

波浪能：這種新型潔淨能源為何讓各國趨之若鶩？

如果你曾被海浪打過，就會明白它們力量有多大。

事實上，在海洋的咆哮之下，潛藏著一股尚未被充分開發的能量，這股力量有望重塑乾淨能源的未來。

數十年來，研究人員一直在嘗試利用波浪能，但海洋的嚴酷環境使其成為一個極具挑戰且成本高昂的作業場域。

然而，各國正積極尋找可再生能源，以減少對化石燃料的依賴並對抗氣候變化。

此外，俄羅斯入侵烏克蘭也促使各國加速提升國內能源供應。

「波浪能」（wave power）便應運而生。

政府間氣候變化專門委員會（IPCC）指出，全球波浪能理論上每年可產生30,000太瓦時的電力，超過當前的全球用電量。

不過，儘管潛力巨大，美國俄勒岡州立大學的波浪能專家布萊妮·杜邦（Bryony DuPont）博士表示，這個能源仍存在「大量技術與經濟挑戰」。

波浪能開發的熱點包括歐洲西海岸、美洲太平洋沿岸以及英國北部水域。

誰能獲益？

澳洲、南韓和中國也在積極研究這項技術。

歐盟則是設定了到2030年從波浪和潮汐中獲取1吉瓦（GW）海洋能的目標，並估計到2050年，這可能滿足歐盟10%的電力需求。

有專家認為，波浪能對於沿海城市及偏遠島嶼供電尤為重要，這些島嶼目前主要依賴進口昂貴且污染環境的柴油。

在2021年的COP26氣候大會上，小島嶼發展中國家（SIDS）的領袖們成立了「全球海洋能源聯盟」（GLOEA），旨在推動海洋能源發展。

巴貝多、百慕達、馬提尼克、格瑞那達和東加共和國隨後與愛爾蘭公司Seabased簽署協議，開發波浪能發電場。每個項目將從2兆瓦（MW）的試驗開始——足以為約2,800戶家庭供電——並根據當地需求擴展至50兆瓦。

對此，杜邦博士認為，在最佳情況下，波浪能可在未來十年內為電網貢獻大量電力。

但這並非她最興奮的部分。她告訴BBC說：「波浪能絕對是未來的趨勢。當我們想到災後應急場景，例如大量使用柴油發電機的情況，如果我們能將這樣的設備投入水中，為遭受颶風或海嘯襲擊的沿海社區供電。這將深刻改變人們的生活。」

正在起步的能源經濟

波浪能的開發並非易事。英國南安普敦大學可持續能源專家阿巴克爾·巴哈伊（AbuBakr Bahaj）教授警告，過去曾有「錯誤起步和未達目標」的案例。

譬如，蘇格蘭的佩拉米斯（Pelamis）波浪能項目於2004年接入英國電網，但十年後公司破產。或者，卡內基清潔能源（Carnegie Clean Energy）承諾於2017年在澳洲建設首個商業規模的波浪能發電場，但因財務問題，政府最終取消了該項目。

對此，巴哈伊教授認為，雖然波浪能最終將發揮作用，但由於風能和太陽能成本更低且技術更成熟，波浪能開發獲得資金是一場「艱難的挑戰」。

不過，英國普利茅斯大學海洋工程學教授黛博拉·格里夫斯（Deborah Greaves）向BBC指出，波浪能具有關鍵優勢：「波浪幾乎無時不在。你不能僅依賴風能和太陽能，因為它們的供應存在間歇性。」

「如果引入波浪能，這種能源非常穩定，就能平衡系統。這將降低為電力儲存所需的成本，」她強調說。

波浪能如何產生

波浪主要由風吹過海洋表面形成。風力越強、吹拂距離越遠，波浪攜帶的動能就越多。

這種能量可通過波浪能轉換器（WECs）加以利用。

杜邦博士表示，目前全球正在測試超過200種不同的設計：「你必須製造出極具韌性的設備。這些設備需要承受海浪的衝擊——你希望它們能盡可能吸收波浪的動量。它們處於鹽水環境中，且遠離離岸區，這是一個極其困難的工程挑戰。」

葡萄牙大西洋沿岸的洶湧波浪，使該地其成為波浪能的理想地點。瑞典公司CorPower Ocean自2023年起在阿瓜多拉（Agucadora）海岸部署了一個浮標設備。該浮標錨定於海底，隨著波浪上下移動，活塞驅動發電機

將運動轉化為電能，電力隨後通過海底電纜傳送到葡萄牙電網。

CorPower宣稱，該浮標克服了兩個關鍵挑戰：在強大風暴中存活，同時捕捉最大化的能量。

目前該公司正在愛爾蘭海岸開發一個由14個浮標組成的5兆瓦波浪能發電場，旨在為約4200戶家庭供電，並展示該技術如何助力愛爾蘭實現氣候目標。

此外，另一種捕捉波浪能的方式是將渦輪等設備附著在現有的港口或碼頭上。

譬如，西班牙北部穆特里庫（Mutriku）鎮的一個項目，由政府運營的巴斯克能源局負責，自2011年起以此方式為少量家庭供電。

專家表示，這種方式的成本遠低於安裝和維護離岸設備。

來自以色列公司的EcoWave Power使用隨著波浪上下移動的浮子，這些浮子驅動活塞，將液壓液推入壓縮機，進而驅動馬達並旋轉發電機。該公司正在葡萄牙波爾圖建設其首個商業規模設備，初始容量為1萬億（兆）瓦，計劃逐步擴展至20萬億瓦。

此外，該公司即將在美國洛杉磯港口啟動一個示範設備，並已宣布在印度和台灣開發波浪能的合作協議。

關於波浪能對海洋生物的潛在影響，巴哈伊博士表示，影響微乎其微。「當這些設備被放置在海中時，它們會成為海洋生物生長的棲地，反而促進了生物的繁衍，而非減少。」

與此同時，英國蘇格蘭公司Moccean使用一種稱為「衰減器」的設備，讓大型浮動臂隨波浪彎曲，在中央鉸鏈處捕捉能量。目前，這種設備已為離岸油氣行業使用的水下自主載具提供動力。雖然這看似與其氣候影響相悖，但格里夫斯教授表示這有助於增強投資者對技術的信心並推動其規模化。



蘇格蘭公司Moccean讓大型浮動臂隨波浪彎曲，在中央鉸鏈處捕捉能量

她相信，如果能成功實現這一點，將為世界提供另一個至關重要的清潔電力來源。（BBC）

困擾風力發電場的「尾流效應」和「竊風」爭議

隨著全球各地的海上風力發電場在達成淨零氣候目標的競賽中不斷擴展，一種令人擔憂的現象正引起越來越多的關注：在某些情況下，風力發電場會「竊取」彼此的風。

彼得·巴斯（Peter Baas）是荷蘭專門從事可再生能源和天氣預測的「威夫爾」（Whiffle）公司研究部門的科學家。他說：「風力發電場產生能量，而這些能量是從空氣中提取的。從空氣中提取能量會導致風速減少。」

他解釋說，風力發電場內，每個渦輪機後方的風速比前方慢，整個風力發電場後方的風速也比前方慢。「這被稱為『尾流效應』（Wake Effects）」。

簡單來說，當風力發電場的旋轉渦輪機從風中提取能量時，它們會產生尾流並減慢風速。在某些天氣條件下，這種尾流對於非常大且密集的海上風力發電場來說，可能會延伸超過100公里（62英里）。也有研究人員表示尾流通常延伸數十公里。

研究表明，如果風力發電場建在另一個風力發電場的上風處，它可能會使下風處的發電量減少多達10%或更多。

通俗地說，這種現象被稱為「竊風」——儘管挪威專門研究海上風能的律師埃里克·芬瑟拉斯（Eirik Finser's）指出：「『竊風』這個術語有點誤導，因為你不能偷竊無法擁有的東西——沒有人擁有風。」

儘管如此，他指出這種現象可能會對風力發電場的開發商造成多種負面影響，甚至可能在跨境方面引發問題。事實上，風力發電場開發商之間因涉嫌「竊風」而進行的爭議不斷，這引起了依賴海上風能來達成淨零氣候目標的國家的擔憂。

專家表示，雖然「竊風」問題在原理上早已為人所知，但由於海上擴展的規模和速度以及海上風力發電場的大小和密度，這一問題變得越來越迫切。

根據彼得·巴斯（Peter Baas）與荷蘭代爾夫特理工大學和荷蘭皇家氣象研究所的研究人員進行的模擬，在北海這個海上風力發電蓬勃發展的地區，隨著海上風力發電場越來越密集

，「尾流效應」對海上能源生產的影響可能在未來幾十年內增加。巴斯表示，風力發電場越密集越大，「尾流效應」就越強。

英國今年春季啟動了一項新的研究項目，旨在提供「尾流效應」的更清晰圖像，以幫助政府和開發商改善規劃，避免爭議。項目負責人、曼羅（Pablo Ouro）說，該項目將模擬尾流及其對2030年風力發電場產量的影響，屆時英國水域內的渦輪機數量將比現在多出數千台。

奧羅表示：「我們多年來一直看到『尾流效應』，並知道它們的存在。問題在於，為了達成淨零目標，我們需要部署一定數量的海上風力發電容量。因此，到2030年，我們需要擁有比現在多三倍的（裝機）容量，這意味著在不到五年的時間內，我們需要部署數千台渦輪機。」

「（一些）渦輪機將非常靠近已經運行的渦輪機，因此情況變得越來越擁擠。這些『尾流效應』現在開始產生更大的影響。」他說。

英國政府承諾，到2030年將從風能等可再生能源中產生足夠的電力來滿足其電力需求。2025年英國政府的政策文件強調需要更好地理解尾流效應，並將其描述為一個新問題，為海上風力發電場帶來不確定性。

奧羅表示，目前英國有多起風力發電場開發商之間因潛在「尾流效應」而產生的爭議。在他看來，這些爭議部分是由於對尾流的精確影響的不確定性造成的。例如，現行的英國指南關於海上風力發電場應如何間隔以避免「尾流效應」，可能未能反映尾流實際延伸的範圍。

他解釋說，由於海上風力發電場是成群建造的，因此很難評估它們如何相互影響彼此的產出。

奧羅說：「當你有一個風力發電場A與風力發電場B的相互作用。但如果你有六個風力發電場，它們如何相互作用？這是我們不知道的——但隨著越來越多的風力發電場建成，這肯定會發生。」

他指出：「另一個問題是渦輪機變得非常大。」渦輪機越來越高，葉

片越來越大，以捕捉更多的風能。最新的渦輪機葉片長度超過100米，相當於一個足球場的長度。在最大的海上渦輪機中，一台渦輪機可以為大約18,000至20,000個歐洲普通家庭供電。

但這種尺寸的增加可能會加劇「尾流效應」，因為更大的葉片直徑可能會產生更長的尾流。奧羅還補充說，應該進行更多研究以了解其影響。

搶占最佳位置？

芬瑟拉斯（Finser's）在挪威卑爾根大學進行博士研究期間，領導了一項關於「尾流效應」和監管缺口的研究。該研究分析了挪威計劃中的風力發電場的尾流如何可能對丹麥的下風發電場產生負面影響。芬瑟拉斯警告說，除非解決「尾流效應」管理問題，否則可能會導致法律和政治衝突，並使投資風能變得更加困難。

芬瑟拉斯說：「至少在歐洲，北海和尤其是波羅的海可能會成為大規模海上風力發電場建設的中心。因此，『尾流效應』問題很可能會滲透到北海及其他地區的能源轉型中。」

從投資角度來看，即使是相對較小的「尾流效應」也可能對海上開發商造成問題，芬瑟拉斯說。「建造海上風力發電場的成本非常高，」他解釋說，這是由於這些發電場的巨大規模以及所有相關的複雜工作，包括部署專用船隻。

他說，為了證明其投資合理並獲利，「對於開發商來說，能夠預測風力發電場在25或30年的典型壽命期間將產生一定量的電力非常重要」。芬瑟拉斯說，即使是相對較小的、意外的產出減少也可能打亂這一投資計算，使風力發電場在財務上不可行。

他警告說，如果運營商或國家試圖通過確保最佳位置來避免「尾流效應」，可能會產生另一個風險：「尾流效應」可能會導致所謂的「搶水現象」，即各國爭相開發以從最佳可用



風力渦輪機產生的尾流效應可能會延伸超過100公里（62英里）

風力資源中獲益。他說，匆忙開發可能會增加忽視風力發電場規劃其他重要方面的風險，例如保護海洋環境。

曼徹斯特大學的奧羅也看到了跨境問題的日益風險：「迄今為止（在英國）提交的所有爭議都是英國風力發電場之間的，但如果明天英國風力發電場與荷蘭、比利時或法國的風力發電場之間發生爭議呢？因此，我們越早預見這種情況，並為『好吧，這就是我們要解決這個問題的方法』奠定基礎，就越好。這減少了不確定性，對行業更有利。」

芬瑟拉斯建議歐洲國家在規劃風力發電場時通過合作和相互諮詢來解決風力竊取問題，並引入明確的法規來管理風力作為共享資源。他建議，風力可以像其他有法規的共享海洋資源一樣被對待，例如跨越國界的油田或魚類。「國家之間以前規範過類似問題。」他說。

芬瑟拉斯說，為了解決這些棘手問題，參與的歐洲國家通常有良好的政治關係，這是有幫助的。

他說：「我們必須使能源部門脫軌，而且必須非常迅速地進行，這是歐盟在海上風能政

策方面的雄心。因此，毫無疑問，所有這些都在迅速發生。但我們不應該因為事情發生得快而阻止找到好的解決方案，」他說，沒有人有興趣為風力爭鬥。「儘管（風能擴展）正在全速進行，但各國之間仍有動力合作，找到公平的解決方案。」

不僅僅是歐洲在努力更好地理解「尾流效應」。例如，中國正在迅速擴展其海上風力發電場，那裡的研究人員已經將「尾流效應」對中國海上風力發電場的影響放在了聚光燈下。

自該項目於三月宣布以來，奧羅收到了大量對該項目感興趣的電子郵件，在他看來，這表明問題的緊迫性。「我們需要理解這一點，我們需要在建模方面取得更多進展，以便每個人都充滿信心，因為我們需要這麼多的海上風力來達到淨零。我們必須實現這一目標。」

