

## 因應氣候衝擊：再生能源應用於氣候變遷調適策略

國際再生能源總署 (International Renewable Energy Agency, 簡稱 IRENA) 是一個在各國向永續能源未來轉型給予支持的跨政府組織，是國際合作的主要平台、卓越研究中心及政策、技術、資源及再生能源相關的金融知識資料庫。IRENA 有 180 多個國家積極參與，IRENA 鼓勵各國政府為再生能源投資訂定政策，提供實用工具和政策建議以加速再生能源部署並促進知識共享。

本篇分享的議題為 IRENA 於 2021 年出版的研析報告「因應氣候衝擊：再生能源應用於氣候變遷調適策略 (Bracing for Climate Impact: Renewables as a Climate Change Adaptation Strategy)」，內容主要討論以再生能源為基礎的氣候變遷調適措施對於不同部門的好處，並說明再生能源在綜合減緩-調適的「雙贏」做法中的重要性，列出以再生能源為基礎的可行調適框架，包括調適目標、調適規劃、再生能源調適投資以及未來展望，將目前現行再生能源調適措施，與未來目標、納入私人投資的部分作完整的描述。期能提供我國能源部門及產業考量減緩與調適的綜合作法時，對於再生能源的調適規劃和投資之了解更加明確，並作為擬定調適措施之參考。

### 一、不同部門再生能源調適做法

再生能源是一種具備多功能的能資源，可以滿足多種調適需求，並提供其他資源無法提供的優勢。本報告重點介紹

了五個部門/領域：水；糧食、農業與林業；自然災害因應；海洋、海岸及島嶼；及人類健康的具體調適需求，與以再生能源為基礎的潛在解決方案。以下各小節將介紹各部門特有的氣候衝擊和風險，對於辨識部門的調適需求和建立一個氣候框架相當重要。

## ➤ 水

由於氣候變遷，部分地區的淡水資源正越來越稀缺，這些氣候變遷對水系統的影響主要分為三類：淡水短缺、水質退化及極端天氣事件，如水災和旱災。然而，氣候變遷對水系統的影響並不局限於水部門，水部門消耗了全球 4% 的電力，主要包括供水(42%)、海水淡化(26%)、廢水處理(14%)及配送(13%)，再生能源技術是保障、管理淡水資源的創新方法的驅動力。

- 再生能源為本的海水淡化：以再生能源為本的海水淡化可使水資源來源更多樣化，特別在小規模的計畫中更具可行性。大規模部署目前處於開發早期，需要更多的政府支持，提供研發投資與獎勵計畫。不同再生能源與製水之間也存在互補性：如太陽能發電在白天產生的多餘電力可用於海水淡化，因為水很容易儲存在水箱或含水層中供以後使用，可減少電力的無謂損失。
- 分散式供水解決方案：分散式再生能源系統正越來越廣泛用於偏遠社區的供水服務，在沒有集中供水系統的偏遠地區，小規模的離網再生能源供水解決方案是非常經

濟和可行的選擇。蒸汽(或霧氣)收集是一種新興的創新技術，這項新技術利用這種蒸汽資源，適用於小到中等規模的水供應。如杜拜的沙漠探險隊利用太陽能光電與熱能技術將大氣中的水蒸氣轉變為飲用水。

- 廢水處理和回收：廢水處理通常需要能源，但產生的沼氣可用於發電及污泥、廢水處理。如新加坡國家氣候變遷秘書處報告說，在新加坡大士(Tuas)的一個水再生廠及食物垃圾管理設施合用同一地點，來自水污泥和食物垃圾產生的沼氣是傳統污泥處理過程的三倍，同時水循環利用減少了消耗。
- 以再生能源為動力的灌溉解決方案：離網太陽能泵相對傳統灌溉泵的能源消耗更具成本效益。
- 儲水及保留水蒸氣：水力發電的水庫上安裝漂浮的太陽能板是一種減少水蒸發的方式。

水資源開發項目如果沒有提前規劃、跨部門整合，在中長期過程會增加不當調適(maladaptation)的情況，可能包括：(1)透過太陽能灌溉過度開發地下水，沒有適當規劃或監測系統；(2)缺乏與其他部門的協調，造成環境負面影響，如海水淡化過程排放廢鹽水。

#### ➤ 糧食、農業和林業

糧食生產已經受到海平面上升、日益頻繁和強烈的極端天氣事件以及不規則降雨模式的影響，預計大多數地區的作物和畜牧系統將受到氣候變遷的負面衝擊。農業與林業部門

對再生能源的發展做出了重要貢獻，特別是生物能源，廣泛的再生能源技術可用於推動整個糧食系統的調適。

- 太陽能灌溉、農業光電技術：再生能源抽水系統可以提供地下水灌溉，多餘的電力也可以被轉移到儲水箱或電池存儲，形成協同效應。農業光電技術也在逐漸普及，農場中的太陽能共享，可以透過在太陽能電池板下栽培農作物來創造光電基礎設施和農業之間的綜效效應，重要的是選擇能在部分陰涼處生長良好的農作物。不過還需要進行更大規模的示範。
- 溫室園藝及室內垂直農法：溫室園藝與再生能源的結合可以是一個雙贏的解決方案，再生能源可以提供熱能與電力，高效且具有成本效益，而且不會排放溫室氣體。使用 LED 燈和水耕系統的室內垂直農法是最近的一項創新技術，以最大限度地提高水和土地的使用效率，同時抵消氣候影響。它可以透過使用再生能源在水-食物-能源之間創造綜效。
- 減少收穫後損失的食品加工：在發展中國家，由於缺乏適當的收穫後儲存、加工及運輸設施，導致新鮮食品的損失高達產量的 30-40%，氣溫上升需要更多的冷藏、加工及物流作為調適措施。對於食品儲存和加工，可以使用各種再生能源技術，包括太陽能、風能、生物能源和地熱。
- 農業廢棄物與副產品處理：糧食系統及供應鏈提供清潔能源生產的機會越來越多，如動物糞便用於沼氣；作物秸

稈用於烹飪；農業廢棄物處理透過生質能小型電網用於農村電氣化；以及來自糖業和稻米業的農業廢棄物用於發電與生質燃料生產。農業廢棄物的再利用可以提高作物產量、節約能源、防止土壤侵蝕。

在部署糧食、農業及林業的再生能源解決方案方面仍然存在挑戰：(1)發展中國家的前期高額成本與負擔能力；(2)由於作物模型的複雜性，很難建立一個參考案例；(3)對生質能生產的全生命週期成本與效益進行評估。再生能源技術在農業應用中的解決方案，包括太陽能灌溉系統，已經具有很高的可靠性與經濟競爭力，而且成本下降很快。然而，在許多發展中國家，中小型農場負擔不起再生能源系統，主要是因為相對較高的前期成本與小規模的項目在取得銀行資金的障礙。

### ➤ 自然災害因應

因應自然災害需要採取跨部門/產業的韌性建設及復原措施，再生能源技術可以透過提供水、糧食和其他公共服務(如衛生、公共設施)來幫助減少社會對災害影響的脆弱度。此外，分散的能源系統可以提供更有韌性的電力供應。

- 緊急通訊和天氣監測：太陽能可以應用於電網覆蓋範圍以外的農村和島嶼地區，提供離網氣象和農業站的危害預報。這些由再生能源提供動力的離網氣象站和設備可以收集數據，創建更可靠的預測。再生能源發電廠也有可能幫助預警系統的運行。例如，在高風速的時候，風力發

電廠在準確的天氣預報服務的幫助下提前最佳化運行；定期的天氣資訊可以與地方當局/社區共享；海上風電廠的海洋預報和預警系統也可以幫助減少漁業的風險。

- 減少能源系統風險：再生能源技術透過使發電資源多樣化和引入創新解決方案：如電池儲存和智能 IT 系統，減少對氣候風險的脆弱度。在撒哈拉以南非洲，分散式能源系統已可以自給自足電力。
- 為難民部署再生能源：離網的再生能源技術，可以很容易地與社區一起搬遷，然後幾乎立即提供能源。正如國際再生能源組織的《難民定居點的再生能源》報告中所描述，與緊急供電的方式類似，再生能源可以在難民定居點發揮重要作用。在災後復原階段，小規模的太陽能光電可以比公用事業規模的發電系統更迅速地部署緊急電力，同時更容易修復。

再生能源對自然災害的脆弱度是再生能源調適措施中的另一個挑戰，所使用的技術必須能抵禦氣候變遷衝擊。例如，水力發電在易受乾旱影響的地區可能無效，因此應考慮其他再生能源方案。氣候變遷衝擊會改變水壩的預期收益，所以水電站的水庫設計應納入考量。變動性高的再生能源也面臨著自然災害的風險，可能會加劇供應的不穩定性。

### ➤ 海洋、海岸和島嶼

沿海地區和島嶼發展中國家面臨海平面上升、海洋生態系統退化和自然災害增加的風險。由於地理位置偏遠的島嶼

國家高度依賴於必需品的進口，極端天氣事件的增加進一步威脅到他們的糧食和能源安全以及人類健康。再生能源提高了島嶼發展中國家的整體能源安全並有利於能源獨立。

- 分散式海水淡化和水供應：由於氣候變遷，缺水已經成為太平洋地區大多數島嶼國家的嚴重挑戰。集中式海水淡化和配送系統需要巨大的基礎設施投資，這使得太陽能或風能海水淡化、淨化及灌溉技術成為社區分散式供水的可行選擇。特別是，小規模的分散式太陽能海水淡化是一個合適、有競爭力的解決方案，可以提高許多小島嶼國家的水及能源安全。智慧資訊及通信技術將使這些系統可以遠程操作和維護，以進一步提高效率。
- 園藝與再生能源：園藝與再生能源技術相結合，可以為偏遠島嶼提供食物和水，透過減少進口來建立社區的韌性。
- 水熱加熱及冷卻：水熱是一種創新的解決方案，可以引入到被動式房屋和建築中，並可以提供輔助能源，以因應溫度上升的冷卻和加熱。水熱製冷利用大型水體，如含水層、河流、湖泊及海洋，並利用環境空氣和水之間的相對溫差，或溫暖的表層水與寒冷的深層水之間的溫差來供熱或製冷。透過熱泵等技術，從建築物中排出的熱量可以消散在含水層中儲存起來，可以再次提取熱量以供暖，這也有助於減少城市熱島效應。
- 以再生能源為基礎的生態旅遊：由於沿海和海洋生態系統是旅遊業的關鍵資源，不損害自然環境的生態旅遊正

在成為一個關鍵的趨勢，這些地區越來越多的飯店及度假村正在採用再生能源解決方案，以提高氣候韌性。例如使用太陽能海水淡化的零碳排放方案、或使用地熱資源(溫泉、間歇泉)支持旅遊業。

- 海上風力發電廠的水產養殖和海洋保護地帶：海上風力發電廠可能成為多用途平台，結合水產養殖和預警系統。風力渦輪機的天氣預報資訊對小島嶼發展中國家特別有用，需要考慮海上風電場的安全區，以及瀕危海洋物種的海洋保護區域。

儘管海洋能具有巨大的潛力，但許多海洋技術仍處於研究和開發的早期階段。它們預計需要幾十年的時間才能實現商業化，所以很難評估再生能源在氣候調適方面的適用性。此外，由於缺乏需求，海洋技術不容易在人口稠密的偏遠島嶼國家大規模部署。鑑於許多小島嶼國家所面臨的氣候急迫性，目前可用的選擇是昂貴的，而且技術上有限。

#### ➤ 人類健康

由於人類健康與能源、水及糧食部門密不可分，健康生活的前提條件是來自這些部門的供應量和品質。人類的健康和福祉需要良好的糧食、水、能源、救災及健康服務的結合。

- 為衛生設施提供一般電力：在許多偏遠地區，可靠的電力供應不僅可以限制對氣候變遷的敏感性，而且可以提供基本的衛生保健及醫療設備的電力(例如，用太陽能光電發電的冰箱來取代煤油)來加強對極端氣候的調適能力。



- 清潔的冷卻解決方案：其中一個解決方案，即太陽能冷卻，幫助用戶透過冷卻家用電器來降低環境溫度，從而調適更高的溫度。在柴油動力冷卻解決方案資本密集不可行的地方，正在為小型社區開發離網或太陽能熱能的解決方案。隨著冷卻需求的增加，正在出現空調和冷凍水使用的創新商業模式，如區域供冷服務，與標準空調及冷水機模式相比，可以節省 40% 以上的能源。
- 潔淨水解決方案：在服務不足的偏遠地區，小規模的解決方案，如太陽能海水淡化、水的再利用和循環、診所和醫院的水和衛生設施，以及社區衛生設施，將是需要考慮的優先政策措施。跨部門融資計劃，如綠色健康基金，有助於激勵公共衛生和再生能源之間的創新方法。
- 清潔烹飪解決方案：在依賴傳統木材、木炭等燃料的偏遠社區，由於氣候變遷的影響，森林砍伐加劇，使其更難獲得能源資源。清潔烹飪解決方案可以保護森林資源，因為烹飪不再需要木材，沼氣解決方案可以改善廢物回收。

由於人類健康受到各種個人、社會和環境條件的影響，評估和監測某個項目對衛生部門的影響是非常困難的，量化氣候變遷和人類健康之間的關係甚至更具挑戰性。健康問題的複雜性和相互關聯的特點必然需要跨部門的措施，確保與其他部門因應對措施相結合的綜合方法相當重要。

## 二、以再生能源為基礎的可行調適框架

### ➤ 調適目標與規劃

在國際和國家層面上，以再生能源為基礎的減緩和調適綜合方法可以在因應氣候變遷方面帶來協同效應。本節透過分析國際和國家文件(國家自定貢獻 NDCs、國家調適計劃 NAPs 等)，研究各國如何在調適規劃中納入和使用再生能源，以及再生能源除了減緩暖化，它如何對調適產生影響。《巴黎協定》認識到調適行動帶來的減緩的共同利益，更高水平的減緩可以減少對額外調適努力的需求。如前述，許多國家認識到再生能源是一種協同措施，並將其納入 NDCs。圖 1 顯示各國之間 NDC 有提到的調適措施存在很大差異，因為並非所有國家都同樣容易受到氣候變遷的影響。

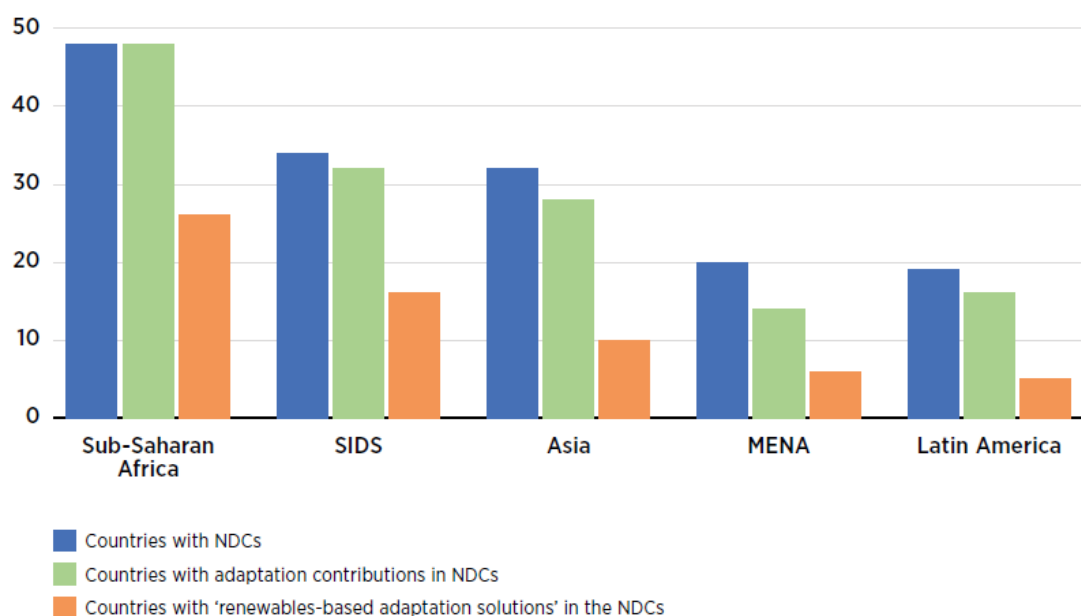


圖 1、各區域國家 NDCs 統計圖

撒哈拉以南非洲國家和小島嶼發展中國家在使用再生能源技術的需求和計劃方面的特殊性較為突出，在這些區域中，幾乎有一半的國家將再生能源技術納入其調適行動中。這些國家都面臨著共同的氣候變遷挑戰，如高度暴露於氣候變遷

的影響，缺乏地方調適能力和對傳統燃料的依賴。因此，利用再生能源和其他部門之間的協同作用對這些國家來說非常重要。以下是針對各國將再生能源具體納入其 NDC 調適措施的分析。

在這些 NDC 的調適部分中，總共有 131 項調適活動中提到了「再生能源」(如果各國在多個部門中提到再生能源，則算作多次)。在最多的情況下(共 36 個)，各國將再生能源描述為降低能源部門脆弱性的一種方式，因為再生能源可以使能源結構多樣化，並透過減少依賴化石燃料來提高能源安全，再生能源也被提到是確保能源部門韌性的一種方法。分析這些 NDC 及其調適目標後顯示，具有調適潛力的關鍵部門(即最適用於調適的部門)是供水、農業、林業、以及防減災。雖然水、食品 and 農業是最常提到再生能源的部門，但一些國家在其國家發展計劃中包括促進再生能源以保護森林，因為再生能源可以取代傳統的生物質做供暖和烹飪，從而保護森林資源。

NDC 的重點是因應氣候變遷的目標，而 NAP 則是各國具體的調適規劃。NAP 使各國能夠決定其在不同時間架構(通常是中長期)的調適需求，以及滿足這些需求的適當調適措施。NAP 主要目標是通過能力建設和促進調適行動的國家規劃進程，減少各國對氣候風險的脆弱度。NAP 過程中還提供技術指引，協助發展中國家進行調適規劃。在 64 個將再生能源作為其 NDC 調適部分的國家中，有 4 個國家的 NAP 可

在《聯合國氣候變遷框架公約》(UNFCCC)網站上查閱。這四個國家(布吉納法索、衣索比亞、斯里蘭卡、多哥)都在調適行動清單中明確說明再生能源的實施方法。

《巴黎協定》中的長期溫室氣體低排放發展策略(Long-term Low Emission Development Strategy, LTS)是一項國家計劃，概述了溫室氣體減排的長期願景、路徑和後續的氣候行動。LTS 的時間框架跨越 30 年以上，而 NDC 通常涉及 10-15 年。由於 LTS 是一個長期計劃，它可以為不同部門之間更積極的對話提供機會，這可以幫助在永續資源利用、氣候調適和減緩方面達成協同效應。LTS 大多涉及社會經濟發展計劃，以及一些氣候調適計劃。許多國家將農業、林業和廢棄物管理確定為易受氣候變遷影響的優先部門，因此將氣候調適措施納入 LTS。各國還表示，他們的 LTS 應該同時涵蓋減緩和調適，特別是在這些部門。

一些國家採取了更加前瞻性的方法，強調了創新技術在長期內的作用。例如，日本和新加坡分別將農業光電技術和垂直耕作技術納入其 LTS。法國特別闡述了生物經濟的跨領域和創新問題，如開發生物材料和綠色化學，不使用石化產品而使用生態友好型農產品。雖然有些技術目前還不成熟，也沒有商業化，但作為一項長期的國家計劃，LTS 的特點是通常比 NDC 中有更多未來性和創新的再生能源解決方案。

#### ➤ 再生能源調適投資

氣候融資的前景正在迅速發展，數量也在增加。支持調適和韌性的投資捐獻金額大幅增加，人們了解進一步拖延調適行動將導致氣候變遷調適措施成本越來越高。2018年，為調適活動提供和調動的氣候融資上升到168億美元，佔氣候融資總額的21%，高於2016年的17%。根據全球調適委員會的報告，從2020年到2030年，全球氣候調適所需的投資每年可能達到1800億美元，僅在五個調適領域投資1.8萬億美元，就能產生7.1萬億美元的淨收益。雖然調適氣候變遷的融資規模已大幅擴展，但投資缺口仍舊巨大，需要透過公共和私人融資來解決。

有幾個關鍵行為者為調適提供資金，包括國家、國際、公共和私人機構。私人機構Bottom-up推動調適投資與公共行為者促進這一結構性變化，因為調適往往與公共產品和服務相關，公共部門的作用相對更為重要。在調適的公共融資範圍內，已經建立了廣泛的融資計劃--包括國家間的雙邊融資、多邊開發銀行和氣候基金。全球氣候基金、全球環境基金和調適基金提供了大量的國際調適資金，並有助於形成更廣泛的投資趨勢和倡議。特別是全球合作框架，自2014年以來，它被授權將其投資組合的一半用於調適項目，其中一半的份額將分配給最不發達國家、小島嶼發展中國家和非洲國家。2019年，身為全球環境基金受託人的世界銀行宣布：2025年將把調適資金增加到500億美元，確保一半以上的氣候資金用於調適。

由於氣候調適措施並不保證收益，因此公共資金作為催化劑是必不可少的。本報告分析了哪些涉及再生能源科技 (Renewable Energy Technology, RET) 的調適項目是由基金實際執行的，與 NDC 相比，這些以再生能源科技為基礎的調適項目的使用更加多樣化和創新(例如，再太陽能板下進行蜂蜜生產、利用太陽能的水產養殖、利用再生能源的氣象觀測網)。

許多公司越來越關注保護他們的業務、營運和供應鏈免受日益頻繁的極端天氣事件和緩慢發生的氣候變遷帶來的風險。公司也將對氣候韌性的支持視為一個新的商業機會，將私人行為者的興趣從減緩擴展到調適。隨著投資者和企業越來越多地在投資決策和策略方向中權衡氣候變遷風險，調適氣候變遷融資在私營部門投資中的地位正逐漸提升。金融穩定委員會氣候相關財務揭露工作組(Task Force on Climate-Related Financial Disclosures, TCFD)和碳揭露項目等倡議的出現，使企業分配額外的資源來管理氣候變遷風險。

在中東和北非地區，正在利用再生能源建設獨立的電力供應商項目，有時與獨立的水供應商項目結合起來。這些項目是公私合營的一種形式，在需要大規模投資的建設項目中是一種成熟的融資模式。電力部門一直在積極與私營部門合作，特別是在發電方面；而現在伙伴關係機制也應用至更廣泛的公私部門中，如供水、廢棄物處理項目。在公共投資不足的情況下，公私合營投資可以促進氣候調適，並使國家預

算的負擔減少，可以吸引更多的私人融資。另一種有助於氣候調適的公私合營形式是以能源服務公司的形式出現的，可以在初始投資中利用私人資本，後續再以公私合營形式進行營運。此外，在中東和北非，能源服務公司通常通過設備改造、水泵更新以及需求監測和控制來精進能源消耗和加強水資源保護。

能源部門一直是傳統的資本密集型產業，因此大多數企業是國有的或由大型公司經營。然而，分佈式再生能源措施 (Distributed Renewable Energy Solutions, DRES) 已經將這個行業轉變為小規模企業也可以參與，這促進農村和偏遠地區快速且可負擔的調適方案的興起。因此，再生能源公司正在氣候調適領域找到新的商業機會，如太陽能灌溉、水淨化和太陽能製冷。微型、小型和中型企業在再生能源調適方案部分變得活躍，並在這一新興市場進行越來越多的投資。再生能源使更多的調適選擇成為可能，並使調適項目對投資者更具吸引力。

再生能源領域出現的創新融資模式，如現收現付模式和小額融資，有可能將更多融資資源用於氣候調適。其中一個例子是「調適津貼機制」，這是非洲開發銀行提出的創新機制，旨在鼓勵私人資金根據《巴黎協定》第 6.8 條投資於氣候調適項目。在這一機制下，在成功完成一個調適項目後，如利用 DRES 進行清潔烹飪和供電，計畫開發商可以按照既定方

法獲得調適津貼，並將津貼出售給發展援助機構、投資者和慈善組織。

### 三、未來展望

氣候調適策略框架而言，應建立於強大的氣候方法學與最佳可用科學之上，衝擊模擬與脆弱度評估應用來確定最脆弱的部門和優先次序。然而，再生能源往往被納入規劃和項目層面，而沒有適當的調適框架，意味著需要在全球範圍內建立進一步的研究和良好做法。將再生能源技術納入地方、國家和全球層面的部門調適政策、計劃，擴大了降低脆弱度的機會範圍，確保更有效地利用稀缺資源，幫助所有關鍵利益相關者(決策者、公共和私人投資者以及當地社區)找到協同作用，並利用更大的資金流。各利益相關方應在界定風險的早期階段就參與進來，將跨部門政策協調和各方利益相關者的參與制度化，可以降低實施成本。由於與能源相關的減緩政策易於理解，並能產生切實的成果，因此，調適與減緩之間的綜合方法可使調適政策更容易被接受。

再生能源可以提供多種效益，同時滿足調適、減緩和發展的需要。再生能源在改善商業模式和吸引更多投資，特別是私人資金進入氣候變遷調適領域方面可以發揮關鍵作用。為了確保私營部門的參與，從而獲得其專業知識和資本的優勢，政策制定者需要為創新項目和新的商業模式建立協同預算方案，如太陽能共享、農業光電和垂直耕作。目前，有必要對這些做法進行進一步的實證研究，以提供有力的證據，



說明做法可行性與預期的共同利益。政府應鼓勵金融機構為再生能源解決方案提供公共擔保、貸款、補貼、小額融資和綠色債券等激勵計劃，這可以吸引更多投資於調適政策和行動，從而提高其影響。為了因應許多發展中國家的氣候融資挑戰，國際再生能源機構、聯合國開發計劃署和人人享有可持續能源組織與全球合作基金合作，建立了氣候投資平台 (Climate Investment Platform, CIP)，用以協助各國獲得氣候相關融資。

### **參考文獻**

IRENA (2021), Bracing for Climate Impact: Renewables as a climate change adaptation strategy, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi.