

AI 情報代理人支持生態探究學習之系統設計與規劃

System Design and Planning for AI Agent-Supported Ecological Inquiry Learning

林長信

臺灣嘉義大學數位學習設計與管理學系暨研究所

* changhsinlin1206@mail.ncyu.edu.tw

【摘要】 在全球氣候變遷與人為開發的壓力下，落實聯合國永續發展目標（SDGs）第 15 項「陸域生態」顯得格外重要。然而，當前環境教育多偏重靜態知識的記憶與物種辨識，難以支持學生進行深層的科學探究。本研究旨在探討 AI 情報代理人支持生態探究學習之研究設計與規劃，聚焦於開發「福爾摩沙蝶影」 Web-based 沉浸式探究遊戲，整合 360° 虛擬棲地與政府開放資料，並導入 AI 對話系統作為基礎鷹架。本研究採準實驗設計，結合探究式學習架構與多模態學習分析，除了學習成效外更聚焦於系統性蒐集學生在低衝突情境下的觀察行為、初階判斷模式與資訊解碼軌跡，藉此建立探究認知歷程之實證基準，為後續智慧型探究教學與鷹架介入提供理論與數據基礎。

【關鍵字】 探究式學習；AI 情報代理人；多模態學習分析；沉浸式探究遊戲；生態環境教育

Abstract: Amid the escalating challenges posed by global climate change and human development, advancing the United Nations Sustainable Development Goal (SDG) 15, Life on Land, has become increasingly critical. However, environmental education has often focused on the memorization of static knowledge and species identification, offering limited support for students' engagement in deeper forms of scientific inquiry. This study presents the research design and planning of an AI-based agent-supported ecological inquiry learning approach, centering on the development of Formosa Butterfly Shadow, a web-based immersive inquiry game. The proposed system integrates 360-degree virtual habitats, government open data, and an AI-powered conversational system as a foundational scaffolding mechanism. A quasi-experimental design is adopted, combining an inquiry-based learning framework with multimodal learning analytics. Beyond examining learning outcomes, the study particularly emphasizes the systematic collection of students' observational behaviors, initial judgment patterns, and information-decoding trajectories in low-conflict inquiry contexts. By doing so, this research seeks to establish an empirical baseline for understanding learners' cognitive processes in ecological inquiry and to provide both theoretical and data-driven foundations for the future development of intelligent inquiry instruction and adaptive scaffolding interventions.

Keywords: Inquiry-based learning; AI-based agent; multimodal learning analytics; immersive inquiry game; ecological and environmental education

1. 研究背景與動機

1.1 氣候變遷下的生態警訊與聯合國永續發展目標 (SDGs) 之落實

近幾十年來，台灣的蝴蝶正一點一滴地離開我們的視野。這種消失並非一夕之間發生，而是逐年減少，曾經在校園角落或田埂邊輕易可見的身影，如今卻需要刻意尋找。這些變化鮮少被立即察覺，卻真實地累積在每一次棲地被切割、道路延伸以及氣候節律失序的過程中。蝴蝶對於環境變遷的反應往往比人類更為敏銳，當牠們開始無法完成遷徙或無法順利繁殖時，所反映的正是我們所熟悉的生活空間正在悄悄改變。在這樣的時代背景下，聯合國於 2015 年

通過的「2030 永續發展議程」及其 17 項永續發展目標 (SDGs) 不再只是遙遠的政策框架。其中, SDG 15「陸域生態 (Life on Land)」明確呼籲全球行動者應致力於保護、恢復並促進陸域生態系統的永續利用, 並將遏止生物多樣性喪失視為維繫地球的關鍵任務。台灣這座被譽為「福爾摩沙」的島嶼, 因其獨特的地形與氣候孕育出豐富的生命樣貌, 蝴蝶更是這片土地最醒目的象徵之一。然而, 蝴蝶與人類生活空間的高度重疊, 使牠們既親近又脆弱; 牠們數量的銳減不只是一項生態警訊, 更深刻提醒著我們: 人類每一個看似微小的開發選擇, 終究會在自然環境中留下難以抹滅的痕跡。因此, 如何將 SDG 15 的精神落實於教育實踐中, 幫助學生建立對環境議題的批判性思考與社會責任感, 已成為當前科學與環境教育的迫切任務。

1.2 台灣紫斑蝶的越冬奇觀與社會性科學議題 (Socio-scientific Issues, SSI) 衝突

在眾多蝴蝶之中, 台灣紫斑蝶的生命歷程尤具全球性的生態與教育指標意義。從生物地理學的觀點來看, 蝴蝶的大規模遷徙與越冬行為極為罕見, 全球目前僅存兩大「越冬型蝴蝶」景觀: 其一為被列為世界自然遺產的北美墨西哥帝王斑蝶谷, 其二即為台灣南部大武山腳下的「紫蝶幽谷」。紫斑蝶展現出高度適應性的生命策略, 順著季風南下至暖谷越冬, 並於初春北返產卵, 形成跨越季節與世代的遷徙循環。此外, 紫斑蝶翅膀背面具有隨光線角度改變而呈現的「幻色」物理結構 (結構色), 因此被生態界譽為「移動的寶石」。然而, 這項世界級的生態景觀正面臨前所未有的存續危機。棲地遭開發為停車場與住宅導致寄主植物流失, 氣候異常造成河川缺水威脅其生存, 而最嚴峻的衝擊則來自北返蝶道與現代交通網絡-國道三號林內段的垂直交會, 高速行駛車輛產生的氣流對薄弱的蝶翅構成致命威脅。雖然高公局推動了「國道讓蝶道」政策, 使死亡率由 3% 顯著下降至 0.148%, 但整體族群數量的長期衰減, 仍凸顯出這是一個涉及開發與保育衝突、具備高度不確定性的社會性科學議題 (Socio-scientific Issues, SSI)。紫斑蝶的生死並非自然獨立運作的結果, 而是人類行動在空間與時間尺度上累積而成的後果。

1.3 當前科學教育與探究實務之痛點

儘管台灣 108 課綱在自然科學領域強烈標舉「探究與實作」及「跨科整合」的精神, 但在實際的蝴蝶環境教育現場, 仍面臨顯著的結構性挑戰。長期以來, 國中小學的蝴蝶教育多半停留在靜態的物種辨識與生命史介紹層次。學生能夠輕易背誦蝴蝶的變態過程, 卻難以理解蝴蝶真正面對的環境壓力, 更難將零散的觀察經驗連結到土地使用、交通建設與氣候變遷等人類決策上。生態議題本質上具備高度的時空複雜性, 傳統課堂在有限時間與空間內, 極難支持學生進行長期、連續且具脈絡的探究歷程, 導致學習容易流於無目的的操作與淺層的記憶。在應對如「國道讓蝶」這類社會性科學議題 (SSI) 時, 考驗的是學生的多視角理解與證據導向論證能力。然而, 在數位學習工具大量導入的當下, 教師往往面臨極高的教學負荷: 既要操作數位系統, 又要同時監控全班數十位學生的學習歷程。由於缺乏即時的鷹架支持與深層論證引導, 學生經常在資訊解碼與關鍵判斷節點出現思考停滯; 若無系統化的自動化支援與視覺化分析, 科技不僅無法促進深層探究, 反而可能成為教師與學生新的認知負擔。

基於上述背景與痛點, 本研究跳脫傳統以單向知識傳遞為主的教育軟體框架, 提出「福爾摩沙蝶影」虛實整合探究系統體驗。系統命名蘊含深意: 「蝶影」與諧音「碟影」的設計, 刻意讓學生不直接輕易「看到蝴蝶」, 而是必須透過環境變數、族群密度變化與人為干擾等間接線索, 在地圖與棲地中追尋生命留下的痕跡。這種以痕跡推理生命狀態的方式, 高度貼近真實生態研究的工作邏輯。為突破傳統探究教學在時間、空間與教師引導量能上的限制, 本研究第一年度的核心動機, 在於建構一個能完整記錄並觀測「學習如何發生」的認知基準場域。將結合 360° 高解析虛擬棲地與政府開放資料 (TaiBIF、TaiCOL), 建置沉浸式探究

遊戲系統。同時，有別於將 AI 視為單純給予標準答案的工具，本研究將引入「AI 情報代理人」作為探究歷程的智慧鷹架。在學習的過程中，AI 將透過對話系統輔助學生釐清觀察焦點與建立初階因果關聯。此外，本研究將導入多模態學習分析 (Multimodal Learning Analytics, MMLA)，透過系統底層完整記錄學生的數位操作足跡、觀察注意力分布與任務決策軌跡。系統性地描繪出學生在沉浸式探究情境中進行「生態資訊解碼」的基礎認知歷程。我們期望透過此一設計，讓環境教育不再只是生硬的價值宣示，而是讓學生在可推論的空間脈絡中，看見並承擔每一個生態選擇的重量。

2. 文獻探討

2.1 17 項全球永續發展指標 (SDGs) 在環境教育、科學教育的重要性

聯合國 2015 年通過的「2030 永續發展議程」明訂了 17 項全球永續發展指標 (SDGs)，強調在追求經濟與就業穩定增長的同時，必須重視自然資源的永續維繫。該議程呼籲各國對空氣、河流、湖泊及土地等關鍵自然資源進行更具責任感的消費與生產轉型，旨在為後代子孫創建一個資源共享且環境永續的共榮世界 (Globalgoals, 2025)。其中第 15 項指標「保育陸域生態 (Life on Land)」即明確要求全球行動者應致力於保護、恢復並促進陸域生態系統的永續利用。該目標不僅聚焦於森林與土地資源的維護，更將遏止生物多樣性喪失視為維繫地球的關鍵任務。在追求經濟增長與社會包容的同時，人類必須建立起與土地、河流及生物棲地共生的永續模式，確保從空氣到土壤等自然資源皆能獲得妥善保護 (Salvati et al., 2025)。

而教育被廣泛認為是實現永續發展的最重要工具之一，能夠提升人們對永續發展的知識與意識，並促進行為改變以應對人類面臨的永續性挑戰，不僅提升個體對生態系統及其相互關聯的理解，還能促進對永續發展議題的批判性思考與付諸行動 (Xiao, Duritan & Jia, 2024)。在這之中，環境教育是一個學習過程，讓個人獲得對環境的認識，並習得知識、技能、價值觀和經驗，進而能夠個人或集體地採取行動來解決環境問題 (Zareie & Jafari Navimipour, 2016)。其領域的多元性、延展性不僅拓展到跨學科學習，結合科學教育、社會科學與人文學科，並適用於不同年齡層與正式、非正式的教育場域 (Damoah, Khalo & Adu, 2024)。環境教育強調情境性，即根據在地文化、知識脈絡、經驗傳承、價值觀和實踐，讓學習者能夠與該地環境產生連結；也強調行動導向，即培養學習者採取實際行動來改善環境品質；更致力於培養社會責任感，使個人和群體意識到自己對環境保護的責任 (Ardoin, Bowers & Gaillard, 2020)。現代科學教育已將永續發展與環境教育納入課程，從小學到高等教育皆涵蓋如再生能源、氣候變遷、生態保育等永續議題，目的是培養學生的知識、技能、態度與價值觀，塑造更具永續意識的未來公民 (Abdurrahman et al., 2023; Lin, Yang & Lin, 2024)。科學教育透過強調生態系統、物質循環、土地資源管理等內容，幫助學生理解人類活動對陸域生態的影響，並培養其保護自然資源的責任感 (Lin, Yang & Lin, 2024; Salvati et al., 2025)。

2.2 AI 導向式鷹架的學習支持

鷹架理論 (Scaffolding Theory) 是一種教學策略，教練、專家或教師透過有結構的互動、討論、反思、實作等方式，協助學習者建構知識、後設認知並獲得能力，最終達到自主學習的目標 (Chen, Chang & Lin, 2021)。在教學實務與學習理論中，鷹架理論的核心精神在於「提供有目的且可調整的學習支持」 (Hou, Fang, & Tang, 2023)。研究指出，鷹架並非固定或長期的介入，而是一種具備臨時性的教學協助，由教師、同儕或其他具經驗者提供，協助學習者完成原本無法獨立完成的任務 (Bordonaro & Richardson, 2004)。此概念源自 Vygotsky 的社會文

化理論，特別是近側發展區(Zone of Proximal Development, ZPD)，強調學習者在適當協助下，能夠達成超越其現有能力水準的學習表現。在此歷程中，鷹架的功能並非取代學習者思考，而是暫時補足其認知落差，協助其逐步建構理解與能力。隨著學習者知識與技能的提升，鷹架支持亦需進行逐步撤除(fading)，使學習者能逐漸轉向自主完成任務，這被視為鷹架理論中促進獨立學習的關鍵機制(Gillespie & Hald, 2017)。此外，不少研究強調 鷹架並非線性遞減，而是一種高度動態的調整歷程，教師需根據學習者的理解程度與表現狀況，適時 增加或減少支持強度，在失敗時提供引導，在成功時降低介入，以維持適當挑戰並促進深層學習(Covington, Kyle & Moseley, 2025)。此類支持亦可涵蓋多個層面，包括認知、情感與後設認知鷹架，並透過提問、回饋、示範、語言提示等多元方式實現(Hou, Fang, & Tang, 2023; Li, 2025)。綜合上述論點，過去研究應用鷹架理論提供了一個重要的教學設計視角，使學習支持能隨學習 歷程動態調整，並逐步引導學習者展現自主與高品質的學習表現。探究式學習強調學習者在真實、擬真的情境中，模擬科學家的思考歷程，進行問題設定、議題假 設、證據推導與結論建構的一連串的探究。然而，研究指出，科學探究任務本身具有高度的認知複雜度，學習者若缺乏適當引導，往往難以有效掌握探究流程與策略(Mamun et al., 2020; Wang & Wang, 2023)。因此，鷹架被視為支撐探究式學習的重要教學機制，能透過程序性、元認知與社會性支持，協助學生逐步建構探究技能與科學理解(Prayogi et al., 2025)。在科學教育情境中，鷹架不僅被用來協助學生理解科學知識概念，更被視為促進科學素養與高層次認知思考的重要工具。研究顯示，透過引導性提問、概念比較與外部表徵的學習支持，鷹架能幫助學生建立概念框架，深化對科學原理與關係的理解，並提升其批判性思考、科學素養、科學論證能力(Maksić & Jošić, 2021)。隨著數位學習環境的普及，科學教育中的鷹架亦逐漸延伸至虛擬與數位探究情 境，透過結構化流程與即時回饋，支持學生反思與知識建構(Mamun et al., 2020)。遊戲式學習透過任務、規則與體驗情境設計，提升學習動機與參與度，但研究亦指出，若缺乏明確的教學引導，遊戲活動可能流於娛樂而難以促進深層學習(Hwang, Yang & Wang, 2013)。因此，鷹架在遊戲式學習中扮演關鍵的角色，透過教師或遊戲系統所提供的知識概念或是情感支持的鷹架引導，協助學習者將遊戲經驗轉化為學科理解與問題解決能力(Sun et al., 2023)。相關研究顯示，適當的數位鷹架設計能有效提升學生的知識建構、創造力與問題解決表現，但亦需審慎平衡學習 支持與遊戲樂趣，以避免過度干預(Kacmaz & Dubé, 2025)。

綜合上述研究可知，鷹架被視為支撐學習者由淺入深科學探究與高層次認知思考的關鍵策略。當 學習情境逐漸走向複雜、動態與高互動時，傳統鷹架的即時性與可擴展性逐漸受到限制，而近年人工 智慧的迅速發展又進一步擴展了鷹架的可能性，AI 導向式鷹架因而成為近年科學教育研究的重要發 展方向。相較於傳統由教師、或是系統單向提供的認知或情感上的學習支持，AI 導向式鷹架能根據學習者表現提供即時、個人化且可調整的回饋，促進自我調節、批判性思考與跨領域知識建構(Avci et al., 2025)。在遊戲式學習情境中，AI 驅動的自適應、動態調整鷹架能避免學習者流於無目的探索，協助其將遊戲經驗轉化為學科理解與問題解決能力(Sun et al., 2023)；在科學 STEM、語言教育中，AI 導向式的鷹架設計也被證實能支持科學論證、形成性評量與合作學習，補足教師在執課過程中難以即時回應多位個別學生學習差異的限制(Avci et al., 2025)。然而，相關研究也指出，AI 鷹架的執行成效高度仰賴其設計是否對準學習目標與提供時機，過度或不當的介入反而可能干擾學習與遊戲體驗，或導致學生過度依賴(Kacmaz & Dubé, 2025)。因此，當前科學教育亟需發展以明確教學理論為依據、可依學習歷程動態調整，並能被系統性分析與評估的 AI 導向式鷹架設計，以支撐學習者在遊戲式與探究導向的學習環境中，從表層參與邁向可被分析與證據化的科學觀察、論證、決策歷程以及科學素養的建立。

3. 研究設計

本研究預計採用準實驗研究設計（Quasi-experimental Design），以台灣南部的國民小學作為主要之教學實驗與推廣場域。研究對象將區分為實驗組與對照組：實驗組學生將於正式課堂情境中，使用本計畫開發之「福爾摩沙蝶影」沉浸式探究遊戲系統進行學習；對照組學生則維持傳統的多媒體講述與靜態生態教學。在研究評量工具的設計上，本計畫依循「探究認知歷程可觀測性」原則。除了實施前、後測預計各 20 分鐘的學習成效測驗之外以評量學生在基礎生態理解與初階科學論證表現的量化差異外，研究重心更著重於學生歷程性資料的蒐集。研究假設（H1）為：在沉浸式探究遊戲情境中，導入 AI 對話系統之學習環境，相較於未具備 AI 引導的傳統教學，學生將展現較清晰之生態資訊理解結構與初階判斷依據，且其認知歷程特徵能透過系統底層的多模態學習資料加以明確辨識。

本研究跳脫傳統以「學習成效比較」為單一目標的框架，將核心聚焦於「探究歷程的動態演變」。為精確描繪學生在高度不確定性之生態議題中，如何進行資訊解碼與科學判斷，本研究除了比較成效的差異外，其設計著重於「沉浸式探究遊戲情境建構」與「探究認知歷程基準建立」，並結合多模態學習分析技術，作為後續驗證 AI 鷹架介入成效的實證基礎。

4. 系統設計

為了讓探究行為具備一致且可比較的歷程基準，本計畫預計建置「福爾摩沙蝶影」系統，該系統不僅是教學載具，更是精密的「歷程研究工具」。系統底層採用 React/Next.js 架構進行開發，以 Web-based 跨平台網頁遊戲的形式呈現，具備離線預取功能，有效降低教學現場在載具與系統相容性上的硬體門檻，確保推廣的實務可行性。

在情境建構上，系統深度整合了虛實技術與政府公開資料。首先，團隊與專業影像製作公司合作，針對紫斑蝶的關鍵棲地與微距生態特徵，進行高品質的 360° 全景影像與動態素材採集，突破傳統戶外教學受限於天候、季節與空間距離的痛點。其次，系統直接串接國家級的「臺灣生物多樣性資訊機構（TaiBIF）」與「臺灣物種名錄（TaiCOL）」等政府開放資料庫，由研究團隊進行科學文本轉譯，將這些權威的學術數據轉化為遊戲中的「生態檔案」與「觀察線索」。透過此種虛實整合的設計，學生在系統中進行的除了是遊戲的解謎外，更可以基於真實生態數據進行科學鑑定與推論。

在 AI 技術的初步導入方面，系統預計建置基於 Google Gemini 之後端橋接引擎，作為基礎型 AI 對話與提示介面。在本研究設定中，AI 的角色定位為「探究操作與概念理解之輔助工具」，主要提供固定規則之觀察提示、名詞澄清與操作引導，支持學生順利推進探究任務。此階段的 AI 介入刻意維持在「低衝突、具體線索」的引導層次，旨在建立學生資訊解碼的基礎認知基準，為後續導入高衝突的「檢索增強生成情報代理人」預留比較空間。

5. 教學設計

本研究之教學設計旨在將抽象的生態知識與 5E+S（參與、探索、解釋、精緻化、評價＋永續行動）探究學習架構，轉化為具備邏輯連貫性且可獨立實施的數位探究微任務。有別於市面上的商業養成遊戲多偏重物種收集，本計畫之設計核心在於建構一個能結構化引發學生「比對—推論—修正」的認知學習歷程。

（一）虛實整合之遊戲世界觀與任務機制

為了讓學生在高不確定性的生態情境中產生探究動機，本系統刻意設計了「時空修復」的遊戲世界觀。遊戲敘事設定在氣候劇烈變遷的未來，政府的「福爾摩沙生態調查資料庫

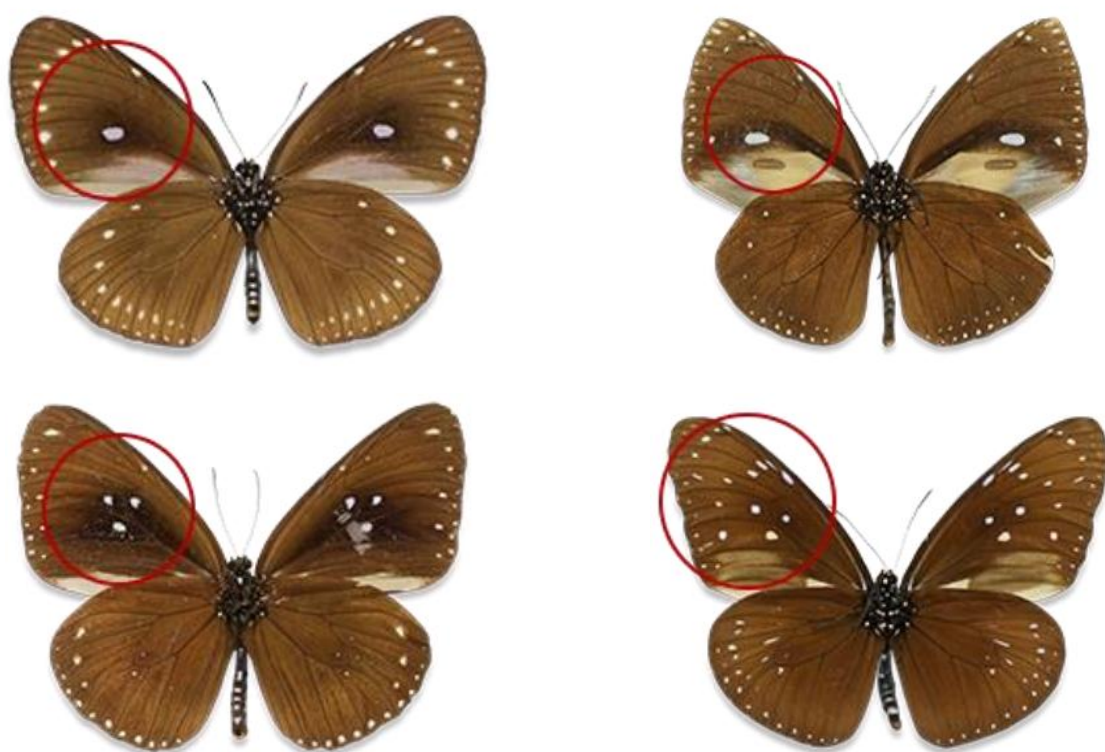
（基於真實的 TaiCOL 與 TaiBIF 開放資料）」因環境破壞而出現數據遺失與錯亂。玩家将扮演「時空修復員（生態資料調查者）」，其核心任務在於解決「歷史檔案數據」與「現實棲地觀察」之間的衝突。

當系統偵測到學生在比對政府開放資料與 360° 虛擬棲地影像時，發現物種特徵、分布或數量上的不一致，便會觸發探究任務。此種「資料衝突」的起點設計，迫使學生必須透過數位鑑定、環境因子分析與科學論證，將正確的生態資訊對齊並歸檔，從而將死板的標本與文字資訊，巧妙轉化為解謎的關鍵線索。這套系統被拆解為五個每次約 15-20 分鐘的「微任務」，重點在於建立學生在低衝突情境下的觀察、推論與決策認知基準。

（二）五大核心微任務之科學設定與認知基準

任務一：【標本鑑定偵探】（物種特徵解碼與鑑定判斷） 本任務聚焦於生物形態學的初步探究，引導學生從感官觀察進入科學鑑定。在 360° 沉浸式虛擬棲地中，紫斑蝶因群聚與快速飛行的習性，初學者往往難以僅憑肉眼區分。系統提供了數位放大鏡與視角調整功能，並導入學術界廣泛使用的四種紫斑蝶辨識口訣如下圖 1 所示：「小紫點一邊、圓翅點兩邊、斯氏有三點、端紫亂亂點」。學生必須觀察紫斑蝶前翅腹面中室的白點數量與排列特徵來進行物種配對。此外，任務亦融入了「物理結構色（幻色）」的進階科學概念。學生可透過系統模擬光源調整，觀察到紫斑蝶翅膀背面的藍紫色光澤並非來自色素，而是多層鱗片對光線產生干涉與衍射的物理現象。

圖 1、小紫點一邊(左上)、圓翅點兩邊(右上)、斯氏有三點(左下)、端紫亂亂點(右下)



任務二：【生命密碼還原】（生命週期與生存策略之推論） 本任務引導學生將具象的觀察轉化為對生物演化意義的理解。學生需在棲地中搜尋紫斑蝶的卵、幼蟲與蛹，並推論其對應的生存策略。例如，幼蟲透過攝取夾竹桃科的盤龍木或羊角藤等食草植物，將毒素累積於體內，形成帶有警告意味的「警戒色」（化學防禦）。而到了蛹期，則演化出宛如黃金般

閃耀的「金屬結構色」，利用鏡面反射周圍環境的光線，達成隱蔽偽裝的效果（物理防禦）。

任務三：【氣候監測預警】（群體行為與因果推論預測） 本任務聚焦於蝴蝶群體行為與氣溫、風向、濕度等微氣候環境因子的交互作用。紫斑蝶在茂林越冬期間會展現出令人驚嘆的生態奇觀，系統將要求學生依據氣候數據進行因果推論。例如，當清晨或久旱後，學生需推論出蝴蝶會形成「蝶毯」停棲於濕潤泥地(如圖 2)，以展開翅膀吸收地表輻射熱並補充水分與鈉離子等礦物質。而當氣溫驟降至 15°C 以下，學生必須預測蝶群將退縮至避風峽谷深處，形成層層疊疊的「蝶瀑」(如圖 3)，透過高密度群聚減少表面積散熱，維持微環境的溫度以防失溫。

任務四：【蝶道地圖測繪】（空間推理與遷徙連結建模） 本任務將探究視角拉升至景觀生態學中的「空間分佈與棲地連結」。紫斑蝶的遷徙是跨越地理屏障的生命壯遊，系統整合了 TaiBIF 與 GBIF 等開放資料中的經緯度觀測點，要求學生從零散的點位資料中，推論並重建兩大遷徙路徑（蝶道）。學生需在地圖上測繪出：(1) 西部蝶道：由茂林出發，途經曾文水庫、林內、八卦山、大肚山，一路向北延伸至苗栗竹南的「蝴蝶高速公路」；(2) 東部蝶道：由台東大武溪谷起程，沿海岸線北返至立霧溪口、甚至抵達新北龍洞的東岸廊道。同時，理解日週性活動中，蝶群外出覓食所形成的「蝶河」現象（如圖 4）。

任務五：【永續決策會議】（社會性科學議題之論證與權衡） 作為整體探究遊戲的最終關卡，本任務將科學探究延伸至 5E+S 中的「社會實踐與永續行動」。學生將扮演「永續決策官」，面對紫斑蝶北返高峰期與國道三號林內段車流交會所引發的「路殺風險」。系統將提供歷史致死率資料（例如高公局推動「國道讓蝶」政策後，死亡率由 3% 降至 0.148% 的數據），以及即時遷徙模擬。學生必須在交通效率、生態保育與社會成本之間進行價值權衡，並嚴格運用 CER（主張 Claim、證據 Evidence、推理 Reasoning）的科學論證模式，提出具備實證基礎的政策決策方案，如目前政府策略性的啟動封道、架設防護網等措施。

圖 2、蝶毯示意圖



圖 3、蝶瀑示意圖

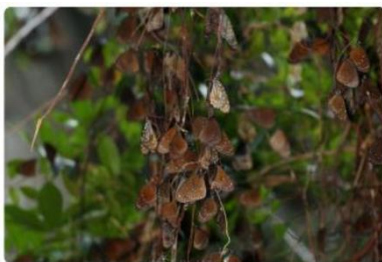


圖 4、蝶河示意圖



6. 預期結果

本研究跳脫傳統數位學習僅作為單向知識傳遞工具之框架，透過建置「福爾摩沙蝶影」沉浸式探究遊戲系統。在學術研究層面，過去科學教育研究多仰賴單一時間點的測驗成績作為學習成效之指標，難以精確揭示學生在面對高度不確定之生態議題時的思考路徑、策略調整與互動行為，進而限制了對「學習如何發生」的深層理解。為突破此限制，本研究引入多模態學習分析技術，將研究重心由「結果導向」轉向「歷程導向」。透過系統底層完整紀錄學生在 360° 虛擬棲地中的放大鏡使用軌跡、任務停留時間、資料比對順序及決策歷程，本研究得以將抽象的認知歷程轉化為可量化、可視覺化的數位足跡。

此外，本研究透過結構化、任務導向的遊戲設計所蒐集之歷程數據，為後續建構「多模態學習分析視覺化儀表板」奠定基礎，有望將科技從教學的額外負擔轉化為支持教師精準診

斷的利器。也預計透過在地合作學校的實地教學實驗，示範將數位探究系統穩定融入自然科正式課程的可行性。不僅建構了高品質的數位教學資源，更透過實證導向的科學探究歷程設計，讓學生在可推論的空間脈絡中看見人類行動對環境的影響，將 SDGs 第 15 項「保育陸域生態」的價值宣示，轉化為具備科學素養與批判思考的永續教育實踐。

參考文獻

SDGs 臺灣。(2025)。17 項永續發展目標。<https://globalgoals.tw/>.

- Abdurrahman, A., Maulina, H., Nurulsari, N., Sukamto, I., Umam, A. N., & Mulyana, K. M. (2023). Impacts of integrating engineering design process into STEM makerspace on renewable energy unit to foster students' system thinking skills. *Heliyon*, 9(4), e15100.
- Ardoin, N. M., Bowers, A. W., & Gaillard, E. (2020). Environmental education outcomes for conservation: A systematic review. *Biological conservation*, 241, 108224.
- Avci, H., Lunn, S. J., & Hazari, Z. (2025). Exploring STEM educators' perspectives on the integration of AI-enabled technologies in teaching and learning. *Computers and Education Open*, 100304.
- Bordonaro, K., & Richardson, G. (2004). Scaffolding and reflection in course-integrated library instruction. *The Journal of Academic Librarianship*, 30(5), 391-401.
- Covington, E. W., Kyle, J., & Moseley, L. (2025). Scaffolding a clinical debate assignment in an infectious disease pharmacy elective: A mixed methods analysis. *Currents in Pharmacy Teaching and Learning*, 17(5), 102306.
- Damoah, B., Khalo, X., & Adu, E. (2024). South African integrated environmental education curriculum trajectory. *International Journal of Educational Research*, 125, 102352.
- Gillespie, A., & Hald, J. (2017). The paradox of helping: Contradictory effects of scaffolding people with aphasia to communicate. *PLoS One*, 12(8), e0180708.
- Hou, H. T., Fang, Y. S., & Tang, J. T. (2023). Designing an alternate reality board game with augmented reality and multi-dimensional scaffolding for promoting spatial and logical ability. *Interactive Learning Environments*, 31(7), 4346-4366.
- Hwang, G. J., Yang, L. H., & Wang, S. Y. (2013). A concept map-embedded educational computer game for improving students' learning performance in natural science courses. *Computers & Education*, 69, 121-130.
- Kacmaz, G., & Dubé, A. K. (2025). Measuring Teacher Scaffolding in Game-Based Learning: Emotional and Responsibility Scaffolds Lead While Resources and Previous Game Experience Shape Practices. *Computers & Education*, 105393.
- Li, J. (2025). Stepping out of the conversation: Exploring teacher fading dynamics in EFL classroom interactions. *System*, 132, 103698.
- Lin, J. H., Yang, S. C., & Lin, J. Y. (2024). Fostering ecosystem understanding: The synergistic impact of inquiry-based instruction and information literacy. *Computers & Education*, 220, 105125.
- Maksić, S., & Jošić, S. (2021). Scaffolding the development of creativity from the students' perspective. *Thinking Skills and Creativity*, 41, 100835.
- Mamun, M. A., Lawrie, G., & Wright, T. (2020). Instructional design of scaffolded online learning modules for self-directed and inquiry-based learning environments. *Computers & Education*, 144, 103695.
- Mamun, M. A., Lawrie, G., & Wright, T. (2020). Instructional design of scaffolded online learning modules for self-directed and inquiry-based learning environments. *Computers & Education*, 144, 103695.

- Prayogi, S., Verawati, N. N. S. P., Bilad, M. R., Samsuri, T., Asy'ari, M., Yusup, M. Y., ... & Ernita, N. (2025). Emphasizing reflective processes in scientific inquiry and its impact on preservice science teachers' critical thinking skills. *Social Sciences & Humanities Open*, 12, 101895.
- Salvati, L., Ciaschini, C., Postigliola, M., Ermini, B., & Vardopoulos, I. (2025). *Contextual differences, contrasting trends? Sustainable development, economic performances, and divergence in land resource depletion*. In *Environmental Sustainability and Global Change* (pp. 107-114). Elsevier.
- Sun, L., Kangas, M., Ruokamo, H., & Siklander, S. (2023). A systematic literature review of teacher scaffolding in game-based learning in primary education. *Educational Research Review*, 40, 100546.
- Xiao, Z., Duritan, M. J. M., & Jia, R. (2024). Resourceful futures: Integrating responsible mining and green education for sustainable development in developing and emerging economies. *Resources Policy*, 88, 104377.
- Zareie, B., & Navimipour, N. J. (2016). The impact of electronic environmental knowledge on the environmental behaviors of people. *Computers in Human Behavior*, 59, 1-8.