

溶氧極低層擴張

陳瑞谷、蘇博堃、陳郁凱、吳繼倫 摘譯

水產試驗所海洋漁業組

過去九年的夏天，美國奧勒岡州外海都會出現致命的缺氧海水。這也許暗示著有“什麼”正逐漸靠近……

海灘上死亡的魚是線索之一。

2002 年 7 月，美國奧勒岡州漁業與野生動物部門的科學家發現，原本充滿生機的海床不尋常地滿布著死亡的底棲性牛尾魚，螃蟹的屍體也被大量地沖積在海灘上。

海水溶氧濃度會影響海洋生物、地質和化學作用，同時關係著全球的碳、氮循環。海水表層溶氧主要來自海、氣間的交換，內部則以洋流間的水平混合為主，加上光合作用的製造與生物消耗。當溶氧介於 60–120 $\mu\text{mol/kg}$ 稱為低氧 (hypoxia)，低於 10 $\mu\text{mol/kg}$ 稱為缺氧 (suboxic)，而最後則是無氧 (anoxic) 的狀態。

全世界沿海地區並不乏低氧的海域，這是因為含大量肥分的農業和家庭廢水排入所導致的優氧化。但在奧勒岡州的事件成因並非如此，畢竟當地沒有大量廢水排入，同時在離岸更遠的海域測得同樣的低溶氧水層，更確認發生了非同以往的狀況。

自從 2002 年首次發現海域溶氧不足，往後每年夏季奧勒岡外大片陸棚海域的溶氧總會謎樣般消失，最嚴重的情況發生在 2006 年，有長達 4 週的時間海水溶氧甚至

低於精密儀器的偵測下限，造成海星和貽貝大量死亡，岩礁魚類與其他游泳魚類則逃離低氧水域，而受到影響的海域廣達 3,000 km^2 。

這個慘況讓當地漁政單位十分憂心，每年開始投入一億元經費在春、夏季監測這致命的低氧海水是否出現。科學家對這缺氧的成因十分疑惑，懷疑是否與全球暖化有關，並希望藉由追尋低氧海水的源頭，發展預警系統，協助漁政單位減輕當地海洋生物遭受的衝擊。

奧勒岡海域溶氧的改變也許是全球變遷中的一環，次表層低氧海水規模正不斷地擴大，越來越多氧氣謎般的消失。無論全球暖化是否正是造成溶氧消失的原因，從模式分析預測，未來十年表水溫的上升與海流循環路徑的改變將會使得海水中的氧氣濃度下降更多。

隱憂

在奧勒岡州的春天，間歇性的北風會使得表層海水往外洋輸送，使得陸棚邊緣深層較冷、富含養分但低氧的海水因此湧升，深層海水湧升正是當地漁產如此富饒的原因。常年間，造成湧升的北風在春季與夏季會間

歇地減弱，這空檔讓陸棚域海水有機會和大氣混合補充注入溶氧；但近來某些年強烈的北風持續吹拂，妨礙了次表層海水重新補充溶氧，同時湧升海水中的養分助長藻華發生，浮游藻類死亡分解時更消耗了殘存的溶氧(圖 1)。

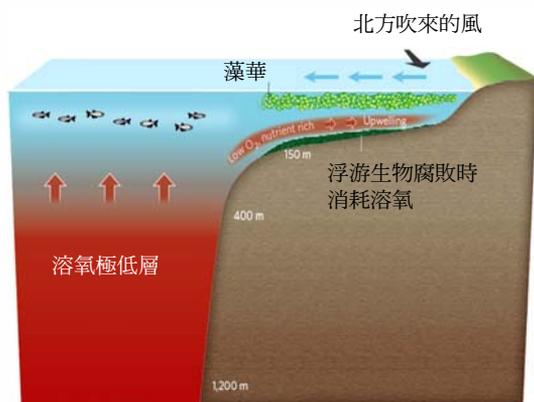


圖 1 危機潛伏(當北風吹拂，表層水因艾克曼輸送機制向左遠離海岸，深層的低溶氧、高營養鹽海水就會上補進入陸棚區，即所謂湧升現象。大量營養鹽湧入光合層促進了藻類生長，但當藻華結束，細菌分解將耗盡水中溶氧，惡化海水缺氧困境)

每公升表層海水通常含有 5–8 mL 的溶氧，會隨著深度急遽地減少，約在溫躍層底達最低，再隨深度逐漸增加後持穩。水深約 300–1200 m，溶氧呈現嚴重不足的水層，通稱為“溶氧極低層 (oxygen minimum zone, OMZ)”，這是全球海洋普遍的現象，歸因於生物利用與分解作用消耗氧氣，卻因太深與密度成層之故，無法與表層富含溶氧的海水混合所致。太平洋與大西洋海水溶氧水平分布都呈西高東低，即因離岸流使深層低氧海水上補造成，以南美洲秘魯外海的湧升海

域最為有名。

監測全球海域發現，許多 OMZs 正持續地擴張覆蓋面積與深度。OMZs 目前約覆蓋 3,000 萬平方公里海域，約佔 8% 的海洋面積(圖 2)。在太平洋、大西洋與印度洋的赤道海域，過去 50 年中，OMZs 內的溶氧約減少了 0.1–0.4 $\mu\text{mol}/\text{kg}$ ，極度缺氧以致魚類無法生存的海域也增加了 450 萬平方公里，約是兩個阿根廷的大小。當中許多 OMZs 鄰接陸棚海域，低氧層的擴張將使得缺氧海水更有機會衝擊陸棚海域生態。

環境變遷模式預測未來海水溶氧將會降低，主要原因為表水溫上升會阻礙中、表層水間的混合循環，同時氧氣更難溶存於溫海水中。最嚴重的是，極區的暖化使得溫鹽環流減緩，無法將極區冰冷的高含氧水帶往熱帶深海置換。預測在下世紀內，全球海域溶氧會減少 1–7%。

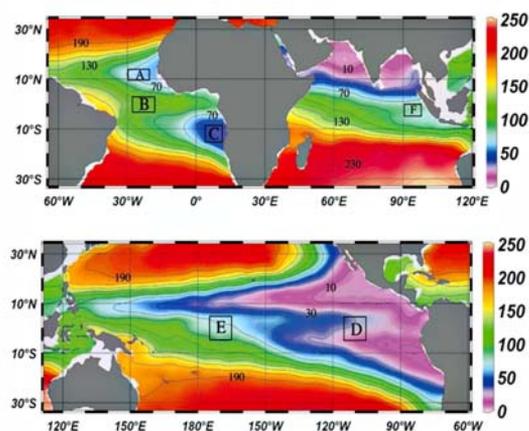


圖 2 全球海洋 400 m 等深氣候平均(climatological mean)溶氧分布(太平洋溶氧概呈西高東低，在東部熱帶海域屬於缺氧狀態，甚至無法測得溶氧；在大西洋亦為西高東西，東部熱帶海域為低氧狀態。印度洋則為南北分布，北部熱帶海域屬於缺氧狀態)(本圖以濃度差 20 $\mu\text{mol}/\text{kg}$ 為間隔繪製)

天然的偵測器

低氧海水對底棲性螃蟹和海星的威脅最大，美洲大赤魷則能在低氧環境中生存，很快可移入遭棄置的棲地。大赤魷的遷入與微生物的改變可視為生態系已出現問題的徵候。

低氧海水的擴張不僅危害海洋生物，也可能改變海中微生物相而間接加速全球暖化。當氧氣供應量不充足時，耗氧的微生物物種會被仰賴 NO_2 維生的微生物取代，當 NO_2 從水中逸入大氣將加劇溫室效應。全球低溶氧海域覆蓋面積或許不高，但其不成比例地釋放大量的 NO_2 和甲烷等溫室氣體卻讓我們不能忽視。從智利外海低氧海域微生物群聚研究發現，微生物是絕佳的偵測器，SUPO5 這個厭氧菌被發現存在於加拿大、那米比亞和祕魯外海低氧水層中。當這個菌種出現在過去未曾記錄的海域，即表示該海域水團已經改變了。

利用海水中氧同位素的分析，可以協助釐清低溶氧水是從北方還是南方海域而來，藉此判斷太平洋 OMZs 的擴張是否真的與奧勒岡州沿岸陸棚海水的缺氧事件有關。如果兩者是關連的，奧勒岡當地魚類的死亡就是對全球類似沿岸海域的警示，低氧海水的衝擊也許很快就會蔓延。

雖然目前南加州的漁業尚未受到明顯衝擊，但 1984–2006 年間，其陸棚邊緣深層海水的溶氧已減少近 20–30%，同時低氧海水層已變淺約 90 m 之多。以目前學術界掌握的零星資訊來說，只能假設近年來觀察到 OMZs 的擴張是自然週期，但若未來十年洋

流循環真如預期般的減弱，北美加州外海與南美祕魯外海兩大 OMZs 的覆蓋面積會更大，將使低氧海水乘著湧升流入原本不缺氧的海域，因此目前最迫切的事情是如何跟漁政管理單位示警。二氧化碳增加造成的海水暖化與酸化，再加上缺氧的衝擊，海洋生物是否能承受這些急促的棲地改變？

不同於底棲生物，魚類可以游離低氧海域，漁民們已經悟出這個習性並從中得利。當 OMZs 擴張且更靠岸，無法承受的物種其生存水域與水層會更形壓縮而集中，更易被一網打盡。當低氧海域僅是零星侷限，魚類仍可找到庇護所避開漁獵，但當未來低氧海域愈形擴大，也許漁政管理當局就應考慮在深水與淺水域適當地點都設立禁漁區以保護漁業資源。

在研究全球變遷與低氧海水間關聯時最大的困難在於大部分海域都缺乏對溶氧、溫度與其他參數的長期監測資料，目前是希望藉由衛星海流觀測浮標 (argo float) 與錨定式儀器陣列獲得更多的證據，以期拼湊出全球暖化的脈絡。

註：本文摘譯自

1. Virginia Gewin (2010) Dead in the water. *Nature*, 466: 812-814.
2. Lothar Stramma, Gregory C. Johnson, Janet Sprintall and Volker Mohrholz (2008) Expanding Oxygen-Minimum Zones in the Tropical Oceans. *Science*, 320: 655-657.