

在黑暗處尋找生命的精彩：探訪深部地殼生物圈

台灣大學地質學系 林立虹

一、生命起源與地球演化之謎

儘管科學家對生命的起源及形成機制仍未有定論，許多的地質觀察證據顯示生命出現於地球的時間至少長達 35 億年以上[1]。在如此悠遠的時空軸上，生命與地球環境如何共同演化，一直是地球科學家關注的重要議題之一。

生命的分佈、變異、出現與滅絕與地球環境的變遷息息相關。最熟悉的例子像是火山活動所釋放大量的還原性物質（如硫化氫與甲烷）與產生的高熱，均足以消滅或抑制絕大部分生物的生存繁衍，甚是造成生物滅絕。相反的，生命的代謝作用亦同時影響大氣與海洋的化學特性與全球性的元素循環[2]，例如能夠製造氧氣的光合作用菌與藻類是地球環境中自由氧的重要供應者，所產生的氧氣與地球上還原性物質交互作用，這些作用和二十幾億年前大氣中氧氣的快速累積與海洋硫酸鹽類濃度的增加有密切的關連。

在實務上研究早期地球生命圈的可能形貌，主要仰賴被保存於岩石或礦物中經生物作用產生的化學訊號與影像，然而受限於長時間的地質作用，僅有零碎與片段的殘餘資訊，得以提供科學家進一步的解析。因此欲針對早期生物圈的組成、功能與分佈獲得較為完整且系統性的瞭解，我們需要利用現生的環境所提供的類比。

二、深部地殼生物圈

在地球의 各種環境中，深部地殼（土壤層或沈積物下大於一公里深度）被認為是研究地球早期生物圈甚而外星可能生物的最佳候選材料，其主要原因便在於無論是早期地球的地表環境或外星表面，都是可能不利於生命的存在。這些因素包括：(1)因為不具臭氧層的保護，宇宙射線及紫外光得以穿透至表面，直接或產生自由基分解有機分子；(2)密集隕石的撞擊所產生的高熱與電磁波，足以對生物形成極大的破壞力；(3)表面環境溫度可低至攝氏零下 100 度以下或高於 150 度

以上，此溫度範圍遠超過目前地球上已知生物所可容忍的極限。換言之，最有可能且較為穩定的適居帶，便存在於地下環境。

除上述原因外，深部地殼也是少數可以隔絕於今日地表以光合作用為基礎之生態系統影響的環境，可能更具有原始生命型態發生與演化時的早期地球環境特徵。地殼主要組成為花崗岩質（大陸地殼）或玄武岩質（海洋地殼）等岩類，有機質的含量低，因深部地殼與表層環境的連通性十分有限，於表層光合作用所產生的有機質無法有效的經由地下水或海水快速的傳輸，供給異營性代謝作用的利用，因此存在於深部地殼的生物可能必須發展或演化特別的生存策略，利用地質材料或作用所產生的物質，以維繫最低的代謝能量需求。

深部地殼生物圈的主角為單細胞微生物。由於有機質的傳輸十分有限，且氧氣在表層即被行耗氧呼吸作用的生物使用殆盡，因此代謝複雜且能量需求較高的多細胞生物是無法在這種貧養的環境下生存；反之，單細胞微生物對能量的需求較低，並具備多樣性的代謝功能（需氧或厭氧、異營或自營），得以適應各種艱惡的環境因子，成為深部地殼生物圈的主要構成份子。

在各種無機物質中，氫氣(H₂)被認為是除了有機質外最佳的能量來源，其主因為地殼中進行的種種無機作用（例如岩石與水的交互作用）得以源源不斷的供應氫氣，且氫氣的氧化還原電位與有機質類似，能夠產生相當的代謝能量，供給地下微生物族群使用。因此探索深部地殼生物圈的組成族群與其所需的地質特徵條件，將有助於我們了解是否生物得以完全自外於地表光合作用的影響，扮演食物鏈最底層的角色，將無機質轉換成有機質，以提供其他異營性生物所需。

三、難以碰觸的深部地殼生物圈

我們對深部地殼生物圈的理解，至今仍是十分有限的，最主要的原因在於標本不易取得，另

外過去分析技術的成本過高與靈敏度較低，亦阻礙對這未知世界的探索。即便如此，過去近三十年來經由海洋鑽探，針對鬆軟且富含有機質的沈積物所進行的分析，依然提供了許多過去令人驚豔的成果。在數萬筆細胞計數的資料中，大致可歸納微生物數量隨著深度的增加呈現指數遞減的趨勢[3]，數量的變化由表層沈積物約每公克含 10^9 個單細胞生物至深度 800 公尺時約減少為 10^4 個單細胞生物。若將這樣的關係延伸至地下深度 5 公里或是生物可容忍溫度的極限 (120°C) 深度，可推算出地下環境中存在的總微生物質量，可達全球生物質量的一半以上[4]。然而，這樣存在於淺部沈積物的關係式，是否可以直接應用至深部地殼以火成岩或變質岩為主之生物圈，仍有待進一步驗證，而我們更對如此潛在驚人數量的微生物族群分佈、組成及限制因子，幾乎一無所知。

如何取得具有代表性的標本，一直是研究深部地殼生物圈的工作者最大的挑戰。海洋鑽探固然提供了許多珍貴的研究素材，然而受限於以往鑽探能力的極限和研究目的的取捨，僅能取得表層鬆軟的沈積物，供地質微生物學家進行研究，對於沈積物下層之玄武岩質海洋地殼，尚待由日本所領導的國際海洋深鑽組織 (IODP) 最新建造的探勘船『地球號』正式運作後才有機會取得。相較之下，陸域深部地殼之探勘，無論成本或技術門檻皆較容易克服達成。在陸上主要獲取標本的方式包括兩大類別：(1) 表面鑽探；(2) 利用開採礦石之隧道。經由鑽探取得標本的方式較為有針對性，可進行特定岩層或地質構造之鑽探，以獲取不同深度一系列之標本進行比較，同時可全程的進行污染源監控，以瞭解人為操作是否導致原始環境之孔隙水化學及微生物組成改變。不過受限於鑽探本身的取樣特性，可供探查的區域面積是極為有限的，而且即便是技術層面需求較低的陸域鑽探，也可能因無法預期之地下地質特性，導致操作成本的增加，甚而任務的失敗。另一種取樣方式是借助現存之礦坑深入地下環境，因此較為容易進行大範圍的探勘，更可檢視標本與採樣點周遭地質環境的關係 (如檢視距離破裂帶水脈的遠近與微生物組成的關係)，以瞭解是否存在系統性的關連模式，得以解釋觀察的變異。由於標本的取得是藉由現有之設施，取得

成本亦遠低於鑽探所需。不過採礦設施與活動往往意味頻繁且廣泛的人為干擾影響，因此需要更為精確選擇取樣的地點與建立各種確認污染源的指標。

四、探索南非古老地殼的深部生物圈

基於研究深部地殼生物圈對瞭解早期生物圈的形貌與外星可能生命有關鍵性的助益，我參與的普林斯頓團隊選定南非約翰尼斯堡附近 Witwatersrand 盆地的金礦，針對於地下 0.7 公里以下深度所取得的地下水標本，進行結合地球化學、微生物學與分子生物學等分析技術的分析，以期能有系統的探討地質無機機制與微生物有機機制之間的交互作用，如何影響深部地殼微生物的分佈、組成與功能性，以及何種因子扮演關鍵性的角色。選擇南非 Witwatersrand 盆地的金礦作為研究素材的來源有以下的考慮：(1) 此盆地的地層主要為太古代 (Archaean)，盆地形成後，除了元古代 (Proterozoic) 中期的岩漿活動外，並無頻繁的地體構造運動擾動，因此有較高的機會得以發現較為古老的地下微生物生態系統；(2) 此盆地深部地層由變質砂岩及火成岩為主，有機質的含量低，有助於瞭解深部地下微生物族群是否得以自外於地表光合作用；(3) 金礦的開採已深入地下 4.5 公里，可提供直接的管道供給科學家進行大範圍的探勘。

經過三年的野外工作，共計獲得分佈於 8 個礦區，超過 100 個地下水標本，進行水化學、氣體化學、穩定同位素、鈍氣同位素、微生物培養、細胞記數、細胞膜脂質及 DNA 等分析。其中近 40 個標本的細胞記數顯示，微生物質量並未隨著取樣深度的遞增有遞減的趨勢[5]。為了瞭解深部地殼微生物族群的代謝能量來源是否為氫氣 (H_2)，我們利用水化學及氣體化學組成，並結合現地的地質條件，計算可能產生氫氣反應 (包括發酵作用、蛇紋岩化作用、玄武岩質亞鐵的氧化作用、黃鐵礦化作用、斷層剪切及作用及輻射水解離作用) 的自由能，並評估這些反應是否足以產生測量所得的溶解態氫氣含量[6,7]。模式計算與評估顯示除了輻射水解離作用外，其他反應受限於反應物的短缺或不能自發反應，皆無法解釋所測量到的氫氣含量變化。根據樣品中氫氣與氫氣濃度的關係，可區分為兩大類，其一類來源深

度較深且年代較老的標本，兩種氣體的濃度關係與輻射水解離作用模式所預測的趨勢相同；另一類來源深度較淺且年代較輕的標本，氫氣含量則遠低於此模式的預測值達兩個數量級以上，顯然後者的氫氣被特定的作用所消耗。進一步配合微生物族群分析發現，使用氫氣的甲烷菌僅出現於氫氣含量過低的標本中，而未出現在高氫氣含量的標本中；同時培養試驗亦顯示低甲烷含量的標本中的微生物會使用氫氣，反之高氫氣含量的標本則未有使用氫氣的現象。另外同位素分析同樣指示氫氣含量的多寡與甲烷的碳同位素呈負相關，高氫氣含量的標本同時具有較重且指示無機成因的甲烷碳同位素成份，低氫氣含量的標本則顯示較輕且指示微生物成因的甲烷碳同位素成份[8,9]。綜合各項分析結果顯示，含鈾、鈷及鉀的岩石或礦物所釋放的輻射能將水分子解離產生氫氣與氫氣（源自 α 粒子），經過長時間的累積，若無嗜氫菌的有效利用，地下水的溶解態氫氣與氫氣濃度可不斷累積；若有嗜氫菌的存在，溶解態氫氣濃度會下降，而氫氣則仍持續增加。位於不同深度的微生物族群展現對氫氣有不同的親和度(affinity)，位於較淺處且較為年輕的標本，微生物族群的活性可能較高，可以有效的將氫氣轉換為甲烷，位於較深處且年代較為久遠的標本，微生物族群使用氫氣十分緩慢，標本中甲烷的形成則主要源自於非生物源的無機作用[6]。

分子生物配合多重硫同位素的分析顯示，位於較深處標本的微生物族群主要是由隸屬 *Firmicutes* 門的單一嗜熱硫酸還原菌種所構成[10]，此菌種佔整個族群的比例可達 90%之多。鈾同位素分析顯示，這由似 *Firmicutes* 組成之硫酸還原族群，被封存於地下 2.8 至 4.2 公里的水脈中達 2000 萬年之久[10,11]。此族群除了利用氫氣作為代謝能量主要的來源，尚需要硫酸鹽源源不斷的供應，經由質量平衡的模式計算顯示，硫酸鹽源自於重晶石的溶解或黃鐵礦的氧化作用。雖然豐富且源源不斷的氫氣與硫酸鹽足以產生充足的代謝能量，然而此硫酸還原族群卻以極為緩慢的速度，使用輻射能產生的氫氣與溶解自含硫礦物的硫酸鹽，而代謝速度約可對應至 40 至 300 年的繁衍週期。

南非 Witwatersrand 盆地金礦的研究顯示，深部地殼生物圈與表層或淺部地層的特性極

為不同，它們分佈並不均勻，族群組成十分單純，是以岩養自營的代謝作用維繫生存，並且以極為緩慢的速度代謝，自外於地表光合作用產物的影響。這些成果可以隱示早期地球或其他外太空星體可能存在的生命系統，可能存在這類的微生物族群，緩慢的利用地質營力，將地質材料或地質作用的產物轉換為有機質，供應食物鏈上層的生物使用。

五、跨越研究領域的未來

我們對於深部地殼生物圈的研究熱忱，或許建築在對於未知的生命起源、原始生命形貌和外星生命存在的想望上，但是無庸置疑的這是一項必須使用多種探勘技術、整合多樣分析工具，以及綜合各種知識層面的複雜團隊工作。前述這些關於地殼深部生物圈的介紹和研究成果，彰顯出跨領域整合的必要性，若僅由單一學門的角度出發，往往僅能窺得核心問題部分的面貌，若能透過各個領域專長的合作，將有助於脫離單一知識範疇的思考限制，建構較為全面性的模式預測。想知道生命與地球的如何共舞，需要生命科學家與地球科學家各自往未知的領域跨出一步，我們深切的期待學界之間攜手合作，激起燦爛的花火。

參考文獻

- [1] E.G. Nisbet and N.H. Sleep, *Nature*, **409**, 1083 (2001).
- [2] J.F. Kasting, and J.L. Siefert, *Science*, **296**, 1066 (2002).
- [3] R.J. Parkes, B.A. Cragg and P. Wellsbury, *Hydrogeol. J.*, **8**, 11-28 (2000).
- [4] W.B. Whitman, D.C. Coleman and W.J. Wiebe, *Proc. Natl. Acad. Sci.*, **95**, 6578 (1998).
- [5] T.C. Onstott, L. L-H, M. Davidson, B. Mislouack, M. Borcsik, J. Hall, G. Slater, J. Ward, B.S. Lollar, J. Lippmann-Pike, E. Boice L.M. Pratt, S. Pffiffer, D. Moser, T. Gihring, T.L. Kieft, T.J. Phelps, E. Vanherden, D., Litthaur M. DeFlaun and R. Rothmel, *Geomicrobiol. J.*, **23**, 369 (2006).
- [6] L.H. Lin, J. Hall, J. Lippmann, J.A. Ward, B. Sherwood Lollar, M. DeFlaun, R. Rothmel,

- D.P. Moser, T. Gihring, B. Mislouack and T.C. Onstott, *Geochem. Geophys. Geosyst.*, **Q07003**, doi:10.1029/2004GC000907 (2005).
- [7] L.-H. Lin, G.F. Slater, B. Sherwood Lollar, G. Lacrampe-Couloume and T.C. Onstott, *Geochim. Cosmochim. Acta*, **69**, 893 (2004).
- [8] B. Sherwood Lollar, G. Lacrampe-Couloume, G.F. Slater, J.A. Ward, D.P. Moser, T. Gihring, L.-H. Lin and T.C. Onstott, *Chem. Geol.*, **226**, 328 (2006).
- [9] J.A. Ward, G.F. Slater, D. Moser, L.-H. Lin, G. Lacrampe-Couloume, A. Bonin, M. Davidson, J. Hall, B. Mislouack, R.E.S. Bellamy, T.C. Onstott and B. Sherwood Lollar, *Geochim. Cosmochim. Acta*, **68**, 3239 (2004).
- [10] L.H. Lin, P.-L. Wang, D. Rumble, J. Lippmann, E. Boice, L. Pratt, S B. herwood Lollar, E. Brodie, T. Hazen, G. Andersen, T. DeSantis, D.P. Moser, D. Kershaw and T.C. Onstott, *Science*, **314**, 479 (2006).
- [11] J. Lippmann, M. Stute, T. Torgersen, D.P. Moser, J. Hall, L. Lin, M. Boresik, R.E.S. Bellamy and T.C. Onstott, *Geochim. Cosmochim. Acta*, **67**, 4597 (2003).