊聯盟 (TBIA)、臺灣生命大百科 (TaiEOL)、臺灣野生生物遺傳物質冷凍典藏計畫 (TaiBOL)、台灣及全球入侵種資料庫 (TaiGISD)，以及 GLORIA 高山植群樣區、長期森林動態樣區與農業試驗所「臺灣農業長期生態研究」所累積之長期生態監測資料。本期評估以前述既有資料、監測成果與可公開取得之研究資料為基礎，參採既有文獻與官方資料所提之物種分布模型 (Species Distribution Model, SDM)、氣候速度 (climate velocity)、嗜熱化指標、標準化降雨蒸散指標 (SPEI)、差異化標準化燃燒指數 (dNBR) 等工具，作為風險辨識與後續資料缺口盤點之參考。

(2) 評估氣候衝擊現況：依《作業準則》第二條規定，氣候變遷風險評估係指對氣候變遷風險進行量化或質化之科學評估，並考量危害度、暴

露度及脆弱度等風險要素之關聯影響。本期評估生態系統領域調適行動方案整合既有研究與監測觀察，呈現本領域現況風險之初步辨識結果。

(3) 規劃權責機關及易受氣候變遷影響對象屬性之質化、量化或綜合之衝擊評估方法：本領域因本期首次獨立分項、過往無對應之基層資料蒐集機制，本期評估以質化整合為主、量化指標為輔；量化引用以專家學者既有發表之同儕審查文獻所提供之具體數值為限。

3. 評估未來氣候變遷風險

依《作業準則》第七條，本領域辦理未來風險評估之事項如下：

(1) 使用當期氣候變遷科學報告及最新國內外科學研究：本領域評估採《科學報告 2024》為當期氣候變遷科學報告，並參採 IPCC AR6 WGII 及相關學者既有同儕審查文獻為主要科學資訊來源。前述科學資訊以本章第一節所訂「國家調適應用情境」(全球暖化程度 1.5°C 及 2°C)為共同基準，評估本領域易受氣候變遷影響對象及所對應業務範疇之未來衝擊或風險。

(2) 依檢視現況之評估結果及方法進行未來風險評估、辨識調適差距或指認高風險地區呈現本領域未來風險辨識之初步結果。考量本領域於本期屬首次獨立分項辦理風險評估，僅辨識「危害度 × 暴露度 × 脆弱度」三大面向別之風險主軸，以文獻與內容作為未來建立常態量化評估機制及高風險地區指認之基礎，未進行乘積式整體推估。

(3) 邀集有關機關、學者、專家及民間團體共同檢視調適差距或指認高風險地區之合理性：本期於文獻整理後，透過專家會議與公聽會邀集各界檢核風險評估結果，建立諮商修正機制。

(三) 調適方案研擬工作之承接

本章依《作業準則》第五條至第七條完成「氣候變遷風險評估」之成果，將延續於第四章「調適目標」與第五章「推動策略及措施」，呈現《作業準則》第八條至第十一條所要求之「調適方案研擬與執行」，除了建立領域內常態化之風險評估推動機制外，亦作為下一期方案邁入第二階段調適工作之關鍵基礎。

三、現況與未來風險評估

本節將依前述風險評估作業說明所訂之評估程序，呈現本領域風險評估之初步辨識結果。考量本領域於本期首次獨立分項、過往尚未獨立辦理氣候變遷風險評估，僅依最新科學資訊與準則規範，彙整可能遭遇之風險；

具體之高風險地區指認、調適差距量化分析等工作，俟未來評估方法成熟及資料累積後辦理。

本章之風險分為現況與未來兩部分呈現：(一)現況風險評估：對應《作業準則》第六條「檢視資源及氣候衝擊現況」之評估，係就已觀測之氣候危害、所暴露之生態系統與物種及其既有脆弱條件，依既有研究與監測成果，辨識目前已可掌握之風險與資料缺口；(二)未來風險評估：對應第七條「評估未來氣候變遷風險」，以本章第一節所訂「國家調適應用情境」(全球暖化程度 1.5°C 及 2°C)為共同基準，承接現況辨識結果，研判未來可能加劇、位移或新增之風險方向。

二者評估結果之落差，即《作業準則》所稱之調適差距。本節於相關風險項說明資料缺口、判讀限制及可參考之評估依據，係為銜接《作業準則》第七條所定未來風險評估、調適差距辨識或高風險地區指認之需求；惟本期屬初步質化辨識，具體評估方法與指標選擇仍待後續依資料累積及專家檢視滾動精進。

(一) 現況風險評估

本節各面向之現況風險，主要著重於既有科學知識、長期生態監測數據及研究成果之盤點。評估方式係考量由物種、族群、群聚、地景至整體生態系統等不同層級之生態特性，就「目前已觀測到」之氣候危害因子、所暴露之衝擊對象，以及其脆弱條件關係加以辨識。藉由呈現目前本領域已掌握之實質生態衝擊與證據基礎，推估生態系統所面臨之可能風險與資料缺口，並將各面向風險彙整於本節末之風險綜整表。

1. 陸域保育空間涵蓋不足與棲地破碎化限制調適能力

截至 115 年 4 月，臺灣之陸海域保護區共 97 座，扣除範圍重複部分後總面積共 1,210,657 公頃，其中陸域保護區約 694,449 公頃，將近陸域面積之 20% (林業及自然保育署，2026)；海域保護區約 516,208 公頃，佔我國海域面積之 8.38% (海洋保護區，2026)。除此之外，亦於保護區外推動國土生態保育綠色網絡及「保育共生地」(OECM，或譯為「其他有效地區保育措施」)，以保育淺山、平原、海岸等人為活動環境之生態棲地。

臺灣中高海拔已有相對完善之保護區體系，但根據林業及自然保育署 (2026) 統計，仍有約六成之保育類野生動物與受脅植物生活於受保護之國有森林之外，平地及淺山地帶之物種棲地破碎化，仍屬本領域之重大保育挑戰 (許皓捷等，2021)。譬如以 eBird Taiwan 公民科學資料分析臺灣冬

季水鳥多樣性熱區，全臺 994 個冬季水鳥熱區中僅約三分之一座落於現有保護區範圍內（陳宛均等，2024），此缺口在氣候變遷衝擊下，保護程度仍顯不足。

2. 複合性壓力加劇沿海陸域棲地脆弱度

根據《科學報告 2024》，臺灣位於西北太平洋，1961 年至 2003 年間之海平面變化率超過全球平均值之 1.5 倍，1993 至 2015 年間平均每年上升 2.2 公釐。以 1920 年代至 2020 年代之歷史地形圖及 Landsat 衛星影像重建西部潮間帶泥灘變遷，臺灣西部潮間帶泥灘面積於 1950 年代至 2010 年代由約 460 平方公里降至約 194 平方公里，流失約 58%（約 266 平方公里），依 IUCN 生態系紅皮書（IUCN Red List of Ecosystems）之生態系分布衰退準則已達瀕危等級（Chen *et al.*, 2024）。臺灣沿海陸域棲地之流失，除受氣候變遷之衝擊，亦面臨超抽地下水、河川輸砂與海岸及上游開發等複合性壓力，影響棲息生物之生存，等為本領域沿海生態空間規劃與保育優先性判斷之重要風險訊號。

3. 極端氣候情境減損生態系統服務能力

(1) 陸域生態系

臺灣高山生態系因海拔梯度陡峭、可遷移空間有限，對暖化、乾旱及極端事件具有較高敏感性。觀察高山植群對於溫度與水分變化的反應，依 GLORIA 國際標準化方法監測臺灣 6 處高山山頂之結果，三個監測週期（2005–2009、2010–2014、2015–2019）比較顯示，部分較低海拔山頂已出現嗜熱物種比例增加、嗜濕物種減少、玉山箭竹等優勢種擴張及整體物種豐富度下降等現象（Kuo *et al.*, 2022）。這研究顯示觀察的高山植群組成已可觀察到與溫度升高的影響及水分條件變化相關之變動訊號。

高山植群應對乾旱複合壓力，以 1951 至 2022 年資料分析臺灣高山地區乾旱事件之研究指出，嚴重乾旱與極端乾旱事件已被量化辨識，且 2016 年後極端乾旱事件有增加趨勢（Kuo *et al.*, 2026）。當乾旱與高溫同時發生時，植群生產力下降幅度較為顯著，部分冷涼及喜濕物種於樣區中減少或消失，群落組成亦可能朝同質化方向變化。此顯示高山生態系之現況風險不宜僅以平均升溫判讀，亦需納入乾旱、高溫及水分條件變化之複合壓力；標準化降雨蒸散指標（SPEI）所反映之乾旱壓力仍需後續持續監測。

淺山平原地區的生態系也因土地利用形式變化產生之壓力，減損各生態系的生態系統服務能力，降低對於氣候變遷壓力的調適能力，惟目前尚無適當研究評估風險。

紅樹林等沿海藍碳生態系兼具棲地維持、海岸防護與碳循環功能，惟其調適與減緩效益高度受物種組成、潮汐水文、鹽度、營養鹽、沉積物來源、分解與外輸過程影響，不宜僅以造林面積、植被面積或單一碳匯係數判定。且底泥碳庫有相當比例來自上游河流之外源有機質，而非紅樹林自身生產 (Li *et al.*, 2018; Lin *et al.*, 2021, 2023; Yong *et al.*, 2024, 2025)。因此，紅樹林復育之氣候風險在於氣候變遷壓力上升時，環境受到極端氣候事件的衝擊而影響到生態系統服務能力。另外在紅樹林復育時，若忽略物種、水文及底泥碳來源差異，可能高估單一復育措施之減碳共效益，並影響場址選擇與成效判讀。關於氣候變遷壓力對於生態系統服務能力之影響，目前研究較零散，缺少整體面向或完整的研究。現有研究多屬特定物種、樣區或監測網絡之成果，於此僅列舉數項尚不宜推論為全臺生態系之整體風險分級，但可作為本期辨識生態系現況壓力之重要案例。

(2) 海域生態系

氣候變遷可能降低海岸生態系維持生態系統服務之能力，既有風險評估指出，臺灣海岸生態系中，主要承受海溫上升與海洋酸化衝擊之珊瑚礁、海草床與藻礁屬相對高風險群；其他沿海生態系之風險樣態不同，需依暴露度與脆弱度分別評估 (Chiu *et al.*, 2017)。

就珊瑚礁而言，全球研究與 IPCC 評估均指出海洋熱壓力將增加珊瑚白化與群聚退化機率，進而削弱珊瑚礁生態系提供棲地、生物多樣性維持及漁業支持等生態系統服務之能力。然而珊瑚礁退化並非僅由氣候因子單獨造成，亦可能與營養鹽、污水、過漁及大型藻優勢化等在地壓力交互作用，進一步削弱珊瑚礁韌性與生態功能。南臺灣研究顯示，營養鹽富化可促進大型藻覆蓋並削弱珊瑚競爭力 (Liu *et al.*, 2009)；另具化感作用之大型海藻 *Galaxaura divaricata* 會降低多數草食性魚類對可食大型藻之取食量，並可能影響部分非草食性魚類之取食行為 (Lee *et al.*, 2026)。此類在地壓力雖非氣候因子本身，惟會影響珊瑚礁面對熱壓力與酸化之韌性，增加生態功能衰退之可能性，屬複合風險之一環。

海草床具有重要棲地支持與碳循環功能，惟其生態功能與碳匯效益可能受氣候變遷及環境條件變化影響，其中物種組成、演替階段、底泥有機碳保存、分解與外輸過程為碳匯效益的重要影響因子。東沙及南臺灣海草床研究指出，部分海草床雖具高生產力與生態功能，惟海草床生態系的碳儲存未必長期埋存於底泥（南臺灣泰來藻床僅約 4% 之葉片生產被長期埋存），且不同海草物種對乾濕季、潮位變化與營養鹽條件之反應不同（Chiu *et al.*, 2013；Huang *et al.*, 2015；Lin *et al.*, 2018；Lee *et al.*, 2021；Chen & Lin, 2022）。因此，海草床之碳匯與棲地功能之能力，受物種組成、覆蓋度、底泥碳庫、水質與營養鹽狀態等多因子影響；在氣候變遷情境下，相關資料缺口仍增加其風險判讀與調適規劃之不確定性。

4. 高溫乾旱情境增加森林火災發生與擴散潛勢

每年十月至次年四月氣候較乾燥，為林火好發季節，主要為人為引起，如用火不慎、亂丟菸蒂、蓄意縱火。根據林業及自然保育署（2024）統計，民國 106 至 113 年國有林地火災件數，平均一年 50 件，其中因 110 年遭逢 56 年大旱，森林火災件數高達 93 起（行政院災害防救辦公室，2022）。既有研究彙整 1987 至 2023 年臺灣高山國家公園 42 起火災紀錄，並運用 Landsat 衛星反射率推導差異化標準化燃燒指數（dNBR）分析火災後森林恢復情形，發現六成受災網格以復育，但仍有經過 32 年未復育之情形（Kuo *et al.*, 2026）。森林火災之發生與災後恢復受氣候條件、地形、燃料、人為活動及其他擾動共同影響，因復原不易，加上氣候變遷下高溫與乾旱日數增加，人為因素若不得妥善管控，將提高森林火災風險，相關監測與資料仍待後續補強。

5. 微氣候變化改變物種互動與生態系穩定性

氣候變遷壓力下，溫度、水分因子受到影響，造成微棲地結構的改變，亦可能透過微氣候變化影響物種間之互動，屬跨生態系之風險。Chan *et al.*（2023）以臺灣合歡山埋葬蟲與麗蠅幼蟲之資源競爭為例指出，森林砍伐可增加日較差（diurnal temperature range, DTR），並改變白天與夜間活動物種於資源競爭中的相對表現。此研究提醒本領域在評估棲地劣化、森林邊緣化及復育管理成效時，除氣候因子本身外，亦需留意土地利用變遷、植被覆蓋、微氣候條件及物種互動關係之複合影響。此類風險目前仍屬案例型證據，後續仍需補強相關證據之議題。

6. 現況風險之綜整觀察

綜整現有證據，辨識出現況風險高度集中於「棲地環境實質壓縮」與「自然系統運作失衡」。高山森林與雲霧林面臨的暖化與乾旱複合壓力，以及西部沿海潮間帶泥灘流失、濕地與藍碳生態系變動、珊瑚礁熱壓力及海洋相位轉變等危機，不僅威脅著瀕危物種的續存，更顯示出氣候壓力已逐漸削弱大自然原有的環境緩衝、碳吸存與基礎棲地維持等底蘊。

面對高溫異常、極端降雨與海平面上升等持續影響，儘管我國已投入諸多保護與保育措施，目前觀測到的物種分布初期位移、極端天氣對現存脆弱棲地造成的實質破壞，以及海平面上升對沿海保護區造成的立即性邊界擠壓，凸顯了物種的避難退路與生存網域的壓力困境。

雖受限於資料分散、監測網絡密度不足及跨生態系評估方法尚未一致，目前仍不宜解讀為完整之量化評估結果；但這些已辨識出的立即性壓力，將成為後續調適研擬的關鍵參據。確保未來的保育行動能有效因應氣候變遷下的棲地連結需求與自然機能衰退危機。

（二）未來風險評估

奠基於前述現況風險證據基礎，本節未來風險評估進一步聚焦於氣候變遷可能導致衝擊與威脅加劇風險辨識。本節依國家調適應用情境（全球暖化程度 1.5°C 之 2021–2040 年、2°C 之 2041–2060 年）為共同基準。辨識方式同於現況評估，參採《科學報告 2024》及 IPCC AR6 WGII 及學者同儕審查文獻等最新科學資訊，以研判在未來情境下推估對各生態層級所產生之變化趨勢與疊加效應。

1. 高山特有與子遺物種適生範圍持續限縮

氣候變遷可能使部分物種之適生棲地向高海拔或較冷涼區域移動，惟臺灣高山物種受島嶼地形、山頂效應及既有棲地分布限制，可遷移空間有限。以臺灣冷杉為例，Chiu *et al.* (2022) 推估其現今氣候下之潛在適生面積為 73,151 公頃，實際分布約 16,857 公頃，主要位於海拔 2,700 至 3,600 公尺之高山環境；於升溫 0.5°C、1.0°C、1.5°C 及 2.0°C 情境下，潛在適生面積分別降為現況之 70.2%、47.1%、30.2% 及 10.0%。此結果顯示，於 GWL 1.5°C 與 2°C 情境下，高山特有物種之適生棲地可能顯著縮減，且因向上遷移空間有限，未來保育空間規劃須同時考量現有分布、潛在未來棲地及棲地連續性；針對此類於自然棲地中退無可退之高脆弱物種，亦凸顯推動域外保育與種原保存（如方舟計畫）以避免物種滅絕之急迫性。

冰河子遺物種亦呈現類似風險。《科學報告 2024》表示臺灣水青岡

(*Fagus hayatae*) 霧林「至 2100 年適生面積可能僅餘現生之 7% 甚或不及 1%」，顯示此類物種之棲地限縮風險需納入保育空間規劃。昆欄樹 (*Trochodendron aralioides*) 之集成模型研究亦指出，不同區域族群於未來氣候下可能呈現不同之遷移與流失風險(至 2050 年中部中海拔族群可往上遷、北部低山族群則大量流失)，反映子遺物種保育不宜僅以現況分布判斷，仍需納入未來適生區位與區域族群差異 (Lin & Chiu, 2019)。

2. 海平面上升與複合壓力加劇沿海關鍵棲地退縮

於未來氣候情境下，沿海潮間帶、泥灘地及濕地可能受海平面上升影響，並與海岸開發、綠能基礎設施擴張及棲地破碎化等壓力交互作用，增加沿海關鍵棲地退縮與功能受影響之可能性。若缺乏整體棲地網絡規劃，可能進一步限制沿岸生物因應環境變遷之空間。

3. 氣候避難所與生態連結空間布局未臻完善

未來保護區規劃不僅需維持現有保護區功能，亦須檢視保護區是否能涵蓋物種未來適生棲地、氣候避難所及遷移廊道。既有研究以臺灣高山樹種(臺灣冷杉、臺灣鐵杉)為例指出，現有保護區於氣候變遷情境下仍可涵蓋多數適生地，惟為抵銷適生棲地縮減及模型不確定性，仍需透過系統性保育規劃辨識保護區外之補充保育區位 (Lin *et al.*, 2014)。國際「氣候智慧型保護區」研究亦指出，未來保護區規劃應同時考量物種未來棲地、氣候避難所、氣候連通性及調適潛力區 (Buenafe *et al.*, 2023, 2025)。因此，本領域未來風險不在於現有保護區立即失效，而在於若未將未來棲地與連通性納入空間規劃，可能形成新的保育缺口。

4. 極端氣候減損生態系統功能維持與恢復力

臺灣棲地長期面臨破碎化與品質下降之挑戰，未來若再疊加氣候變遷衝擊，生態系恢復所需時間可能延長，並增加功能維持之挑戰。以崩塌地為例，依《科學報告 2024》推估，未來侵臺之颱風將呈現「個數減少、強度增強」之趨勢，單次事件引發坡地崩塌、土砂擾動及溪流棲地變動之可能性亦可能提高。然現有崩塌地資料多偏重災害與工程治理，較缺乏棲地品質、生物群聚、溪流濁度、底質變化及復育後生態功能恢復之長期評估，若缺乏生態指標與長期監測，將增加復育成效評估及調適策略優先順序判定之不確定性，亦可能限制生態系恢復力之掌握，如難以判斷復育措施對於提升生態系韌性之效用，以及投入具氣候調適意義之復育措施排序與成效指標設定。

紅樹林等沿海藍碳生態系之碳匯效益高度受物種別、潮汐水文、物種組成及分解與外輸過程影響，於未來暖化與酸化之雙重壓力下不確定性可能進一步提高。根據《科學報告 2024》，臺灣之海平面於 21 世紀末將提升 0.4 至 0.8 公尺，然而紅樹林垂直生長之上限為每年 7 毫米 (Saintilan *et al.*, 2020)，若海平面上升速度超過此閾值，紅樹林又無法向內陸擴張，可能面臨調適受限，進而影響海岸防護與碳匯功能之維持。

依 IPCC 海洋與冰凍圈特別報告 (SROCC, 2019)，珊瑚礁於全球升溫 1.5°C 即面臨極高風險，於 1.5°C 與 2°C 情境下預估分別大幅減少 (約七至九成、逾九成五，屬全球尺度評估)；惟承前述現況，臺灣海域大規模白化之長期監測資料仍有限，未來氣候情境下對珊瑚礁生態功能變化之評估仍具有相當不確定性。

5. 乾旱與火災削弱森林碳匯維持能力

於 GWL 1.5°C 及 2°C 情境下，暖化與乾旱之複合壓力可能進一步提高，並透過群落同質化等機制改變高山生態系結構，不僅需耗費長年恢復，也可能影響森林碳匯。根據陳奕穎等 (2024) 研究，2020 至 2021 年間之乾旱期間，臺灣中部森林之淨生態系交換量 (NEE) 為正值或接近於 1，顯示碳吸存功能暫停。經統計分析，淨生態系統交換、輻射因子、地下水位和野火之間存在顯著相關，亦即若反覆發生嚴重乾旱，將增加森林火災機率，並降低森林長期碳吸存潛力。因此乾旱與火災之監測至關重要，惟林火趨勢受氣候、地形、燃料、人為及次生干擾共同影響，dNBR 可作為輔助監測之一，相關資料仍待後續補強。

6. 氣候變遷與入侵種交互作用提升入侵種擴散潛勢

入侵種與氣候變遷之交互作用屬未來需預警但不確定性較高之議題。全球模式綜整研究指出，氣候變遷可能改變入侵種之潛在分布，且不同類群反應並不一致；部分無脊椎動物與病原體可能具有較高擴張潛力，但草本植物與脊椎動物之分布變化則受海洋阻隔、棲地條件與傳播限制等因素影響 (Bellard *et al.*, 2018)。就臺灣而言，目前尚缺乏外來入侵種對未來氣候情境反應之系統性本土評估，故不宜直接推論特定類群將必然向高海拔或冷涼棲地擴張。外來入侵種與氣候交互作用屬目前資料較不足、判讀限制較高之議題，仍需後續持續補強相關資料。

7. 未來風險之綜整觀察

本領域已有部分本土研究與氣候情境推估成果，顯示未來高山特有與

子遺物種棲地限縮、沿海關鍵棲地退縮、極端天氣擾動將會加劇。綜觀上述未來風險仍與現況風險辨識出相似方向及更嚴峻之「適生空間壓縮」與「自然功能失能」。具體而言，高山物種與沿海棲地退無可退的困境，凸顯出未來物種避難與遷徙的空間連結將面臨嚴峻挑戰。而更加極端氣候模擬情境，亦將深刻衝擊大自然原有的碳吸存、海岸防護與棲地維持等種種功能，導致環境調節機能失能衰弱。

儘管目前針對林火所致淨生態系交換量暫停、外來入侵種突破低溫限制風險，以及跨生態系與保護區之氣候韌性評估仍存在資料缺口。前述所辨識出之未來風險與威脅，未來仍宜以結合更多長期監測、高解析度氣候資料、海陸整合圖資及臺灣生態系分類架構為基礎，全面考量由物種、族群、群聚、地景至整體生態系統等不同層級之生態特性，並引導後續調適行動設計，以因應未來情境下棲地網絡斷裂與自然系統運作失衡之長期危機。