

「失落的城市」海底熱液活動區

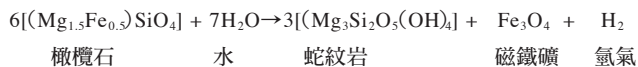
文·圖—單希瑛

地質背景

「失落的城市」熱液活動區是海底熱泉的一類，有別於「黑煙囪」海底熱泉的高溫酸性熱液，「失落的城市」熱液溫度介於40°C到91°C、強鹼性(pH=9-11)、富含氫氣及硫酸鹽。熱液在噴口生成碳酸鹽沉澱，形成一叢叢的白色碳酸鈣柱，仿若海底城市。這類的熱液活動區目前僅發現兩處，均在大西洋中洋脊附近，它們不在張裂中心，而是偏離張裂軸十數公里處。至於一般人所熟悉的「黑煙囪」海底熱泉則廣布於全球中洋脊的擴張中心，目前已發現200多處。

標準的「失落的城市」座落在亞特蘭提斯古地塊的頂端，這個海底山在20公里的水平距離內從海底拔升4000公尺，到達水面下800公尺。亞特蘭提斯古地塊是由中洋脊張裂形成長期(約1-2百萬年)的斷層活動及抬升造成。這個作用同時扯開了淺層地殼的火成物質，使富含鎂的地函岩石(橄欖石)露出。古地塊的頂部蓋著平坦的沉積角礫岩，再往上則覆蓋了含化石的深海石灰岩，因此熱液噴口的沉澱以碳酸鈣為主。沉積岩蓋之下是50-100公尺厚的剪裂帶，由變質超基性岩類(蛇紋岩、滑石角閃石片岩)及少量的輝長岩類組成。「失落的城市」熱液活動區就位於古地塊頂一塊陷落區的沉積岩蓋上。其中最大、最活躍的噴口群呈東西向排列，超過300公尺。這個線形構造被南北向的斷層穿過，露出破裂的蛇紋岩。斷層面近乎垂直，在斷層上是較老、也較不活躍的碳酸鈣噴口，基盤岩石裡一些傾斜的裂隙有較活躍的熱液滲漏，繼續產生新的白色熱液沉澱。

「失落的城市」的熱液來自蛇紋岩化(serpentinization)作用，它是因張裂作用使地函中的橄欖岩得以接觸海水，發生化學反應，形成蛇紋岩，這是一種高度放熱反應。一般的反應式是：



因此形成高濃度的氫氣，此種還原環境非常適合非生物性碳氫化合物

的產生，例如甲烷。至於「黑煙囪」也含高濃度的氫，但兩種熱泉的相似處僅止於此，「黑煙囪」海底熱泉含二氧化碳及溶解的金屬、低PH值、溫度為350°-360°C，是典型的由玄武岩主導的海底熱液系統。

「失落的城市」獨特的化學反應，源於它的地質環境，因它座落在地函岩石暴露區之上，才使得蛇紋岩化作用得以發生，轉而產生了非生物源的甲烷及碳氫化合物。這些地球化學反應的產物，就是此處繁盛的微生物代謝的基礎。

碳酸鈣煙囪

「失落的城市」熱液活動區聳立著約30餘個高度在30-60公尺間白色碳酸鈣柱，其核心是超過60公尺高，被暱稱為波賽頓(希臘神話中的海神)、噴口活躍的碳酸鈣柱。這個複合構造由4個直徑數公尺的柱子構成，底部相連形成東西向塊狀結構，延伸超過5公尺。煙囪的成分是霏石或方解石，加上少量水鎂石。根據Ludwig等人的定年，它們是已知持續最久的海底熱液系統，已活動了15萬年。

另外在垂直的蛇紋岩壁上覆蓋著各種型態的熱液出口，熱液由崖面流出，產生了一叢叢多岔的碳酸鹽增生生物。這些多岔的煙囪有些高達10公尺由崖面向外垂直生長，而從較緩坡度長出的單一煙囪可達30公尺。這些構造形成了連續的碳酸鹽沉積，延伸可達200公尺。

生態系

和大家熟悉的高溫熱液環境中典型的大型生物聚落相較，「失落的城市」的生物量要小得多。「失落的城市」的碳酸鈣沉澱起伏劇烈、表面積大，提供大量的生物棲息空間。許多無脊椎動物藏身於碳酸鈣柱中的空隙及裂隙中。它們多小於1公分，殼透明至半透明，所以很難看到。活躍的煙囪噴口(~10-40°C)以幾種腹足類及端足類為主。較大的動物很少，出現其中的有蟹、蝦、海膽、鰻及珊瑚。據估計，「失落的城市」中有58%的生物屬於此熱液環境所特有。

此生態系中的生產者：微生物密布於碳酸鈣煙囪上，它們以聚合物生物膜附著在碳酸鈣上，以中的氫氣及甲烷為生。在缺氧的煙囪內部，溫度為20-90°C、pH值為9-11，長在此處的生物膜以單一類系的古菌——「失落的城市」甲烷八疊球菌(Lost City Methanosarcinales (LCMS))為主。細菌則多出現在有氧的煙囪外壁，這裡熱液的化學性質因為混入了海水而與煙囪內部有本質上的不同。熱液的化學性質及微生物膜群落顯示，甲烷及硫的循環主導了「失落的城市」生態作用。焦磷酸測序的結果，發現古菌及細菌生物膜群落在過去一千年，隨煙囪環境的改變也跟著發生劇烈改變。

自然發生(abiogenesis、生物自生)的生態模型

「失落的城市」已存在了15萬年，比黑煙囪熱液生態系要長久得多(數十年)。有假說提出生命應該就是起源於這類環境中。因為地函岩石出露而形成的獨特地質化學反應，創造了非生物源的碳氫化合物，形成了多孔隙的鹼性環境，提供了早期地球生命演化出來的可能性。而「失落的城市」可能常見於早期地球環境，Brazelton在2010年的文章中即指出因地函岩石出露而產生的特殊環境在早期地球可能非常普遍，且可能是生命形成時期的主要生態系。

甲烷八疊球菌生物膜則顯示固氮基因的水平轉移證據，在生命的早期，這可能是很盛行的現象。在「失落的城市」，生物表型多樣性(phenotypic diversity)很高，但物種多樣性卻很低，這可以類比是生命發生後，由水平基因轉移形成的演化的初始階段。

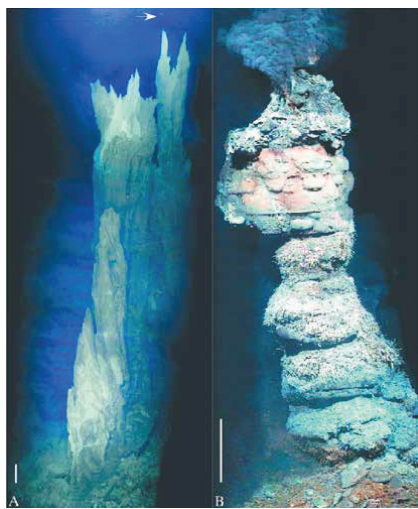


圖1 「失落的城市」鹼性熱液活動區以及「黑煙囪」海底熱泉的比較。兩處比例尺均為一公尺。鹼性噴口可累積達60公尺高，相當於20層樓。頂部白色箭頭指著固定在上方的探針，較白的區域是熱液最活躍的地方，但不像「黑煙囪」，它沒有黑煙(取材自Biochemist, 37(5))。

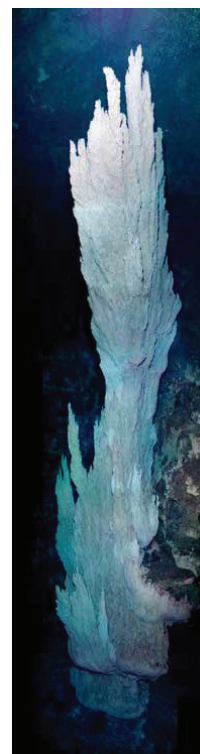


圖3 精緻的碳酸鈣煙囪沉澱。從接近垂直的蛇紋岩懸崖上側生出來(取材自<http://www.lostcity.washington.edu/story/Vents>)。

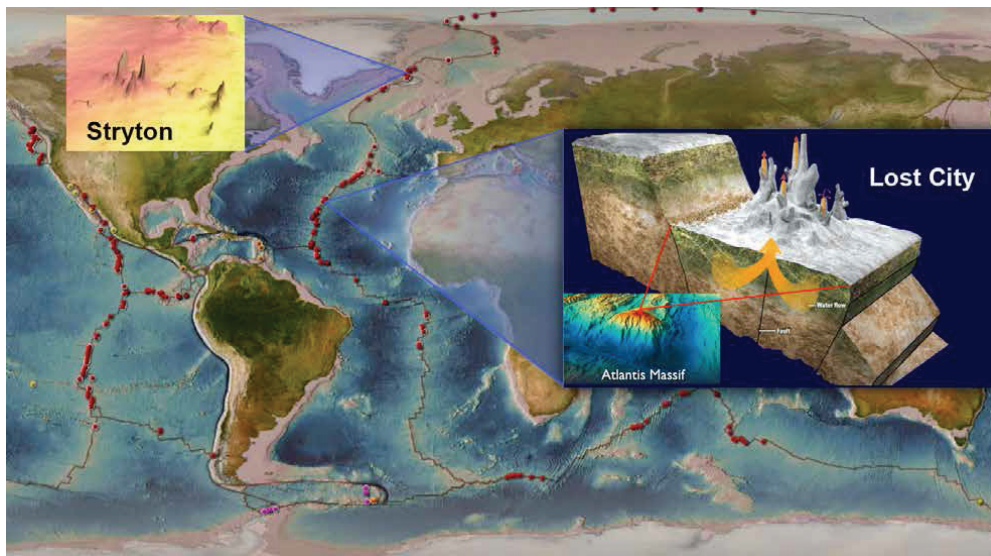


圖2 目前所知的兩個鹼性熱液活動區。一個位於中大西洋，一個位於冰島北邊峽灣中(改自<http://www.cev.washington.edu/story/Portfolio>)。