

β -环糊精对中性红及荧光素包合性能的研究*

宫 斌 黄据芹 王怀友

(山东师范大学化学化工与材料科学学院, 济南 250014)

摘要 利用分光光度法及荧光法分别研究了 β -环糊精(β -CD)对荧光素和中性红的包合作用, 求出 β -CD 对荧光素和中性红的包结常数 K 分别为: 7.53×10^3 、 264 L/mol , 包结比 n 均为 1:1。计算了 β -CD 对荧光素和中性红包合反应的热力学参数 ΔG° 、 ΔH° 及 ΔS° , 对 β -CD 对荧光素和中性红的包合作用进行了对比, 探讨了 pH 值、 β -CD 浓度、放置时间、试剂加入顺序等因素对包合作用的影响。

关键词 荧光素 β -环糊精 中性红 超分子作用 包合物 紫外可见分光光度法 荧光分析法

环糊精是环糊精葡萄糖基转移酶作用于淀粉的产物, 一般常见的有 α -环糊精、 β -环糊精、 γ -环糊精, 它们分别由 6、7、8 个 α -D-吡喃葡萄糖单元, 以 α -1,4-糖苷键首尾相连而成的环状化合物, 目前应用最广的是 β -环糊精(β -CD)。环糊精成锥形圆筒状, 其中伯羟基和仲羟基分别位于环糊精的较小和较大的开口端, 致使其外侧为亲水性, 内侧为 C-3、C-5 氢原子和糖苷氧原子组成的空腔, 因此其内侧具有疏水性。环糊精的这种外亲水、内疏水的特性, 使其可同许多有机分子、无机离子、药物及生物小分子等客体结合形成包合物, 此外环糊精还具有类似于天然酶的疏水空腔, 可催化一些化学反应, 如酯水解、卤素烷基化、D-A 反应^[1]、聚合反应^[2]等。

目前研究环糊精超分子作用及基于环糊精超分子作用检测物质的方法有 NMR 法^[3,4]、荧光法^[5,6]、分光光度法^[7]、圆二色柱法^[8]、电化学法^[9]、ESEEM 法^[10]。基于环糊精的优良性质, 其在模拟酶^[11,12]、食品、化妆品、日用品、医药、环境保护等领域中有着广泛的应用。由于染料含发色基团或荧光基团, 因此常被用作客体分子借助光谱分析来研究其包合理论^[13-18]。荧光素是具有光致特性的染料, 在荧光标记中有着广泛的应用, 中性红是常用的染色剂, 常用来鉴别细胞死活。笔者用分光光度法和荧光法对 β -CD 和荧光素及 β -CD 和中性红的包合作用进行了研究, 并将 β -CD 对两种染料的包合作用进行了对比。通过比较 β -环糊精对荧光素和中性红的包合性能对比, 得出中性红更适合用作荧光探针与 β -CD 组成超分子体系, 为竞争包结测定药物奠定基础。

1 实验部分

1.1 主要仪器与试剂

分光光度计: UV-265 型, 日本岛津公司;

酸度计:pHS-3C 型, 上海雷磁仪器厂;

荧光分光光度计: LS-50 型, 美国 Perkin - Elmer 公司;

荧光素、中性红: 上海试剂三厂;

β -CD: 中国医药集团上海化学试剂公司, 超纯水重结晶两次, 80°C 真空干燥 24 h;

柠檬酸: 天津市博迪化工有限公司;

磷酸氢二钠: 中国医药集团上海化学试剂公司;

三(羟甲基)氨基甲烷: 中国医药集团上海化学试剂公司;

实验所用试剂均为分析纯;

实验所用水为超纯水。

1.2 实验过程

(1) 实验步骤 I

准确移取 2 mL 缓冲溶液(pH 3)、2 mL β -CD 溶液($5 \times 10^{-3} \text{ mol/L}$)于 10 mL 比色管中, 用水定容, 混匀。准确移取 2 mL 缓冲溶液(pH 3)、3 mL 荧光素溶液($1.0 \times 10^{-4} \text{ mol/L}$)于 10 mL 比色管中, 用水定容, 混匀。准确移取 2 mL 缓冲溶液(pH 3)、3 mL 荧光素溶液($1.0 \times 10^{-4} \text{ mol/L}$)、不同体积的 β -CD 溶液($5 \times 10^{-3} \text{ mol/L}$)于 10 mL 比色管中, 用水定容, 混匀, 超声 5 min, 室温静置 15 min。以试剂空白为参比, 于分光光度计上分别测定 β -CD、荧光素、荧光素- β -CD 包合物的吸光度。

(2) 实验步骤 II

准确移取 2 mL 缓冲溶液(pH 3)、1 mL 荧光素溶液($1.0 \times 10^{-6} \text{ mol/L}$)、不同体积的 β -CD 溶液($5 \times 10^{-3} \text{ mol/L}$)于 10 mL 比色管中, 用水定容, 混匀, 超声 5 min, 室温静置 15 min, 于荧光分光光度计上, 在最大激发波长 432 nm 下测定溶液的荧光强度。

* 山东省自然科学基金资助项目(Y2006B31)

收稿日期: 2010-01-04

(3) 实验步骤Ⅲ

准确移取2 mL缓冲溶液(pH 7.6)、0.5 mL中性红溶液(1.0×10^{-3} mol/L)、不同体积的 β -CD溶液(5×10^{-3} mol/L)于10 mL比色管中,用水定容,混匀,超声5 min,室温静置7 min,于荧光分光光度计上,在最大激发波长470 nm下分别测定溶液的荧光强度。

2 结果与讨论

2.1 荧光素- β -CD包合物及中性红- β -CD包合物的形成

按照实验步骤Ⅰ,分别测定 β -CD(1.0×10^{-3} mol/L)、荧光素(3.0×10^{-5} mol/L)、荧光素- β -CD包合物的吸光度,吸收光谱如图1所示。由图1可见, β -CD在300~600 nm没有吸收,荧光素和荧光素- β -CD包合物的最大吸收均在438 nm,但荧光素- β -CD包合物的吸收强度明显下降,表明荧光素和 β -CD形成了包合物。

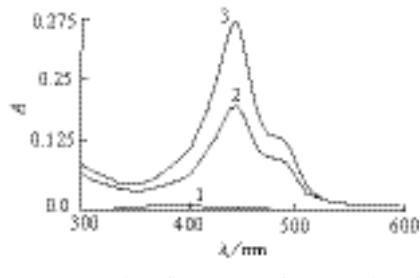


图1 吸收光谱
1— β -CD; 2—荧光素- β -CD包合物; 3—荧光素

按照实验步骤Ⅲ,分别测定中性红(5.0×10^{-4} mol/L)、中性红- β -CD包合物的荧光强度,荧光光谱见图2。

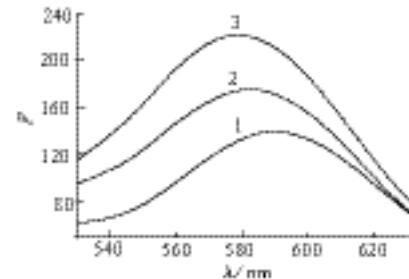


图2 荧光光谱
1—中性红; 2— β -CD的浓度为 2×10^{-4} mol/L;
3— β -CD的浓度为 8×10^{-4} mol/L

图2 荧光光谱

由图2可知,在最大激发波长470 nm激发下,中性红在590 nm处有最大发射,当加入 β -CD后,荧光强度显著增强,表明中性红和 β -CD形成了包合物。

2.2 pH的影响

(1) pH对 β -CD包合荧光素的影响

实验了不同pH值对 β -CD包结荧光素的影响并计算了不同pH值时的 ΔA (荧光素吸光度与荧光素- β -CD包合物吸光度的差值)。结果表明, ΔA 在酸性条件下较碱性条件下大,其中当pH 2时最大,pH 3时其次。考虑到pH 2时,吸收光谱的峰型不好,故选用pH 3的柠檬酸-磷酸氢二钠缓冲液控制 β -CD包结荧光素体系的酸度。

实验了不同pH对 β -CD包结中性红的影响并计算了不同pH值时的 ΔF (中性红荧光强度与中性红- β -CD包合物荧光强度的差值)。试验表明, ΔF 随pH增大而增大,当pH 7.6时最大,以后又逐渐减低,故选择pH 7.6的Tris-HCl缓冲液来控制 β -CD包结中性红体系的酸度。

2.3 放置时间

(1) 放置时间对 β -CD包合荧光素的影响

实验了放置时间对荧光素和 β -CD包合作用的影响,发现在放置10 min时溶液的荧光强度不再改变,因此选择放置15 min。由试验可知,溶液的荧光强度在室温下放置2 h仍保持稳定。

(2) 放置时间对 β -CD包合中性红的影响

实验了放置时间对中性红和 β -CD包合作用的影响,发现在放置5 min时溶液的荧光强度不再改变,因此选择放置7 min。由试验可知,溶液的荧光强度在室温下放置3 h仍保持稳定。

2.4 试剂加入顺序

(1) 试剂加入顺序对 β -CD包合荧光素的影响

试验了试剂加入顺序对 β -CD包合荧光素的影响,结果表明,最佳试剂加入顺序为:缓冲溶液、荧光素、 β -CD。

(2) 试剂加入顺序对 β -CD包合中性红的影响

试验了试剂加入顺序对 β -CD包合中性红的影响,结果表明,最佳试剂加入顺序为:缓冲溶液、中性红、 β -CD。

2.5 荧光素- β -CD包合物包合常数的测定

固定荧光素的浓度为 3.0×10^{-5} mol/L,改变 β -CD的浓度($0, 2 \times 10^{-4}, 4 \times 10^{-4}, 6 \times 10^{-4}, 8 \times 10^{-4}, 1.0 \times 10^{-3}, 1.2 \times 10^{-3}, 1.4 \times 10^{-3}, 1.6 \times 10^{-3}, 2.0 \times 10^{-3}, 3.0 \times 10^{-3}$ mol/L),按照实验步骤Ⅱ测定溶液吸光度。实验表明,荧光素的最大吸收波长位于438 nm,随着 β -CD的浓度逐渐增大,荧光素在438 nm处的吸收逐渐减弱,表明荧光素- β -CD包合物形成。若荧光素和 β -CD以1:1形式发生包合,则根据Hildebrand-Benesi^[19]方程,1/A与

$1/[CD]$ 之间呈线性关系如式(1), 线性曲线如图 3 所示。

$$\frac{1}{A} = \frac{1}{\varepsilon[G]_0 K[CD]} + \frac{1}{\varepsilon[G]_0} \quad (1)$$

式中: A —荧光素在 β -CD 存在时的吸光度;
 ε —摩尔吸光度 $L/cm \cdot mol$;
 $[G]_0$ —荧光素的初始浓度, mol/L ;
 K —表观形成常数;
 $[CD]$ — β -CD 的浓度, mol/L 。

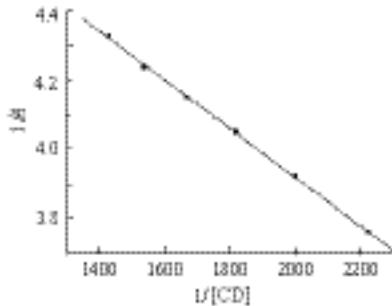


图 3 $1/A$ 与 $1/[CD]$ 的关系曲线

由图 3 可见, $1/A$ 与 $1/[CD]$ 呈良好的线性关系, 表明 β -CD 与荧光素是以 1:1 形式发生包合。计算得包合常数为 $7.53 \times 10^3 L/mol$ 。

2.6 中性红- β -CD 包合物包合常数的测定

固定中性红的浓度为 $5.0 \times 10^{-5} mol/L$, 改变 β -CD 的浓度, 按照实验步骤 III 测定荧光强度, 结果如图 4 所示。

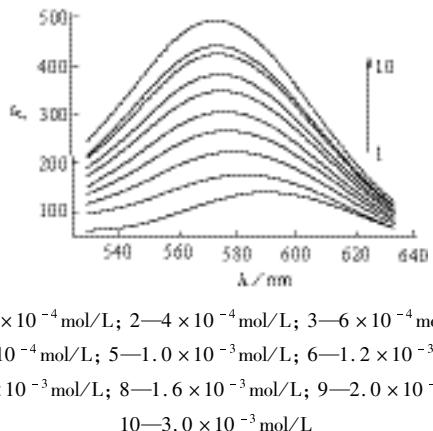


图 4 中性红在不同浓度 β -环糊精存在下的荧光光谱

由图 4 可知, 在 470 nm 激发波长下, 中性红在 590 nm 处有最大发射, 随着 β -CD 的浓度的逐渐增加, 溶液的荧光强度逐渐增大, 此现象表明, β -CD 和中性红发生了包结作用。若 β -CD 与中性红以 1:1 形式发生包合, 则根据 Hildebrand-Benesi 方程^[20], $1/(F-F_0)$ 与 $1/[CD]_0$ 之间应呈线性关系, 线性方程如式(2), 线性关系如图 5 所示。

$$\frac{1}{F-F_0} = \frac{1}{Kk[P]_0[CD]_0} + \frac{1}{kQ[P]_0} \quad (2)$$

式中: F —中性红在 β -CD 存在时的荧光强度;
 F_0 —中性红在 β -CD 不存在时的荧光强度;
 K —表观形成常数;
 k —仪器常数;
 $[P]_0$ —中性红的初始浓度, mol/L ;
 $[CD]_0$ — β -环糊精的初始浓度, mol/L ;
 Q —包合物的量子产率。

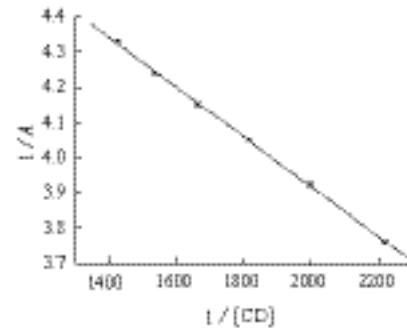


图 5 $1/(F-F_0)$ 与 $1/[CD]_0$ 的关系曲线

如图 5 所示, $1/(F-F_0)$ 与 $1/[CD]_0$ 呈良好的线性关系, 说明中性红和 β -环糊精是以 1:1 的形式进行包合, 并求得结合常数为 $264 L/mol$ 。

2.7 包合物的热力学参数

荧光素- β -CD 包合物及中性红- β -CD 包合物的热力学参数 ΔG^0 、 ΔH^0 及 ΔS^0 可通过 Van't Hoff 方程: $\ln K = \Delta H^0 / RT + \Delta S^0 / R$ 求得。其中 ΔH^0 与 ΔS^0 可由 $\ln K$ 对 $1/T$ 作图的斜率和截距求出, ΔG^0 可根据方程 $\Delta G^0 = \Delta H^0 - T\Delta S^0$ 求得。结果分别见表 1、表 2。

表 1 荧光素- β -CD 包合物的热力学参数

温度/ K	$K / L \cdot mol^{-1}$	$\Delta G^0 / kJ \cdot mol^{-1}$	$\Delta H^0 / kJ \cdot mol^{-1}$	$\Delta S^0 / kJ \cdot (mol \cdot K)^{-1}$
301	7.17×10^3	-1156.75		
317	8.16×10^3	-1246.03		
319	8.67×10^3	-1257.19	522.83	5.58
329	1.02×10^4	-1312.99		

表 2 中性红- β -CD 包合物的热力学参数

温度/ K	$K / L \cdot mol^{-1}$	$\Delta G^0 / kJ \cdot mol^{-1}$	$\Delta H^0 / kJ \cdot mol^{-1}$	$\Delta S^0 / kJ \cdot (mol \cdot K)^{-1}$
298	264	-1.74×10^5		
303	211	-1.77×10^5		
308	119	-1.80×10^5	15.0	58.4
313	91	-1.83×10^5		

注: K 为表观形成常数; ΔG^0 为标准自由能增值; ΔH^0 为焓变; ΔS^0 为熵变。

由表 1 可看出, 随着温度升高, K 逐渐增大, 表明温度越高 β -CD 包合荧光素的能力越强, ΔH^0 、 ΔS^0

均为正值,说明包合过程是由熵变控制,疏水作用是主要驱动力^[21]。由表2可看出,随着温度升高,K逐渐减小,表明温度越高 β -CD包合荧光素的能力越弱, ΔH^0 、 ΔS^0 均为正值,说明包合过程是由熵变控制,疏水作用是主要驱动力^[21]。

2.8 β -CD对中性红和荧光素包合作用对比

(1) 包合常数的对比

由实验可知, β -CD对荧光素的包合常数为 7.53×10^3 L/mol, β -CD对中性红的包合常数为264 L/mol。可见 β -CD对荧光素的包合常数相对较大,而 β -CD对中性红的包合常数适中,因此中性红更适合作 β -CD竞争包结反应的探针。

(2) 荧光敏锐度对比

若加入相同量的 β -CD,荧光素和中性红的荧光强度变化敏锐性用 $f = (F_0 - F)/F_0$ 表示。当 β -CD的浓度同为 1.0×10^{-3} mol/L时,对于荧光素而言, $f = (139.93 - 85.20)/139.93 = 0.39$,对中性红而言, $f = (346.99 - 140.79)/140.79 = 0.59$ 。显然,加入 β -CD后中性红的荧光改变较荧光素大。这说明,中性红对 β -CD更为敏锐,故中性红较荧光素更适合作 β -CD竞争包结反应的探针。

由此可知,在以 β -CD作主体的超分子竞争识别反应中,中性红更适合作荧光探针。

3 结论

研究了荧光素及中性红和 β -CD的包合作用,计算出了各自的热力学常数,并将 β -CD对荧光素和中性红的包结作用进行了对比,发现中性红更适合作竞争包结的荧光探针。该研究可拓展 β -CD包合物研究的范围,为竞争包结法研究一些无发色基团和无荧光基团的体系奠定基础。

参 考 文 献

- [1] Breslow R, Steven D D. Biomimetic reactions catalyzed by cyclodextrins and their derivatives [J]. Chem Rev, 1998, 98 (5): 1997–2012.
- [2] Osaki M, Takashima Y, Yamaguchi H, et al. Polymerization of lactones Initiated by cyclodextrins: Effects of cyclodextrins on the initiation and propagation reactions [J]. Macromolecules, 2007, 40(9): 3154–3158.
- [3] Bekiroglu S, Kenne L, Sandström C. ^1H NMR studies of maltose, maltoheptaose, α -, β -, and γ -cyclodextrins, and complexes in aqueous solutions with hydroxy protons as structural probes [J]. J Org Chem, 2003, 68(5): 1671–1678.
- [4] Hallberg F, Christoph F, Weise P V, et al. Molecular complexation and binding studied by electrophoretic NMR spectroscopy [J]. J Am Chem Soc, 2008, 130(24): 7550–7551.
- [5] Freeman R, Finder T, Bahshi L, et al. β -cyclodextrin – modified Cd Se/ZnS quantum dots for sensing and chiroselective analysis [J]. Nano Lett, 2009, 9(5): 2073–2076.
- [6] Nakashima H, Yoshida N. Fluorescent detection for cyclic and acyclic Alcohol guests by naphthalene – appended amino – β -cyclodextrins [J]. Org Lett, 2006, 8(22): 4997–5000.
- [7] Yuan H N, Yao S J, Shen L Q, et al. Preparation and characterization of inclusion complexes of β -cyclodextrin – BITC and β -cyclodextrin – PEITC [J]. Ind Eng Chem Res, 2009, 48(10): 5070–5078.
- [8] Park J W, Lee S Y, Song H J, et al. Self – inclusion behavior and circular dichroism of aliphatic chain – linked β -cyclodextrins viologen compounds and their reduced forms depending on the side of modification [J]. J Org Chem, 2005, 70(23): 9505–9513.
- [9] Deryabina M A, Hansen S H, Stengaard J, et al. Effect of α -cyclodextrin on drug distribution studied by electrochemistry at Interfaces between immiscible electrolyte solutions [J]. J Phys Chem B, 2009, 113(20): 7263–7269.
- [10] Ionita G, Florent M, Goldfarb D, et al. Studying supramolecular assemblies by ESEEM spectroscopy: Inclusion complexes of cyclodextrins [J]. J Phys Chem B, 2009, 113(17): 5781–5787.
- [11] Liu Y, Li B, Li L, et al. Synthesis of Organoselenium – Modified β -Cyclodextrins Possessing a 1, 2-Benziselenazol-3 (2H) – one Moiety and Their Enzyme – Mimic Study [J]. Helv Chim Actam, 2002, 85(1): 9–18.
- [12] Naughton M M, Engman L, Birmingham A, et al. Cyclodextrin – Derived Diorganyl Tellurides as Glutathione Peroxidase Mimics and Inhibitors of Thioredoxin Reductase and Cancer Cell Growth [J]. J Med Chem, 2004, 47(1): 233–239.
- [13] Wang H Y, Han J, Feng X G, et al. Study of inclusion complex formation between tropaeolin OO and β -cyclodextrin by spectrophotometry and Infrared spectroscopy [J]. Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy, 2006, 65(1): 100–105.
- [14] Wang H Y, Han J, Feng X G, et al. Spectroscopic study of orange G – β -cyclodextrin complex and its analytical application [J]. Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy, 2007, 66(3): 578–585.
- [15] Xie H, Wang H Y, Ma L Y, et al. Spectrophotometric study of the inclusion complex between β -cyclodextrin and dibenzoyl peroxide and its analytical application [J]. Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy, 2005, 62(1–3): 197–202.
- [16] Liu Y, Chen Y, Liu S X, et al. Unique fluorescence behavior of rhodamine B upon inclusion complexation with novel Bis(β -cyclodextrin – 6 – yl) 2,2'-bipyridine-4,4'-dicarboxylate [J]. Organic Letters, 2001, 3(11): 1657–1660.
- [17] Zhao G C, Zhu J J, Chen H Y. Spectroscopic studies of the interactive model of methylene blue with DNA by means of β -cyclodextrin [J]. Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy, 2005, 62(1–3): 197–202.

- lecular Spectroscopy, 1999, 55(5): 1109 – 1117.
- [18] Zhao G C, Zhu J J, Chen H Y. Voltammetric studies of the interaction of methylene blue with DNA by means of β -cyclodextrin [J]. Analytica Chimica Acta, 1999, 394 (2 – 3): 337 – 344.
- [19] Davies J E D, Ripmeester J A, Atwood J L, et al. Physical methods in supramolecular chemistry [M]. Oxford: Pergamon Press, 1996: 426 – 432.
- [20] Catena G C, Bright F V. Thermodynamic study on the effects of beta – cyclodextrin inclusion with amilinonaphthalenesulfonates [J]. Anal Chim, 1989, 61(8): 905 – 909.
- [21] 童林荟. 环糊精化学 [M]. 北京: 科学出版社, 2001: 164 – 176.

STUDY ON INCLUSION REACTION OF β -CYCLODEXTRIN WITH FLUORESCEIN AND NEUTRAL RED

Gong Bin, Huang Juqin, Wang Huaiyou

(College of Chemistry, Chemical Engineering and Materials Science, Shandong Normal University, Jinan 250014, China)

ABSTRACT The inclusion interaction between fluorescein (FL), neutral red (NR) and β -cyclodextrin have been studied by fluorimetry and spectrophotometry. 7.53×10^3 L/mol and 264 L/mol, inclusion constants of FL and NR with β -cyclodextrin, were obtained respectively. With inclusion of β -cyclodextrin stoichiometric ratio was 1:1 either FL or NR. The thermodynamic parameters, ΔG° , ΔH° and ΔS° were calculated. Effects of the pH, reaction time, the addition order of reagents, concentrations of β -cyclodextrin on the inclusion reaction were examined. Also the difference between the two inclusion reactions was discussed.

KEYWORDS fluorescein, β -cyclodextrin, neutral red, supramolecular chemistry, inclusion complexes, UV – Vis spectrophotometry, fluorescence method

微生物分子生物学检测高新技术问世

日前,中国地质科学院水文地质环境地质研究所建立了适合土样和地下水样的微生物分子生物学检测高新技术。

微生物分子生物学检测技术通过对不同样品微生物DNA的提取,将提取的DNA进行扩增并识别,来确定样品中微生物的多样性和种属,具有先进性和准确性,免去了繁琐、耗时的培养过程,可检出传统方法不可培养的微生物,并能原位反映微生物群落结构的真实情况。微生物分子生物学技术的建立,突破了长期以来一直采用的传统微生物培养技术方法。该技术在污染修复,成岩、成矿、成油机理研究,微生物找矿,污水处理等方面具有广泛的应用前景,是一种快速准确的高新技术。目前,传统的微生物培养方法只能检测少量可培养的微生物,不能揭示其余大量的微生物,以至对水土环境中微生物的多样性认识以偏概全。近年来,通过直接对样品的DNA分析揭示其微生物种类的技术得到了较大发展,该技术可不通过对微生物进行培养的方法,更快速、准确地反映微生物种群的多样性,为研究水土环境中的微生物组成开辟了一条崭新的道路。通过对水土样品DNA提取纯化,利用聚合酶链式反应(PCR)技术,对样品DNA进行扩增,对扩增后的产物再利用变性梯度凝胶电泳(DGGE)技术,将不同微生物类型的DNA基因片段分离,直观显示样品中微生物群落的多样性。微生物分子生物学检测技术的建立,突破了长期以来一直采用的传统微生物培养技术方法,可以更加直观全面地将样品的多样性展示出来,以及准确鉴定微生物种属。它不仅可以应用于科学的研究,在具体的实践工作中也具有很好的应用前景,可显示在污染环境修复过程中,是哪类微生物大量繁殖并修复污染,这类微生物就可人工添加至类似污染环境,加速污染修复过程。同时,在成岩

成矿成油的过程中,通过微生物参与技术,可以找到并鉴定相关的微生物种类,为成岩、成矿、成油机理研究以及利用微生物找矿而建立一种快速有效的手段。(中国化工仪器网)

科学家研制出可称出分子质量的微小天平

新浪科技讯北京时间2月15日消息,据国外媒体报道,科学家研制出世界上最微小的天平,可以实时称量单个分子的质量。借助这种微小天平,研究人员称出了某种蛋白质分子和金纳米微粒的质量。

据了解,世界上最微小的天平是由美国加州理工学院物理学家迈克尔·卢克斯和他的同事研制的。研究人员可以利用这种微型仪器实时称量单个分子的质量,最小天平可谓用途广泛。化学家可以用这种高灵敏衡器来确定未知物质的化学特性。而加州理工学院研究小组表示,科学家利用这种微型仪器可以在几毫秒内分析上千种蛋白质,而且所需样本更少。

科学家研制出的世界最微小天平其实是一种微型谐振器,只有2 μm长,120 nm宽。它的工作原理是:当称量一个分子的质量时,含有这种分子的溶液喷洒到这一微型谐振器上。当分子“降落”到谐振器上,会使谐振器的震动方式发生改变。微型谐振器和一个电路相连,电路记录下震动改变,并传输至计算机,随后计算出分子的质量。每一次分子降落到谐振器上,都会计算出一个分子的质量;最终上百个分子堆积在谐振器上,科学家可以多次测量,得到非常精确的分子质量数据。

截至目前,卢克斯利用这种最微小天平测量出金纳米微粒的质量以及3种牛奶血清蛋白的质量。目前,他正带领研究小组研制新型谐振器。他们希望新型谐振器的震动方式更为复杂,能够做出更为精确的测量。(中国分析计量网)