

光合細菌在微生物燃料電池中的應用研究進展

吳義誠^{1,2} 王澤傑^{2,3} 傅海燕¹ 趙峰^{2*}

(1. 廈門理工學院環境科學與工程學院 福建 廈門 361024)

(2. 中國科學院城市環境研究所 福建 廈門 361021)

(3. 中國科學院青島生物能源與過程研究所 山東 青島 266101)

摘要：微生物燃料電池(Microbial fuel cells, MFCs)降解污染物的同時產生電能，受到廣泛關注。光合細菌在 MFCs 領域的應用實現了污水處理、CO₂ 捕捉、光電轉換等多重功能，並顯示出了良好的產電特性。本文根據光合細菌在 MFCs 中所起作用的不同對其產電機理進行評述，並在此基礎上分析了光照對光合細菌型 MFCs 產電性能的影響；針對當前研究的不足與面臨的問題，提出了今後光合細菌在 MFCs 領域的應用前景與發展方向。

關鍵字：微生物燃料電池, 光合細菌, 光照, 生物能源

Progress on application of photosynthetic bacteria in microbial fuel cells

WU Yi-Cheng^{1,2} WANG Ze-Jie^{2,3} FU Hai-Yan¹ ZHAO Feng^{2*}

(1. School of Environment Science and Engineering, Xiamen University of Technology, Xiamen, Fujian 361024, China)

(2. Institute of Urban Environment, Chinese Academy of Sciences, Xiamen, Fujian 361021, China)

(3. Qingdao Institute of Bioenergy and Bioprocess Technology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao, Shandong 266101, China)

Abstract: Microbial fuel cells (MFCs) are receiving wide attentions as a promising method of producing electricity through degradation of pollutants by microorganism. MFCs with photosynthetic bacteria as biocatalyst showed high capability of electricity generation, and achieved multiple functions of sewage treatment, capture of carbon dioxide, conversion of light energy into electricity, as well as recycling of valuable photosynthetic bacteria biomass. Based on the role of photosynthetic bacteria in the system, the ability of electricity production and electron transfer mechanism were reviewed. Moreover, the effects of light on the performance of MFCs inoculated with photosynthetic bacteria were also discussed. Finally the perspective of application of photosynthetic bacteria in MFCs was proposed.

Keywords: Microbial fuel cells, Photosynthetic bacteria, Light, Bioenergy

Foundation item: Young Teacher project of Fujian Province (No. JA15372); National Natural Science Foundation of China (No. 41471260)

*Corresponding author: Tel/Fax: 86-592-6190766; E-mail: fzha@iue.ac.cn

Received: December 25, 2015; **Accepted:** July 11, 2016; **Published online** (www.cnki.net): July 19, 2016
基金專案：福建省中青年教師教育科研專案(No. JA15372)；國家自然科學基金專案(No. 41471260)

*通訊作者：Tel/Fax：86-592-6190766；E-mail：fzha@iue.ac.cn

收稿日期：2015-12-25；接受日期：2016-07-11；優先數位出版日期(www.cnki.net)：2016-07-19

社會經濟快速發展，環境日趨惡化，化石能源逐漸走向枯竭，污染物资源化技術逐漸成為人們研究的熱點領域。微生物燃料電池(Microbial fuel cells, MFCs)通過電化學活性微生物的代謝降解污染物並回收能源，具有環境友好及利於可持續發展的特點，受到越來越廣泛的關注^[1-2]。

早在 1911 年，英國植物學家 Potter 就發現微生物通過代謝有機物產電的現象，開啟了 MFCs 研究序幕^[3]。近年來，基於電化學活性微生物代謝的多樣性，以 MFCs 為基礎，開發了包括淡化海水的微生物脫鹽電池^[4]、產氫的微生物電解池^[5]、捕捉 CO₂ 的光合微生物碳捕捉電池^[6]等微生物和電化學結合的衍生技術。應用光合微生物構建光微生物燃料電池(Photo microbial fuel cells, Photo-MFCs)實現了光能到電能的轉化。光合細菌是一類能進行不放氧光合作用的原核生物，利用光合細菌構建的 Photo-MFCs 同步實現污水處理、CO₂ 捕捉、產電等多重功能，擴大了廢水資源化程度^[7-9]。

光合微生物主要包括光合細菌和微藻，微藻應用於 MFCs 陰極提供電子受體目前已有較多的報導，而光合細菌既能應用於 MFCs 陽極分解有機污染物提供電子，還能應用於 MFCs 陰極作為電子受體，其代謝途徑的多樣為 MFCs 功能的擴展提供了條件^[10-11]。本文綜述了近年來光合細菌在 MFCs 領域的研究，並就光合細菌在 MFCs 領域的應用趨勢

進行探討。

1 光合微生物燃料電池

MFCs 是一種利用電化學活性微生物的代謝將廢水中污染物蘊含的化學能轉化為電能的廢水處理技術，由陽極、陰極和膜組成。污染物在陽極被電化學活性微生物氧化，釋放電子和質子，電子通過陽極和外電路傳遞至陰極電子受體，而質子通過半透膜到達陰極，形成一個閉合回路實現污染物降解和產電，傳統 MFCs 工作原理如圖 1A 所示^[12]。光合微生物應用於 MFCs 領域可構建 Photo-MFCs，實現污染物降解的同時將光能轉化為電能，受到科研工作者的重視^[13-14]。產電光合微生物是 Photo-MFCs 能量轉換的基礎，也是其功能實現的關鍵^[15]。接種於 Photo-MFCs 陽極的光合細菌通過光合作用和呼吸作用均能為 Photo-MFCs 提供電子來源，而陰極生長微藻在光照條件下能夠為 Photo-MFCs 提供充足的氧氣作為電子受體，Photo-MFCs 工作原理如圖 1B 所示^[16]。

2 光合細菌在 MFCs 領域的基礎研究

光合細菌種類繁多，代謝途徑多樣，在 MFCs 陰極和陽極均有應用，但其在陽極應用相對更為廣泛。

2.1 光合細菌在 MFCs 陽極應用

陽極電化學活性微生物是一類能將代謝底物

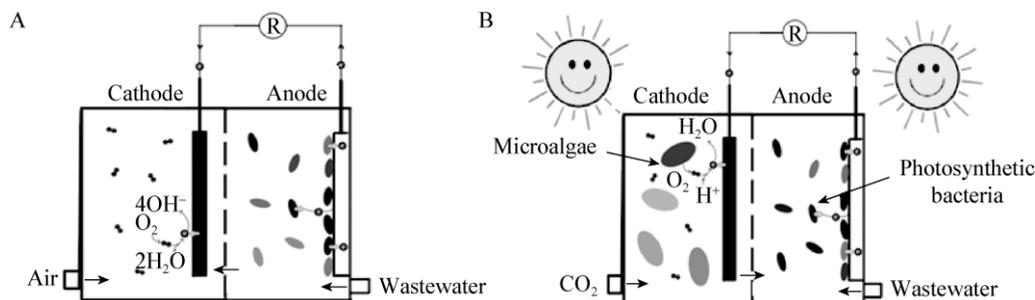


圖 1 微生物燃料電池示意圖^[16]

Figure 1 Schematic diagrams of MFCs^[16]

注：A：傳統 MFCs；B：Photo-MFCs.

Note: A: Traditional MFCs; B: Photo-MFCs.

Tel: 010-64807511; E-mail: tongbao@im.ac.cn; <http://journals.im.ac.cn/wswxtbcn>

產生的電子傳遞到陽極的微生物，是 MFCs 功能實現的關鍵，決定著 MFCs 的產電性能。光合細菌代謝途徑多樣，能進行不產氧的光合作用，菌體廣泛應用於餌料、飼料、菌肥等生產^[9]。光合細菌應用於 MFCs 領域，實現廢水處理的同時產生電能並收穫光合細菌，提高了廢水資源化程度。

光合細菌在陽極產電方式主要有兩種：(1) 通過自身光合作用或呼吸作用產生電子直接產電；(2) 通過光合作用產生的氫氣作為陽極底物間接產電。微生物是影響 MFCs 產電性能的關鍵因素之一，按照 MFCs 中接種的微生物的種屬是否單一，MFCs 分為單菌 MFCs 和混菌 MFCs。

2.1.1 光合細菌純培養物在 MFCs 陽極的應用：光合細菌光反應中心色素蛋白複合體在光照條件下激發至激發態，激發態的色素蛋白複合體具有更強的還原性，電子更容易從光合細菌傳遞到電極，從而提高 MFCs 的產電性能。早在 1984 年，Bark 等^[17]

將紅螺菌 *Rhodospirillum rubrum* 接種於 MFCs 陽極，構建的 Photo-MFCs 在暗條件下獲得了 0.96 V 的開路電壓及 750 mA/m² 的短路電流。

在 2003 年，Chaudhuri 等^[18]從佛吉尼亞的牡蠣海灣沉澱物中分離的光合細菌 *Rhodospirillum rubrum* 是最先被報導可以使用複雜有機物的電化學活性光合細菌，可以氧化葡萄糖、蔗糖、乳糖和木糖等有機物實現長期穩定地產電，且庫倫效率在 80% 以上，在富含碳氮化合物廢棄生物質的開發利用方面具有較大潛力。祝學遠等^[19]利用 *R. ferrireducens* 構建單室空氣陰極 MFCs，發現該 MFCs 電能的輸出主要依賴附着在電極表面的菌膜，而與懸浮在溶液中的細菌及溶液中的其他物質基本無關。Xing 等^[20]分離到的沼澤紅假單胞菌 *R.*

palustris DX-1 有很好的產電性能，能利用廣泛的底物產電；接種該菌的單室空氣陰極 MFCs (電極面積約 15 cm²) 功率密度高達 2 720 mW/m²，高於相同裝置接種混合菌群的 MFCs。基於 *R. palustris* DX-1 多樣的代謝途徑、廣泛的底物來源、相對較高的產電性能等諸多優勢，該菌具有應用於 Photo-MFCs 實際工程的潛力。吳義誠等^[21]採用光

照富集及厭氧劃線法從污水廠二沉池採集的活性污泥分離到一株光合細菌 YC-1，以 YC-1 為雙室 MFCs 的陽極接種物氧化乙酸鈉，鐵氰化鉀作為陰極電子受體，外載為 1 000 Ω 時，電池穩定運行時輸出電壓為 0.58 V，且輸出電壓不受光源光譜影響。曹效鑫^[22]計算以碳布為電極構建的 MFCs，陽極接種活性污泥，忽略電極、電解液、質子交換膜等的內阻條件下，其輸出最大功率密度理論值為 19 369 mW/m²。Cho 等^[23]以類球紅細菌 *Rhodospirillum rubrum* 為陽極構建的單室空氣陰極 MFCs 具有較好的產電性能，光照條件下輸出的最大功率密度最高也只有 7 900 mW/m²，說明目前光合細菌構建的 MFCs 產電性能的提高還有較大的空間。

2.1.2 光合細菌混合培養物在 MFCs 陽極的應用：單菌 MFCs 有助於研究微生物與電極間的電子傳遞機制，但混菌 MFCs 操作簡單易行，便於實際應用，其性能往往優於相同底物和運行條件下的單菌 MFCs。儘管很多 MFCs 採用光合細菌純培養物，但自然環境中的微生物群落更適合於降解有機廢物產電^[24-26]。Cao 等^[27]發現光照使接種光合細菌混合培養物的 Photo-MFCs 功率密度提高了 7 倍。吳義誠等^[28]以恒電位及光照富集的光合細菌混合培養物為陽極接種物構建的雙室 Photo-MFCs 以含乙酸鈉的人工廢水為底物，輸出電壓為 207 mV (外阻 R=1 000 Ω)，以養豬廢水為底物，電池穩定輸出電壓為 161 mV，COD、氨氮及總磷去除率分別為 91.8%、90.2% 和 81.7%。Xing 等^[29]研究單室空氣陰極 MFCs 陽極生物膜微生物群落結構發現 *R. palustris* ATCC 17001 及 *R. sphaeroides* PSB07-19 在陽極生物膜中含量豐富。Chandra 等^[30]在單室空氣陰極 MFCs 陽極接種河水，光照富集光合細菌和微藻構建的菌藻混合陽極具有較好的產電性能，COD 的去除率達 96.12%，且對揮發性有機酸也有很好的去除效果。

2.1.3 光合細菌產氫產電方式：光合細菌依靠僅有的光合系統 I 在限氮等產氫條件下，光氧化有機質產生電子，並依靠固氮酶將 H⁺還原為 H₂。光合細

菌產氫具有較高的理論效率，並能利用較寬的光波帶，且不存在放氧過程，是富有應用潛力的產氫系統^[31-32]。

在光合細菌通過產氫間接產電過程，氫氣利用方式分為原位利用和異位利用。陽極培養的光合細菌光合產氫，氫氣陽極室氧化實現原位產電。Cho 等^[23]在單室空氣陰極 MFCs 中接種光合細菌 *R. sphaeroides*，其光合作用產生的氫氣原位利用，電池輸出的功率密度達 790 mW/m²。Rosenbaum 等^[33]採用混合放氫系統，在 MFCs 陽極同時接種大腸桿菌 *Escherichia coli* K12 和光合細菌 *R. sphaeroides*，大腸桿菌 *E. coli* K12 發酵葡萄糖產生有機酸和乙醇，產生的這些易於降解的小分子有機物代謝產物被光合細菌 *R. sphaeroides* 於光照條件下氧化，產生的氫氣提供給陽極作為氧化底物，電池產生的最大功率密度為 7.3 mW/L，混合放氧系統提高了光合細菌產氫效率，進而提高了 MFCs 的功率密度。

異位元利用方式則是將光合細菌產氫光生物反應器與 MFCs 耦合，底物首先在光合產氫反應器降解並產生氫氣，氫氣由光生物反應器通入 MFCs 陽極室氧化。MFCs 陽極與光合產氫都需要厭氧的環境，因此光合產氫反應器與 MFCs 陽極具有較好的系統相容性，使得光合產氫反應器與 MFCs 進行耦合成為了可能^[34]。李俊等^[35]構建了由生物膜光合產氫反應器和單室無膜空氣陰極MFCs 組成的耦合系統，該系統以葡萄糖為底物研究了底物流速對耦合系統產氫和電池性能的影響，結果表明在底物流速為 40 mL/h 時，不僅有助於陽極電化學活性微生物的生長，還有利於電池陰極性能的改善，MFCs 最大功率密度達到 50.0 W/m³。

2.2 光合細菌在 MFCs 陰極的應用

生物陰極型 MFCs 利用陰極微生物作為催化劑，降低 MFCs 成本的同時提高其運行穩定性。陰極微生物是生物陰極的核心，也是其功能實現的關鍵，因此陰極微生物的研究受到廣泛關注^[36]。陰極微生物可實現 CO₂ 的還原和高附加值有機物的合成。MFCs 陰極還原 CO₂ 是一個吸熱過程，不能自

發發生^[7,37]。因而要實現陰極微生物的催化 CO₂ 還原，必須有外源的能量輸入。Liu 等^[5]通過在陰陽極之間加電壓的方法降低陰極電勢，從而使得陰極產氫得以發生。

光合細菌具有捕光色素蛋白複合體，能夠捕獲光能作為體系能量輸入，進而克服同化 CO₂ 的熱力學能壘，實現 CO₂ 的固定。Cao 等^[25]在 MFCs 陰極接種光合細菌，光照條件下，光合電子傳遞鏈中的電子躍遷至高能態，其電勢降低後沿呼吸電子傳遞鏈傳遞給作為最終電子受體的 CO₂，實現電化學活性光合細菌自身獲能和 CO₂ 的還原(圖 2)。另外，該裝置陰極使用 CO₂ 作為電子受體，與使用 NO₃⁻ 和 O₂ 作為電子受體相比優勢更加明顯：首先，採用的碳酸/碳酸氫鹽的緩衝體系成本更低；其次，陽極的出水可以直接進入陰極，這種運行方式可以有效減少陰陽兩室溶液間的 pH 差異，進一步提高輸出功率；另外，整個裝置呈厭氧狀態，有助於提高 MFCs 的庫侖效率^[25]。

3 光照對 Photo-MFCs 產電性能的影響

光照是影響光合微生物光合作用效率和生長繁殖的重要因素，提高光能利用率對於改善 Photo-MFCs 性能、降低運行成本、拓展應用領域具有重要意義^[2,38]。光合細菌對光照的回應具有一定

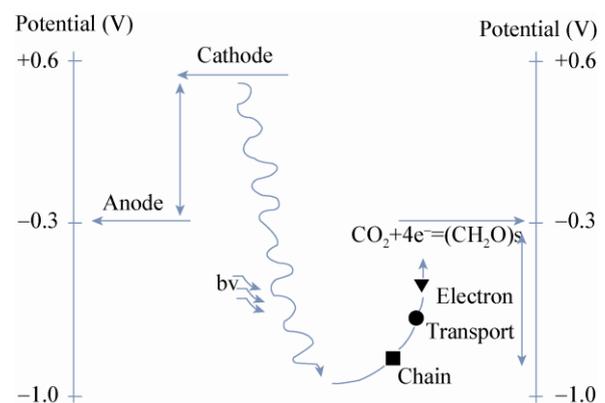


圖 2 光照條件下陰極同步固碳的電子流向示意圖^[25]

Figure 2 Cathode electron flow of carbon sequestration under light condition^[25]

的種屬特異性，且存在最適生長的光照環境。光照是一個複雜的生態因數，包括光強和光質等。光合細菌應用於 MFCs 領域，優化光照條件，促進光合作用，是提高光合細菌型 MFCs 性能的重要途徑。

3.1 光強對 Photo-MFCs 產電性能的影響

電化學活性光合細菌產電的電子來源主要由呼吸作用和光合作用提供，優化呼吸作用和光合作用影響因素，有助於提高接種光合細菌的 Photo-MFCs 性能。曹效鑫^[22]通過光照和產電雙重選擇壓力，Photo-MFCs 陽極富集產電光合細菌，光照條件下光合細菌色素蛋白複合體捕獲光子，光反應中心蛋白複合體激發至高能態，電勢降低，還原性增強，電勢差增大，提高了 Photo-MFCs 產電性能，但該 Photo-MFCs 在黑暗條件下運行功率密度仍可達 600 mW/m²，說明所富集的包括光合細菌在內的微生物在黑暗條件下能夠通過代謝有機物為 Photo-MFCs 提供電子。吳義誠等^[28]也發現光照能提高光合細菌的產電性能，光照條件下接種光合細菌混合培養物的生物電化學系統開路電勢迅速降低，且對光照回應靈敏。但接種沼澤紅假單胞菌 *R. palustris* DX-1 單室空氣陰極 MFCs 最大功率密度基本不受光照的影響，這可能與該菌產電主要依靠呼吸作用提供電子有關^[20]。CO₂ 還原性能的生物陰極啟動過程中，恒定電位和光照兩個條件兩者缺一不可，當從光條件切換至暗條件時，體系輸出電流迅速減小，重新恢復至光照條件，輸出電流又逐漸增大^[22]。

3.2 光源對 Photo-MFCs 產電性能的影響

光合細菌細胞內不同種類的色素蛋白複合體捕獲特定波長的光進行不產氧的光合作用，不同光譜的光源對光合細菌的生長和代謝具有重要影響。曹效鑫^[22]研究發現光源對光合細菌混合培養物產電性能影響顯著，螢光燈波長範圍偏窄，與光合細菌可利用光的光譜範圍不匹配，接種活性污泥的單室空氣陰極 MFCs 使用螢光燈做光源，陽極室培養物顏色變化不明顯，電池長時間運行仍不能啟動，光源改用白熾燈後，隨反應器的運行，陽極室顏色

呈鮮豔的玫瑰紅色，輸出電壓高於相同運行條件下接種 *G. sulfurreducens* 的單室空氣陰極 MFCs。但吳義誠等^[21]發現不同光譜光源對陽極接種光合細菌 YC-1 的 MFCs 產電性能沒有顯著影響，迴圈伏安結果進一步表明該光合細菌氧化還原活性不受光源影響。不同光譜的光源對電化學活性光合細菌電化學性能影響的差異可能是由於不同光合細菌所含的捕光色素蛋白複合體種類和含量的差異所致，由於捕光色素蛋白複合體的差異，不同光合細菌對不同波長的光捕獲能力不一，造成不同光源照射下光能利用率的差異。因此研究光合細菌對不同波長光的捕獲能力差異，有助於消除光合細菌光飽和效應，提高接種光合細菌的 Photo-MFCs 光能利用率。

4 總結與展望

近年來，環境污染日趨嚴重，能源危機日趨加劇，MFCs 利用生物電極促進污染物降解和轉化，實現污染物資源化，是一項符合可持續發展戰略的環境治理新技術。電化學光合細菌或是通過不產氧的光合作用直接產電，或是通過代謝產生電子介體提高 MFCs 的產電性能。開展光合細菌在 MFCs 領域的研究不僅可以促進所涉及的相關學科基礎研究發展，還可以提高污染物資源化程度，具有重要的經濟和社會意義。

由於光合細菌在 MFCs 領域的應用研究起步較晚，其產電機理尤其是與電極間電子傳遞機制瞭解還不夠深入，電化學活性光合細菌光電轉化和污染物降解效率都還較低。光合細菌在 MFCs 領域下一步研究的重點主要包括以下幾個方面：

(1) 電化學活性光合細菌的分離，優化微生物群落產電的富集方法，篩選更多高性能產電光合細菌。

(2) 分析光合細菌電子傳遞途徑及光合細菌與電極間電子傳遞機理，借助於分子生物學技術改造產電光合細菌的代謝途徑，提高其電子傳遞效率，拓展光合細菌在 MFCs 領域應用。

(3) 構建光合細菌型 MFCs 與其它生化反應器之間耦合系統，利用不同微生物反應器間優勢互補

的特點，優化耦合系統的運行工藝，達到提高廢水處理和能量回收效率的目的。

(4) 接種光合細菌的 MFCs 反應器優化，在綜合現有 MFCs 反應器結構優勢的基礎上，結合高效光生物反應器特點做進一步優化，提高光合細菌的光能利用率。

MFCs 產電影響因素較多，且各因素之間相互關聯，隨著生物電化學及分子生物學等交叉學科理論和技術的發展，為光合細菌產電性能的逐步提高提供了有力支撐，光合細菌在 MFCs 領域應用也將愈加廣泛。

參考文獻

- [1] Park DH, Zeikus JG. Improved fuel cell and electrode designs for producing electricity from microbial degradation[J]. *Biotechnology and Bioengineering*, 2003, 81(3): 348-355
- [2] Zhao F, Rahunen N, Varcoe JR, et al. Activated carbon cloth as anode for sulfate removal in a microbial fuel cell[J]. *Environmental Science & Technology*, 2008, 42(13): 4971-4976
- [3] Potter MC. Electrical effects accompanying the decomposition of organic compounds[J]. *Proceedings of Royal Society B: Biological Sciences*, 1911, 84(571):260-276
- [4] Cao XX, Huang X, Liang P, et al. A new method for water desalination using microbial desalination cells[J]. *Environmental Science & Technology*, 2009, 43(18): 7148-7152
- [5] Liu H, Grot S, Logan BE. Electrochemically assisted microbial production of hydrogen from acetate[J]. *Environmental Science & Technology*, 2005, 39(11): 4317-4320
- [6] Wang X, Feng YJ, Liu J, et al. Sequestration of CO₂ discharged from anode by algal cathode in microbial carbon capture cells (MCCs)[J]. *Biosensors & Bioelectronics*, 2010, 25(12): 2639-2643
- [7] Wu YQ, Song HY. Advance in the study on molecular biology of nitrogen fixation in photosynthetic bacteria[J]. *Plant Physiology Communications*, 1991, 27(3): 161-166 (in Chinese)
吳永強, 宋鴻遇. 光合細菌固氮分子生物學研究進展[J]. *植物生理學通訊*, 1991, 27(3): 161-166
- [8] Li QS, Tan DQ, Wang YQ. Growth promotion effect of DL-1 microbial additive on cultured fish[J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 1990, 14(4): 368-371 (in Chinese)
李勤生, 譚德清, 王業勤. DL-1 微生物飼料添加劑對養殖漁類的促長作用[J]. *水生生物學報*, 1990, 14(4): 368-371
- [9] Nissen H, Dundas ID. *Rhodospirillum salinarum* sp. nov., a halophilic photosynthetic bacterium isolated from a Portuguese saltern[J]. *Archives of Microbiology*, 1984, 138(3): 251-256
- [10] Xiao L, He Z. Applications and perspectives of phototrophic microorganisms for electricity generation from organic compounds in microbial fuel cells[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2014, 37: 550-559
- [11] Wu YC, Guan K, Wang ZJ, et al. Isolation, identification and characterization of an electrogenic microalgae strain[J]. *PLoS One*, 2013, 8(9): e73442
- [12] Liu H, Ramnarayanan R, Logan BE. Production of electricity during wastewater treatment using a single chamber microbial fuel cell[J]. *Environmental Science & Technology*, 2004, 38(7): 2281-2285
- [13] Bombelli P, McCormick AJ, Scott AM, et al. Quantitative analysis of the factors limiting solar power transduction by *Synechocystis* sp. PCC 6803 in biological photovoltaic devices[J]. *Energy & Environmental Science*, 2011, 4(11): 4690-4698
- [14] McCormick AJ, Bombelli P, Scott AM, et al. Photosynthetic biofilms in pure culture harness solar energy in a mediatorless biophotovoltaic cell (BPV) system[J]. *Energy & Environmental Science*, 2011, 4(11): 4699-4709
- [15] Logan BE, Hamelers B, Rozendal R, et al. Microbial fuel cells: methodology and technology[J]. *Environmental Science & Technology*, 2006, 40(17): 5181-5192
- [16] Rosenbaum M, He Z, Angenent LT. Light energy to bioelectricity: photosynthetic microbial fuel cells[J]. *Current Opinion in Biotechnology*, 2010, 21(3): 259-264
- [17] Berk RS, Canfield JH. Bioelectrochemical energy conversion[J]. *Applied Microbiology*, 1964, 12(1): 10-12
- [18] Chaudhuri SK, Lovley DR. Electricity generation by direct oxidation of glucose in mediatorless microbial fuel cells[J]. *Nature Biotechnology*, 2003, 21(10): 1229-1232
- [19] Zhu XY, Feng YL, Li SH, et al. Construction of a single-chamber direct microbial fuel cell and preparation of cathode electrode[J]. *The Chinese Journal of Process Engineering*, 2007, 7(3): 594-597 (in Chinese)
祝學遠, 馮雅麗, 李少華, 等. 單室直接微生物燃料電池的陰極製作及構建[J]. *過程工程學報*, 2007, 7(3): 594-597
- [20] Xing DF, Zuo Y, Cheng SA, et al. Electricity generation by *Rhodospseudomonas palustris* DX-1[J]. *Environmental Science & Technology*, 2008, 42(11): 4146-4151
- [21] Wu YC, Xiao Y, Zhao F. Isolation and identification of a photosynthetic bacteria and its electricity-generating characteristics[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2014, 8(10): 4503-4507 (in Chinese)
吳義誠, 肖勇, 趙峰. 一株光合細菌的分離鑒定及其產電特性[J]. *環境工程學報*, 2014, 8(10): 4503-4507
- [22] Cao XX. Mechanism and application of exoelectrogen-electrode interaction in microbial fuel cell[D]. Beijing: Doctoral Dissertation of Tsinghua University, 2009 (in Chinese)
曹效鑫. 微生物燃料電池中產電菌與電極的作用機制及其應用[D]. 北京: 清華大學博士學位論文, 2009
- [23] Cho YK, Donohue TJ, Donohue TJ, et al. Development of a solar-powered microbial fuel cell[J]. *Journal of Applied Microbiology*, 2008, 104(3): 640-650
- [24] Bond DR, Holmes DE, Tender LM, et al. Electrode-reducing microorganisms that harvest energy from marine sediments[J]. *Science*, 2002, 295(5554): 483-485
- [25] Cao XX, Huang X, Liang P, et al. A completely anoxic microbial fuel cell using a photo-biocathode for cathodic carbon dioxide reduction[J]. *Energy & Environmental Science*, 2009, 2(5): 498-502
- [26] Rabaey K, Verstraete W. Microbial fuel cells: novel biotechnology for energy generation[J]. *Trends in Biotechnology*, 2005, 23(6): 291-298
- [27] Cao XX, Huang X, Boon N, et al. Electricity generation by an enriched phototrophic consortium in a microbial fuel cell[J]. *Electrochemistry Communications*, 2008, 10(9): 1392-1395
- [28] Wu YC, Wang ZJ, Liu LD, et al. Resource recovery of swine wastewater using photo microbial fuel cells[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2015, 35(2): 456-460 (in Chinese)
吳義誠, 王澤傑, 劉利丹, 等. 利用光微生物燃料電池實現養豬廢水資源化利用研究[J]. *環境科學學報*, 2015, 35(2): 456-460
- [29] Xing DF, Chen SA, Logan BE, et al. Isolation of the exoelectrogenic denitrifying bacterium; *Comamonas denitrificans* based on dilution to extinction[J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2010, 85(5): 1575-1587
- [30] Chandra R, Subhash GV, Mohan SV, et al. Mixotrophic operation of photo-bioelectrocatalytic fuel cell under anoxygenic microenvironment enhances the light dependent bioelectrogenic

