

臺灣石斑魚養殖業的氣候變遷風險分析

鄭安倉 (國立高雄科技大學水產養殖學系教授兼水圈學院院長)

莊翔傑 (國立高雄科技大學水產養殖學系副教授)

楊宗諭 (國立高雄科技大學漁業科技與管理系副教授)

(通訊作者 , email: tyyang2020@nkust.edu.tw)

文章資訊	內文摘要
接受日期：2026.06 關鍵詞： - 氣候變遷 - 地理資訊系統 - 石斑魚養殖 - SDG 13	本研究利用地理資訊系統 (GIS) 整合氣候推估資料與生物生理耐受性臨界值，依循 IPCC 風險評估架構，系統性評估臺灣石斑魚養殖業在不同全球暖化水平 (GWLs) 下之環境風險與空間轉型。研究結果顯示，現況基線下寒害風險呈現隨緯度遞減之空間梯度，臺南與嘉義受脅程度顯著較高。隨暖化情境由 +1.5°C 推進至 +4°C，寒害風險因致災低溫天數縮減而趨於均質收斂，熱害則轉為高度極化之異質高險，尤以臺南與高雄受地理蓄熱影響，風險增幅預期將高於具備海洋熱緩衝之屏東地區。魚種分析中，龍虎斑因產量佔比達 72%，資產暴露度居首；龍膽石斑面臨長養成期之累積暴露風險；青斑則因產區高度集中，呈現顯著之南北風險落差。理論上，本研究將風險計分定義為「基準風險」，確立規避損害之邊際效益基準，為調適投資建議合理之成本上限。整體而言，暖化促使管理核心由冬季抗寒轉向夏季高溫緊迫管理，資源配置應隨風險重心位移，策略性向南部核心產區之抗熱基礎建設移轉。

CLIMATE CHANGE RISK ANALYSIS OF TAIWAN'S GROUPEL AQUACULTURE INDUSTRY

Ann-Chang Cheng (Department of Aquaculture, National Kaohsiung University of Science and Technology)
Hsiang-Chieh Chuang (Department of Aquaculture, National Kaohsiung University of Science and Technology)
Tsung-Yu Yang (Department of Fisheries Technology and Management, National Kaohsiung University of Science and Technology)
(Corresponding Author, email: tyyang2020@nkust.edu.tw)

Information	Abstract
Accepted date : 2026.06 Keywords : • Climate Change • Geographic Information Systems (GIS) • Grouper Aquaculture • SDG 13	This study utilizes Geographic Information Systems (GIS) to integrate climate projections with biological physiological tolerance thresholds, systematically evaluating the environmental risks and spatial transitions of Taiwan's grouper aquaculture industry under different Global Warming Levels (GWLs), in accordance with the IPCC risk assessment framework. The empirical results indicate that under the current baseline, cold surge risks exhibit a spatial gradient that diminishes with latitude, with Tainan and Chiayi demonstrating significantly higher vulnerability. As the warming scenarios advance from +1.5°C to +4°C, cold risks tend to homogenize and converge due to the reduction in disaster-inducing low-temperature days; conversely, heat stress transforms into a highly polarized and heterogeneous high-risk state. Notably, due to geographical heat accumulation, the risk increments in Tainan and Kaohsiung are projected to exceed those in Pingtung, which benefits from maritime thermal buffering. Species-specific analysis reveals that the hybrid tiger giant grouper ranks first in asset exposure due to its 72% production share; the giant grouper faces cumulative exposure risks stemming from its prolonged cultivation period; and the orange-spotted grouper exhibits a pronounced north-south risk disparity due to the high geographical concentration of its production areas. Theoretically, this study defines the risk score as 'baseline risk,' establishing a benchmark for the marginal benefit of damage avoidance, which serves as a rational cost upper bound for adaptation investment recommendations. Overall, climate warming necessitates a shift in management focus from winter cold mitigation to summer high-temperature stress management. Resource allocation should track the shifting locus of risk, strategically shifting toward heat-resistant infrastructure in the core southern production regions.

壹、研究背景

臺灣石斑魚養殖業是全球水產養殖的重要產業之一，不僅為國內市場提供高附加價值的水產品，更在國際市場上享有良好的聲譽，深受香港、中國大陸、新加坡、日本及其他亞洲國家的市場歡迎。根據農業部統計，石斑魚產值長期位居臺灣水產養殖業的前列，對農村經濟發展及就業創造具有重要貢獻（吳俊良與陳歐泉，2018；鄭安倉等人，2023；謝易叡等人，2022；許嘉閔等人，2021；繆峽，2010）。尤其是近幾年，石斑魚出口中國及東南亞國家，國際市場對其需求持續增加，進一步鞏固了其在國際市場中的地位，對於提升臺灣水產品的國際形象具有積極作用（施友元，2010）。

氣候變遷對臺灣的石斑魚產業的影響日益顯著，全球氣溫上升、海洋酸化、海平面上升及極端氣候事件的頻率增加，對養殖環境帶來多重威脅。這些變化不僅可能破壞養殖設施，造成經濟損失，過高或過低的水溫均可能抑制生長，影響魚類的免疫系統，降低養殖成功率。暖化的水體環境為病原體及寄生蟲的繁殖提供有利條件，加重養殖業者的防疫壓力（董慶斌等人，2017；許耿銘與何瑄芳，2020；梁世武，2014；侯清賢等人，2015；陳雅惠等人，2018；漁業署，2021；石永新，2002）。

鑑於氣候變遷對石斑魚養殖業的潛在威脅，進行全面的風險評估顯得尤為重要。透過量化評估氣候變遷帶來的環境與經濟影響，能夠為業者提供更精準的風險管理策略，並協助政府制定適應性政策，如強化養殖技術及水質監控、推動多元化的養殖模式以分散風險、發展氣候變遷保險機制，減輕業者負擔等（王俊，2016；陳永茂與郭加恩，2019；余祁暉與林彥宏，2014）。

在氣候變遷影響全球水產養殖業，尤其是臺灣水產養殖業的背景下，世界各國政府已採取多項措施來減輕其對水產養殖業的影響。這些措施包括加強水質監測、生產環境適應性強的品種以及建立氣候保險機制等。特別是，臺灣政府利用地理資訊系統（GIS）技術來重點管理和減少氣候變遷對水產養殖業，特別是石斑魚養殖業的影響。更具體地說，GIS 技術可以實現精確的空間分析，例如繪製洪水風險和極端氣候情境圖，以評估養殖場的脆弱性。透過將氣候數據與養殖區域結合，GIS 可以幫助預測可能的經濟損失並分析不同養殖業階段的風險程度。這些資訊不僅為政策制定提供科學依據，也有助於養殖者採取更有針對性的調適措施，有效提高養殖業的抵禦能力和永續發展能力。

本研究旨在探討氣候變遷對臺灣石斑魚養殖業的影響，並利用地理資訊系統（GIS）整合氣候資料、空間資料庫和養殖數據進行評估。研究透過分析養殖調查數據、土地利用資訊，評估極端氣候事件在嘉義縣、臺南市、高雄市和屏東縣等主要養殖區可能導致的潛在經濟損

失。進一步，本研究探討水產養殖戶應對極端氣候挑戰時的適應措施與技術差距，為政府制定更有效的政策以提高養殖業對氣候變遷的韌性提供科學依據。

貳、臺灣石斑魚養殖漁業介紹

依據聯合國糧農組織 (Food and Agriculture Organization of the United Nations, FAO) 統計資料顯示(表1)，目前全球主要石斑魚養殖生產國家仍以亞洲國家為主。至2022年，全世界石斑魚養殖總產量已經增加至243,174公噸。在主要產區中，以中國增長最快速，繼續保持主要生產國的地位，自2011年起產量均大幅增加。中國大陸憑藉其規模化擴張，至2022年產量已達205,816公噸(約佔全世界產能的84.64%左右)，其次為臺灣地區16,946公噸(佔總產能約6.97%)。回顧臺灣產量變遷，而臺灣自2012年至2015年產量均保持在2.2萬至2.6萬公噸以上，2016年後產量均維持在2萬公噸左右，2020年至2022年產量均維持在1.5至2萬公噸。除中臺兩地合計佔全球九成以上產量外，印尼 (5.05%)、馬來西亞 (1.63%) 及菲律賓 (0.78%) 亦為亞洲重要生產國。鑑於 FAO 預估 2030 年全球人均水產品需求將提升至每年 19至20 公斤，石斑魚產業之穩定發展與全球糧食供應安全之關聯性益發顯著。

表 1 近十年亞洲地區主要石斑魚產區生產量之變化

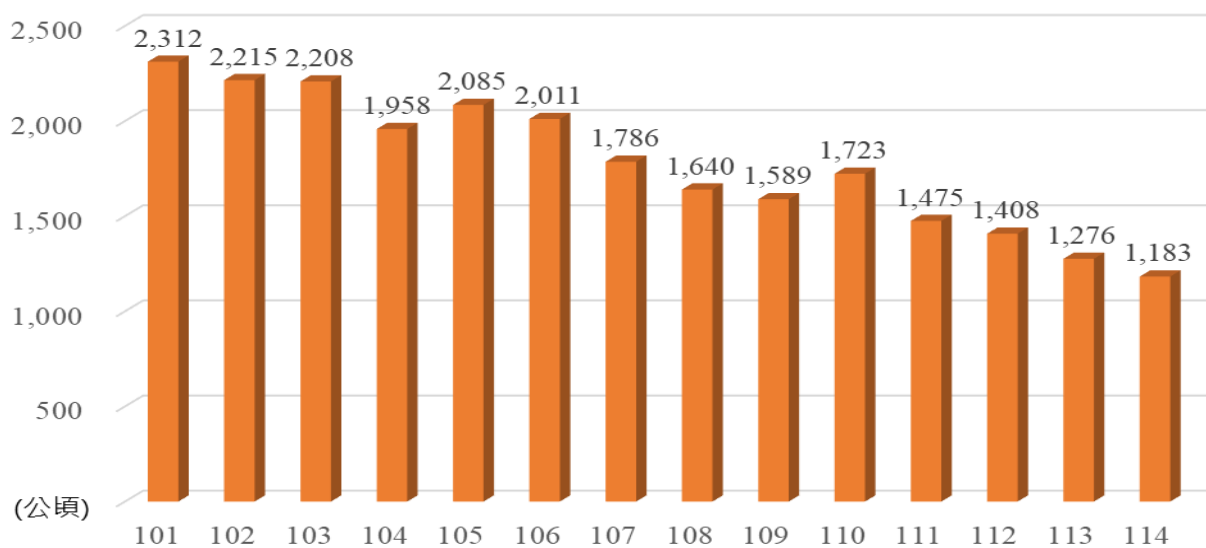
(單位: 公噸)

國家		2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
Bahrain	巴林	1	0	1	-	-	-	-	-	-	-	-
Brunei Darussalam	汶萊	50	4	28	13	37	65	214	159	53	66	78
Cambodia	柬埔寨	140	150	200	200	300	320	350	420	550	480	460
China	中國	69,747	78,898	84,228	95,790	107,203	131,536	159,579	183,127	192,045	204,119	205,816
Hong Kong	香港	286	324	398	206	105	42	5	28	74	44	6
Indonesia	印尼	11,950	18,864	13,346	16,795	11,504	20,600	16,414	12,942	9,478	13,012	12,273
South Korea	南韓	52	56	67	134	217	443	300	145	79	-	220
Kuwait	科威特	-	-	-	-	-	2	-	-	-	-	2

Malaysia	馬來西亞	6,009	5,354	7,881	8,003	6,167	6,137	8,040	7,370	3,753	2,601	3,956
Myanmar	緬甸	140	140	150	13	13	14	-	15	-	-	-
Philippines	菲律賓	1,290	733	341	337	256	249	477	137	27	-	1,902
Saudi Arabia	沙烏地阿拉伯	115	125	140	108	100	100	100	-	-	-	-
Singapore	新加坡	131	275	257	238	298	498	550	508	288	325	461
Taiwan	臺灣	22,432	25,942	25,682	26,207	20,479	21,787	21,301	21,576	19,508	16,946	16,946
Thailand	泰國	2,837	2,495	2,586	2,258	2,042	2,007	1,830	1,786	1,239	1,270	980
United Arab Emirates	阿拉伯	-	-	-	-	-	190	190	180	240	78	73
總計		115,180	133,359	135,304	150,302	148,721	183,989	209,351	228,393	227,335	238,943	243,174

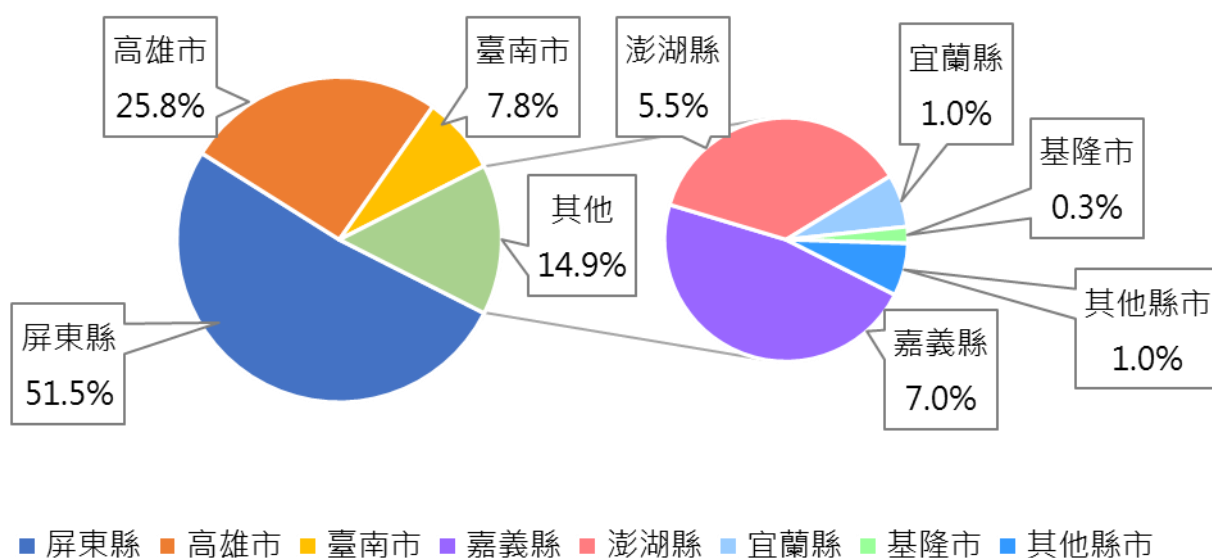
資料來源：聯合國糧農組織 FAO (2024)。

根據臺灣地區漁業年報及養殖漁業管理系統的資料顯示，彙整近十年間臺灣地區石斑魚放養面積(圖 1)，101年至106年臺灣地區石斑魚放養面積達2,000公頃左右，自107年後已低於2,000公頃，可能是受到石斑魚價波動不穩定、午仔魚放養意願逐漸提升之原因，自107年起，石斑魚放養面積整體呈下降趨勢，但110年略有回升(107年1,786公頃、108年1,640公頃、109年1,589公頃、110年1,723公頃)，至113年已降至1,241公頃(111年1,475公頃、112年1,320公頃)。截至 114 年 11 月之調查數據顯示，國內放養面積僅約 1,183 公頃。放養面積自107年跌破2,000公頃後，近四年(111至114年)均維持在1,500公頃以下，顯示產業規模趨於保守。114年主要放養區域為屏東縣：417.79 公頃(約 35.3%)，仍為全國最大產區；高雄市：348.58 公頃(約 29.5%)；臺南市：282.67 公頃(約 23.9%)；其他縣市：133.46 公頃(約 11.3%)，含嘉義、雲林、澎湖等(圖2)。石斑魚依其物種特性、氣候條件、水源供應、地理位置及養殖方式等，仍以屏東縣擁有最佳的養殖條件。



資料來源：漁業統計年報、養殖漁業資訊管理系統。

圖 1 歷年臺灣地區石斑魚養殖面積之變化

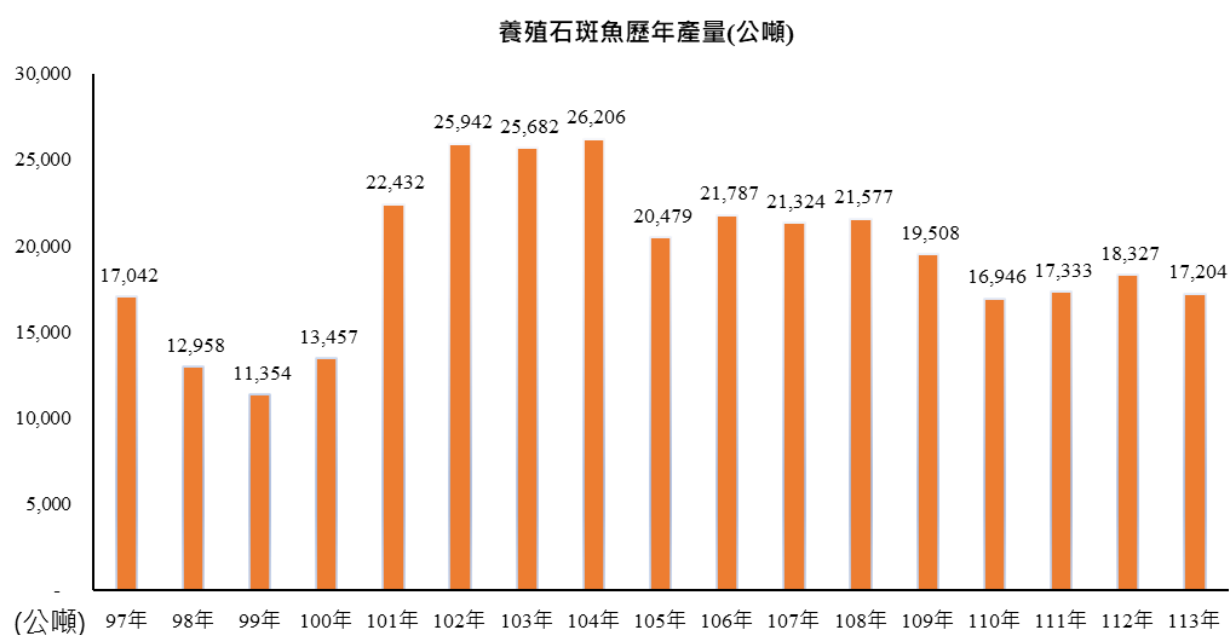


資料來源：114年漁業統計年報。

圖 2 臺灣地區石斑魚主要放養地區分布

臺灣石斑魚養殖產業具備高度專業化之分工鏈，涵蓋種魚繁殖、魚苗培育、中間育成及成魚養成四大階段¹。以 113 年資料為例，成魚放養面積約1,102公頃(88.77%)、中間育成約58公頃(4.68%)、魚苗培育約75公頃(6.05%)、種魚養殖約5公頃(0.40%)。石斑魚產業各階段分工明確，每個階段皆有專門的養殖業者，形成一個完整的養殖供應鏈體系。然而，整個產業結構的改變(如市場需求波動、魚價波動及政策等)，除了影響各養殖階段規模的變動，進而影響下游供應鏈(如活魚消費、加工、出口)的穩定性與整體效益。

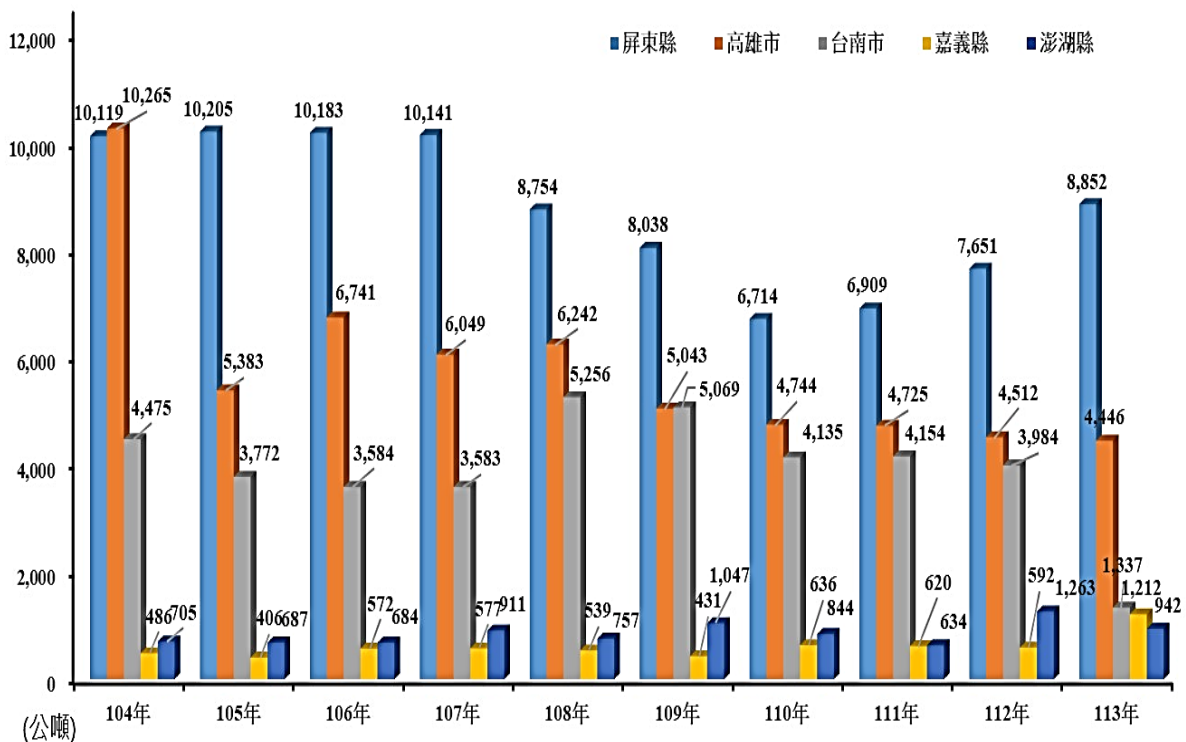
臺灣石斑魚養殖產業自民國 90 年代初期因繁養殖技術的突破進入全盛期，產量於 96 年達 15,000 公噸，隨後雖歷經 98 年八八風災之衝擊，仍於 101 年起穩健回升。民國 102 至 104 年為產業產量之高峰期，年平均產量達 26,000 公噸；然隨後受到 105 年超級寒流、109 年新冠肺炎疫情衝擊全球物流，以及近年中國大陸禁輸令、極端氣候頻傳與國內午仔魚轉養潮等複合因素影響，整體產量呈現下降趨勢，111 年後年產量均低於 20,000 公噸(圖 3)。



資料來源：漁業統計年報。

圖 3 近年臺灣地區養殖石斑魚總產量之變化

¹ 魚類養殖一般可分為四階段：種魚繁殖(選育並長期維護具備優良遺傳性狀的成熟種魚，進行人工誘產或自然產卵)、魚苗培育(將受精卵孵化後，培育至白身苗(約 1 英吋)或寸苗(約 2-3 英吋)的過程)、中間育成(將寸苗繼續培育成 6 至 8 英吋以上的幼魚)及成魚養成(將幼魚投入養成池，直至達到上市規格(如龍虎斑、青斑約 0.9 公斤，龍膽石斑約 20 公斤以上))。



資料來源：漁業統計年報。

圖 4 近年臺灣地區養殖石斑魚主要產區總產量之變化

在區域分布方面，臺灣石斑魚生產呈現「兩強獨大」的空間格局，以屏東縣與高雄市為核心產區，兩者合計貢獻全國逾四分之三的產量。屏東地區長期扮演領導角色，其產量佔比在歷經波動後，於 113 年強勢反彈至 51.5%，再次確立其全國最大產區之地位。高雄市則以產量穩定見稱，113 年佔比約 25.8%，位居第二；值得注意的是，高雄市在 114 年的放養總量居全國之冠（約 1.08 億尾），主因在於其承載了全國半數以上的龍虎斑放養量，顯示高雄在物種集約化養殖上的重要性。相較之下，臺南市與嘉義縣則扮演結構性調整角色，過去以魚苗生產為主，產量佔比隨產業環境變動而消長，113 年兩地合計佔比約為 14.8%(圖4)。

在物種構成上，臺灣石斑魚產業已發生顯著的結構性轉型。自 109 年漁業署將龍虎斑（珍珠龍膽）獨立統計以來，該物種憑藉高成長率與抗病力，迅速取代傳統物種成為產量貢獻主力。根據 113 年統計，龍虎斑產量已佔整體石斑魚類之 72%，遠超龍膽石斑（12%）與青斑（7%）。然而，這種高度集中的物種結構也帶來了市場風險，114 年在庫調查顯示，龍

虎斑在池量較去年同期增加 23.36%，顯示在產能高度集中於單一物種的現況下，產業極易受市場去化速度²與外部貿易條件波動之影響，進而形成產銷失衡的潛在威脅。

透過比較臺灣與中國大陸在龍虎斑、龍膽石斑及青斑之年平均池邊交易價格變動可以發現，中國大陸各魚種之均價普遍高於臺灣，且兩地價格變動趨勢展現出高度的同步性。以 113 年數據為例，兩岸市場均以龍虎斑之交易價格居冠，臺灣與中國大陸分別為每公斤 284 元與 322 元；其次為龍膽石斑（臺灣 251 元/公斤、中國大陸 188 元/公斤）；青斑之價格則相對最低，分別為 243 元/公斤與 281 元/公斤。然而，受到中國大陸自 111 年 6 月 13 日起暫停臺灣活魚輸陸措施，以及後續疫情蔓延對運銷體系之干擾，臺灣石斑魚外銷面臨劇烈衝擊。除龍膽石斑受影響程度相對較輕外，龍虎斑與青斑之池邊價格均出現顯著下修，一度逼近產業之成本谷底。儘管貿易壁壘對既有外銷體系造成嚴峻挑戰，然此外部壓力亦轉化為產業調整之動力，進而促使業者重新審視市場結構，並開啟內銷轉型與通路多元化之轉機。

綜合上述產業現況，臺灣石斑魚養殖業正處於結構調整與轉型之關鍵期。儘管產業鏈在生產技術、分工體系及物種替代上展現出高度靈活之經營策略，但在市場波動與貿易壁壘等外部經濟風險之外，環境與氣候因素始終是決定生物耐受性與養殖穩定性的最底層物理限制。隨著全球氣候異常事件頻傳，過往高度集約且集中於特定地理位址（如屏高一帶）的生產模式，正日益受到氣候變遷的嚴峻考驗。為深入評估石斑魚產業在氣候變動下的生存韌性，本研究於下一章節導入氣候風險評估框架，將上述物種特性、空間分布與生產數據進一步連結至極端氣候情境中，藉此分析產業在面臨未來多維度環境危害時的脆弱性與風險程度。

參、氣候變遷風險分析

本研究針對臺灣石斑魚養殖業所進行之氣候變遷風險評估，其核心複雜性根植於風險本身具備的多維度特性。首先，地理環境對氣候衝擊具備顯著的篩選作用，導致風險呈現高度的空間異質性；不同養殖位址因養殖條件(如水源)與區域基礎設施（如供排水系統）的差異，使得即使面臨相同強度的氣候事件，亦會產生非對稱的損害程度。

其次，石斑魚養殖業的風險結構受到物種生理特性與養殖階段的深刻影響。雖然石斑魚的環境韌性隨生命週期增長而提升，魚苗階段因生理機能尚未發育完全，對溫度的敏感度最高且耐受力最弱。然而，由於「成魚養成」階段佔據了產業絕大部分的空間規模（放養面積

² 市場去化速度係指已達上市規格之養殖漁產品，由生產端（養殖池）轉移至消費端（市場）的流通效率。龍虎斑與青斑的可上市規格為600至900克，若因價格或產銷通路因素，養殖業者或可選擇繼續飼養至更大規格，但風險也隨之增加。

佔比達 88.77%) 與養殖產出的最終經濟價值，因此本研究之風險分析聚焦於最具代表性的成魚產量，旨在確保風險分數能精確反映「最大期望損害」並指引「調適成本上限」。

在分析方法上，由於現階段缺乏足夠的統計數據來具體量化氣候危害指標變動與各階段漁損數量之對應關係，本研究捨棄傳統的漁損金額估算，改採「風險計分」方式來呈現臺灣石斑養殖漁業在極端高、低溫衝擊下的風險移轉與演變趨勢。風險來源不僅侷限於全球均溫的長期推移，更源於極端事件頻率與強度的變動，包括夏季高溫引發的熱緊迫以及強烈冷氣團導致的寒害威脅。

最後，為應對未來氣候發展的不確定性，本研究導入多情境分析架構，除設定現況基線外，亦納入全球平均溫度上升 1.5°C、2°C 及 4°C 等不同暖化路徑。透過整合空間分布、生物生理耐受性臨界值、極端危害事件及未來氣候情境，本章節建構一套系統化的風險分析體系，將抽象的氣候變異轉化為具備產業決策價值的量化指標，進而為後續的衝擊評估與調適策略奠定科學基礎。

一、生物耐受性與氣候危害指標

(一)生物耐受性

風險評估當中，氣候危害所造成的衝擊程度取決於物種的生物生理耐受性。本研究所掌握的「石斑魚對於高溫與低溫的耐受性」數據，是風險模型所定義的生理耐受性臨界值。因此，本研究參考水產試驗所的相關研究資料，建立生理耐受性指標為本研究後續進行危害分析與風險模型建構提供關鍵的參考依據。

在表 2 中，針對臺灣主要石斑養殖物種的分析顯示，龍虎斑與龍膽石斑的最適生長水溫均介於 22~28°C 之間，而青斑則表現出較廣的溫度適應性，其最適範圍可達 22~30°C。當環境水溫超過 35°C 之緊迫臨界值時，各物種普遍會出現生理緊迫、停止攝食，並顯著增加虹彩病毒與鏈球菌感染的風險。在極端高溫 38°C 的情境下，龍虎斑具備較佳的耐受力，可維持生命約 24 小時，相較之下，青斑與龍膽石斑則無法存活超過 12 小時。

在低溫耐受性方面，不同物種間存在明顯的脆弱性差異。龍虎斑與龍膽石斑在水溫低於 15°C 時即進入緊迫狀態，若水溫持續下降至 10°C–12°C 的致死下限，魚體將因失去平衡能力而出現側翻與昏迷現象。青斑對於寒害的敏感度則更高，其緊迫臨界值定於 13°C，一旦環境低溫探至 10°C 的致死臨界點，將因呼吸中樞麻痺與心臟功能衰竭而導致死亡。這些臨界值將決定氣候數據（例如 35°C）在生物學上的意義是「最適生長」還是「緊迫開始」。

表 2 關鍵石斑魚物種之生理耐受性臨界值 (Vulnerability Thresholds)

物種 (Species)	參數 (Parameter)	最適範圍 (Optimal)	緊迫臨界值 (Stress Threshold)	
龍虎斑	水溫 (Water Temp)	22~28°C	>35°C	緊迫/停止攝食，並增加病原菌，如虹彩病毒、鏈球菌感染的風險
			>38°C	可以耐受24小時
	低溫 (Cold Temp)		<15°C	當水溫逼近 10°C–12°C 的致死下限時，魚體會失去平衡能力、側翻，進入昏迷狀態
青斑	水溫 (Water Temp)	22~30°C	>35°C	緊迫/停止攝食，並增加病原菌，如虹彩病毒、鏈球菌感染的風險
			>38°C	無法存活超過12小時
	低溫 (Cold Temp)	-	<13°C	停止攝食，且易感染疾病，隨著水溫持續下探至 10°C的致死臨界點，魚體失去平衡（翻肚）、沉底或側臥，最終因呼吸中樞麻痺與心臟功能衰竭而死亡。
龍膽石斑	水溫 (Water Temp)	22~28°C	>35°C	緊迫/停止攝食，並增加病原菌，如虹彩病毒、鏈球菌感染的風險
			>38°C	無法存活超過12小時
	低溫 (Cold Temp)	-	<15°C	當水溫逼近 10°C–12°C 的致死下限時，魚體會失去平衡能力、側翻，進入昏迷狀態

資料來源：水產試驗所。

(二)氣候危害指標

本研究所採用的「危害指標 (Hazard Indicators)」為轉化生物脆弱性與氣候資料的關鍵鏈結。本研究將物種生理耐受性的臨界數值，進一步轉化為可由氣候觀測資料中具體量化的衝擊參數。經由轉化的過程，生物學上的生理限制得以精確映射至氣候變異的強度與頻率，確保後續風險評估在處理不同物種與氣候情境時，具備高度的一致性與分析可比性。

具體而言，該指標以生理耐受性（如 35°C 或 15°C）作為劃分標準，將抽象的生物反應（如緊迫、停止攝食或死亡）映射至具體的氣象統計值。例如，對於青斑而言，低於 13°C 的氣候事件即被定義為高風險的危害指標，因為該溫度區間會導致其生理機能停滯並增加死

亡風險。這種轉化確保了氣候監測數據能被賦予明確的產業損害意義，從而構建出實證基礎的風險分析模型。

值得注意的是，在進行氣候風險評估時，將氣象觀測到的空氣溫度作為水溫的最佳代理變數（Optimal Proxy Variable），係基於兩者在物理能量交換上存在高度的正相關性。儘管氣溫與水溫在熱容量、受光照影響及蒸發冷卻等機制上存在本質差異，導致水溫的波動通常較氣溫更為平緩且具備滯後性，但在缺乏長期、高頻率實測水溫資料的限制下，氣象統計溫度成為描述養殖環境熱應力最穩定且可取得的替代指標。

表 3 氣候危害指標定義、計算方式與資料來源(TCCIP)

危害指標 (Hazard Indicator)	定義		計算方式 (基於逐日資料)	資料來源 (TCCIP)	關鍵生物連結與衝擊
指標 1： 高溫緊迫 (Extreme Heat Stress)	年均「極端高溫日數」 (Days/year)		連一日日 高溫 $\geq$ 35°C	1km 網格 化「逐日最 高溫度」	1. 魚類熱緊迫、攝食率下降、免疫力降低。 2. 疾病風險代理指標。
指標 2： 低溫寒害 (Cold Damage)	年均「寒害風險日數」 (Days/year)		連一日日 低溫 $\leq$ 14°C	1km 網格 化「逐日最 低溫度」	1. 魚類凍傷、停止攝食、代謝機能喪失。 2. 大規模死亡事件：臺灣水產養殖業（虱目魚、石斑魚）在 105 年寒流中遭受數億元損失，證明此指標對產業衝擊至關重要。

註 1：氣象觀測溫度與實際水溫雖存在差異，但可作為最佳代理變數（proxy）。更進階的模型可建立氣溫至水溫的轉換函數。

註 2：TCCIP: 臺灣氣候變遷推估資訊與調適知識平台(Taiwan Climate Change Projection Information and Adaptation Knowledge Platform；簡稱 TCCIP)，是由國家科學及技術委員會（國科會）主導，結合多個研究機構所建置的國家級氣候變遷專業平台。

二、系統韌性與生產環境之關聯

在氣候變遷風險評估架構中，脆弱度（Vulnerability）應被視為一複合性概念。其不僅取決於物種內在的生理敏感性（Sensitivity），更深受養殖系統外部環境韌性（Resilience）的調

節。雖然生物生理耐受臨界值定義了氣候危害 (Hazard) 的致災門檻，但相同強度的氣候衝擊在不同養殖區域所造成的實質損害，往往取決於該系統的緩衝能力。

從系統韌性的角度視之，生產效率的低下往往與較高的「環境敏感度」呈現正相關。當養殖環境本身處於不穩定狀態、基礎設施 (如自動增氧、溫控設施) 不完善時，一旦氣候危害天數增加，魚體所承受的生理緊迫 (Physiological Stress) 將因缺乏環境支持系統的調節而產生加乘效應，進而導致免疫力潰敗。即使在相同氣候情境與產量規模下，具備較低生產韌性的產區將因其環境脆弱性而承擔更高的系統性損害風險。

三、風險模型建構

本研究採用 IPCC (政府間氣候變遷專門委員會; The Intergovernmental Panel on Climate Change) 的標準風險框架 (國科會、環境部, 2024, pp. 529~531)，將風險定義為：

$$\text{風險(Risk)} = \text{危害度(Hazard)} \times \text{脆弱度(Vulnerability)} \times \text{暴露度(Exposure)}$$

$$\text{風險計分方程式: } Risk_Score_{ijrk} = H_{jrk} \times V_{ik} \times E_{ik}$$

此風險分數(Risk_Score)表示 i 物種，在 j 氣候變遷情境下，因 r 氣候危害(極端事件) 對於該物種在 k 養殖區域(鄉鎮)可能造成的損害衝擊。 H 為氣候危害 (Hazard)的頻率，即鄉鎮 k 在氣候變遷情境 j 下的年均極端事件 r 發生的天數。 E 代表受威脅資產的規模 (Exposure)，即特定物種 i 在鄉鎮 k 的產量 (公噸)。

氣候危害度 (H_{jrk})：代表氣候危害的頻率，係指鄉鎮 k 在氣候變遷情境 j 下，年均極端事件 r (如極端高溫或寒害) 發生的天數。此指標並非抽象之氣溫數值，而是基於石斑魚生理耐受臨界值 (如 $\leq 14^{\circ}\text{C}$ 或 $\geq 35^{\circ}\text{C}$) 所轉譯之「致災天數」。將頻率量化為危害程度，主因在於石斑魚雖具備短暫耐受逆境之能力，但極端日數的累積將引發長期的生理緊迫與攝食停止，進而損害免疫系統，大幅增加虹彩病毒或鏈球菌感染之二次損害機率，象徵養殖系統「環境恢復力」的喪失。

生產脆弱度 (V_{ik})：定義為「單位產量之倒數」(公頃 / 百公噸)。由於特定產區之單位面積產量是水質、底質、基礎設施與維生設備等養殖條件的綜合產出結果。當養殖條件越完善，系統對於氣候危害的敏感度越低，調適能力越高，其最終在經濟產出上便會必然地呈現出較高的單位面積產量。此指標反映了產區之環境韌性與管理效能。資產暴露度 (E_{ik})：代表受威脅資產的規模，定義為特定物種 i 在鄉鎮 k 的年產量 (公噸)。

本研究之風險公式能將「魚種耐受性 (由臨界值定義)」與「環境適養性 (由單位產量定義)」進行整合。這使得風險計分不僅是氣象數據的統計，更是對該產區養殖系統「本質脆弱性」的量化描述。這種處理方式能協助決策者指認出哪些地區亟需透過基礎設施升級

(如推動智慧化養殖、改善供排水系統)來提升其環境恢復力，從根本上降低因環境韌性不足所誘發的氣候衝擊損害。

四、氣候危害預測資料

本研究之氣候危害指標係源自「臺灣氣候變遷推估資訊與調適知識平台」(Taiwan Climate Change Projection Information and Adaptation Knowledge Platform, 簡稱 TCCIP)。TCCIP 係由國家科學及技術委員會(國科會)主導，並協同環境部、中央氣象署及相關學術單位共同建置之國家級氣候變遷科學資訊中心。該平台之核心任務在於整合全球氣候模式(Global Climate Models, GCMs)產出之粗解析度數據，透過動力與統計降尺度(Downscaling)技術，轉化為符合臺灣複雜地形之高解析度氣候推估資料(如 1 公里網格數據)。其產出之數據不僅包含歷史觀測基線，亦涵蓋聯合國氣候變遷政府間專家委員會(IPCC)第六次評估報告(AR6)中不同共享社會經濟路徑(SSPs)下之未來推估，為國內各界評估氣候衝擊、建構調適策略與進行風險管理之權威依據。

本研究利用 TCCIP 提供之原始推估數據，進一步計算並推估在不同全球暖化水平下，如上表 3 中定義之「高溫緊迫」與「低溫寒害」危害指標。以下詳述數據獲取與處理流程：

TCCIP 數據獲取

進行本分析所需的原始數據，可至「TCCIP 氣候變遷資料商店」獲取。

- 關鍵行動：搜尋並下載「AR6 統計降尺度日/月資料(1 公里)」。
- 資料規格：必須選擇逐日(Daily)網格資料(通常提供.csv 或 NetCDF 格式)。
- 所需變數：確保下載的資料集包含：逐日最高溫(Tmax)和逐日最低溫(Tmin)。
- 空間範圍：篩選並下載涵蓋嘉義縣、臺南市、高雄市、屏東縣所有鄉鎮的 1km 網格資料。

情境的對應：從 GWLs 到 SSPs

資料使用的需求是評估 +1°C、+2°C、+4°C(全球暖化水平, GWLs)的情境。然而，TCCIP AR6 資料是依據 SSPs(共享社會經濟路徑，如 SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP5-8.5)提供。因此，必須進一步的「情境轉譯」。

- 轉譯步驟：查閱 TCCIP 的官方報告(例如《國家氣候變遷科學報告 2024：現象、衝擊與調適》)或利用其平台工具，找出不同 SSP 情境下，全球均溫達到特定 GWLs(例如 +2°C)所對應的「時間切片」(Time Slices)(例如 20 年期)。
- 情境定義：

- 基線 (Baseline): 選擇 1995-2014 年的歷史觀測資料 (Historical)。
- +1°C 情境: 目前全球已約處於此水平，可使用基線資料或 2000-2019 年的資料。
- +2°C 情境: 係指在全球多模式集合推估下，預期全球升溫達到 2°C 之時間切片 (通常為 2041-2060 年，視不同模式路徑之集合平均而定)。
- +4°C 情境: 係指在全球多模式集合推估下，預期全球升溫達到 4°C 之 20 年平均時間切片 (通常只對應於高排放路徑 SSP5-8.5 下之 21 世紀末期，如 2081-2100 年)。
- 資料準備：分析者必須為這四個「時間切片」分別下載 TCCIP 的逐日資料 (Tmax, Tmin)。

數據處理流程 (Data Processing Pipeline)

獲取原始網格資料後，需依循以下流程進行處理，以產出危害指標 (H)：

1. 空間平均 (Spatial Averaging)：

- 利用 GIS 軟體 (如 ArcGIS 或 QGIS) 或程式語言 (如 Python) 的空間分析工具。
- 將 TCCIP 的 1km 網格資料 依據臺灣鄉鎮市區界線圖資 (SHP file) 進行疊加分析。
- 計算每個鄉鎮範圍內所有網格點的平均值 (Tmax, Tmin)。
- 產出：每個鄉鎮 (i)、每一天 (t) 的 Tmax, Tmin 時間序列資料。

2. 計算危害指標 (Hazard Calculation)：

- 依據表 3 中定義的計算方式，分析上一步產出的時間序列。
- 例如，對於彌陀區 1995-2014 年 (基線) 的 Tmin 時間序列，計算每年 $T_{min} < = 14^{\circ}\text{C}$ 的總天數。

3. 情境彙整 (Scenario Aggregation)：

- 將步驟 2 得到的「每年天數」在對應的情境「時間切片」(例如 20 年)內進行平均。
 - 產出 (H_{ijk})：每個鄉鎮 (i)、每種危害 (j)、每個情境 (k) 的「年均極端事件天數」。
- 範例產出： $H_{\text{(七股, 寒害, +2}^{\circ}\text{C)}} = 5.2$ 天/年。

肆、結果分析與討論

一、氣候危害指標空間異質性與跨期（升溫情境）變化

(一)各鄉鎮氣候危害指標的空間異質性（現況基線）

寒害危害指標（年均連續一日日低溫 $\leq 14^{\circ}\text{C}$ 天數） 在現況基線下，寒害危害指標具有極為顯著的「北高南低」空間梯度。位於北部的嘉義縣布袋（11.25 天）、東石（11.66 天），以及臺南市七股（10.64 天）、安南（10.63 天），年均極端低溫天數皆高達 10 至 11 天以上。與之形成強烈對比的是，地理位置偏南的屏東佳冬僅有 2.89 天。這種隨緯度遞減的大氣氣候梯度，構成了現況下各養殖鄉鎮最主要的空間異質性來源。

熱害危害指標（年均連續一日日高溫 $\geq 35^{\circ}\text{C}$ 天數） 在現況基準期下，全台各鄉鎮的日高溫高於 35°C 天數皆處於極低的水平，普遍不超過 1 天（例如臺南安南為 0.662 天、屏東佳冬為 0.188 天）。因此在現況下，熱害危害在各鄉鎮之間並未展現出具備統計或經濟意義的空間異質性。（請參閱表 4）

(二)氣候危害空間異質性的跨期（升溫情境）變化

依據TCCIP 氣候變遷資料(表 4)顯示，隨著全球暖化水平由現況向 $+1.5^{\circ}\text{C}$ 、 $+2^{\circ}\text{C}$ 及 $+4^{\circ}\text{C}$ 情境推進，各生產鄉鎮的氣候危害空間分布發生了根本性的轉移：

寒害空間的落差隨著全球均溫上升，冬季至災低溫的發生頻度全面大幅萎縮，原本顯著的「北寒南溫」空間落差在跨情境(跨期)演變中不斷收窄。以寒流衝擊最劇烈的嘉義布袋為例，其年均寒害天數由現況的 11.254 天，在 $+1.5^{\circ}\text{C}$ 時降至 9.162 天，至 $+4^{\circ}\text{C}$ 的極端情境時更驟減至 4.146 天。這項數據表明，在未來的深度暖化環境中，寒害跨區域間的落差將大幅減弱，各鄉鎮的寒害天數皆跌入低點，原本劇烈的空間異質性將走向模糊與空間收斂。

相對於寒害的消退與空間異質性的收斂，熱害危害則由現況的空間均質低險演變為高度極化的異質高險，使得各鄉鎮間的熱害危害強度差距隨時間(情境變化)顯著擴大。數據顯示，臺南安南在 $+4^{\circ}\text{C}$ 下高溫天數激增至 16.448 天，高雄永安增至 15.854 天，屏東佳冬也增至 13.89 天。

值得注意的是，屏東的佳冬、枋寮雖同樣面臨熱害威脅，但其指標天數明顯低於臺南與高雄重鎮。造成此種南端屏東地區熱害天數反而較低的原因，在於屏東養殖區位處最南端半島地帶，受開闊洋流熱緩衝與海風冷卻效應的影響較臺南、高雄更為強烈。臺南、高雄的養殖區域雖然也臨海，但位於廣闊且易蓄熱的嘉南平原邊緣，加上後方連綿的都市與工業區所

產生的額外人為熱源，導致海洋熱緩衝效果相較屏東的佳冬、枋寮地區來得低，熱害天數反而較高（許晃雄等人，2024）。

總結而言，氣候危害的空間異質性在跨情境的分析當中呈現明顯的變化。原先具有高空間異質性（北重南輕）的寒害威脅，隨暖化情境推進而全面弱化並走向空間均質；取而代之的是原本無顯著差異的熱害天數隨之暴增，並發展出以臺南、高雄與屏東等南部傳統精華養殖區為核心的新型空間極化異質性，將成為未來南方各鄉鎮最主要的氣候環境限制。

表 4 危害度(指標)的趨勢變化表

寒害 (年均日低溫 ≤ 14°C 天數)					熱害(年均日高溫 ≥ 35°C 天數)			
現況	+1.5°C	+2°C	+4°C		現況	+1.5°C	+2°C	+4°C
嘉義縣								
布袋鎮	11.25	9.16	7.68	4.15	0.02	0.67	1.83	12.58
東石鄉	11.66	9.47	8.00	4.46	0.01	0.58	1.63	12.21
義竹鄉	13.06	10.79	9.24	5.32	0.30	1.77	3.76	15.76
臺南市								
七股區	10.64	8.43	7.01	3.70	0.40	1.82	3.80	16.37
北門區	11.53	9.20	7.71	4.11	0.24	1.37	3.07	14.88
學甲區	12.09	9.74	8.22	4.53	0.31	1.71	3.70	16.15
安南區	10.63	8.44	7.01	3.71	0.66	2.28	4.25	16.45
將軍區	11.20	8.96	7.46	3.94	0.29	1.51	3.34	15.80
鹽水區	12.97	10.71	9.15	5.35	0.44	2.19	4.35	16.76
高雄市								
彌陀區	8.33	6.33	5.15	2.52	0.36	1.58	3.26	15.73
林園區	6.01	4.50	3.57	1.64	0.39	1.20	2.29	13.26
永安區	8.08	6.22	5.06	2.46	0.39	1.70	3.42	15.85
湖內區	9.74	7.60	6.25	3.23	0.62	2.17	4.16	16.41
茄萣區	9.74	7.60	6.25	3.23	0.62	2.17	4.16	16.41
路竹區	9.48	7.37	6.05	3.16	0.60	2.11	4.12	16.69
屏東縣								
佳冬鄉	2.89	1.93	1.39	0.41	0.19	0.86	2.11	13.89
新園鄉	6.46	4.88	3.92	1.85	0.54	1.48	2.87	14.70
東港鎮	4.00	2.77	2.10	0.75	0.27	0.85	1.87	13.12
枋寮鄉	2.21	1.45	1.00	0.25	0.15	0.74	1.92	13.91
枋山鄉	2.21	1.45	1.00	0.25	0.15	0.74	1.92	13.91
林邊鄉	3.57	2.42	1.81	0.58	0.22	0.81	1.86	13.20
風險程度分類								
風險程度分類				危害度 (天數)				
低風險					0 ≤ ·, <3			
					3 ≤ ·, <6			
					6 ≤ ·, <9			
					9 ≤ ·, <12			

	高風險	12 ≤ , < 15
		15 ≤

二、各魚種氣候風險(風險分數)空間異質性與跨期 (升溫情境) 變化

在各氣候情境中，三魚種的風險計分展現出明顯的數量級差距(詳細請參閱附錄)。龍虎斑(珍珠龍膽)的風險計分在所有情境中普遍最高，這主要源於其高達 72% 的產量佔比與極高的養殖密度，導致其資產「暴露度」遠超其他魚種。例如在高雄市永安區，龍虎斑的現況寒害風險高達 113,983，而龍膽石斑在同區域僅為 47,911，青斑則為 9,831。這種差異並非完全由生物耐受力決定，而是反映了當前石斑魚產業高度集中於龍虎斑單一物種的結構性現象。青斑雖然產量相對較低，對低溫的生理緊迫門檻也較高(13°C)，但其風險分數在臺南市安南區(現況寒害 150,710)大幅高於風險分數次高的臺南七股(現況寒害 39,124)，主因是其生產重鎮高度集中於冬季氣候較嚴峻的臺南安南區。

隨著全球暖化水平從現況向 +4°C 情境推進，所有魚種的風險屬性皆經歷了劇烈的轉型。龍虎斑在永安區的寒害風險由現況的寒害風險分數 113,983 逐步銳減至 +4°C 時的 34,710。青斑在安南區的寒害風險也由 150,710 下降至 52,548。這顯示在未來的深度暖化環境中，傳統上威脅石斑魚產值最劇烈的冬季寒流將不再是主要風險來源，各產區的寒害風險分數差距也隨之縮小並趨於均質收斂。

與寒害消退相反，熱害風險分數(連一日日高溫 ≥ 35°C)呈現大幅的攀升，且在 +2°C 之後出現顯著的轉折點。龍虎斑在高雄永安的熱害風險由現況的 5,533 增至 +4°C 情境下的 223,787。即使是抗熱性相對較佳、最適生長溫可達 30°C 的青斑，其在臺南安南的熱害風險也從 9,387 暴增至 233,218。這說明即使生物具備微幅的耐受優勢，也難以抵擋未來極端高溫天數大幅增加(如臺南、高雄天數突破 15 天)所帶來的系統性資產損害。

總結而言，三魚種的風險軌跡呈現高度同步的趨勢，但其受威脅的「暴露度」隨魚種分布而異。龍虎斑因其龐大的產業規模，成為全台面對高溫衝擊最脆弱的物種，特別是在高雄永安與屏東佳冬等高產區。龍膽石斑雖分數絕對值較低，但因其長達兩年以上的養成期，在跨情境演變中，其成魚池面臨極端事件輪替的累積暴露風險實際上更為複雜。青斑則因其特殊的空間佈局(集中於臺南)與高寒害脆弱性，在基線情境下呈現最極端的南北風險落差，並在未來情境中轉化為臺南平原產區最沉重的熱危害負擔。整體而言，全球暖化將使石斑魚產業的風險核心從冬季抗寒管理轉向夏季抗熱與水質防疫。

表 5 各魚種氣候風險跨期轉變特徵

災 害 類型	代 表 產區	代 表 魚種	暴露度 (產量；公噸)	現況基線 風險分數	+4°C 增溫情 境 風 險 分 數 (風險變動率)	跨期風險演變特徵
寒害	高 雄 永安	龍虎	3,548	113,983	34,710 (-69.5%)	冬季致災低溫威脅大幅消退。
		龍膽	829	47,911	14,590 (-69.5%)	現況分數較低，主因產量暴露度落差。
		青斑	272	9,831	2,994 (-69.5%)	物種結構集約化，致現況基線分數居末。
	臺 南 安南	青斑	1,782	150,710	52,548 (-65.1%)	產區高度集中，現況承受全台最高風險。
	臺 南 七股	青斑	616	39,124	13,583 (-65.3%)	與鄰近的安南區形成對比，突顯顯著空間異質性。
熱害	高 雄 永安	龍虎	3,548	5,533	223,787 (3944.6%)	跨期由低風險直接竄升為未來衝擊重災區。
	臺 南 安南	青斑	1,782	9,387	233,218 (2384.5%)	雖具微幅耐熱優勢，仍難抵擋系統性高溫。
氣候風險跨期 轉變趨勢		1. 寒害威脅空間均質收斂：隨全球暖化水平提升，各魚種寒害風險全面降低，致使既有產區之寒害風險落差縮小。 2. 熱害風險於 +2°C 後大幅提升：熱害分數呈大幅攀升，即使物種具生理耐熱優勢亦難抵擋未來系統性熱危害。 3. 資產暴露度主導魚種風險特性：三魚種的風險軌跡高度同步，龍虎斑因產量佔比極高成為風險最高物種，青斑則面臨產區高度集中所誘發之空間風險集中的威脅。				

	4. 管理核心由冬季抗寒全面轉向夏季抗熱：產業風險屬性的根本轉型， 管理核心與資源配置勢必轉向夏季抗熱與水質防疫。
--	--

資料來源：本研究計算之風險分數。註 1: +4°C 增溫情境風險分數欄位之括弧內數值為「現況基線」轉變至「+4°C 增溫情境」的風險分數變動率。

三、各鄉鎮生產規模與調適資源分配建議

為客觀評估各養殖鄉鎮之氣候風險屬性，本研究參考風險矩陣之理論架構（Duijm, 2015；Ni et al., 2010），採取樣本中位數（Median）作為二元象限之客觀切分基準線（即圖5至圖10中之十字虛線）。其中，橫軸（X軸）代表資產暴露度（年產量，公噸），縱軸（Y軸）則代表由氣候危害天數與生產脆弱度相乘所得之複合威脅強度（ $H \times V$ ）。透過各產區數據相對趨勢分佈特徵，將其精確歸類至四個具備不同管理決策意義之風險象限，藉以避免主觀之劃分，並為後續調適資源之優先配置提供科學化的實證基礎。

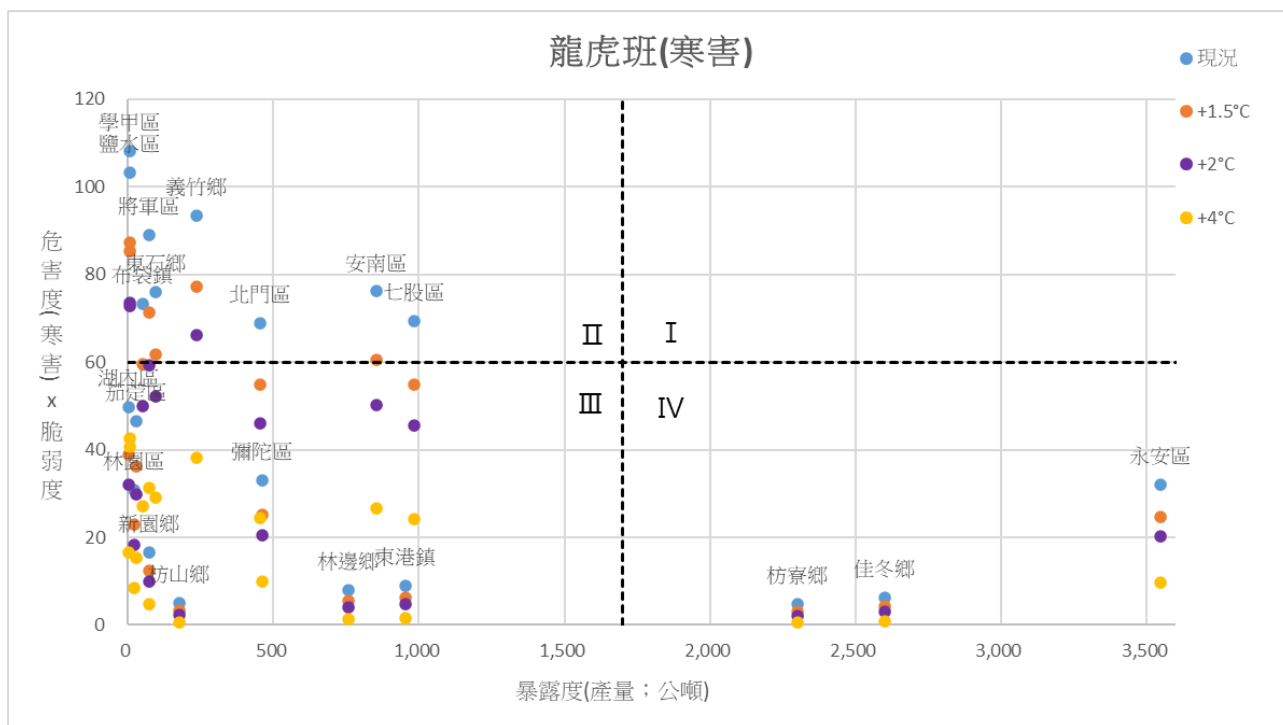
依據上述風險矩陣之劃分結果，位於第一象限（I）之區域，如屏東枋寮、佳冬、高雄永安（圖6龍虎斑熱害，圖8龍膽石斑熱害）與臺南安南（圖9青斑寒害，圖10青斑熱害）等地，在 +4°C 情境下同時展現出極高之資產規模與環境威脅強度，理應作為政府投入重資本調適設施（如 LNG 冷排水公共管網基建或 RAS 循環水系統）的優先策略考量。相較之下，位於第二象限（II）之地區（如嘉義與臺南之低產量鄉鎮），則應側重於智慧化監測、耐熱品種與參數型保險之推廣，以彌補其環境緩衝能力之不足。然而，前瞻性調適策略的實務落實仍受限於多重產業障礙。由於國內石斑魚養殖多屬小規模經營，高昂的初始資本門檻與投資報酬率之失衡，顯著降低了業者投入技術轉型的誘因；此外，漁民對傳統經驗法則的依賴，以及參數型保險理賠標準與養殖現場實際災損間的認知落差，亦導致產業目前多傾向採取短期的應急損害控管，而非系統性的結構優化。

針對寒害動態演變的分析顯示，在現況情境下，嘉義縣義竹鄉及臺南市學甲區、鹽水區等北部產區主要座落於第二象限(II)，為目前防風牆及增溫設備等抗寒資源投入的重點區域（圖5、圖7、圖9）。然而，隨著全球暖化水平推進至 +4°C 情境，氣候資料顯示各產區點位普遍顯著向下位移至第三(III)或第四象限(IV)，反映出冬季低溫危害天數的萎縮。從資源分配效率的角度來看，對於寒害的調適投資可專注在「短期、低成本、具可回收性」的輕量化設施，如臨時性的防風布或擋風屏障，以因應升溫趨勢下傳統防寒工程投資報酬率逐年遞減的實務現狀。

相對而言，熱害危害的動態發展構成未來產業轉型最嚴峻的挑戰。觀察各鄉鎮生產規模與受災敏感性空間分布之熱害趨勢圖，多數鄉鎮在現況至 +2°C 情境下尚處於低風險象限，

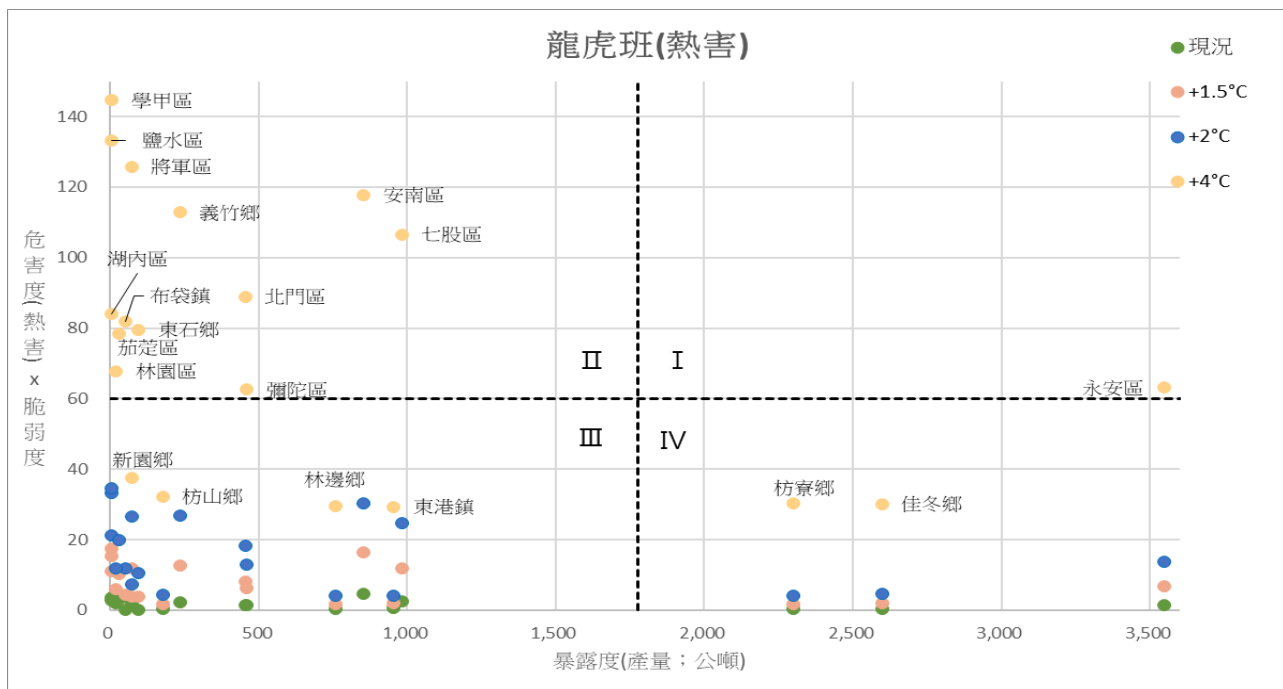
但進入 +4°C 情境後，高溫威脅呈現劇烈拉升之趨勢。其中，高雄市永安區的龍虎斑養殖由第四象限(IV)直接竄升至第一象限(I)，成為全台調適資源分配的重點考量（圖6）。基於單位投資應產生最大規避漁損效益之考量，政府應可優先引導資源投入永安區之 LNG 冷排水公共管線建設。對於如臺南安南區及七股區等快速趨向高風險象限的區域(I、II)，則應可列為後續調適資源投入之區域（圖6、圖8），可選擇重點推廣耐熱魚種選育與智慧水質監測技術，以防範高溫緊迫誘發之二次生理疾病損害。

在物種特性的討論中，青斑展現出特殊的空間分布佈局。臺南安南區在青斑養殖規模上屬於極端離群值，其暴露度遠高於其他區域，且在暖化情境下展現出極高的環境威脅敏感性（圖9、圖10）。考量青斑對溫度的生理緊迫門檻較低，其調適策略應具備高度專屬性。資源應可集中於安南區養殖場域，推行封閉式溫控養殖系統或深度的智慧化預警機制，以確保此一核心養殖場域在極端暖化情境下仍能維持其環境恢復力與生產穩定性。透過風險矩陣之動態轉移分析，本研究指出調適資源之配置應展現高度彈性，以因應氣候風險屬性之轉變：即從現況下對高緯度敏感區之寒害規避，逐步轉化為極端增溫情境下對南部核心產業聚落之高溫衝擊調適，以期達成調適成本與規避損害間之最大化效益。



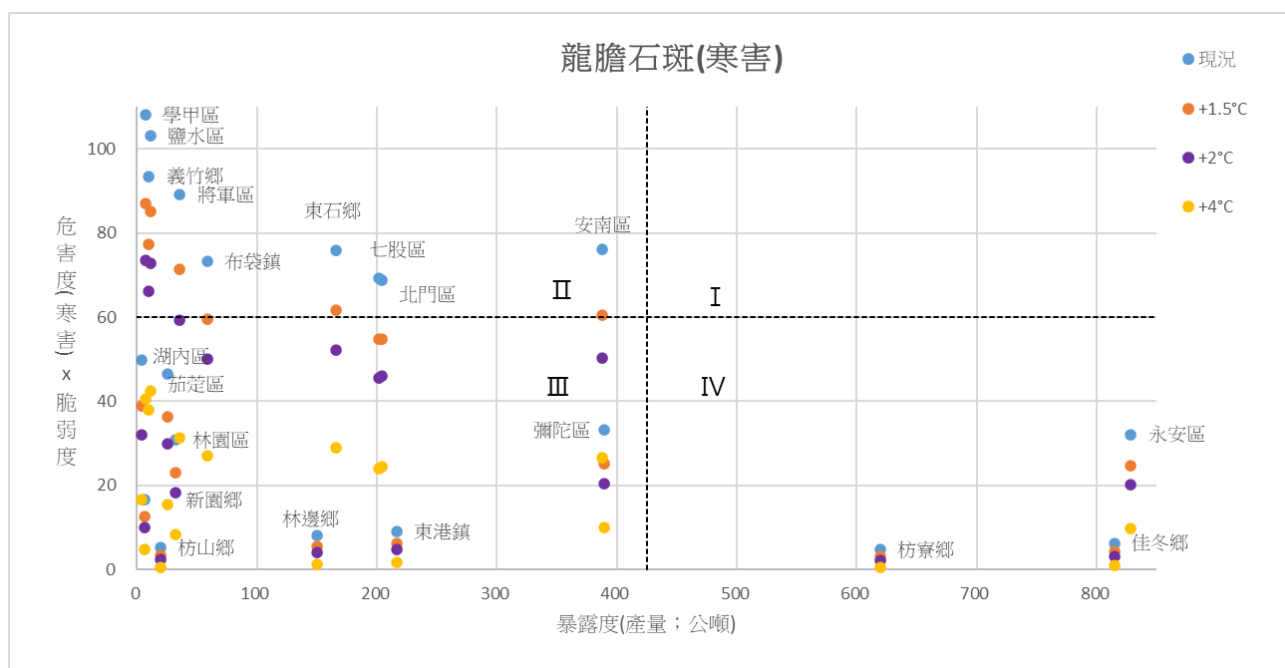
資料來源：本研究自行繪製。

圖 5 龍虎斑寒害



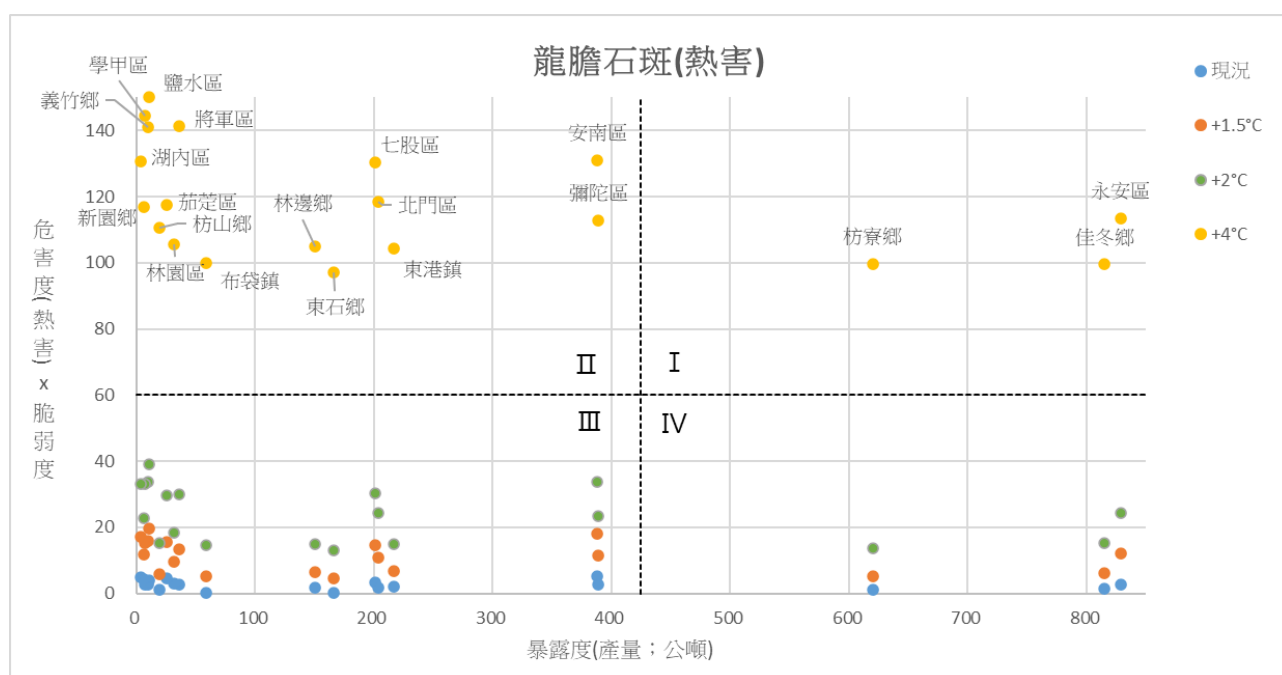
資料來源：本研究自行繪製。

圖 6 龍虎斑熱害



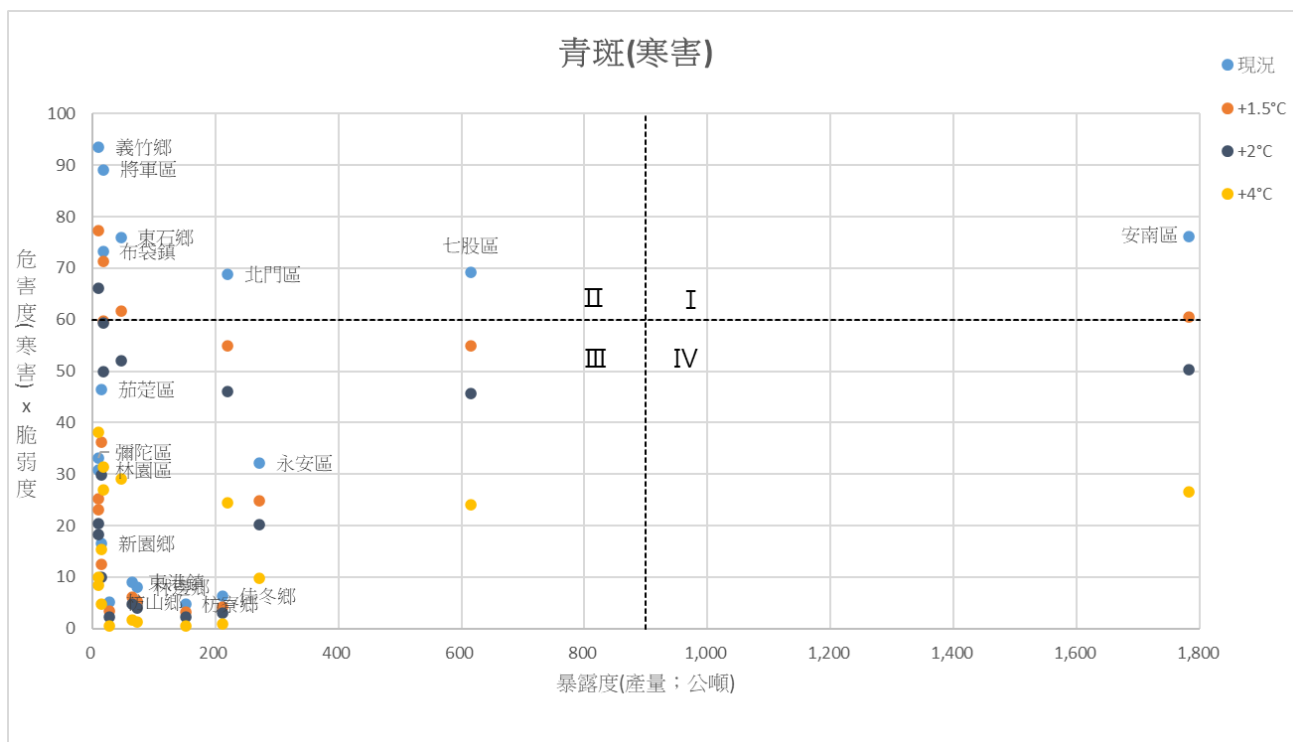
資料來源：本研究自行繪製。

圖 7 龍膽石斑寒害



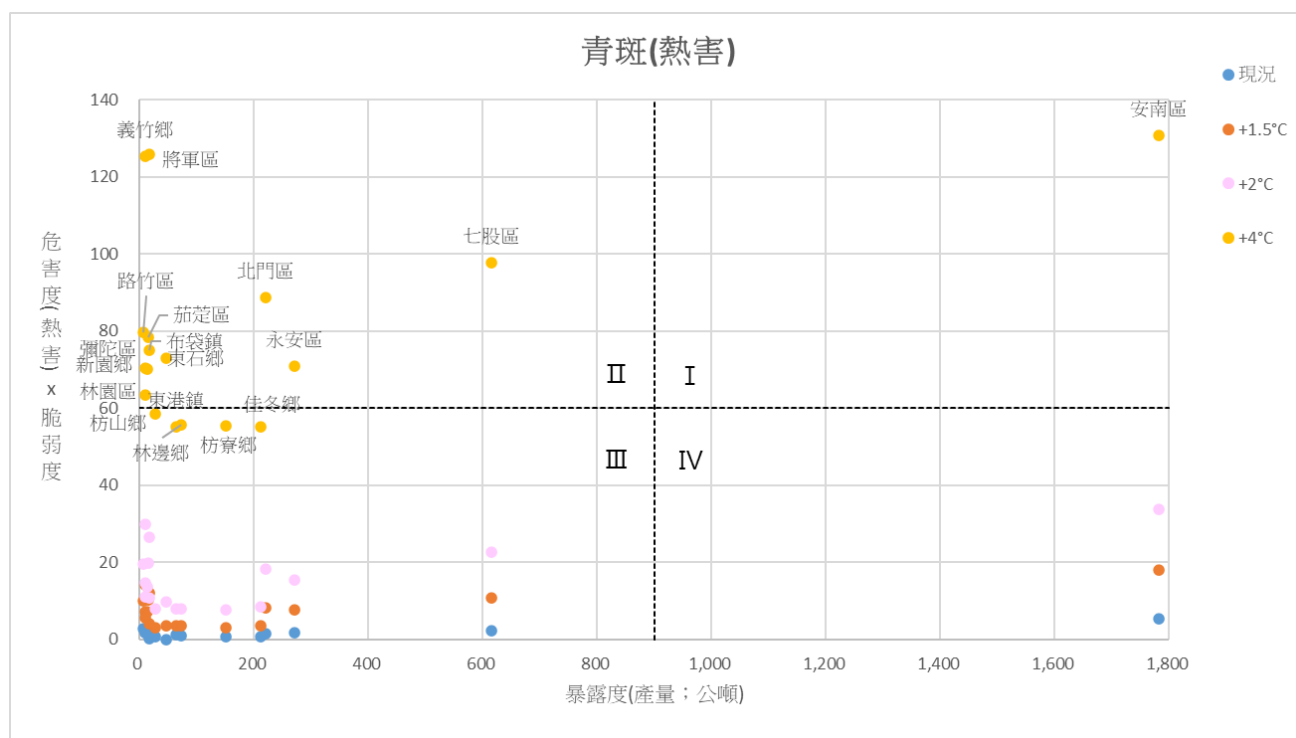
資料來源：本研究自行繪製。

圖 8 龍膽石斑熱害



資料來源：本研究自行繪製。

圖 9 青斑寒害



資料來源：本研究自行繪製。

圖 10 青斑熱害

四、氣候變遷調適障礙與推動困境

針對臺灣石斑魚養殖業在未來情境下所面臨的異質風險，多數的研究建議與現行的實務做法多涵蓋短期技術、中期佈局與長期轉型的階梯式調適路徑。短期策略方面，多強調技術層面的解決方案，包括智慧養殖系統與 IoT 感測網路的布建、日常管理與益生菌的使用，及建議改進飼料配方，加入有效成分（如膽鹼），以增強魚蝦對環境壓力的耐受力。此外，在設施改善上，增加遮光網以緩解夏季熱應力，並建置擋風設施因應突發寒害，亦為降低短期損害的實務作法。

中期的調適主體則應轉向空間資源的最佳化佈置與金融避險機制。漁政單位應利用極端氣候大數據分析各鄉鎮環境之跨期變化，引導業者動態調整放苗時程或將適養區域向具備較佳海洋熱緩衝效應的南端或離島（如澎湖）擴張。此外，積極推廣液化天然氣 (LNG) 冷排水（鑽石水）之多元利用，此種穩定在 22-24°C 的純淨冷能資源不僅能平抑熱浪衝擊，實驗證明還能提升生存率達 15% 並降低電費成本。在分散財務風險方面，政府推廣參數型養殖保險，利用科學化的降水量或溫度臨界值作為理賠標準，為業者提供實質的經濟屏障。

長期而言，產、學、研界長期投入耐熱、耐寒及抗病新品種的育種工作，以擺脫對單一物種龍虎斑的過度依賴。最終目標是推動產業轉向「智慧養殖 2.0」，藉由封閉式循環水養殖系統(RAS) 或全生命週期精準管理，減少養殖環境對外部大氣溫度的高度依賴，從而實現石斑魚產業在極端氣候下的永續經營與高韌性發展。

然而，上述調適策略雖然具備科學上的前瞻性與必要性，但在產業端的推廣成效往往受限於多重現實因素，導致普及率不如預期。首先，資本密集度與投資報酬率的失衡是基層養殖戶最直接的考量。智慧養殖系統與 IoT 感測網路的布建需投入高昂的初始建置成本，對於國內以「小漁經營」為主、平均規模僅 1 至 2 公頃的石斑魚養殖戶而言，財務門檻極高。特別是在近年面臨市場去化緩慢、魚價劇烈波動的背景下，漁民的現金流多用於支應日常飼料與電力支出，缺乏誘因投入長期的技術升級。此外，如 LNG 冷排水（鑽石水）之利用受限於地理位址（主要集中於高雄永安），多數產區（如屏東、臺南）缺乏此類穩定且低價的冷能基礎設施，導致該策略難以產生全國性的外部經濟效益。

其次，石斑魚養殖高度依賴從業者積累的經驗法則，傳統養殖漁民對較具前瞻性的做法，如AI 預警或感測數據的信賴度仍低於個人觀察。這種技術轉換成本不僅是硬體上的更新，更涉及管理者心態上的接受程度。再者，參數型養殖保險雖然能提供經濟屏障，但其理賠標準（基準風險）與現場實際災損之間往往存在落差，例如極端高溫導致可能引發後續的病變，並非保險條款中即時性的直接損害，導致漁民對保險工具的避險效能持保守觀點。

最後，生物技術開發的時間跨度與產業緊迫性存難以同步。耐溫、耐寒品種的選育需歷經多個世代的驗證與穩定性測試，耗時數載甚至十年以上，難以即時回應當前極端天氣事件（如每年夏季熱浪）的威脅。在此空窗期內，漁民傾向於採取最具成本效益的短期應急措施（如單純增加增氧機），而非長期的韌性重構。這種「短期損害控管」與「長期系統轉型」之間的資源錯置，使得石斑魚產業在面對未來情境時，仍處於高敏感性且低適應能力的脆弱狀態。

五、未來研究方向

儘管本研究嘗試建立臺灣石斑魚養殖業在氣候變遷情境下的風險評估框架，然受限於資料可得性與模型複雜度，仍存在若干限制，或可作為未來進階研究之方向。首先為擴充氣候危害之範疇。本研究主要聚焦於氣溫變異引發之熱緊迫與寒害事件，但在實務養殖環境中，極端氣候事件通常具備複合性。未來研究應進一步將颱風、強降雨等危害因子納入評估模型。強降雨不僅會引發魚塭溢流造成直接經濟損失，更會導致水體鹽度（Salinity）在短時間內劇烈波動，進而誘發石斑魚的滲透壓調節壓力與後續病變，這類連鎖型的氣候災害的空間分配與衝擊路徑值得深入探討。

其次，氣象數據與養殖環境之轉換限制。目前風險判別多仰賴廣域氣象站之觀測值，然氣溫與實際養殖水體溫度之間存在物理上的落差。未來研究可透過計量模型或水文動力方程式，建構氣溫至水溫之轉換函數（Transfer Function）。除溫度外，未來可建立更精細的水質監測數據庫，探討氣候指標與水體中溶氧量（DO）、pH 值及氨氮濃度的關聯性。隨著氣候暖化與水溫升高，水體飽和溶氧量下降，若能結合物種生理模型與即時水質參數，將能更精準地界定各養植物種在極端環境下的生存極限與產量風險。

最後，本研究在構建風險分數時，主要係採取基於現有生產結構與成本條件之靜態評估，尚未能完整捕捉產業在面臨氣候衝擊過程中的動態調整行為。具體而言，本研究所推估之風險(分數)指標，係建立在「現況不採取額外調適措施」之基準情境下。從環境經濟學的決策視角觀之，此項估算結果之核心學術意義，在於其定義了現階段產業界為規避氣候風險所願意投入的調適成本上限（對未來漁損金額的預測），而非對未來實際損害的最終預測。此數值反映了在完全不採取應變行為下可能產生的最大期望損害，亦即決策者在進行風險規避投資時的邊際效益基準。然而在真實情境中，養殖業者必然會隨氣候訊號與市場價格之變動，產生內生性的調適反應（如調整放養週期、變更物種或升級防災設施等），進而減緩氣候衝擊帶來的實質損害。因此，本研究之風險分數可被視為一種風險暴露基準(risk exposure baseline)，用以指引資源配置之優先順序。未來研究應可嘗試導入動態賽局或最適化模型，將業者的反饋行為納入產出函數，以期更精確地勾勒出產業在動態調適路徑下的真實經濟韌性。

另外，在調適行為的分析上，未來研究亦可結合行為經濟學，透過實地調查或實驗經濟學方法，探討漁民在面臨不確定風險下的決策機制。例如：漁民對「去化緩慢」引發之滯留風險的認知，如何影響其投入調適設施（如備援電廠或智慧感測器）的意願。將人的行為反應與生物生理脆弱性整合至動態一般均衡模型或空間計量模型中，將有助於產出更具政策執行力的風險管理建議。

伍、總結

研究利用地理資訊系統（GIS）整合氣候推估資料與生物生理耐受性臨界值，系統性地分析了臺灣石斑魚養殖業在不同全球暖化水平下之風險空間分布與結構轉型。研究結果顯示，在現況基線情境下，寒害危害指標具備顯著的緯度梯度，高緯度產區（如嘉義、臺南）受極端低溫威脅之頻率明顯較高。然隨著全球暖化水平由 $+1.5^{\circ}\text{C}$ 向 $+4^{\circ}\text{C}$ 推進，寒害風險因冬季低溫天數之全面萎縮而趨於空間收斂與均質化；取而代之的是極端高溫危害之大幅攀升，特別是臺南與高雄等傳統產區，因地理蓄熱效應導致其受脅程度增幅預期將高於具備海洋熱緩衝效應之屏東地區。

在物種風險評估層面，本研究發現資產暴露度（產量規模）是決定風險分數的主要因子。龍虎斑因其在池產量佔比達 72%，其風險計分在各情境中均居全台首位，反映出產業結構高度集中於單一物種之脆弱性。龍膽石斑則因養成期長達兩年以上，面臨更為複雜之極端事件累積暴露風險。青斑則受限於其生產重心高度集中於冬季氣候較嚴峻之臺南地區，導致其在現況基線情境下呈現顯著之南北風險落差。

在調適策略的推動上，雖然智慧養殖系統、參數型保險與液化天然氣冷排水利用具備科學上的必要性，但實務應用仍受限於基層養殖戶的資本投入能力與技術接受度。國內石斑魚養殖以小規模經營為主，高昂的初始建置成本與投資報酬率失衡，降低了業者投入技術升級的意願。此外，保險理賠標準與養殖現場實際損害的認知落差，以及耐溫品種育種時程較長，皆導致現階段產業在面對極端氣候事件時，多傾向採取短期應急措施而非系統性的結構優化。

就方法論與理論貢獻而言，本研究將生產脆弱度定義為「單位產量之倒數」，成功將養殖系統之環境緩衝能力納入評估模型。所推估之風險計分在本質上可視為一種「基準風險（Baseline Risk）」，其學術意義在於確立了規避氣候損害之邊際效益基準，進而為調適投資設定了經濟合理性之成本上限。透過風險矩陣之跨期分析，本研究具體論證了風險重心之地理位移趨勢，建議調適資源之配置應隨暖化情境之演進，由現況下針對高緯度產區之寒害管理，策略性地轉向南部核心產區之抗熱基礎建設佈署，如液化天然氣（LNG）冷排水之多元利用。

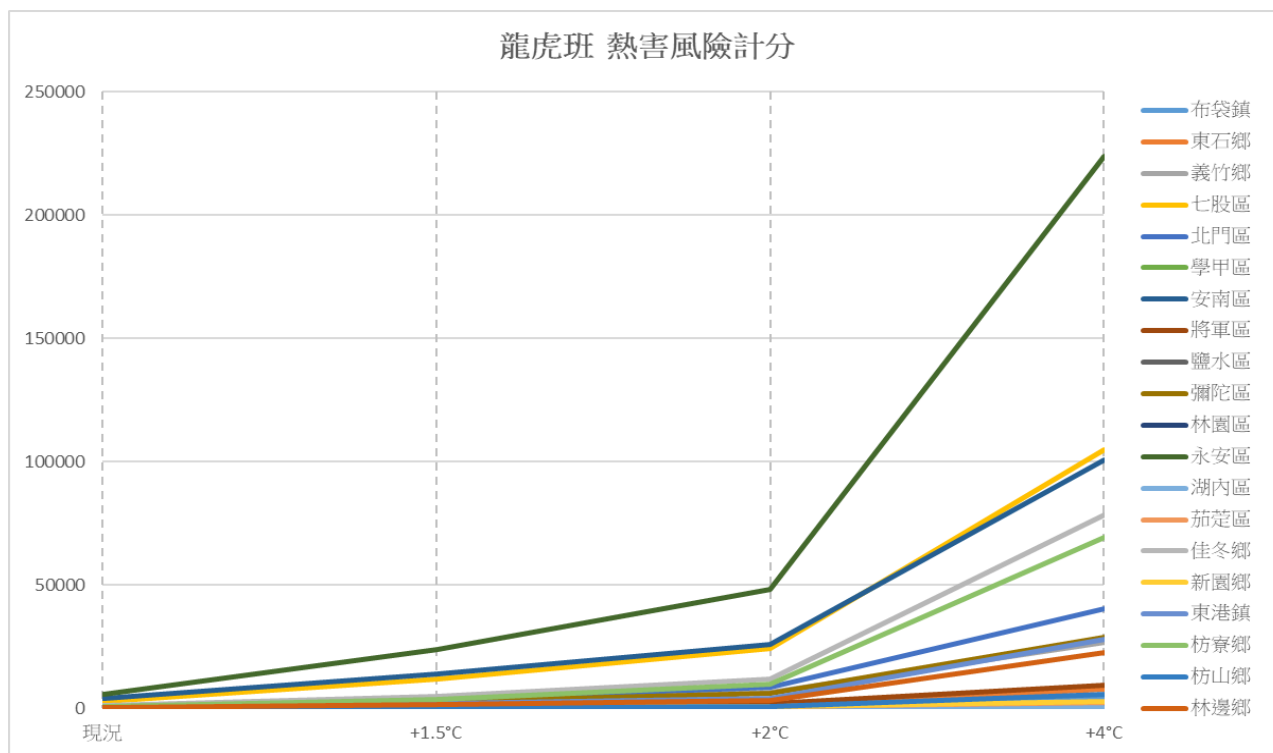
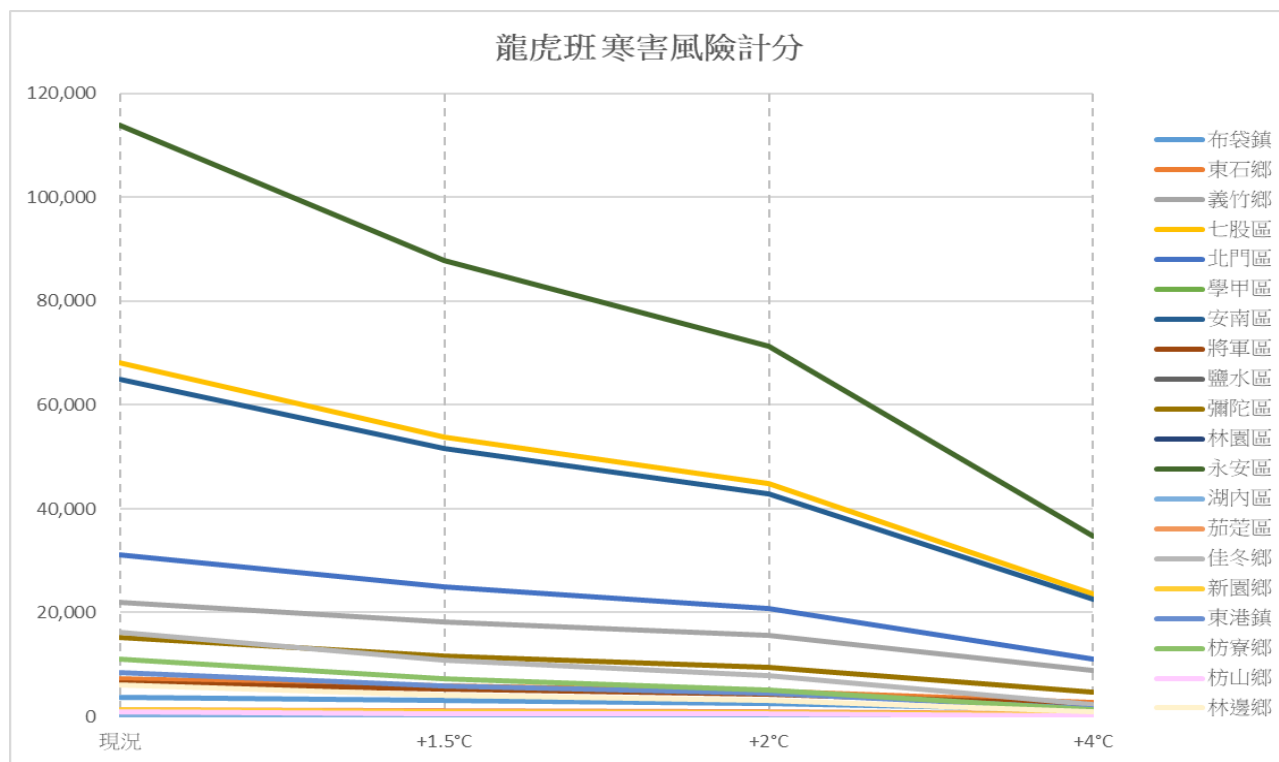
綜上所述，本研究建構之風險評估框架為臺灣石斑魚產業提供了量化的決策參考。未來研究應進一步將強降雨、颱風與鹽度劇烈波動等複合型危害因子納入評估模型，並建立氣溫至實際水溫之轉換函數以提高風險判別之精確度。同時，考量養殖業者在面對風險時的動態調整行為，結合行為經濟學分析漁民的決策機制，將有助於政府制定更具政策效力的氣候變遷調適路徑，以確保石斑魚產業在極端環境下的永續發展。

參考文獻

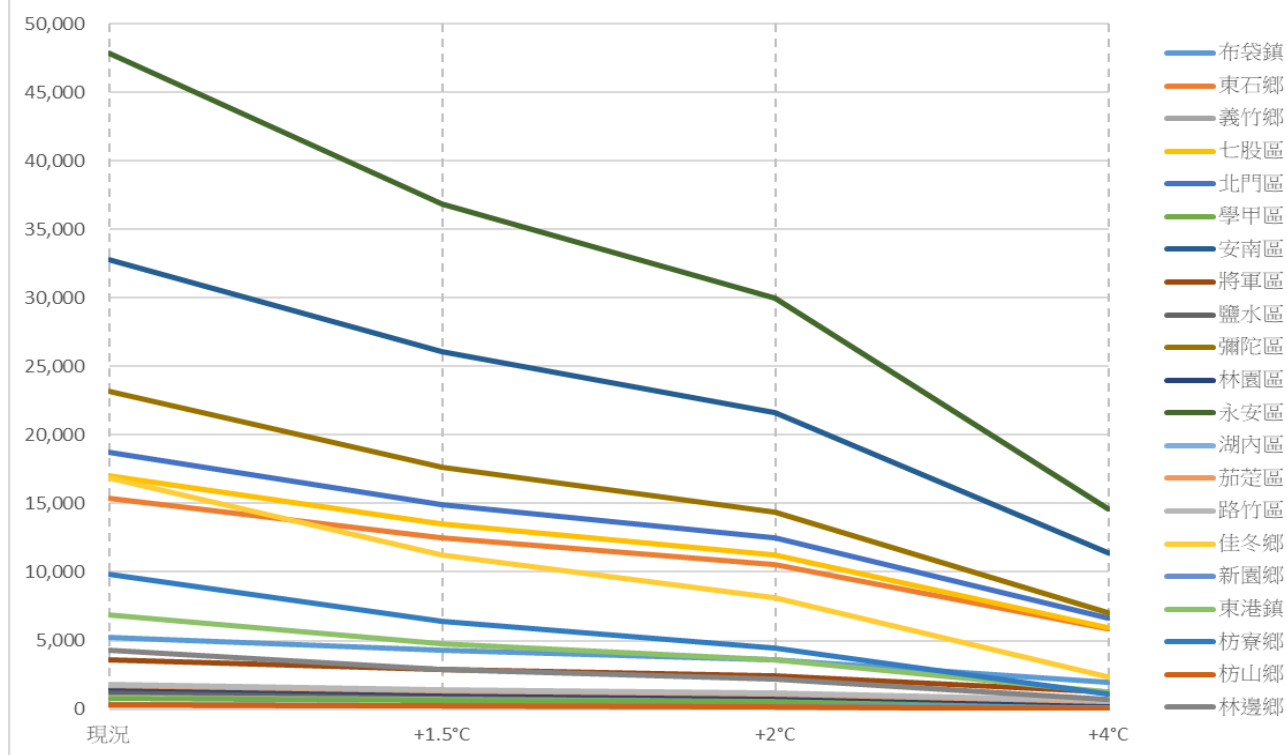
1. 王俊 (2016) , 「水產養殖生態系統方法管理的理論與實踐之研究」, 國立臺灣海洋大學環境生物與漁業科學學系碩士論文。
2. 石永新 (2002) , 「臺灣石斑魚與市場供需之分析」, 國立臺灣海洋大學應用經濟研究所碩士論文。
3. 余祁暉、林彥宏 (2014) , 「從穩定供應安心漁獲出發 - 我國水產養殖業整合發展策略建議」, 臺灣經濟研究月刊, 第37卷, 頁58-64。
4. 吳俊良、陳歐泉 (2018) , 「石斑魚溫度參數型養殖保險規劃及試辦情形」, 農政與農情, 第308期, 頁14-17。
5. 侯清賢、呂學榮、林幸助、潘靖汶、嚴國維 (2015) , 氣候變遷及濕地生態系統變動對周邊漁產之影響, 氣候變遷調適科技整合研究計畫 - 跨領域評估組示範計畫工作報告。
6. 施友元 (2010) , 「國際氣候變遷調適策略經濟評估方法之趨勢與啟示」, 經濟研究, 第11期, 頁291-319。
7. 國家科學及技術委員會、環境部 (2024) , 《國家氣候變遷科學報告2024: 現象、衝擊與調適》。臺北市: 國家科學及技術委員會。
8. 梁世武 (2014) , 「風險認知與核電支持度關聯性之研究: 以福島核能事故後臺灣民眾對核電的認知與態度為例」, 行政暨政策學報, 第58期, 頁45-86。
9. 許晃雄, 王俊寓, 王柳臻, 吳威德, 李欣輯, 李思瑩, 李時雨, 林子平, 林靜君, 侯清賢, 涂柏安, 施意敏, 洪若雅, 洪景山, 紀佳法, 張雅惠, 陳正達, 陳永明, 陳保中, 陳昭安, 陳家琦, 曾品涵, 童裕翔, 黃文亭, 楊曜旭, 劉曉薇, 歐姿辰, 蔡至恒, 盧韻存, 駱世豪, 謝章生, 闕帝旺, 羅資婷 (2024) , 《暖化趨勢下的臺灣極端高溫與衝擊》。國家災害防救科技中心。
10. 許耿銘、何瑄芳 (2020) , 「在氣候風險中, 該如何溝才能通?」, 指南新政電子報雙周刊, 第3期, 頁1-4。
11. 許嘉閔、劉恩良、李彥宏、陳富美、謝易叡 (2021) , 經濟性淡海水魚蝦貝類養殖因應氣候變遷調適 (第2年 / 全程4年) , 行政院農業委員會水產試驗所110年度科技計畫研究報告。
12. 陳永茂、郭加恩 (2019) , 「智能化養殖於石斑魚養殖產業發展策略之應用」, 海大漁推, 第49期, 頁63-74。
13. 陳雅惠、王瓊芯、李俊霖、陳郁蕙 (2018) , 「農業損失空間分析與政策涵義: 以雲嘉南淹水潛勢地區為例」, 調查研究 - 方法與應用, 第41期, 頁7-55。

14. 童慶斌、李培芬、林幸助、李明旭、盧虎生、蘇慧貞、張靜貞、詹士樑、許泰文、李河清 (2017) , 臺灣氣候變遷科學報告, 國家災害防救科技中心。
15. 漁業署 (2021) , 漁業統計年報, 行政院農業委員會漁業署。
16. 鄭安倉、楊宗諭、莊翔傑 (2023) , 「我國養殖石斑魚產銷變動及國際市場分析」, 農業保險半年刊, 112年第四期, 頁130-138。
17. 繆峽 (2010) , 因應氣候變遷漁業調適政策討論彙編專刊, 行政院農業委員會漁業署, 頁44-52。
18. 謝易叡、陳富美、楊明樺、林承澤、李彥宏、劉恩良 (2022) , 經濟性淡海水魚介類養殖因應氣候變遷調適 (III) (第3年 / 全程4年) , 行政院農業委員會水產試驗所111年度科技計畫研究報告。
19. Duijm, N. J. (2015). Recommendations on the use and design of risk matrices. *Safety Science*, 76, 21-31.
20. Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2024). The State of World Fisheries and Aquaculture 2024: Blue Transformation in action. <https://doi.org/10.4060/cd0683en>
21. Ni, H., Chen, A., & Chen, N. (2010). Some extensions on risk matrix approach. *Safety Science*, 48(10), 1269-1278.

附錄



龍膽石斑 寒害風險計分



龍膽石斑 熱害風險計分

