

HIGH PERFORMANCE
CAPILLARY ELECTROPHORESIS
AND ITS APPLICATION
IN BOTANY STUDIES

高效 毛细管电泳技术 及在植物学 研究中的应用

李海英 著

黑龙江科学技术出版社



高效毛细管电泳技术及在 植物学研究中的应用

HIGH PERFORMANCE CAPILLARY ELECTROPHORESIS
AND ITS APPLICATION IN BOTANY STUDIES

李海英 著

黑龙江科学技术出版社

中国·哈尔滨

图书在版编目 (CIP) 数据

高效毛细管电泳技术及在植物学研究中的应用/李海英编著. —哈尔滨: 黑龙江科学技术出版社, 2005.9
ISBN 7-5388-4976-9

I. 高... II. 李... III. ①毛细管-电泳-应用-甘草-中药化学成分-分析②毛细管-电泳-应用-景天科-中药化学成分-分析 IV. R282.71

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2005) 第 116660 号

责任编辑 常瀛莲
封面设计 洪 冰

高效毛细管电泳技术及在植物学研究中的应用
**HIGH PERFORMANCE CAPILLARY ELECTROPHORESIS
AND ITS APPLICATION IN BOTANY STUDIES**
李海英 著

出 版 黑龙江科学技术出版社
(150001 哈尔滨市南岗区建设街 41 号)
电话 (0451) 53642106 电传 53642143 (发行部)

印 刷 黑龙江龙新印刷有限公司

发 行 黑龙江科学技术出版社

开 本 850×1168 1/32

印 张 4.875

字 数 160 000

版 次 2005 年 11 月第 1 版·2005 年 11 月第 1 次印刷

印 数 1-1 000

书 号 ISBN 7-5388-4976-9/R·1244

定 价 15.00 元

前 言

随着我国现代化的发展和科学技术的进步，生物技术的发展极为迅速。高效毛细管电泳（High Performance Capillary Electrophoresis，缩写为 HPCE）技术作为高效、快速、自动化的分析方法，在生命科学、药理学、环境科学、农学及食品科学等领域有着十分广泛的应用。

本书从高效毛细管电泳技术的特点、国内外的发展趋势、操作模式、应用等方面进行了全面阐述。

药用植物甘草 (*glycyrrhiza*)，我国古代医学家喻其为“国老”。它具有补脾益气、清热解毒、祛痰止咳、缓急止痛、调和诸药之功效，具有良好的开发前景。经现代药理学证明，甘草的主要有效成分是甘草酸 (*glycyrrhizic acid*)。对甘草酸常用的测定方法有薄层色谱法、紫外分光光度法、气相色谱法和液相色谱法，这些方法均需进行样品的前处理，且重现性不好。本书介绍了在优化的实验条件下，采用高效毛细管电泳技术对甘草中甘草酸含量的成功测定，克服了以往分离技术的缺点，为甘草酸的分离分析开辟了新的方法。

高山红景天 (*Rhodiola sachalinensis*) 为多年生草本植物，具有抗疲劳、抗高温、抗缺氧、抗肿瘤、抗衰老、防止心血管系统疾病、增强机体免疫力的作用，无毒副作用，且具有安神益智等药效。其有效成分为红景天甙 (*salidroside*)，对红景天甙的测定从 20 世纪 80 年代中期就有人开始进行研究，采用的主要方法有重氮盐

比色法、双波长薄层扫描法、薄层层析—紫外分光光度法，以及高效液相色谱法、高效液相层析法，这些方法具有柱效低、重现性差等缺点。本书介绍的红景天甙的高效毛细管电泳测定技术，具有分辨率高、检测灵敏度高、进样量少、成本低、再现性好、自动化等优点，使高效毛细管电泳技术在药物分析上显示出巨大潜力。

通过聚合酶链式反应（PCR）技术进行基因的体外扩增，是当今分子生物学中十分活跃的一个研究领域。通常采用的平板或垂直板凝胶电泳对 PCR 产物的分析，不利于定量和自动化。本书向读者介绍了采用高效毛细管电泳技术分离分析 PCR 产物的基本原理，重点阐述了在优化的实验条件下，成功的分离分析了三裂叶豚草（*Ambrosia trifida* L.）聚合酶链式反应产物和标准寡核苷酸片段，显示了高效毛细管分析快速、定量准确、使用方便的优势，使高效毛细管电泳技术在基因研究领域的应用起到积极的促进作用。

希望本书的出版可以为今后的同类研究能够提供一些借鉴和帮助。同时由于笔者经验不足、时间有限，本书的内容和方法还存在一些不足之处，敬请各位专家批评指正。在本书出版之际，感谢我的博士后合作导师聂绍荃教授、祖元刚教授对我的指导和教诲。

2005年8月于黑龙江大学
李海英

目 录

第一章 高效毛细管电泳技术概述·····	(1)
一、高效毛细管电泳技术及其特点·····	(1)
二、高效毛细管电泳技术在国内外的的发展·····	(2)
三、高效毛细管电泳仪的逐步完善和商品仪器的 竞相推出·····	(8)
四、毛细管电泳的几种模式·····	(10)
五、高效毛细管电泳技术的应用·····	(26)
第二章 高效毛细管电泳技术的应用·····	(41)
第一节 高效毛细管电泳技术测定甘草中甘草酸 的含量·····	(41)
一、概述·····	(41)
二、材料与amp;方法·····	(67)
三、结果与amp;讨论·····	(68)
四、结论·····	(75)
五、参考文献·····	(75)
第二节 高效毛细管电泳技术测定高山红景天中红景 天甙的含量·····	(84)
一、概述·····	(84)
二、材料与amp;方法·····	(92)
三、结果与amp;讨论·····	(94)
四、结论·····	(97)
五、参考文献·····	(97)
第三节 高效毛细管电泳技术检测植物 PCR 产物·····	(109)
一、概述·····	(109)
二、材料与amp;方法·····	(121)

三、结果与分析·····	(128)
四、结论·····	(131)
五、参考文献·····	(132)
第三章 270A - HT 型高效毛细管电泳仪·····	(142)
第一节 270A - HT 型高效毛细管电泳仪简介·····	(142)
一、270A - HT 型高效毛细管电泳仪的特点·····	(142)
二、270A - HT 型高效毛细管电泳仪的性能指标·····	(143)
三、关于 Turbochrom 软件·····	(144)
第二节 270A - HT 型高效毛细管电泳仪的故障 处理·····	(145)
一、270A - HT 型高效毛细管电泳仪的日常维护·····	(145)
二、故障原因及处理办法·····	(145)

第一章 高效毛细管电泳技术概述

一、高效毛细管电泳技术及其特点

高效毛细管电泳 (High Performance Capillary Electrophoresis, 缩写为 HPCE), 被誉为是 20 世纪 90 年代最重要的分离分析工具之一。在已经到来的 21 世纪, 它将作为解决全球性经济问题的关键技术之一, 在迎接人口、资源、能源、食物和环境等五大方面的挑战中起到举足轻重的作用。

高效毛细管电泳是离子或荷电粒子以电场为驱动力, 在毛细管中按其淌度和分配系数不同进行高效、快速分离的一种电泳新技术。HPCE 最基本的仪器结构如图 1-1 所示。

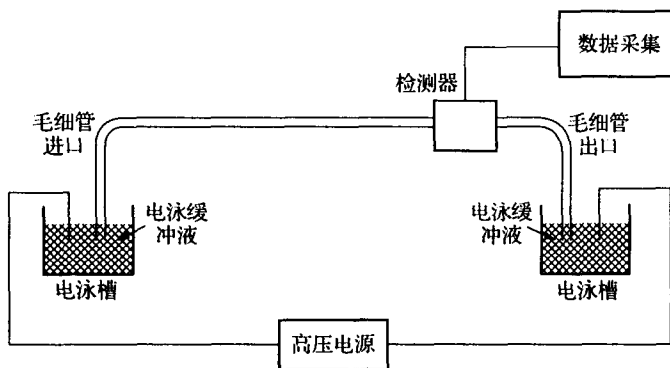


图 1-1 毛细管电泳基本仪器结构示意图

Fig. 1-1 Basic Configuration of Capillary Electrophoresis

在应用广泛的毛细管区带电泳 (Capillary Zone Electrophore-

sis, 缩写为 CZE) 中, 毛细管和电板槽内充有相同组分和相同浓度的缓冲溶液。样品从毛细管的一端进入, 当毛细管两端加上一定的电压后, 荷电溶质便朝着与其电荷极性相反的电极方向移动, 由于样品组分间的淌度不同, 所以它们的迁移速率也不同, 因而经过一定时间后, 各组分将按其速率大小顺序, 依次到达检测器被检出, 从数据采集系统中便得到电泳图谱, 从电泳图谱便可以进行定性和定量分析。

在高效毛细管电泳中, 管内径一般在 $25\sim 75\ \mu\text{m}$ 之间, 从而使毛细管具有良好的散热效能, 允许在毛细管两端加上 $30\ \text{kV}$ 的高电压, 分离毛细管的纵向电场强度可达到 $400\ \text{V/cm}$ 以上, 因而分离操作可以在很短的时间内完成, 分离效率可达到 $400\ 000$ 理论塔板/ m 。毛细管的进样体积在 μL 级, 样品浓度可低于 $10^{-4}\ \text{mol/L}$ 。因此, HPCE 达到了仪器分析技术所要求的高效、快速、样品用量少等优异的特点。此外, HPCE 还有易于自动化、操作简便、溶剂消耗少、环境污染小等优点, 这些优点使毛细管电泳在短短的十几年中, 特别是在最近几年, 在生物化学界掀起了高效毛细管电泳分离分析的一股新热潮。

2

二、高效毛细管电泳技术在国内外的发展

毛细管电泳刚一诞生, 就面对着现代生物技术的发展所提供的极其丰富的应用背景, 其他相关技术难以解决或难以很好解决的课题成为毛细管电泳发展的源泉和动力。自 20 世纪 80 年代以来, Jorgenson 和 Lukacs 等人做了大量的开创性工作, 他们使用了 $75\ \mu\text{m}$ 内径的毛细管柱, 并做在线检测, 对不同的对象实现了高效的分离, 同时他们还就分离的机理、高电场和小内径对高效性能的影响等问题进行了讨论。由于这些开创性的工作, 高效毛细管电泳显示了其在肽、蛋白质、核苷酸方面的分离分析, 甚至在快速序列测定方面的巨大潜力, 而这种潜力又正好适应了各国在以生物工程、分子生物学为代表的生命科学各个领域对各种对

象的分离分析和微量制备的迫切需要。因此，以 1989 年 2 月在美国波士顿召开的第一届国际毛细管电泳会议和在此前出现的第一批毛细管电泳商品仪器为代表，在 20 世纪 90 年代初期出现了全世界范围的大规模关于毛细管的研究和应用工作。从 1989 年到 1994 年连续六届的国际毛细管电泳会议，可以看出，越来越多的学者对毛细管电泳开展了大量的工作，极大地推动了这一技术的发展。

毛细管电泳作为一种技术，在不断扩大其应用范围，深入解决应用领域所暴露的各种问题的同时，也需要着重注意自身的完善和发展。一般地说，这种完善和发展主要涉及到柱系统、检测器和进样。但进入 20 世纪 90 年代中期以来，特别引人注目的则是毛细管电色谱技术和微毛细管电泳技术。

1. 毛细管电色谱

毛细管电色谱技术，又称 CEC，虽然早已被很多人注意，但在 1999 年的 Orlando 会上所展示的工作则更令人耳目一新，已被称为一种新的电分离技术，它可以被看作是 CE 和 HPLC 的进一步结合，在一根 50~100 μm 内径的毛细管内填充 HPLC 常用的、但粒度更小 (1~3 μm) 的固定相，比如 C18，由电渗流代替泵带动溶剂通过固定床。对于中性物质分离，通常由流动相和固定相之间的分配实现；而对于带电粒子，则还借助于其不同的淌度。目前的数据表明，同样是反相型的分离，CEC 的柱效是标准反相 HPLC 的 5~10 倍；而对于带电粒子的分离，以强阳离子交换树脂分离强极性三环抗抑郁剂所得的数据，竟达到令人难以置信的 2×10^6 理论塔板/m。直观地看，CEC 采用的是电场驱动的电渗流 (EOF)，较 HPLC 用压力驱动流动相显示了若干重要的优越性：其一是 EOF 扁平的流型本身就能比 HPLC 的抛物线流型有高得多的柱效；另一方面，由于没有背压问题，在用 EOF 推动的系统中可以使用更小的粒子，因此有更高的分辨能力。实验还表明，在高 pH 下，电渗流很大，CEC 有可能解决

大范围中性粒子的分离问题，而不需要像 MEKC 那样使用表面活性剂，因此有利于和 MS 联用。即使是在低 pH 下，如果选择合适的填料，如离子交换树脂，也可以分离如前面所述的抗抑郁剂。

2. 微毛细管电泳

微系统技术在毛细管电泳中的不断应用是当前技术发展的又一点，实际上也是所谓的“在玻璃板上的实验室”（laboratory on-chip）的一个体现。由于应用的结果令人振奋，因此参与的研究小组越来越多，现在的思路是把化学反应也包括进来，即在玻璃上蚀刻，形成一个网，在其上实现化学反应，并把产物引入毛细管柱进行电泳分离。例如，把样品和免疫试剂一起用电渗流泵引入反应室，然后注射到一个分离通道里，并对结果加以检测，成为微免疫检测装置。或者使核苷酸探针和特殊的基因序列反应，然后对产物进行分离，用于 DNA 诊断。对临床仪器来说，检测限必须很低，目前用荧光检测，已达到的检测限约 10 000 个分子。这样的微毛细管电泳装置由于柱短，场强大，因此速度快，效率高，同时样品用量小，检测限低，特别是如果蚀刻技术比较完善，成本也不高，就会很容易实现一系列毛细管的平行操作。普遍认为，微毛细管电泳是一个很有潜力的工具，在已经进入纳米时代的 21 世纪可能会显示出更大的发展前景。

3. 柱和检测器

技术方面的大量工作仍集中于柱和检测器，前者包括柱本身、管壁改性和溶剂系统；后者以质谱为主，也包括电化学检测器等。

用不同有机聚合物制备的中空纤维有可能作为石英毛细管的一个补充，用于毛细管电泳。目前这种柱仍需在检测窗附近加上一段熔融石英，这种管子表面也可以通过各种化学反应改性。但因为表面没有 Si-O-C 链，因此它的化学稳定性要较改性的石英柱好。此外，沿袭色谱的传统做法在常用的石英毛细管内壁上

的改性工作仍在进行,其主要做法是引入含有烷基硅烷单分子层的乙烯基团,把一个合适的单体共聚到一个硅烷单分子层上,所得的涂层在 pH 为 2~10 范围内都很稳定,电渗流几乎可省略,重复性也很好。

在关于柱内介质的研究中,除了已提及的各种功能性添加剂外,目前仍在活跃的是非水体系。非水体系的组成多为有机溶剂,如甲醇、乙腈、二甲基甲酰胺等。在非水体系中,壁吸附和表面活性剂的沉积等现象较少,这通常是由于含水体系中常见的疏水相互作用没有那么强烈的缘故。此外,非水系统中的电渗流较易被控制,而这种体系的选择性分离也通过非水溶剂和不同电介质混合物之间的离子与离子相互作用加以调节。

迄今为止,毛细管电泳的检测器仍以紫外为主。配有多波长扫描或二极管阵列的紫外检测器仍是目前高档商品仪器的基本配置。此外,激光诱导荧光检测也被越来越多的应用于各个方面,以求对一些目的化合物有更高的灵敏度。电化学检测器的研究仍在进行,特别是用于解决儿茶酚胺、多巴胺等一些神经传递介质的检测问题。为了弥补电化学检测器不能检测其他一些神经传递介质的不足,有人提出可否用生物传感器承担这一功能,比如用膜做接受器,让目的配体(分析对象)打开膜上的离子通道,以获得检测。

在毛细管电泳中,尽管仍有价格和技术方面的种种制约,但公认最强大的检测器是质谱。人们预期 CE-MS 的大范围使用,将会对生物技术的发展产生极其重要的影响,就像 20 世纪 60 年代气相色谱-质谱(GC-MS)对石油工业产生的影响一样。在已经出现的各种连接方式中,电喷雾电离是最为有效的一种方式;就质谱本身而言,时间飞行质谱(TOF)具有极快的检测速度($>10^3$ 质谱/s)和极高的灵敏度;扫描速度较低的电动力学离子(如四极质谱)灵敏度仍然不错,同时又有多维质谱($MS^n, n>2$)的功能;此外,Fourier 变换离子环回旋加速响应

质谱，也能提供很高的灵敏度以及极高的分辨率，并同样具有多维质谱的功能，但它的扫描速度很低（ $0.5 \sim 1$ 质谱/ s）。目前，商品 CE-MS 连接的技术问题已基本解决，一些公司已纷纷推出用于连接的接口。

上述 CE-MS 中，CE 通常是指毛细管区带电泳，缓冲液基本上自由溶液。对于 MECC 而言，由于运行缓冲液中表面活性剂浓度过高，因此存在一定的问题。解决方法包括采用高分子量表面活性剂以降低它的浓度，从而避开在界面上产生的大量离子干扰质谱；也可以采用特别的填充方法，以避免表面活性剂进入界面，或者用大气压化学电离代替电喷雾电离。

除了 CE-MS 外，CE-NMR，CE-ICP 等都有报道。CE-NMR 利用一种专门的探针头和连续的流动池作为界面，也被用于纳升级的检测。

6

4. 进样及样品前处理

进样和进样前样品预处理技术，是毛细管电泳中柱和检测以外另一种非常重要的技术。各种不同的预浓缩法正在被广泛的使用，以期弥补 CE 检测的浓度检测限的不足。一致的办法还有小分子的堆积法、常用于肽类样品的等速电泳法以及等电聚焦法。还有后一个时期发展起来的电压极性切换法（有时称场放大技术）和固相预柱浓缩法。所谓场放大技术，在一个很长的样品区带施加与分析电压极性相反的电压，将样品区带压缩，使样品组分形成一个较窄的区带，并排除一部分溶剂达到富集效果，富集结束后再反转电压极性，开始分析；而固相预柱通常装有类似于色谱所用的填料，对样品作选择性预浓缩，但流经固定相的组分谱带通常较宽，因此影响分离效率。现在看来将膜技术和上述方法联用可能比较有效，即在柱前加一个膜，使样品（例如肽和药物的代谢物）浓缩在膜上，然后再辅之以等速电泳或堆积法。与固相浓缩器相比，此法能充分排除有机溶剂，所得谱带较窄，用此法所得的检测浓度限已达到 $0.5 \sim 1 \mu\text{g/L}$ 。

5. 机理研究

相对于应用和技术而言,机理研究在毛细管电泳整个研究工作中所占的比例不大,有一些工作在前几年已经提出,如电渗流和过程模拟等,这几年之所以没有进一步深入或形成热点的迹象,是由于这一技术的应用背景很强,在诞生初期即遇到了生物技术日趋扩大的需求而无暇顾及的缘故。但是这也并不排斥随着新的应用范围的开拓以及核心的单元技术的诞生,会对相关的机理研究提出更为迫切的要求。

目前看来,关于机理研究的工作大体集中在下述几个方面:首先仍然是模型,包括实际模型物理化,物理模型数学化,对数学模型编程,用计算机求解。问题在于模型所包容的范围和借助于模型所得到的计算结果和实验相符的程度。如最近有人提出只要改变初变条件,而不需改变计算机程序,即可模拟等电聚焦和自由溶液区带电泳等几种不同的操作模式。还有人以多元竞争平衡为基础,发展出分离选择性模型,考察 pH 选择剂等对分离特别是手性分离的影响,扩展了分离度方程,使之能同时考虑分离选择性、有效溶剂电荷和电渗流的影响,认为把分离度方程和选择性模型联用即可预测最佳分离度。还有一部分工作是借助于化学计量学的方法对过程进行优化,已经采用的方法有多变量评价、多判据决策、部分因子设计等。第三部分是通过各个方面的研究寻求提高重复性和进一步改善定量准确性的途径。由于检测技术的不断提高,降低定量误差的研究现已相对集中于进样或进样以后的各个环节,包括广泛利用内标、采用相对峰面积等,有报道说峰面积测定的 CV 已达到 0.5%。此外,还可以用淌度比和迁移时间比做计算值以减轻电压、温度、电源等对 CE 的影响,使其日间的精度达到 1%。

概而言之,以复杂的生命科学中的重点问题为背景,发展一系列行之有效的又具有相当普适性的单元技术,并对这些技术已形成的机理作深层次的研究,是 20 世纪 90 年代中期国际毛细管

电泳界所面临的基本课题，也是毛细管电泳技术在自我完善的同时，争取为生命科学的发展发挥更大作用的关键之举。

在我国，毛细管电泳技术研究开展得比较早，1984年，竺安指导研究生率先开展了毛细管区带电泳的研究。进入20世纪90年代以来，短短的几年中，据不完全统计，在国内期刊发表的论文数量直线增长。在发表的论文中有全面的综述，也有从不同侧面对毛细管电泳技术所做的范围广泛的专题文献综述；进样技术、消除管壁对蛋白质的吸附、环糊精在毛细管中的应用、对映体分离，以及蛋白质、DNA及PCR产物的分离等。除了这些综述性文章外，有关毛细管理论、方法和应用研究的论文超过论文总数的一半以上。随着国内研究工作的蓬勃开展，1993年10月在北京召开了第一届全国毛细管电泳报告会，第二届全国毛细管电泳报告会于1995年8月在大连召开，第三届全国毛细管电泳报告会及第二届亚太地区毛细管技术报告会于1998年10月在大连举行。中国目前的状况，可以用周同惠院士在第一届全国毛细管报告会的一段话来作精辟的概括，他说：“我国是开展高效毛细管电泳研究比较早的国家之一，特别是近二三年来，有了长足的发展。在几乎所有的毛细管电泳的分离模式中，涉及到毛细管电泳的基础理论、仪器装置，一直到多个领域的应用等多个方面均已开展了相当深的研究工作。”这段话准确地评价了当前我国毛细管电泳研究的状况。

三、高效毛细管电泳仪的逐步完善和商品仪器的竞相推出

毛细管电泳仪器的完善与毛细管商品仪器推向市场，是毛细管电泳技术步入成熟阶段，走向应用时期的重要标志。自1989年出现商品毛细管仪器以来，短短几年时间，在世界范围内已推出了十几种型号的商品仪器，提供了不少自动化和性能指标都较完善的仪器，为进一步开展毛细管电泳的方法研究和推广应用起

到了促进作用。表 1-1 列出了目前一些仪器的主要特性。

表 1-1 一些商品 CE 仪器的性能指标

公 司	Applied Biosystems	Beckman Instruments	Bio-Rad Laboratories	Colora Messtechnik	Dionex	Gram HPLC Analytic	Water Chromatography	Spectra Physics
型 号	270A-HT	P/ACE 2100	Biofocus™ 3 000	Isco 3 140	CES	System 100	Quanta 4 000	Spectra PHOR ESIS 1 000
高压								
电压范围(kV)	0~30	0~30	0~30	0~30	0~30	0~30	0~30	0~30
极性切换	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y
恒流操作	N	Y	Y	Y	Y	Y	N	Y
电压梯升	Y	Y	Y	Y	Y	N	N	Y
电流记录	Y	Y	Y	Y	N	N	Y	Y
电压记录	N	N	Y	Y	N	N	N	Y
毛细管								
最小长度(cm)	30N	20	17	38	40	20	30	37
管盒系统	N	Y	Y	N	N	N	N	Y
进样方式								
压力/真空	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y
电动	Y	Y	Y	N	Y	Y	Y	Y
待温	N	Y	Y	Y	N	N	N	Y
温度控制								
恒温器	Y	Y	Y	Y	N	N	N	Y
温度范围(℃)	室温~60	15~50	15~40	15~40	-	-	-	15~60
控温介质	空气	液体	液体	空气	-	-	空气	空气
温度记录	N	N	Y	N	N	N	Y	Y
检测器								
多波长检测	N	N	Y	N	N	N	N	Y
波长范围(nm)	196~360	200~360	190~800	190~360	190~800	190~800	185~540	190~800
带宽(nm)	5	3	6	12	6	6	6	6
单色器	光栅	滤光片组	光栅	光栅	光栅	光栅	线性光谱滤光片	光栅(LIS)
光纤	N	N	N	N	Y	N	N	Y

续表 1-1

公 司	Applied Biosystems	Beckman Instruments	Bio-Rad Laboratories	Colora Messtechnik	Dionex	Grom HPLC Analytic	Water Chromatography	Spectra Physics
型 号	270A-HT	P/ACE 2100	Biofocus™ 3 000	Isco 3 140	CES	System 100	Quanta 4 000	Spectra PHOR ESIS 1 000
自动进样器								
样品位置数	50	22	31	40	40	-	20	80
不同缓冲液数	8	9	31	4	3	-	4	80
托盘恒温	Y	N	Y	N	N	-	N	N
防止样品蒸发	Y	Y	Y	Y	Y	-	Y	Y
样品体积(nL)	5~4 200	1~4 500	5~500	75~500	5~500	-	25~500	10~1 500
组分收集	Y	Y	Y	N	N	-	Y	N
仪器控制和数据处理最大数据采集速率(次/s)		10	96	15	20			96
上升时间(s)	0.02~5	0.1~1	0.1~9.9	0.05~3.2	0.1~3	0.1~3	0.1~1	0.1~9.9
重复性 (10次进样)								
高度(mm)	1.8~3.1	0.5~1.3		1.3~1.6			1.8~2.5	0.6~0.9
面积(mm ²)	1.9~2.7	1.1~2.7		1.8~2.4			1.5~1.9	1.4~1.7

注: Y, N分别表示“有”和“没有”。

四、毛细管电泳的几种模式

高效毛细管电泳有多种操作模式,各种方法的分离机理是不同的。在高效毛细管电泳中,自由溶液的区带电泳(CZE)可以看作是高效毛细管电泳的基础,其他技术可以看作是CZE的衍变。

(一) 毛细管区带电泳(CZE)

毛细管区带电泳(Capillary Zone Electrophoresis)是毛细管