

## 不产氧光合细菌的分类学进展

杨素萍<sup>1,2</sup>, 林志华<sup>2</sup>, 崔小华<sup>2</sup>, 连建科<sup>2</sup>, 赵春贵<sup>2</sup>, 曲音波<sup>3</sup>

(<sup>1</sup> 华侨大学生物工程与技术系, 泉州 361021)

(<sup>2</sup> 山西大学生命科学与技术学院, 化学生物学与分子工程教育部重点实验室, 太原 030006)

(<sup>3</sup> 山东大学微生物技术国家重点实验室, 济南 250100)

**摘要:** 不产氧光合细菌 (APB) 一直是研究生命起源与进化、光合作用和固氮机理的良好模式生物。近年来, APB 资源研究发展迅速, 不断发现新的物种、模式种及特殊功能物种, 不断提出新的分类单元, APB 分类系统发生了较大变化, 同时引起了一定混乱。本文对不产氧光合细菌定义、分类系统和分类指征最新进展进行了系统述评, 对分类系统中存在的问题和发展趋势也进行了评述。

**关键词:** 不产氧光合细菌; 分类系统; 分类指征; 存在问题; 发展趋势

中图分类号: Q939 文献标识码: A 文章编号: 0001-6209 (2008) 11-1562-05

近年来, 不产氧光合细菌资源研究发展迅速, 2007 年国际微生物系统与进化学杂志 (*International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology*, IJSEM) 就报道了 19 个新种, 有的还定为新模式种<sup>[1, 2]</sup>, 我国近 8 年报道 4 个新种<sup>[3-6]</sup>。许多新物种和新的高级分类单元的建立, 使得不产氧光合细菌 (Anoxygenic Phototrophic Bacteria, APB) 的定义、命名和种属归类等方面有些混乱。针对这一状况, 依据 2000~2008 年 IJSEM、《伯杰氏系统细菌学手册》第二版<sup>[7, 8]</sup>、国际原核生物系统学委员会光合细菌分类亚委会会议信息<sup>[9]</sup>、DSMZ 和 ATCC 等信息, 我们对 APB 概念、分类系统和分类指征、分类学中存在问题和趋势进行了评述 (截止到 2008 年 3 月), 以便人们正确认识 APB 并深入开展其资源挖掘、保护和利用工作, 提升我国 APB 研究在国际微生物学界的地位, 也为研究生命起源与进化、光合作用和固氮机理、基因横向转移研究等提供参考。

### 1 不产氧光合细菌的新认识

过去人们把不产氧光合细菌称为光合细菌 (Phototrophic Bacteria), 《伯杰氏系统细菌学手册》第

一版开始使用不产氧光合细菌名称, 以区别光合作用释放氧气的产氧光合细菌——蓝细菌<sup>[10]</sup>, 但国内外一些学者仍沿用“光合细菌”。为与国际发展趋势相符合, 避免名称混乱, 使用不产氧光合细菌 (APB) 名称更为恰当。

目前, APB 包括绿色非硫细菌、绿硫细菌、紫细菌、含 Bchl a 的好氧细菌和螺旋杆菌 5 个类群, 前 3 个类群符合 APB“能在厌氧条件下进行不产氧光合作用”经典定义范畴, 而后 2 个类群归为 APB 主要是因为它们含有 Bchl a 和 Bchl g, 而在其它特性, 如厌氧光合生长、光合器官和细胞结构特点等则与 APB 定义不很吻合, 这使得 APB 分类学面临新的挑战。我们认为, 能进行厌氧光合生长且光合作用不释放氧气特性应该是 APB 分类最重要特征, 应引起足够重视。

### 2 不产氧光合细菌分类系统的发展及其分类特征

自 1835 年 Ehrenberg 首次描述有色硫细菌至今, 随核酸等测序技术的快速发展, APB 分类学已由经典

基金项目: 国家自然科学基金(30470044); 科技部资源平台项目(2005DKA21209); 国家留学基金(24814010); 山西省回国留学人员科研基金项目(200713); 太原市科技明星专项(08121022)

作者简介: 杨素萍(1966-), 女, 山西榆次人, 教授, 博士, 研究方向为资源与环境微生物。Tel: +86-592-6166178; yangsuping@sxu.edu.cn, yangsuping@hqu.edu.cn

收稿日期: 2008-04-18; 修回日期: 2008-07-03

分类发展到系统分类, 本文将分 6 个阶段对 APB 分类学的发展进行阐述。

1835~1930 年, 主要是利用光镜对自然生境样品进行观察和描述, 由此发现了紫色细菌, Winogradsky (1888 年) 在此方面作出了突出贡献。1907 年 Molisch 依据有色和光合特性, 首次建立 APB 分类系统, 包括紫色硫细菌和紫色非硫细菌, 归于 Rhodobacteria 目, Athiorhodaceae 和 Thiorhodacea 2 个科。

1930~1960 年, 生理生化研究发展迅速, 同时绿硫细菌研究也取得较大进展。1957 年《伯杰氏细菌鉴定手册》第 7 版发行。除形态学外, APB 分类中增加了光合色素、光合膜结构、碳代谢等生理生化特性描述, 并新建了绿硫细菌新科 (Chlorobacteriaceae)。

1974 年, 《伯杰氏细菌鉴定手册》第 8 版发行<sup>[11]</sup>。分类中增加了 DNA G+Cmol% 等遗传信息, 但分类仍然以形态学和生理生化特性为主。本手册以“Parts”编排分类系统, APB 被称为“光能自养细菌”, 位于第一部分, 包括 18 属 47 种, 仍隶属于 1 目 3 科, 但名称更改为 Rhodospirillales 目, Rhodospirillaceae、Chromatiaceae 和 Chlorobiaceae, 并新建了外硫红螺菌属 (*Ectothiorhodospira*)。

1984~1989 年, 《伯杰氏系统细菌学手册》第一版发行 (共 4 卷), 分类学从表型转向系统发育体系, 除表型外, 增加了 16SrRNA 序列分析、化学分类、生态学、富集和分离方法、分类学评论以及关键特征鉴定表等更多信息<sup>[10, 12]</sup>。1989 年第 3 卷开始使用 APB 这一名称<sup>[10]</sup>, 分为紫细菌和绿细菌类群, 记载 27 属 70 种, 其显著变化是将外硫红螺菌属提升为外硫红螺菌科 (*Ectothiorhodospiraceae*), 并将 Rhodospirillaceae 改称紫色非硫细菌, 新发现了绿色非硫细菌、好氧光合细菌和螺旋杆菌, 但后两者列入不确定属 (Genera incertae sedis)。

1991 年, 《伯杰氏细菌鉴定手册》第 9 版发行<sup>[13]</sup>, 分类系统按“Group”编排, 表型特性为主要分类依据, 各种属关键特征以列表体现, 主要目的是方便鉴定, APB 列在第 10 群, 包括 7 个亚群。

2000~2008 年《伯杰氏系统细菌学手册》第二版发行, 分类系统按 16S rDNA 系统发育数据来编排, 标志着自然分类系统的形成。APB 的显著变化是提出了许多新分类单元, 如 Proteobacteria 门, Chromatiales、Rhodocyclales 和 Rhodobacterales 目, Rhodocyclaceae 和 Rhodobacteraceae 科等; 发现光合生物和非光合生

物相互交叉分布在不同的新的进化分支上, 尤其是紫色非硫细菌和好氧光合细菌; 螺旋杆菌和好氧光合细菌也有了明确分类地位。该版将绿硫细菌和绿色非硫细菌放在 2001 年手册第一卷中<sup>[7]</sup>, 其余 APB 则放在 2005 年手册第二卷中<sup>[8]</sup>。

### 3 不产氧光合细菌新的分类系统和指征

#### 3.1 绿色非硫细菌 (Green Nonsulfur Bacteria)

又称丝状绿细菌、多细胞丝状绿细菌、丝状 APB 或光合丝状细菌, 归在《伯杰氏系统细菌学手册》第二版第一卷的细菌域、绿弯菌门、绿弯菌纲、绿弯菌目、绿弯菌科, 记载 4 属 6 种<sup>[7]</sup>。2000 年, Keppen 依据 16S rDNA 序列相似性、生理生化和化学分类数据, 将绿弯菌科中的颤绿菌属提升为颤绿菌科 (*Oscillochloridaceae*)。2002 年, Hanada 又报道一嗜热新属新种 *Roseiflexus castenholzii*, 所以最新分类系统包括 2 科 5 属 7 种, 我国记录为零。该类群为典型丝状可滑行运动种类, 优先光异养或化能异养生长, 也可光自养生长。除 *Heliobacterium* 属和 *R. castenholzii* 外, 其余种类都具有光合器官“绿囊”(Chlorosome), Bchl 为 a、c 和 d, 但 *R. castenholzii* 只含 Bchl a。脂肪酸为 C16:0, C14:0 和 C15:0。除富含硫化物高温热泉外, 现发现在活性污泥、海洋、盐和淡水等环境也有其生存。

#### 3.2 绿硫细菌 (Green Sulfur Bacteria)

归在 2001 年伯杰氏系统手册第二版第一卷的细菌域、绿菌门、绿菌纲、绿菌目、绿菌科, 记载 5 属 6 种<sup>[7]</sup>。2003 年, Imhoff 依据 16S rRNA 和 *fmo* 基因系统发育数据、DNA G+C 含量和序列标签, 对该类群进行了重新分类, 2008 年又报道 *Chlorobaculum macestae* 新种, 所以最新分类系统中, 绿硫细菌包括 6 属 18 种。近年在墨西哥太平洋 2500 米深处黑烟囱附近发现了一株绿硫细菌 (*Chlorobium tepidum*), 现已获得其全基因组序列, 成为新的模式生物。此外, 还发现了能利用还原性铁作为电子供体的 *Chlorobium ferrooxidans*<sup>[14]</sup>, 改变了过去绿色硫细菌是专性嗜硫菌观点。绿硫细菌是严格厌氧专性光养类群, 光合器官为绿囊, 但与绿色非硫细菌化学组成不同。Bchl 是 a、c、d 和 e, 类胡萝卜素为 Chlorobactene 系列。除 *Colorherpeton thalassium* 滑行运动外, 其余都不运动。能利用硫化物, 硫粒储存在细胞外或进一步氧化成硫酸盐。绿硫细菌对氧敏感, 通常分布在水域底层泥沙沉积物中, 需较高浓度 H<sub>2</sub>S 和低光强。

### 3.3 紫细菌 (Purple Bacteria)

包括紫色硫细菌和紫色非硫细菌。16S rDNA 序列分析数据揭示,紫色硫细菌是亲缘关系密切类群,而紫色非硫细菌之间则呈高度异质性。最新分类系统中,紫细菌提升到变形菌门,分为3个纲: $\alpha$ -变形菌纲, $\beta$ -变形菌纲和 $\gamma$ -变形菌纲(Alphaproteobacteria, Betaproteobacteria 和 Gammaproteobacteria),紫色非硫细菌分布在 $\alpha$ -和 $\beta$ -变形菌纲内,紫色硫细菌属于 $\gamma$ -变形菌纲。

**3.3.1 紫色硫细菌 (Purple Sulfur Bacteria):** 该类群变化最大<sup>[7,8,15]</sup>,分类地位提升到 Proteobacteria 门、Gammaproteobacteria 纲、Chromatiales 新目。2005年《伯杰氏系统细菌学手册》第二版中,依据硫粒沉积在胞内或胞外以及盐度将紫色硫细菌分为 Chromatiaceae 和 Ectothiorhodospiraceae 两个科,现记载 28 属 47 种。Ectothiorhodospiraceae 包括 3 属 10 种<sup>[8]</sup>,后来 *E. marismortui* 合并到 *E. mobilis*, *E. vacuolata* 合并到 *E. shaposhnikovii* (Hirschleir 2003) 和 Gorlenko (2004) 又报道 *H. neutriphilum* 和 *E. mongolicum* 2 个新种,但后者因不能在菌种保藏中心培养而不被承认是有效种,所以最新统计数据是 3 属 9 种。该类群最重要特性是嗜盐或极端嗜盐,元素硫粒或与细胞接触或定位在周质空间,片层内膜结构,含有 Bchl a 或 b,极脂也很特殊。Chromatiaceae 包括 23 属<sup>[8]</sup>,后又建立 *Thiobaca* 和 *Rheinheimara* 两个新属,现记载 25 属 41 种。除表型和 16S rDNA 序列分析外,盐度、运动性和气囊也成为该科属水平的重要分类指征。除富含硫化物的有光厌氧水体、富营养化湖厌氧滞水层和海洋外,极端环境中也广泛分布有此类细菌。我们近期获得 40 余株紫色硫细菌纯培养物,其中一株嗜盐嗜碱且含有奥氏酮类胡萝卜素,研究正在深入之中<sup>[16,17]</sup>。

**3.3.2 紫色非硫细菌 (Purple Nonsulfur Bacteria, PNSB):** 紫色非硫细菌是高度多样化和异质化类群,所以新种的归属须提供形态、生理、内膜系统、16S rDNA 序列相似性、脂、醌、脂肪酸、脂 A 结构等方面的数据信息,也必须考虑其生态分布和环境因素。近年在南极永冻湖水极端环境中也发现了紫色非硫细菌。我国此领域研究较多,但新资源报道较少<sup>[3,4,18]</sup>。

$\alpha$ -变形菌纲中的 PNSB 含有 Bchl a 或 b、MK-10 或 MK-9、Q-9 或 Q-10 或 RQ10、和 C<sub>18:1</sub>。2005 年《伯杰氏系统细菌学手册》包括 3 目 6 科 18 属 50 种<sup>[8]</sup>。近年又发现约 9 个新种 (*Rhodopseudomonas faecalis*、

*Rhodobium pfennigi*、*Rhodobium gokarnense*、*Rhodobacter vinaykumarii*、*Rb. changlensis*、*Rhodovulum marinum*、*Rv. Imhoffii*、*Rv. v isakhapatnamense*、*Rhodobaca bogorinsis*)。

$\beta$ -变形菌纲分支上的 PNSB 主要来自 *Rhodopseudomonas*、*Rhodospirillum* 和 *Rhodocyclus* 属变迁种类,其中胶质红假单胞菌变化最明显,曾由 *Rp.gelatinosa* *Rhodocyclus gelatinosus* *Rubrivivax gelatinosus*。该类群含有 Bchl a、细胞色素 C<sub>551</sub>、MK-8、Q-8、RQ-8、C<sub>16:0</sub>、C<sub>16:1</sub> 或 C<sub>18:1</sub>。现包括 2 目 2 科 3 属 (Burkholderiales 目、Comamonadaceae 科、*Rhodoferax* 和 *Rubrivivax* 属、Rhodocyclales 目、Rhodocyclaceae 科 *Rhodocyclus* 属)。

**3.4 含 Bchl a 的好氧细菌 (Aerobic Bacteriochlorophyll-containing Bacteria, ABC)**

又称“ Aerobic photosynthetic Bacteria (Shiba 1989)”、“ Aerobic Anoxygenic Phototrophs (Shimada 1995)”、“ Aerobic Anoxygenic Phototrophic Bacteria (Yurkov 1998)”、“ Aerobic Bacteriochlorophyll-containing Bacteria (Imhoff 2005)”。严格意义上讲,Shimada 和 Yurkov 两种说法欠妥,这些细菌虽含有 Bchl 和光合内膜,并有可能从中获取能量,但它们不能依赖光能独立生存,并非真正意义上的光合生物。系统发育数据表明,ABC 分布在 $\alpha$ -变形菌纲的 4 目 4 科中,是 APB 分布科目最广泛类群。2005 年《伯杰氏系统细菌学手册》记载 15 属 31 种<sup>[8]</sup>,最新统计约 40 属 48 种 (表 1)。

ABC 生理生态独特,与紫细菌显著不同。它们严格依赖氧而生存,多数种类专性好氧化能异养或好氧光异养生长,能量主要来自以氧作为最终电子受体的呼吸电子传递过程,氧并不抑制光合色素的合成,Bchl 和光合器官内膜系统只在好氧或在有可替代受体条件下合成,Bchl 含量明显低于紫色非硫细菌,这种有氧下的光合作用可能只是某种环境或生长条件下的一种能源补充,光照厌氧条件下,它们既不产色素也不生长。

### 3.5 螺旋杆菌

最新分类系统将之归为厚壁菌门、梭菌纲、梭菌目、螺杆菌科 (Firmicutes, Clostridia, Clostridiales, Heliobacteriaceae),在原有 *Heliobacterium* 和 *Heliobacillus* 两属基础上,新增加 2 属 (*Heliophilum* 和 *Heliorestis*),现有 4 属 9 种。该类群革兰氏染色阴性,但却位于 G<sup>+</sup>进化分支上。严格厌氧和光异养。典型特征是含有 Bchl g,但缺乏内膜光合系统,光合色素位于细胞质膜上,无或有链孢霉素状的类胡萝卜素。不能利用还原态硫化物。细胞壁缺脂多糖,非常特殊。

表 1 含细菌叶绿素 a 好氧细菌的新的分类系统  
Table 1 New taxonomic system of aerobic Bchl a-cotaining bacteria in alphaproteobacteria

Class	Alphaproteobacteria				
Order	Sphingomonadales	Rhodobacterales	Rhodospirillales	Rhizobiales	Rhodobacterales
Family	Sphingomonadaceae	Rhodobacteraceae	Acetobacteraceae	Methylobacteriaceae	Rhodobacteraceae
Genera	<i>Citromicrobium</i> <i>Erythrobacter</i> <i>Erythromicrobium</i> <i>Erythromonas</i> <i>Porphyrobacter</i> <i>Sandaracinobacter</i>	<i>Roseovarius</i> <i>Roseivivax</i> <i>Roseobacter</i> <i>Rubrimonas</i> <i>Photorhizobium</i> <i>Rhodovarius</i> <i>Roseisalinus</i> <i>Roseivirga</i> <i>Roseicyclus</i> <i>Roseibacterium</i> <i>Dinoroseobacter</i> <i>Roseinatronobacter</i> <i>Yangia pacifica</i>	<i>Acidiphilium</i> <i>Acidisphaera</i> <i>Craurococcus</i> <i>Paracraurococcus</i> <i>Roseococcus</i>	<i>Methylobacterium</i> <i>Photorhizobium</i>	<i>Maribius</i> <i>Maritimibacter</i> <i>Thalassococcus</i> <i>Thalassobius</i> <i>Oceanicola</i> <i>Silicibacter</i> <i>Dinoroseobacter</i> <i>Rubellimicrobium</i> <i>Loktanelia</i> <i>Antarctobacter</i> <i>Suffitobacter</i> <i>Salipiger</i> <i>Ruegeria</i> <i>Wenxinia marina</i>

#### 4 存在的问题

新种的描述还需尽快建立一套标准规则。Imhoff 提议新种的描述必须提供 16S rDNA 序列分析、表型特性、生境和生态信息、DNA-DNA 杂交数据<sup>[19]</sup>。由于细菌的生长繁殖与环境相适应,因而生境和生态特性是种分类重要指征<sup>[7-9,20-22]</sup>,如果一个菌株来源独特且具有特定功能,即使有同种名文献报道,仍可被描述为一个新种,但前提是必须提供足够信息以明显区别现有系统发育相近种类。目前仍有许多种类的 16S rDNA 系统发育数据与传统分类有较大分歧,许多新分离物难以定位,解决的有效方法是提供新的特异性分子标记信息数据,比如说紫细菌中增加 *pufL* 和 *pufM*、绿细菌中增加 FMO 蛋白等信息,并与其它证据进行相互印证。

近年来,ABC 细菌研究趋势迅猛,但对新种的归属、能否厌氧光合生长等特性重视程度不够,最典型的是 *Roseobacter* 的分类。在 IJSEM 上发表的一些新种由于显而易见的分类问题,尚未得到国际原核生物系统学委员会光合细菌分类学亚委会认可。

螺旋杆菌也是争议较大的一个类群,是迄今唯一放在 G<sup>+</sup> 菌群的 APB,与 *Clostridium* 亲缘关系较近,有些种类产生抗热芽孢特性又与 *Bacillus* 类似,也有证据显示其细胞壁成分接近 G<sup>+</sup>,因此有起源于 G<sup>+</sup> 的说法,如此一来,螺旋杆菌是否属于 APB 将有待于进一步研究。

2003 年, Rim 推荐用 3 个字母作为 APB 属名的缩写形式,例 *Chromatium* 缩写为 *Chr*。但至今没被采纳,还有待讨论。

#### 5 发展趋势、前景与展望

APB 研究中许多有趣现象的阐明,将有可能使细菌

进化研究这个“黑洞”出现新的曙光,比如说 ABC,含有 Bchl 却严格好氧生长,也不体现 Bchl 光合特性或在特定培养下体现,系统发育上又与淡水、海洋、甲基和非甲基营养细菌交织在一起;紫色非硫细菌和非光化能营养菌之间的亲缘关系比光合生物之间还要接近,推测某些非光化能异养细菌可能起源于光合生物祖先;光合螺旋杆菌类群和革兰氏阳性菌交织在一起,也许在不远的将来,人们会发现属于 G<sup>+</sup> 进化分支上的其它的 APB,寻找到更多的支持证据。此外,南极、北极、深海等极端环境以及特殊降解功能 APB 的发现,表明光合细菌多样性还远未被揭示,目前还没有发现嗜盐绿色硫细菌和绿色非硫细菌,许多描述的新种类至今并没有获得纯培养物,希望由此能激发人们新的研究兴趣。以极端环境和特殊功能光合细菌为重点的资源开发与利用、建立新的分子标记技术仍将是关注的焦点。

#### 参 考 文 献

- [1] Eisen JA, Nelson KE, Paulsen IT, et al. The complete genome sequence of *Chlorobium tepidum* TLS, a photosynthetic, anaerobic, green-sulfur bacterium. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2002, 99(14): 9509-9514.
- [2] Frigaard NU, Chew AGM, Julia A. et al. Bacteriochlorophyll Biosynthesis in Green Bacteria. In: Grimm B, Porra RJ, Rüdiger W, et al. Chlorophylls and Bacteriochlorophylls: Biochemistry, Biophysics, Functions and Applications. Vol.25. Dordrecht Netherlands: Springer, 2006.
- [3] Zhang D, Yang H, Zhang W, et al. *Rhodocista pekingensis* sp. nov., a cyst-forming phototrophic bacterium from a municipal wastewater treatment plant. *Int J Syst Evol Microbiol*, 2003, 53 (4): 1111-1114.
- [4] Zhang D, Yang H, Huang Z, et al. *Rhodopseudomonas faecalis* sp. nov., a phototrophic bacterium isolated from an anaerobic reactor that digests chicken faeces. *Int J Syst Evol Microbiol*, 2002,

- 52, 2055–2060.
- [5] Dai X, Wang BJ, Yang QX, *et al.* *Yangia pacifica* gen. nov., sp. nov., a novel member of the Roseobacter clade from coastal sediment of the East China Sea. *Int J Syst Evol Microbiol*, 2006, 56, 529–533.
- [6] Ying JY, Wang BJ, Dai X, *et al.* *Wenxinia marina* gen. nov., sp. nov., a novel member of the Roseobacter clade isolated from oil-field sediments of the South China Sea. *Int J Syst Evol Microbiol*, 2007, 57, 1711–1716.
- [7] David RB, Richard WC. *Bergey's Manual of Systematic Bacteriology*. 2<sup>nd</sup> ed. Vol.1. New York: Springer, 2001.
- [8] Don JB, Noel RK, James TS. *Bergey's Manual of Systematic Bacteriology*. 2<sup>nd</sup> ed. Vol.2. New York: Springer, 2005.
- [9] Minutes of the meetings. International Committee on Systematics of Prokaryotes, Subcommittee on the Taxonomy of Phototrophic Bacteria. *Int J Syst Evol Microbiol*, 2007, 57, 1169–1171.
- [10] Holt JG, Krieg NR, Sneath PHA, *et al.* *Bergey's Manual of Systematic Bacteriology*. 1<sup>st</sup> ed. Vol.3. Baltimore: Williams and Wilkins, 1986.
- [11] Buchanan RE, Gibbons NE. *Bergey's Manual of Determinative Bacteriology*. 8<sup>th</sup> ed. Baltimore: Williams and Wilkins, 1974.
- [12] 东秀珠, 蔡妙英. 常见细菌系统鉴定手册. 北京: 科学出版社, 2001.
- [13] Holt JG, Krieg NR, Sneath PHA, *et al.* *Bergey's Manual of Determinative Bacteriology*. 9<sup>th</sup> ed. Baltimore: William and Wilkins, 1991.
- [14] Heising S, Richter L, Ludwig W, *et al.* *Chlorobium ferrooxidans* sp. nov., a phototrophic green sulfur bacterium that oxidizes ferrous iron in coculture with a “Geospirillum” sp. strain. *Arch Microbiol*, 1999, 172: 116–124.
- [15] Imhoff JF, Suling J, Petri R. Phylogenetic relationships among the Chromatiaceae, their taxonomic reclassification and description of the new genera *Allochroinatium*, *Halochromatium*, *Isochromatium*, *Marichromatium*, *Thiococcus*, *Thiohalocapsa* and *Thermochromatium*. *Int J Syst Bacteriol*, 1998, 48: 1129–1143.
- [16] 杨素萍, 连建科, 赵春贵, 等. 含奥氏酮嗜盐紫色硫细菌分离鉴定及系统发育分析. *微生物学报 (Acta Microbiologica Sinica)*, 2008, 48(5): 1–6.
- [17] 杨素萍, 赵春贵, 曲音波, 等. 一株极端环境光合细菌的生理特性研究. *水生生物学报 (Acta Hydrobiologica Sinica)*, 2002, 26(3): 221–225
- [18] 王绍校, 杨惠芳, 黄志勇, 等. 嗜盐光合细菌的分离鉴定及其营养成分分析. *应用与环境生物学报 (Acta Hydrobiologica Sinica)*, 2003, 9 (3): 298–301.
- [19] Imhoff JF, Caumette P. Recommended standards for the description of new species of anoxygenic phototrophic bacteria. *Int J Syst Evol Microbiol*, 2004, 54: 1415–1421.
- [20] Dworkin M, Falkow S, Rosenberg E. *et al.* A Handbook on the Biology of Bacteria: Proteobacteria: Alpha and Beta Subclass Vol.5, Gamma Subclass Vol.6. In: *The Prokaryotes*. 3<sup>rd</sup> ed. New York: Springer, 2006.
- [21] Madigan MT, Martinko JM, Parker J. *Brock's Biology of Microorganisms*. 8<sup>th</sup> ed. New Jersey: Prentice Hall, 1997.
- [22] Perry JJ, Staley JT, Lory S. *Microbial Life*. USA, Sinauer Associates, Sunderland Massachusetts, 2002.

## Current taxonomy of anoxygenic phototrophic bacteria—A review

Suping Yang<sup>1,2\*</sup>, Zhihua Lin<sup>2</sup>, Xiaohua Cui<sup>2</sup>, Jianke Lian<sup>2</sup>, Chungui Zhao<sup>2</sup>, Yinbo Qu<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Department of Biotechnology and Biotechnique, Huaqiao University, Quanzhou 362021, China

<sup>2</sup>School of Life Science and Technology, Key Laboratory of Chemical Biology and Molecular Engineering of Ministry of Education, Shanxi University, Taiyuan 030006, China

<sup>3</sup>State Key Laboratory of Microbial Technology, Shandong University, Jinan 250100, China

**Abstract:** Anoxygenic phototrophic bacteria (APB) are good model organisms used to study the origin and evolution of life, photosynthesis and nitrogen fixation mechanism. With increasingly available genetic information and establishment of sequencing techniques for nucleic acid, more attention has been paid to exploration of APB resources from various habitats especially extremely environment. The pace of new species description has been increasing in recent years, and some new taxonomic taxa are also proposed, therefore, it is necessary to redefine APB and provide the newest taxonomic system of APB. We reviewed the problems and prospect about taxonomy of anoxygenic phototrophic bacteria. The definition, situation of the taxonomy, characteristics for APB identification are noted and commented from the discovery of APB up to now.

**Keywords:** anoxygenic phototrophic bacteria; definition; taxonomy system; characteristics; tendency

Supported by the National Natural Science Foundation of China (30470044), the Resources Platform Project of the Ministry of Science and Technology of China(2005DKA21209), the China Scholarship Council (24814010) and the Returning-back Scholarship of Shanxi Province (200713), Star Special Project of Bureau of Science and Technology of Taiyuan (08121022)

\*Corresponding author. Tel: +86-592-6166178; E-mail: yangsuping@sxu.edu.cn, yangsuping@hqu.edu.cn

Received: 18 April 2008/Revised: 3 July 2008