

生物復原新選擇—混養海綿的發展潛力

A new Choice for Bioremediation- The Potential Application of Marine Sponges
in Aquaculture Systems

周雅嵐 湯慕婷 劉莉蓮 國立中山大學海洋科學系

蘇焉 國立澎湖科技大學海洋運動與遊憩系

Chou, Yalan Tang, Mu-ting Liu, Li-Lian Department of Oceanography, National Sun Yat-sen University

Su, Yeng Marine Sports and Recreation Department, National Penghu University of Science and Technology

摘要

生物復原是指利用各種生物降低環境汙染的環境管理方法。二枚貝、多毛類、海鞘與海綿等濾食性生物皆是可應用的材料，由於海綿可吸收的物質與顆粒多樣性高，又可產生抗癌的天然物或製成浴用海綿，是相當具有應用潛力的生物復原材料。

生物復原

所謂生物復原(Bioremediation)是指利用各種生物的特性，降低環境汙染與傷害的環境管理方法，例如開採煤礦時，利用濕地植物吸收礦區流出的酸性洗水，以降低對環境的影響，已經是一個相當普遍的做法；又如，殺蟲劑或是除草劑中所含中氯酚(Chlorophenol)，是一種經常使用的化學製品，很容易吸附於土壤或是湖泊的底泥表面，或經由水體進入生物體內，造成人類或動物肝臟病變，更甚者還會引發癌症與免疫系統的傷害，這類化合物目前則是使用革蘭氏陽性桿菌 *Rhodococcus chlorophenolicus*, DSM 43826和 *Rhodococcus* sp. CP - 2, DSM 4598兩種微生物，將之分解清除(Valo *et al.* 1991)；除了植物與微生物之外，水生無脊椎動物如二枚貝、多毛類、海鞘以及海綿等等，也是可應用在生物復原的材料。這些底棲固著生活的濾食動物，有高效率的濾食行為，能清除水體中的各種顆粒，由溶解性有機碳、0.2 μ m的細菌到50 μ m的微藻顆粒等懸浮粒子無所不包。

二枚貝中常見的牡蠣，透過濾食，一方面可以吸收水中顆粒，獲得營養成長；另一方面也同時減少水體中陸源沉積物、浮游性微細藻類的含量和水中營養鹽濃度；澳洲史提芬斯港(Port Stephens)的研究顯示，珍珠貝可以有效地移除港內重金屬物質，其中又以鋇(Sr)的移除量最為顯著，每公噸珍珠貝至少可移除703公克的鋇，另外，這些珍珠貝還有效降低水體中營養鹽汙染的效果，例如，每公噸的珍珠貝可以吸收將近7.5公斤的氮與0.55公斤的磷，達到水質淨化、避免優養化的效果(Gifford *et al.* 2005)。另外，目前也知道至少有兩種櫻鰓蟲

(*Branchiomma luctuosum*和*Sabella spallanzanii*)可以過濾海水中的細菌。研究人員發現，櫻鰓蟲濾食一段時間後，體內的細菌含量會比環境水體中的細菌量高出許多。尤其對異營性細菌、弧菌、大腸桿菌以及鏈球菌都有良好的吸收能力(Stabili *et al.* 2006)；海鞘除了吸收細菌、微藻等小型顆粒之外，甚至還能夠吸收水中的陰離子界面活性劑，當皺瘤海鞘(*Styela plicata*)和細菌置於水體一段時間之後，有皺瘤海鞘的海水中陰離子界面活性劑濃度只剩下對照組的一半(Cestone *et al.* 2008)，可見各種生物吸收不同物質的能力不盡相同，而海綿，正是近來海洋生物復原物種的新選擇之一。



圖1 在珊瑚礁的間隙、孔穴之中，除了有魚群躲藏，頂部紅色、紫色、黃色、橘色、白色、黑色的附著物，大多都是各種各樣的海綿生物。(周雅嵐 攝)

海綿簡介

海綿的形態很簡單，體內只有表皮細胞(epidermal cell)、入水口周圍的孔細胞(porocyte)、中膠層中的變形細胞(amoebocyte)、與內層幫助水流流動與吸收懸浮顆粒的襟細胞(choanocyte)組成，通常生活在硬質的礁盤或是岩石上面，也有一些種類海綿半埋於沙子中。海綿身體的表面大多是一些肉眼可見或是更小型的小孔，稱為入水孔，另外還有一個或多個

較大的孔洞，稱為出水孔。多個出水孔的海綿身體結構較為複雜，這些大小不一的孔洞互相連接像血管一樣，可將海水吸入，並將水體中的懸浮顆粒帶入體內，水中的顆粒經過通道時，通道中整齊排列的襟細胞藉由揮動鞭毛，便可將水中的顆粒送進入體內進行分解、消化，並吸收顆粒的養分。

海綿動物門包含鈣質海綿綱(Calcarea)、玻璃海綿綱(Hexactinellida，又稱為六放海綿綱)以及尋常海綿綱(Demospongiae)。目前估計全世界約有8000多種，分布相當地廣泛，不論在淡水或是海水中，湖泊、潮間帶、珊瑚礁海域，甚至深海外海域都可發現。在地中海硬底質生態系，海綿的覆蓋率為24~45%，在印尼珊瑚礁區海綿覆蓋可達15~55%，深海外海綿密度更達70~90%。由於海綿體內經常有大量共生細菌，需氧量極高，因此多生活在水流循環良好的地方。另外，海綿偏好陰暗環境，覆蓋率在珊瑚礁洞穴或是珊瑚礁凹陷處的陰暗面，通常都比礁石的向陽面高(圖1)。經過估算，珊瑚礁環境中，每平方公尺珊瑚礁隱藏有8平方公

尺的海綿內在表面積，這顯示海綿的生物量在海洋中可能很高，也可能是協助珊瑚礁生態平衡的主要角色之一。

海綿的各種應用價值

人類利用海綿的歷史可追溯至數千年前的埃及以及希臘，自西元前八百年，古羅馬帝國時代就已有文獻記載浴用海綿(bath sponge)的實用價值(Voultsiadou, 2007)；利用的方式五花八門，像是徒手潛水者的耳塞、戰士頭盔、盔甲的軟墊內襯、畫筆、家用方面的清洗碗盤和洗澡，醫療方面的清洗、乾燥、沾藥塗抹傷口，甚至混合海藻或酒治療女性生殖管道的感染等。這些早期的用途，目前大多已不再使用，但在追求「天然的最好」的風潮下，浴用海綿的商業養殖在今日仍佔有一席之地，以提供市場需求。浴用海綿，主要是指地中海區大量生長的*Spongia officinalis*與*Hippospongia* sp.等物種死後所留下的海綿絲，在衛浴用品上是屬於高價位產品，目前在希臘某些地區，街頭仍有大量店家販賣(圖2)，而過去兩百年來，海綿採集的区域已逐漸向外擴張，從過去的地中海區域，延伸至西大西洋與太平洋的熱帶海域，如此大的採捕範圍，顯示市場有相當大量的需求，或是地中海海綿的密度可能已經下降，而不足以提供市場需要。

自1990年以來，海綿產品已開始朝新的方向發展，目前著重在有醫藥潛力的二次代謝產物。多數海綿體內雖有堅硬的矽質或鈣質的骨骼結構，可做為禦敵之用，但還是有不少動物以海綿為食，主要的掠食者有魚類、海龜與海蛞蝓等。由於海綿除了胚胎時期可能會在水層中漂流一段之間之外，之後便在底質上變態、生長，從此固著在原地生活，當遭遇天敵啃食時，海綿體內大量的二次代謝物有些會散發出攻擊者不喜愛的味道，有的則是含有毒性。在實際應用方面，海綿萃取出的化學物質如軟海綿酸(又稱岡田酸okadaic acid)便是一種細胞毒素，這種毒素會抑制老鼠平滑肌的收縮、造成細胞死亡(Rajesh *et al.* 1999)，另外還有N-acetyl-sugar-specific lectin (HOL-I)和N-acetyllactosamine-specific lectin (HOL-II)有殺死癌細胞的功用(Kawagishi *et al.* 1994)；臺灣也有不少學者致力於海綿天然物的研究，包含南臺灣的海洋生物博物館與中山大學，他們對海綿的研究包括生物活性檢測、抗癌化合物和天然物分離、純化、合成等。



圖2 希臘街頭販售的浴用海綿(*Hippospongia* sp.)(黃彥銘 攝)

雖然目前尚不了解這些二次代謝物是由海綿自身或是其體內的共生菌合成，但這些天然化合物除了幫助海綿生長、禦敵，還可用來攻擊其他底棲生物，使海綿在寸土寸金的珊瑚礁生態系中獲得競爭優勢，甚至還有抵抗細菌感染的功效。此外，科學家也在海綿體內發現光合細菌，這些光合細菌就算沒有光線直接照射，也能透過海綿骨針傳導光能進行後續的光合作用，海綿的骨針比人工製造的光纖更具有彈性，未來除了可以應用於一般通訊或娛樂，或許也可應用在醫學領域的仿生材料，建構人類的骨骼或是組織。

由歷史觀之，海綿產業獲利頗高，1913到1938年間，佛羅里達區域海綿的年採集量超過了40萬磅(大約180噸)，創造約100萬美元的獲利；利比亞區域，浴用海綿的生產高峰則是在1920年代，每年大約有70噸的產量，而目前的產量則已降至10噸以下。造成海綿產量下降的原因不外乎過度捕撈，以及定期爆發的海綿疾病，現今雖有浴用海綿的養殖，但仍供不應求，以2003年為例，國際海綿交易量約2,127 噸，而全球浴用海綿養殖的產量也不過為55噸而已(FAO 2004)。另外，目前已萃取出數千種海綿二次代謝物，其中有些已開發成為抗癌、抗病毒或是抗過敏的藥物，然而這些二次代謝物的濃度很低，通常每公斤(乾重)只有不到1毫克的萃取量，所以採集野生海綿製造藥物並不實際，此時唯有海綿養殖才可提供產業活路。

海綿與生物復原

在浴用海綿的養殖過程中，研究人員發現海綿有高效率的濾食能力，繼而轉向評估海綿解決沿岸養殖環境優養化的潛力，海綿因而成為最近生物復原研究中頗為熱門的物種。舉例來說，將浴用海綿(*S. officinalis*)置於含有各種重金屬的水體中養殖一段時間，水中鐵、錳、銅、鋅、鉛、鉻以及鎘的濃度均顯著地降低。除了重金屬之外，海綿*Hymeniacidon perleve*對養殖水體中大腸桿菌(*Escherichia coli*)和弧菌(*Vibrio anguillarum* II)的清除率皆超過80%(Perez *et al.* 2005)，而養殖水體中其他的異營性細菌以及鏈球菌等，亦有菌數下降的趨勢(Stabili *et al.* 2008)。另外，海綿*Theonella swinhoei*也能藉由濾食，利用溶解性與顆粒性有機碳，作為其營養來源(Yahel *et al.* 2003)。

研究顯示，海綿濾食顆粒的大小範圍介於0.1~70 μm 之間(Ribes *et al.* 1999)，它們不只吸收溶解性有機碳、細菌等顆粒，甚至水中的浮游性微藻也不放過，只是各種海綿各有喜好，只挑選適合自己的食物。由上可知，海綿的食物種類與其濾食效率有關，也就是說，若是只養殖單一種類，就只有一大小範圍內的水中顆粒會被捕食；此外，食物的濃度、養殖區的環境因子、海綿內部構造以及共生細菌的多寡也會影響其濾食效率。

體內共生細菌量高的海綿統稱為「HMA 海綿」，HMA 是指高微生物含量海綿 (high microbial abundance sponge)，這種海綿體內的中膠層厚實，水道系統狹長，結構複雜，濾食的速度也比較慢(圖3)，通常HMA 海綿體內的細菌含量占海綿總體積的40% 以上，有的甚至高達60%；反之，細菌量低的海綿稱為LMA 海綿，也就是低微生物含量海綿 (low microbial abundance sponge)，它們的結構較為鬆散，形態可隨外界水流變化而改變，濾食率較HMA 高約0.5-1倍之多 (Weisz *et al.* 2008)(圖4)；共生細菌量高的海綿(HMA)，能量來源主要由共生菌提供，而細菌量低的海綿(LMA)缺乏內部能量來源，所以濾食是主要獲得能量的途徑，因此，各類海綿攝食效率各有不同。

另外也有研究指出，海綿體內共生的微生物除了有多種的異營性細菌、厭氧菌、古細菌以及化學自營性細菌之外，還有藍綠藻、單胞藻等。細菌能透過海綿吸入海水裡頭溶解的營養鹽生存，並將這些物質轉變成營養物質供海綿利用。相對來說，海綿體內的共生藻研究較少，但透過無光實驗的研究發現，當海綿體內共生藻的作用力下降之時，水中溶解性無機氮 (Dissolved Inorganic Nitrogen, DIN) 移除量降低 (Davy *et al.*, 2002)，雖然還不能確定海綿-共生藻的作用增強多少DIN的吸收，但肯定的是，海綿體內細菌以及共生藻的交互作用必定增強了氮循環的強度。

總結

目前應用在生物復原的水生生物有藻類、水生植物、貝類和海綿，它們清除水中營養鹽、溶解性有機物、有機污染物、金屬污染物、細菌、藻華和懸浮物質的能力各不相同(表一)。以海綿與雙殼貝相比，海綿捕捉的顆粒大小介於0.1-70 μm 之間，較雙殼貝介於1-45 μm 之間的顆粒範圍更廣(表二)。過去養殖業者多以雙殼貝與養殖目標物種混養，未見海綿之混養應用，主要原因可能是海綿對養殖業者而言是相當陌生的物種。然而，海綿普遍存在於臺灣週遭海域，除具有生物復原清除污染的功效之外，還有發展天然藥物、天然清潔產品等高單價的附加價值，且雙殼貝類的生物若是作為重金屬污染的移除者，其供給人類食用的附加價值可能需要再評估。而海綿在適合的環境中，就算被撕裂成小塊，仍能快速癒合傷口，恢復成長；目前養殖業者將海綿切塊之後放入籠具，沈至五公尺以下的水層中，或是使用尼龍繩將海綿吊於水層當中，切塊的海綿便能自行生長，都是相當簡單而方便的養殖方式，有這麼多好處與附加價值，海綿當然可能是養殖產業混養物種的新選項。

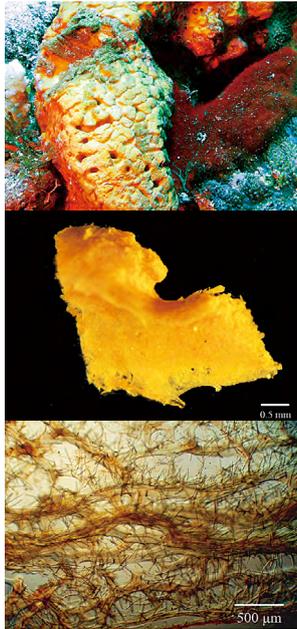


圖3 海綿 (*Agelas* sp.)，質地富有彈性、厚實，組織緻密，海綿絲與骨針排列有序(周雅嵐攝)。

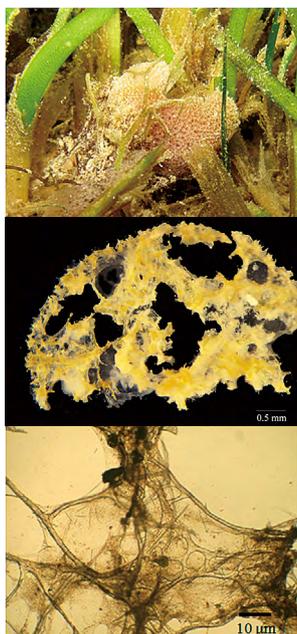


圖4 海綿 (*Niphates* sp.)，外觀孔隙多且鬆散，組織分散，海綿絲與骨針排列無規則(周雅嵐攝)。

表一、各種水生生物清除環境顆粒與污染物質的能力與養殖附加價值

	藻類	植物	貝類	海綿
營養鹽	+	+	-	+
溶解性有機物	+	+	+	+
有機污染物	+	+	+	+
金屬污染物	+	+	+	+
細菌	-	-	+	+
藻華	-	-	+	+
清除懸浮物質	+	+	+	+
附加價值	食用	食用	食用	藥用+浴用+清潔

(Streit and Stumm 1993; Liu *et al.* 1996; Gifford *et al.* 2005; Stabili *et al.* 2008)

表二、雙殼貝與海綿清除力比較

	雙殼貝	海綿
濾食顆粒(μm)	1~45	0.1~70
食物種類	細菌、微藻、有機顆粒、溶解性有機物	細菌、微藻、有機顆粒、溶解性有機物
懸浮物	排出	有些種類保留體內
清除率(ml/h·gDW)	牡蠣 700~117,000 文蛤 600- 92,000 (15~28°C)	34~16,000 (25°C)
用途	食用	提取天然物、製作清潔用品

(Reiswig 1974; Gifford *et al.* 2005)

參考文獻

Cestone, A., Natale, M., di Rosa, S. 2008. Toxicity and biodegradation of the LAS surfactant 1-(p-sulphophenyl) nonane in presence of the ascidian *Styela plicata*. *Chemosphere* 71(8): 1440-1445.

Davy, S.K., Tautman, D.A., Borowitzka, M.A. and Hinde, R. 2002. Ammonium excretion by a symbiotic sponge supplies the nitrogen requirements of its rhodophyte partner. *Journal of Experimental Biology* 205: 3505-3511.

Gifford, S., Dunstan, R.H., O'Connor, W. and Macfarlane, G.R. 2005. Quantification of in situ nutrient and heavy metal remediation by small pear oyster (*Pinctada imbricata*) farm at Port Stephens, Australia Marine Pollution Bulletin 50(4): 417-422.

FAO Fishery Information, Data and Statistics Unit. 2004. Collation, Analysis and Dissemination of Global and Regional Fishery Statistics. FAO, Rome. http://www.fao.org/figis/servlet/static?dom=org&xml=FIDI_STAT_org.xml.

Kawagishi, H., Yamawaki, M., Isobe, S., Usui, T., Kimura, A. and Chiba, S. 1994. Two lectines from the marine sponge *Halichondria okadai*. An N-acetyl-sugar-specific lectine (HOL-I) and an N-acetyllactosamine-specific lectine (HOL-II). *The Journal of Biological Chemistry*. 269: 1375-1379.

Liu, C.B., Lin, L.P., and Su, Y.C. 1996. Utilization of *Chlorella vulgaris* for uptake of nitrogen, phosphorus and heavy metals. *Journal of the Chinese Agricultural Chemical Society*. 34: 331-43.

Perez, T., Longer, D., Schembri, T., Rebouillon, P. and Vacelet, J. 2005. Effects of 12 years' operation of a sewage treatment plant on trace metal occurrence within a Mediterranean commercial sponge (*Spongia officinalis*, Demospongiae). *Marine Pollution Bulletin* 50: 301-309.

Rajesh, D., Schell, K. and Verma, A.K. 1999. Ras Mutation, Irrespective of Cell Type and p53 Status, Determines a Cell's Destiny to Undergo Apoptosis by Okadaic Acid, an Inhibitor of Protein Phosphatase 1 and 2A. *Molecular Pharmacology* 56: 515-525.

Reiswig, H.M. 1974. Water transport, respiration and energetics of three tropical marine sponges. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*. 14: 231-249.

Ribes, M., Coma, R. and Gili, J.M. 1999. Natural diet and grazing rate of the temperate sponge *Dysidea avara* (Demospongiae, Dendroceratida) throughout an annual cycle. *Marine Ecology Progress Series* 176: 179-190.

Stabili L., Licciano, M., Giangrande, A., Fanelli, G. and Cavallo, R.A. 2006. Filtering activity of *Spongia officinalis* var. adriatica (Schmidt) (Porifera, Demospongiae) on bacterioplankton: Implications for bioremediation of polluted seawater. *Water Research* 40: 3083-3090.

Stabili, L., Licciano, M., Longo, C., Corriero, G. and Mercurio, M. 2008. Evaluation of microbiological accumulation capability of the commercial sponge *Spongia officinalis* var. adriatica (Schmidt) (Porifera, Demospongiae). *Water Research* 42: 2499-2506.

Streit, B. and Stumm, W. 1993. Chemical Properties of Metals and the Process of Bioaccumulation in Terrestrial Plants. In Markert Bernd (eds): *Plants as Biomonitors: Indicators for Heavy Metals in the Terrestrial Environment*. VCH Cambridge.

Valo, R., Häggblom, M., Salkinoja-Salonen, M. 1991. Bioremediation of Chlorophenol-Contaminated Ground Water. *Organic Micropollutants in the Aquatic Environment*. pp 211-217

Voultsiadou, E. 2007. Sponges: an historical survey of their knowledge in Greek antiquity. *Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom* 87: 1757-1763

Weisz, J. B., Lindquist, N. and Martens, C. S. 2008. Do associated microbial abundances impact marine demosponge pumping rates and tissue densities? *Oecologia* 155(2): 367-376.

Yahel, G., Sharp, J. H., Marie, D., Hase, C. and Genin, A. 2003. In situ feeding and element removal in the symbiont-bearing sponge *Theonella swinhoei*: Bulk DOC is the major source for carbon. *Limnology and Oceanography* 48(1): 141-149.