

纳米粒子标记 DNA 探针在电化学 DNA 生物传感器中的应用^{*}

陕西师范大学化学与材料科学学院 (西安 710062) 高 梅

摘要:介绍了纳米电化学 DNA 生物传感器的基本概念和分类,并介绍了用于 DNA 标记的纳米粒子的六种类型及其三大检测方法,在此基础上对纳米电化学 DNA 生物传感器在基因检测、疾病诊断、DNA 检测等方面的最新进展进行了综述与讨论。

关键词: 纳米粒子; DNA 探针; 脱氧核糖核酸; 生物传感器

The applications of nanoparticles tagging DNA probe in electrochemical DNA biosensors

GAO Mei

School of Chemistry and Materials Science, Shaanxi Normal University, Xian 710062, China

ABSTRACT: Much attention has been drawn to nanoparticles in electrochemical deoxyribonucleic acid (DNA) biosensors due to the advantage of enhancing the sensitivity of the biosensors. Nanoparticle tagging DNA probe, which combines of nano- technology, gene project and DNA detection, is the focus of recent research field. The principle and classification, labelled methods and principle of detection of nanoparticle tagging DNA probe are introduced. The applications of nanoparticles tagging DNA probe in electrochemical DNA biosensors are reviewed.

Key words: Electrochemical Biosensors; Deoxyribonucleic Acid (DNA); Nanoparticles; DNA probe

脱氧核糖核酸(DNA)是遗传信息的承担者,是生物遗传的主要物质基础。生物机体的遗传信息以密码的形式编码在 DNA 分子上,表现为特定序列的核苷酸排列顺序,并通过 DNA 的复制由亲代传给子代。对 DNA 的研究在生命科学研究领域中有极其重要的地位。随着分子生物学研究的不断深入,人们对 DNA 的检测手段变得越来越重要。有关 DNA 的研究技术很多,主要有表面分析技术、凝胶电泳技术、微量热法、毛细管电泳法、电化学分析技术和化学发光分析技术等。传统的凝胶电泳法需经放射性标记、聚合酶链式反应(PCR)电泳等一系列操作,耗时长、劳动强度大。面对 DNA 测序速度太慢的问题,基于电化学原理构建的检测器或生物传感器孕育而生。电化学 DNA 生物传感器因其具有灵敏、快速、简便、不破坏测试样品、不受溶液颜色影响、便于微型化等优点,已逐渐成为分子生物学研究中直接进行 DNA 序列检测的方法之一^[1,2]。纳米技术是被国际公认的最有前途并正在崛起的新技术。近年来,纳米分析化学已取得许多创新性的研究成果,已成为分析化学的一个研究热点。由于纳米材料有很多优良的特性如:表面效应、体积效应、量子尺寸效应、宏观量子隧道效应、催化性质等。纳米技术与电化学 DNA 传感器的有机结合必将发出前所未有的广阔前景。

1 纳米电化学 DNA 生物传感器

电化学 DNA 传感器是由一个支持 DNA 片段(探针)的电极和检测用的电活性杂交指示剂构成。DNA 探针是单链 DNA(ssDNA)片段(或整链),长度从十几个到上千个核苷酸不等,它与靶序列是互补的,一般多采用人工合成的短的寡聚脱氧

核苷酸作为 DNA 探针。通常是将 ssDNA(探针分子)修饰到电极表面构成 DNA 修饰电极。由于 ssDNA 与其互补靶系列杂交具有高度的序列选择性,使得这种 ssDNA 修饰电极呈现极强的分子识别功能。在适当的温度、pH、离子强度下,电极表面的 DNA 探针分子能与靶序列选择性地杂交,形成双链 DNA(dsDNA),从而导致电极表面结构的改变。这种杂交前后的结构差异,可以通过具有电活性的杂交指示剂来识别,这样便达到了检测靶序列的目的。

纳米材料以其独特的光学、电化学及催化等方面的性能,能够充分满足传感器多功能、微型化、高速化的要求。将纳米技术与电化学分析技术相结合,研制具有高灵敏度、高选择性的基于纳米物质电化学 DNA 生物传感器,应用于对特定 DNA 片断的选择性测定和对 DNA 链中的碱基尤其是单碱基突变的快速、灵敏和准确的识别,为基因的快速分析测定提供了一种简便、快捷、廉价的检测装置,纳米电化学 DNA 生物传感器已成为新一代的 DNA 检测方法^[3-5]。

2 用于 DNA 标记的纳米粒子的类型

为提高电化学 DNA 生物传感器的灵敏度,通常有纳米粒子标记法和改进固定化方法两种途径。其中,纳米粒子标记法是最常用的一种解决方案。作为一种新兴的标记物,纳米粒子易于制备、表面积大、吸附量高、稳定性好且有较好的生物相容性,能大幅度提高检测过程中信号物质的灵敏度。常见的用于 DNA 标记的纳米粒子主要有下述 6 种类型:

(1) 金属纳米粒子:在单一金属纳米粒子中,纳米金和纳米银因其良好的电学性能和良好的生物相容性,在电化学

* 基金项目:国家自然科学基金资助项目(20272035);教育部科技研究重点项目资助(104167)

作者简介:高梅(1980-),女,在读硕士,主要从事生物分析的研究

收稿日期:2005-12-26,接受日期:2006-01-24

DNA 生物传感器的研究中受到人们广泛的关注^[6-8]。

(2) 半导体纳米粒子: 半导体纳米粒子, 也叫作半导体纳米晶或量子点, 它是由半导体材料制成的稳定的、溶于水的、尺寸在 2~20nm 之间的纳米晶体, 常见的有 ZnS、CdS、PbS 等; 半导体纳米粒子在电化学 DNA 生物传感器的研究中也得到应用。

(3) 复合金属纳米粒子: 利用含有多种金属核壳结构的复合纳米粒子可进一步提高 DNA 检测的灵敏度。Fang 等^[9]研究的金银复合纳米粒子在 DNA 检测中使灵敏度较一般的单个纳米粒子标记的 DNA 探针提高了两个数量级, 检出限可达 $50\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 。有关金和铁复合纳米粒子^[10], 金和铜复合纳米粒子^[11]在电化学 DNA 生物传感器中的研究也有报道。

(4) 功能化的纳米粒子: 利用电活性物质功能化纳米粒子, 即在纳米粒子上修饰电活性物质, 得到具有电化学活性的纳米粒子。因在一个纳米粒子上可以修饰多个电活性物质, 实现电化学检测信号的放大; 将功能化的纳米粒子作为标记 DNA 的电活性物质, 可进一步提高检测 DNA 的灵敏度。

(5) 纳米粒子与磁性微粒的结合: 磁性纳米颗粒分离法是将具有磁性的纳米颗粒固定在目标 DNA 上, 然后通过与标记电活性纳米颗粒的探针 DNA 杂交后进行电化学检测, 也可以借助对单双链 DNA 具有不同键合嵌入作用的嵌入剂来检测^[12-14]。磁性纳米颗粒的作用是使用磁性将杂交的 dsDNA 与 ssDNA 有效的分离, 从而达到检测 dsDNA, 消除 ssDNA 的存在产生的影响。

(6) 纳米粒子与纳米管的结合: 碳纳米管的发现是世界科学史上的里程碑。在纳米材料中, 碳纳米管被称为超级纳米材料。Wang 等^[15]成功地将 CdS 标记在碳纳米管增强的 DNA 探针上, 研制成了检测限达到 pg 级的 DNA 传感器。我们成功的制成基于银包覆碳纳米管标记的 DNA 探针的电化学 DNA 传感器检测限达到 10fmol/L 。

3 DNA 在纳米粒子上的固定化方法

目前所使用的 DNA 探针大多为人工合成的短链 DNA, 一般使用已被公认的可识别出靶序列所需的最短序列。制备好的纳米粒子必须进行表面修饰后才能和 DNA 分子相联, DNA 在纳米粒子上的固定是纳米粒子 DNA 探针的制备中的关键步骤。常用的方法有共价键合法、生物素-亲和素法、自组合法等。

3.1 共价键合法:

目前共价键合法已普遍用于 DNA 传感器的研制, 即在纳米粒子表面上引入活性基团, 也可对 DNA 进行修饰, 在 DNA 末端引入活性基团, 然后通过共价键合将 DNA 固定到纳米粒子上。这种方法是将纳米粒子的表面进行改性修饰引入易于连接生物分子的官能团如羟基、胺基、羧基等后, 再与本身进行修饰过的 DNA 如带上巯基或衍生上官能团的 DNA 相联。

3.2 生物素-亲和素法:

生物素-亲和素体系(BAS)是通过生物素-亲和素的特异性结合, 在一定范围内敏感膜可制成有序的层次结构, 生物素-亲和素偶联固化 ssDNA, 具有较高的识别灵敏度。BAS 的固定化有多种形式: 亲和素可直接不可逆地吸附到 Au、Ag、CdS

等纳米粒子表面形成亲和素单分子层; 也可以吸附在纳米粒子表面形成生物素分子固定层。

3.3 自组合法:

基于分子的自组合作用, DNA 在纳米金、纳米银上的固定主要利用 Au-S 键和 Ag-S 键: 一种是将 DNA 链端巯基化, 在通过-SH 在 Au/Ag 表面的自组合作用制备纳米金/银 DNA 探针; 一种是在 Au 纳米粒子上形成特殊官能团的巯基自组单分子层(SAM), 再共价键合或吸附 DNA 制备纳米金/银 DNA 探针。

4 纳米粒子标记物的检测方法

电化学分析法是一种新的检测纳米粒子标记物的方法。由于所用纳米粒子多为金属微粒或半导体纳米材料, 根据组成纳米粒子的金属不同, 其相应的氧化还原电位也不相同, 可以通过对纳米粒子标记物中的金属含量的测定, 达到对纳米粒子标记物的测定的目的。常用的电化学手段有线性扫描伏安法、溶出伏安法、脉冲伏安法等。

4.1 线性扫描伏安法:

线性扫描伏安法是在电极上施加一个线性变化的电压, 即电极电位是随外加电压线性变化记录工作电极上的电解电流的方法。

4.2 溶出伏安法:

溶出伏安法是以表面不能更新的液体或固体电极(如悬汞电极或汞膜电极)作工作电极, 使被测组分预先富集在工作电极上, 再逐步改变电极的电位(向反方向外加电压), 使富集在工作电极上的物质重新溶出, 根据溶出时的伏安曲线的峰高(或峰面积)进行定量分析。Wang 等^[6]报道了一种基于纳米粒电化学检测 DNA 杂交的方法。他们用抗生蛋白链霉素包被的磁性纳米粒子, 固定上生物素修饰的 DNA 探针, 与生物素修饰的靶基因互补配对, 生物素再捕获包有抗生蛋白链霉素的金纳米粒子, 经洗涤, 最后溶解这些被捕获的金粒, 用计时电位分析法测出金的量, 从而算出杂交量。Authier 等^[7]也报道了用电化学方法定量检测 406-碱基对人类细胞巨型病毒 DNA 序列(HCMV DNA - human cytomegalovirus DNA)。这种检测方法基于: 利用纳米金标记的寡核苷酸探针与 ssDNA 杂交后, 采用酸性条件下化学法溶出金, 再利用阳极溶出伏安法检测金离子, 间接检测了 DNA 含量, 检测限可达 $5\mu\text{mol}$ 。Wang 等^[8]将 DNA 的模板作用和 DNA 的电化学检测相结合, DNA 双链上在线生成纳米银, 电化学溶出法检测银, 从而检测 DNA 序列, 检出限可达 100ng/mL , 进一步提高杂交时间或延长纳米粒子的沉积时间, 有望进一步降低检出限。

4.3 脉冲伏安法:

脉冲技术最初是从滴汞电极发展起来的, 目的是与汞滴的生长同步, 通过在汞滴寿命的末端进行电流取样, 以减小电容对电流的贡献。加入脉冲电势后, 电容电流比法拉第电流衰减的快, 在脉冲的末端测量电流。这种形式的取样法可以增加灵敏度, 能够更好的进行应用分析。Fang 等^[9]在壳聚糖修饰的电极上修饰 ssDNA, 与金纳米粒子标记的寡核苷酸探针杂交, 加入银纳米的修饰剂, 在金表面在线沉积纳米银, 得到银包裹的金纳米粒子, 利用高灵敏度的微分脉冲伏安法检测

银,从而使检测 DNA 的灵敏度提高了两个数量级,检出限可达 50 pmol/L 。我们研究室也在金电极表面修饰 HS- DNA/HT 混合自组装膜,然后银纳米粒子包覆的碳纳米管 DNA 探针分子与电极上修饰有巯基的待测 DNA 分子杂交利用在用高灵敏度的微分脉冲伏安法检测银,极灵敏检测待测痕量 DNA 分子。

5 纳米粒子标记 DNA 探针的进展

由于纳米粒子具有优良特性,使其在 DNA 标记分析中应用广泛,在基因检测、疾病诊断、DNA 检测等方面有着应用前景。

Ozsoz 等^[6]以纳米金标记寡核苷酸作为探针,与固定在笔式电极上的互补 DNA 杂交,制备了重现性和稳定性良好的电化学 DNA 传感器,互补 DNA 的检出限可达 0.78 fmol 。Wang^[16]等人利用电化学方法检测纳米金标记的 DNA,他们将抗生蛋白链霉素固定于磁性纳米粒子上用来固定生物素修饰的 DNA 探针。当其与生物素修饰的靶基因互补配对后,再利用生物素与固定着抗生蛋白链霉素的纳米金相结合,洗涤处理后,形成“抗生蛋白-生物素-DNA-生物素-抗生蛋白-纳米金”这样的复合物,对复合物上的纳米金进行溶解后用计时电位法进行分析,进而可以对待测 DNA 的量进行检测。Fang^[17]等人以纳米银标记寡核苷酸为探针,建立了高灵敏的电化学检测 DNA 的方法。他们将纳米银标记的寡核苷酸探针与靶基因序列互补杂交后,将 DNA 上的纳米银用浓硝酸溶解形成 Ag^+ 离子,然后通过阳极溶出伏安法测定 Ag^+ 的含量,以达到测定待测 DNA 的目的。他们还建立了一种银增强纳米金标记电化学检测 DNA 的新方法,将待测 ssDNA 固定在玻碳电极表面,然后与标记有纳米金的互补序列 ssDNA 杂交,最后将银沉积到纳米金的表面,通过示差脉冲伏安法测定银的含量达到测定待测寡核苷酸的目的,互补序列 DNA 的检测下限可达 50 pmol/L 。Fang^[11]等人还合成了一种新的 Cu/Au 核壳型纳米粒子,并将其应用于大肠杆菌毒素基因分析中。他们用低温法制备了一种以 Cu 为核,Au 薄层为壳的核壳型纳米粒子,使之易于和 ssDNA 进行功能性聚合,这种核壳型 Cu/Au 纳米粒子与有 5'-巯基修饰的 ssDNA 偶联,制备成纳米标记的 DNA 探针,待测 ssDNA 固定在玻碳电极表面,当它与相对应的纳米 Cu/Au 核壳型纳米粒子标记 DNA 探针杂交后形成含有纳米标记物的 DNA 杂交分子,用酸将标记物中的纳米粒子溶解后使用高灵敏的阳极溶出伏安法进行测定,检测大肠杆菌毒素 DNA 的下限为 5.0 pmol/L 。Wang^[18]利用电化学译码技术(coding technology),结合 CdS、ZnS、PbS 三种纳米粒子的电化学溶出检测,同时测定多个 DNA 目标分子。磁性微粒上标记多个不同的单链 DNA 序列,与不同纳米粒子标记的探针杂交后,酸性条件下化学法溶出金属离子,利用阳极溶出伏安法在不同电位下($-1.12\text{ V}(\text{Zn})$, $-0.68\text{ V}(\text{Cd})$ 和 $-0.53\text{ V}(\text{Pb})$)检测多个不同的 DNA 序列,为多种 DNA 的序列检测提供了一个新思路。Fang 等^[19]将联吡啶钴($\text{Co}(\text{bpy})_3^{3+}$)涂布在 SiO_2 纳米粒子上,得到电话活性物质 $\text{Co}(\text{bpy})_3^{3+}$ 功能化的纳米 SiO_2 粒子;将该功能化的纳米 SiO_2 粒子再利用硅烷化试剂三氯丙基二乙烯基三甲氧基硅烷和戊二醛标记在寡核苷酸上,得到电化学物质 $\text{Co}(\text{bpy})_3^{3+}$ 功能化的纳米 SiO_2 粒子标记的寡核苷酸探针;该探针与电极

上固定的待测 csDNA 杂交,通过微分脉冲伏安法检测 $\text{Co}(\text{bpy})_3^{3+}$ 的电化学信号,进行 csDNA 的分析检测,目标分子 csDNA 的检出限可达 $2.0 \times 10^{-10}\text{ mol/L}$ 。Wang 等^[20]利用包埋法制备的电话活性物质醛基二茂铁功能化的聚苯乙烯微球,标记目标 ssDNA,与磁性微粒标记的 csDNA 杂交,磁场分离杂交分子,乙腈溶出包埋的醛基二茂铁,计时电位法检测醛基二茂铁的电化学信号,进行 DNA 序列的测定。因一个聚苯乙烯微球可修饰 5×10^{11} 个醛基二茂铁分子,电化学信号得到极大的放大,大大提高检测的灵敏度,降低检出限,检测的目标 DNA 的检出限可达 $5.1 \times 10^{-21}\text{ mol}$ (31000 分子/ 20 mL)。Palecek 等^[21,22]在 DNA 序列的检测中引入磁性微粒,用磁性微粒标记寡核苷酸作为探针,与待测的 DNA 分子杂交后,磁场分离杂交分子,利用阴极溶出法进行 DNA 的检测,降低了检出限。Wang^[23]等人以纳米 CdS 为标记物检测 DNA 的杂交反应。并且采用电化学方法测定杂交复合物中的标记物。为了进一步提高检测的灵敏度,他们采用磁场富集的方法将磁性纳米粒子/DNA 复合物/CdS 标记物组装到薄层电极表面后,采用电位溶出分析的方法对溶解出的 Cd^{2+} 进行测定,由于它结合了磁场分离和高灵敏的电化学检测,使得检测限可达 100 fmol 。Wang 等^[15]成功地将 CdS 标记在碳纳米管增强的 DNA 探针上,用极灵敏的溶出伏安法检测 Cd^{2+} ,研制成了检测限达到 pg 级的 DNA 传感器。

6 展望

纳米技术在电化学 DNA 生物传感器研究中的应用,将继续是一个十分活跃的研究领域。今后合成新的高灵敏检测的纳米粒子和新的探针固定化技术将是纳米粒子 DNA 探针研究的方向。随着研究的不断深入, DNA 生物传感器的开发必将大大改进现有的 DNA 测定方法,并为快速、自动化检测基因奠定基础。纳米粒子以其独特的性能在电化学 DNA 生物传感器中将发挥更重要的作用,促进 DNA 生物传感器的进一步研究开发。

参考文献

- [1] Vercoutere W., Akeson M. Biosensors for DNA sequence detection[J]. *Current Opinion in Chemical Biology*, 2002; 6(6): 816-822
- [2] Thorp H. H., March T. Cutting Out the Middleman: DNA Biosensors Based on Electrochemical Oxidation[J]. *Trends in Biotech*, 1998; 16(3): 117-121
- [3] Niemeyer C. M. Tools for the biomolecular engineer[J]. *Science*, 2002; 297(5578): 62-63
- [4] Koropchak J. A., Sadain S., Yang X., et al. Nanoparticle Detection Methods for Chemical Analysis[J]. *Anal. Chem*, 1999; 71(11): 386A-394A
- [5] Jain K. K. Nanodiagnostics: application of nanotechnology in molecular diagnostics. *Expert Rev[J]. Mol. Diagn*, 2003; 3(2): 153-161
- [6] Ozsoz M., Erdem A., Kerman K., et al. Electrochemical genosensor based on colloidal Gold nanoparticles for the detection of factor V Leiden mutation using disposable pencil graphite electrodes[J]. *Anal. Chem*, 2003; 75(9): 2181-2187
- [7] Authier L., Grossiord C., Bessier P., et al. Gold nanoparticle-based quantitative electrochemical detection of amplified human cytomegalovirus DNA using disposable microband electrodes[J]. *Anal. Chem*, 2001; 73(18): 4450-4456
- [8] Wang J., Rincon O., Polsky R., et al. Electrochemical detection of DNA hybridization based on DNA-templated assembly of silver cluster[J].

- Electrochem. Commun, 2003;5(1): 83- 86
- [9] Cai H, Wang YQ, Fang Y Z, et al. Electrochemical detection of DNA hybridization based on silver- enhanced gold nanoparticle label[J]. Anal. Chim. Acta, 2002; 469(2): 165- 172
- [10] Wang J, Liu G D, Merko? i A. Particle- based detection of DNA hybridization using electrochemical stripping measurements of an iron tracer[J]. Anal. Chim. Acta, 2003; 482(2): 149- 155
- [11] Cai H, Zhu N N, Fang YZ, et al. Cu@ Au alloy nanoparticle as oligonucleotides labels for electrochemical stripping detection of DNA hybridization[J]. Biosens. Bioelectron, 2003; 18(11): 1311- 1319
- [12] Cheng G F, Zhao J, Tu Y H, He P G, Fang Y Z. A sensitive DNA electrochemical biosensor based on magnetite with a glassy carbon electrode modified by multi- walled carbon nanotubes in polypyrrole[J]. Anal. Chim. Acta, 2005; 533(1): 11- 16
- [13] 李静,秦晓民,丁焕平等. 磁性纳米微粒分离中药蛋白质的实验研究[J]. 生物磁学, 2005, 5(2): 1- 4
- [14] 王明华. 磁性纳米材料[J]. 生物磁学, 2002, 2(2): 12
- [15] Wang J, Liu G D, Jan M R, Zhu Q. Electrochemical detection of DNA hybridization based on carbon- nanotubes loaded with CdS tags. Electrochem. Commun, 2003, 5(12): 1000- 1004
- [16] Wang J, Polsky R, Danke X. Silver- Enhanced Colloidal Gold Electrochemical Stripping Detection of DNA Hybridization[J]. Langmuir, 2001, 17(19): 5739- 5741
- [17] Cai H, Xu Y, Zhu ZZ, et al. An electrochemical DNA hybridization detection assay based on a silver nanoparticle label[J]. Analyst, 2002, 127(6): 803- 808
- [18] Wang J, Liu G, Merko? i A. Electrochemical Coding Technology for Simultaneous Detection of Multiple DNA Targets[J]. J. Am. Chem. Soc, 2003; 125(11): 3214- 3215
- [19] Zhu N N, Cai H, Fang Y Z, et al. Tris(2, 2'- bipyridyl) cobalt(III) - doped silica nanoparticle DNA probe for the electrochemical detection of DNA hybridization[J]. Anal. Chim. Acta, 2003, 481(2): 181- 189
- [20] Wang J, Polsky R, Merko? i A, et al. "Electroactive Beads" for Ultrasensitive DNA Detection[J]. Langmuir, 2003; 19(4): 989- 991
- [21] Palecek E, Billova S, Havran L, et al. DNA hybridization at microbeads with cathodic stripping voltammetric detection[J]. Talanta, 2002, 56(5): 919- 930
- [22] Palecek E, Fojta M, Jelen F. New approaches in the development of DNA sensors: hybridization and electrochemical detection of DNA and RNA at two different surfaces[J]. Bioelectrochem, 2002, 56(1P2): 85- 90
- [23] Wang J, Dong GL, et al. Electrochemical stripping detection of DNA hybridization based on cadmium sulfide nanoparticle tags[J]. Electrochem. Commun, 2002, 4(9): 722- 726

趋磁细菌及其应用于生物导航的研究进展^{*}

东南大学生物电子学国家重点实验室 (南京 210096) 何世颖

东南大学生物科学与医学工程系 (南京 210096) 顾宁

摘要:趋磁性细菌是一种由于体内含有对磁场具有敏感性的磁小体,而能够沿着磁力线运动的特殊细菌,本文综述了趋磁细菌的分布、分类、特性、磁小体研究以及趋磁细菌在生物导航方面的研究进展。

关键词:趋磁细菌; 生物导航; 磁小体

Research on Magnetotactic Bacteria and the Application in Bio- navigation

HE Shi- ying, GU Ning

State Key Laboratory of Bioelectronics, Southeast University, Nanjing 210096, China

Department of Biomedical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China

ABSTRACT: Magnetotactic bacteria is a certain bacteria whose swimming direction could be manipulated by magnetic fields, due to the discovery of unique intracellular structure of small magnetic particles known as magnetosomes. Their distribution, classification, characteristic, its magnetosome, and the bio- navigation were introduced in this article.

Key words: magnetotactic bacteria; Bio- navigation; magnetosome

前言

生物磁现象的研究是目前高新技术活动中活跃的领域之一,生物磁导航是国内外研究的热点。磁场充满了生物生存是整个空间,1975年Blakemore发现了趋磁细菌^[1],趋磁细菌是有磁性的微生物,它们体内有一个或几个质点,几乎完全是由纯磁物质构成的立方磁性小体,使它们借助自身的鞭毛沿着与地磁场平行的方向运动^[2]。趋磁细菌沿地磁场磁力线迁移的能力可作为一种模式来研究地磁场对生物系统的影响,许多生物现象都与磁场有关,科学家发现,鸽子的头颅骨和喙部,嵌有一些细微的天然磁铁,它们像指南针一样为鸽子

导航。海豚、金枪鱼、海龟、候鸟、蝴蝶甚至某些海藻体内,都有微小磁体,但这些生物对外加磁场的反应不如趋磁细菌明显,了解趋磁细菌的趋磁行为可以为生物体内的类似的磁性导向提供基础。

本文介绍了国内外趋磁细菌和磁小体的研究现状,以推动趋磁细菌的深入研究,特别在生物导航方面的研究。

1 趋磁细菌的分类和运动特性

Blakemore将趋磁细菌作为单独的类群^[3],将它们分为两个属:趋磁水生螺菌属,和双丛生球菌属,目前发现的趋磁细

* 基金项目: 国家 863 计划重点课题(2004AA302G40), 预研基金项目(51409030405JW0604)

作者简介: 何世颖(1978-), 女, 博士生; hshiyng@seu.edu.cn, 025- 83792576, 13951679605

顾宁, 男, 博士, 教授, 博士生导师, guning@seu.edu.cn

收稿日期: 2006- 01- 18, 接受日期: 2006- 02- 16