

溫泉生物及溫泉菌

三總北投分院 家庭醫學科主任

陳家勉 醫師

就我們所熟知的**土耳其青苔鼠溫泉魚**可以在泉溫 42°C 的碳酸氫鈉泉水中自在的悠游外，於食鹽泉、硫磺泉及鐵泉甚至於較強酸鹼性的泉質中都有溫泉微生物的蹤跡，而在異常高溫或是強酸的溫泉水及周遭的世界裡，其實還住著一群動、植物及微生物的住民，自成一完整獨立的生態系。

生命力是強韌的！生物們都會積極地演化以適應地球上的極端氣候與地理環境找出生命的出口與活路。一般活火山地帶近硫化氫氣體的出口處幾乎是寸草不生！但是在周邊的酸化土壤上還是可見磯杜鵑、岩高蘭科常綠灌木等所謂的「硫氣孔植物」，然而，依傍溫泉而生的「溫泉生物」合計約有 1000 種，其中猿猴、鳥類動物約有 300 種、微生物及植物類則約佔 700 種，此外，還有馬蠅、搖蚊等喜好溫泉味的昆蟲及軟體動物(螺類)等生物。

表 1 微生物可存活的高溫限界*

生物種類	上限溫度(°C)
真核微生物	
原生動物	56
微細藻類	60
菌類(真菌類)	62
原核微生物	
藍藻類	74
細菌(化學合成細菌)	95
古細菌(超好熱細菌**)	122

* 依 M. T. Madigan 等(2003), Takai 等(2008)(做了部分的改變) 摘自:溫泉的百科事典

** 可從無機物質的氧化中取得能量的細菌

溫泉中存活許多種類的生物:如細菌般的原核生物、藻類、原生動物及真菌等單細胞真核生物類的微生物，即使在近 100°C 高溫、強酸性(pH 值 1~2)、高鹽濃度特殊的溫泉環境中亦可發現活生生的微生物，例如在強酸性的**日本草津溫泉**中便可發現單細胞藻類的蹤跡，雖然在 50~80°C 高溫溫泉泉源處或是浴槽內存活的溫泉藻雖對人體然無害，但卻是「退伍軍人桿菌」滋生的溫床。

就**日本**(西元 1977 年)的溫泉微生物的調查(阿岸 祐幸、田中 宗隆及浜田 真之等、2012):細菌類 33 種，而溫泉藻類則有 569 種，總計有 602 種，其中以藍藻類所佔的比例最多 306 種(54%)，其他則依序為矽藻類 189 種(33%)、綠藻類

(含接合藻)61種(11%)及紅藻類13種(2%);此外,在世界各地之溫泉、噴氣地帶及海底熱水噴出孔中的紀錄所發現的一些耐高溫的微生物(如表1)在數量上也是十分的可觀,其中**溫泉藻**的功用主要是做為醫療及美容之用,**義大利及法國**自古的泥浴或是礦泥浴就是利用泥和溫泉水的混合物來醫美病患,而所運用的便是泥中的細菌及藍藻等溫泉內微生物的增殖發酵作用所生成之特殊成分。

總體而言,微生物群的多樣性和豐富度受到溫度升高的負面影響,其他的非生物因素,包括pH值、礦化和地質歷史(geological history)也會影響微生物群落的結構與功能(Saghatelyan、Margaryan及Panosyan等、2021)。能夠存活於**溫泉**中的**細菌**種類繁多,泉溫、離子(鈉、氯、硫酸鹽及重碳酸鹽)濃度、硬度、溶解固體(dissolved solids)及傳導性(conductivity)等都是影響溫泉中微生物群落組合及多樣性的主要環境變數(environmental variables)(Badhai、Ghosh及Das、2015)。類似地,Najar、Sherpa及Das等(2018)於**印度錫金邦(Sikkim)**溫泉區的微生物多樣性調查也發現:溫度、pH值、鹼度(alkalinity)、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 和硫是影響微生物群落組成和多樣性的主要環境變量。

硫磺泉之泉源處所發現的溫泉細菌中,以**古細菌**較為特殊。此遠古時代就存在的**古細菌**是有別於一般的細菌,憑藉著特殊細胞膜的醚脂成分便可從容自在地存活於高溫、酸性、高鹽濃度的環境裡-**古細菌**甚至能在 122°C 高溫的環境中存活!

Huang、Jiang及Briggs等(2013)使用包括地球化學和16S rRNA基因焦磷酸測序在內的綜合方法,研究了**菲律賓**6個酸性至近中性溫泉(溫度: $60\sim 92^{\circ}\text{C}$ 、pH值: $3.72\sim 6.58$)沉積物中的微生物多樣性中發現:高溫泉水中的細菌和古細菌(Archaeal)豐度(abundances)均低於中溫泉水。總體而言,**古細菌**群落由與泉古菌門(Crenarchaeota)、廣古菌門(Euryarchaeota)和未分類的古菌具有高度相似性(核苷酸同一性 $> 92\%$)的序列讀數所組成,而細菌群落則是由與17個中度相關(核苷酸同一性 $> 90\%$)之序列讀數組成,其中以產水菌門(Aquificae)和厚壁菌門Firmicutes為主,而這些系統發育群與環境的條件存有相關性,例如溫度、泉水中溶解之硫酸鹽和鈣濃度以及包括總氮、黃鐵礦和元素硫在內的沉積物特性,根據系統發育推斷,硫代謝似乎是這些溫泉的關鍵生理功能。此外,因為硫化芽孢桿菌(Sulfobacillus)和硫化葉菌目(Sulfolobales)內的成員在兩個高溫泉($> 76^{\circ}\text{C}$)中大量存在,因而認為它們在調節高溫條件下的硫循環中應發揮了重要作用。

位於**中國**西南部的**青藏高原**東部地熱帶擁有溫度和水文地球化學條件差異大的溫泉區域,為微生物群落的分佈提供不同的生態位,因而造就了康定(Kangding)、理塘(Litang)和巴塘(Batang)3個典型熱液區(hydrothermal fields)-溫度範圍 $34.6\sim 88.2^{\circ}\text{C}$ 、16個溫泉的水化學特徵和微生物群落組成。根據含水層岩性與構造上的差異,溫泉的水化學成分顯示出主要由水岩(water-rock)相互作用所形成主要元素與微量元素(如 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 F^{-} /B)分佈明顯之區域特定模式,其微生物的群落聚集是與溫度而非和具有明顯水文地質特徵的地理位置有關,而依據其群落的組成確定了低溫($< 45^{\circ}\text{C}$)、中溫($55\sim 70^{\circ}\text{C}$)與高溫

(>70°C) 3 個不同的溫度分布族群。變形菌門(Proteobacteria)和硝化螺旋菌門(Nitrospirae)是低溫溫泉中的優勢門(phyla)，而在中、高溫溫泉中，它們主要由產水菌門(Aquificae)、異常球菌-棲熱菌門(Deinococcus-Thermus)、熱脫硫杆菌門(Thermodesulfobacteria)、熱袍菌門(Thermotogae)和藍菌門(Cyanobacteria)所組成，這項研究有助於我們了解不同熱液區溫泉微生物群落的分布狀態(Guo、Wang 及 Sheng 等、2020)。

印度 Tarabalo 溫泉中分離之嗜熱細菌通過形態學、生化和 16S rRNA 基因定序，將具有耐高溫能力的細菌鑑定為芽孢桿菌屬(*Bacillus* sp)，BLAST 搜索分析該序列與液化澱粉芽孢桿菌(*Bacillus amyloliquefaciens*)具有最大同源性(99%相似性)。結論：分離出的嗜熱菌芽孢桿菌屬可以做為耐熱蛋白酶(thermostable protease)的來源並可開發為“製藥”和“工業”方面的應用(Panda、Sahu 及 Tayung、2013)。

在溫泉微生物生物探勘(bioprospecting)的商業應用方面，一些耐熱的酶像是脂解酶(lipase)、蛋白酶(protease)、幾丁質酶(chitinase)、澱粉酶(amyase)等都是具有著“生物科技”應用上的潛力(Poddar 及 Das、2018)。“雅漾”溫泉水中 *Aquaphilus dolomiae*(一種具有鞭毛的奈瑟菌)微生物之“生物科技”萃取物 I-modulia 除了具有調節異位性皮膚炎患者角質細胞發炎及免疫反應的能力外，尚可抑制人類肥大細胞的去顆粒化作用以舒緩病症(degranulation)(Nguyen、Chol 及 Maitre 等、2020)。

抗生素的濫用所引發不同抗藥性菌株的結果已造成人類健康照顧與疾病治療上的危害，所以，如何尋求並開發出些新一代對抗頑強細菌之有效抗生素也成為一件刻不容緩之工作... 不少的醫學研究發現：溫泉中的某些微生物(microorganisms)會分泌抗菌化合物(antimicrobial compounds)，像是從溫泉的真細菌(eubacteria)中便可分離出鐮孢菌素 B(Fusaricidin B)，另印度亦成功地從溫泉中分離出 73 種具有抗耐甲氧西林金黃色葡萄球菌(Methicillin-resistant *Staphylococcus aureus*, MRSA)及抗萬古黴素腸球菌(vancomycin-resistant *Enterococcus*, VRE)活性的細菌(Mahajan 及 Balachandran、2017)。

參考文獻

1. 阿岸 祐幸、田中 宗隆、浜田 真之、飯島 裕一、大塚 吉則、甘露寺 泰雄... 綿拔 邦彦 (2012) • 溫泉の百科事典 • 東京：丸善出版株式会社。
2. Badhai, J., Ghosh, T.S., & Das, S.K. (2015). Taxonomic and functional characteristics of microbial communities and their correlation with physicochemical properties of four geothermal springs in Odisha, India. *Front Microbiol*, Oct 26;6, 1166.
3. Guo, L., Wang, G., Sheng, Y., Sun, X., Shi, Z., Xu, Q., ... Mu, W. (2020). Temperature governs the distribution of hot spring

microbial community in three hydrothermal fields, Eastern Tibetan Plateau Geothermal Belt, Western China. *Sci Total Environ*, Jun 10; 720, 137574.

4. Huang, Q., Jiang, H., Briggs, B.R., Wang, S., Hou, W., Li, G., ... Wu, G., ... Dong, H. (2013). Archaeal and bacterial diversity in acidic to circumneutral hot springs in the Philippines. *FEMS Microbiol Ecol*, Sep; 85(3), 452-464.
5. Kato, S., Takano, Y., Kakegawa, T., Oba, H., Inoue, K., Kobayashi, C., ... Yamagishi, A. (2010). Biogeography and biodiversity in sulfide structures of active and inactive vents at **deep-sea** hydrothermal fields of the Southern Mariana Trough. *Appl Environ Microbiol*, May; 76(9), 2968-2979.
6. Mahajan, G.B., & Balachandran, L. (2017). Sources of antibiotics: Hot springs. *Biochem Pharmacol*, Jun 15; 134, 35-41.
7. Miroshnichenko, M.L. (2004). Thermophilic microbial communities of **deep-sea** hydrothermal environments. *Mikrobiologiya*, Jan-Feb; 73(1), 5-18.
8. Miroshnichenko, M.L., & Bonch-Osmolovskaya, E.A. (2006). Recent developments in the thermophilic microbiology of **deep-sea** hydrothermal vents. *Extremophiles*, Apr; 10(2), 85-96.
9. Najar, I.N., Sherpa, M.T., Das, S., Das, S., & Thakur, N. (2018). Microbial ecology of two hot springs of Sikkim: Predominate population and geochemistry. *Sci Total Environ*, Oct 1; 637-638, 730-745.
10. Nguyen, T., Chol, B., Maitre, M., Ravard-Helffer, K., Farinole, F., Lestienne, F., ... Castex-Rizzi, N. (2020). Additional pharmacological activity of I-modulia and generation of two newly designed extracts of *Aquaphilus dolomiae* culture for dermocosmetic actives. *J Eur Acad Dermatol Venereol*, Aug; 34 Suppl 5, 27-29.
11. Panda, M.K., Sahu, M.K., & Tayung, K. (2013). Isolation and characterization of a thermophilic *Bacillus* sp. with protease activity isolated from hot spring of Tarabalo, Odisha. India. *Iran J Microbiol*, Jun; 5(2), 159-165.
12. Poddar, A., & Das, S.K. (2018). Microbiological studies of hot springs in India: a review. *Arch Microbiol*, Jan; 200(1):1-18.
13. Saghatelyan, A., Margaryan, A., Panosyan, H., & Birkeland, N.K. (2021). Microbial Diversity of Terrestrial Geothermal Springs in

Armenia and Nagorno-Karabakh: A Review. *Microorganisms*, Jul
9;9(7), 1473.