

细胞电泳方法学及其在医学和生物学中的应用

施永德

复旦大学上海医学院生物物理学教研室

一、序言

细胞电泳技术是通过测定细胞的表面电荷性质和密度，来研究细胞表面结构和功能变化的一种生物物理学方法。实验表明细胞的表面是许多重要的生物现象发生和进行的场所，也是这些反应和过程的直接参加者，其结构和功能也会发生相应的变化。研究细胞表面方法很多如电子显微镜、X射线衍射、旋光色散、圆二色性、核磁共振等，均能从不同角度提供细胞表面结构和功能的资料。但上述方法所揭示的事实，与天然状态下的活细胞表面有距离。细胞电泳技术是能使细胞处于天然条件之下，对活细胞的表面电荷性质及多寡的变化。从理论上来说细胞表面电荷的变化与其表面结构和功能有关，可从细胞水平上为医学和生物学提供信息[1-4]。此外，如将细胞电泳技术与细胞表面基团的修饰和测定相结合，则又可从分子水平上为医学和生物学提供电学变化的信息。对于细胞电泳技术虽然早在1921年已经出现，但是成功的报道很少，直至上世纪60-70年代国内外对细胞表面结构功能，特别是在这一时间中免疫学的飞速发展，认识到许多免疫反应是发生于细胞的表面，并与细胞表面的电行为存在着内在联系，此外这时期中细胞电泳技术上的很多难点也得到相应的突破。因此细胞电泳技术在医学和生物学中应用研究得到较快的发展，现将这方面结果综述如下。

二、细胞电泳方法学的研究

一、细胞电泳仪器的制作和改善

细胞电泳装置由直流电源、控制线路、电泳小室、光学系统（显微镜、光源、目镜测微器）、恒温系统、计时系统等组成。至到1972年细胞电泳在国内几乎很少有报道，在国外报道也不多。其最根本原因是：（1）在于电泳小室的制作上存在着许多问题。如细胞悬液用量大，多至15ml，至少3ml，这使得医学生物学上取材困难而难以实现；又如有的采用多个玻璃磨砂接口组成，而且这些磨砂玻璃接口与电泳小室相接极不匀称，磨砂接口显得很大，而电泳小室又很小极易折断弄碎，很不实用；又如每一个电泳小室均由人工磨制而成，创作困难，人工成本费大，而且每个电泳小室差异很大，损坏后相互之间重复性极差，操作人员时刻担心损坏电泳小室；又如有的作者采用非密闭型的电泳小室，但实践证明这种小室无法进行，机械漂移十分严重，甚至操作者的呼吸气也引起巨大漂移，使测定无法进行。（2）计时采用计时器，操作人员计时十分吃力，原因在于操作人员的眼睛需盯牢显微镜下的细胞电动运动，一只手掌握直流电源双相开关。另一只手要掌握计时器的开与关，当细胞在电场作用下，经过起跑线时按下计时器，到终止线时按停下计时器，记下时间的秒数，又把计时器恢复至零，这样每一个细胞往返两次，记十个细胞，求数据的平均值，同时应用几个器官，难以做到协调，对操作人员来说十分疲倦和困难。（3）显微镜安放部位不对头，以往采用竖式观察，这种竖式观察是不科学的。因为细胞本身有重量，在水介质中以一定速度下沉。而细胞电泳聚焦在静止层上观察（至于什么是静止层以后专门解释），只有处在静止层上的细胞才能清晰地看到，而竖式观察可以出现如下情况：当细胞出现在起始线时是清晰的，但未到终止线前时则已经模糊或消失，因为这时细胞下沉离开了静止层。当细胞下沉超过静止层时则再也观察不到细胞，这就是更加浪费人力物力，因此根据以上存在问题对仪器进行因地制宜的改进是必要的。科学家们自70年代以来作了以下几个方面的改进[5-8]：

1、细胞电泳小室的改进：1）采用方形或矩形毛细管式，显微镜下观察到细胞清晰，保持原形，克服在圆柱形管中的畸变。2）方形或矩形毛细管为高1mm左右，长度为50mm左右，每次仅用50至100微升的样品，与国内外许多细胞电泳小室相比要减少的多。3）方形毛细管采用自制机器控制，一方面来源大，损坏了可以换；另一方面造价便宜，制作方便，使操作人员用不着耽心损坏了电泳小室，就使实验无法继续的事件。4）电泳小室前后内壁刻上记号，便于调节内腔零深度，使静止层调节容易。5）电泳小室各种大小规格均有，可以适合于不同大小细胞观察的使用。如巨噬细胞可用较大的，血小板可用较小的。6）由于所用毛细管较小，电泳左右双侧对称性很窄到直至实验员观察十个细胞来回各走一次是没有问题。

2、计时和显示细胞上的改进：1）采用了电子计时器，自动记录细胞电泳通过一定的距离所需要时间，累计时间，记录观察的细胞数，到规定细胞数后发出声音提示记录终止。

2）采用微机计时采样，实现了电脑化，并编制了适合细胞电泳的软件，这一软件既可以作临床上红细胞、血小板、巨噬细胞电泳的计时观察；也可以应用于理论研究的Zeta电位、表面电荷密度、双电层厚度等物理化学理论指标的观察；也可以供100个淋巴细胞电泳率和频数分布的自动打印，自动根据峰形分布的T、B淋巴细胞百分率的新分析法。

3、我们研制成电脑电视细胞电泳仪，除上述电脑控制以外，还采用电视机接口，在电视机屏幕上把细胞显示出来，这样也可以有利于实验员的观察和教学中的示数，供整个教室的观察。

二、细胞悬液的例备：

凡是游离的细胞均可作细胞电泳行为的观察，为此电泳以前，需要制备各种细胞悬液，各种细胞悬液制备方法如下：

1、应用比重梯度离心方法，可分离到各种血液细胞，如用 1.03 - 1.20 的比重梯度，分离结果如表 1。

表 1 应用密度梯度离心对细胞分离

细胞名称	血小板	多核核白细胞	淋巴细胞	红细胞
细胞峰比重	1.045	1.065	1.078	1.190
细胞分布比重范围	1.02-1.05	1.05-1.08	1.065-1.085	1.095-1.165

2、纯 RBC 细胞制备：

应用比重 1.085 的菲可溶液进行血液的比重单阶离心。从沉淀于底部的细胞几乎百分之百为 RBC，而除去 100% 血小板、白细胞和淋巴细胞，RBC 细胞悬液最好即制成浓度为 1 万~1.5 万/mm³

3、血小板悬液制备：

用全血在 300g 离心场下，用硅化离心管离心十分钟。上层即含丰富血小板血浆。然后离心压实即可取得无血小板血浆。如用比重 1.060 的菲可溶液作单阶比重梯度离心，即可除去残留 RBC、WBC 和淋巴细胞获纯血小板。由于血小板在形态上特别小，故不去除上述细胞仍可以作电泳测定。血小板悬液可配制成 2 万~4 万/mm³ 的浓度，作电泳为比较合适。

4、淋巴细胞的分离和悬液制备：

应用比重 1.078 的菲可溶液，可以分离到较纯的淋巴细胞，结合 E 花环和 EAC 花环试验。可以分离到纯的 T 和 B 细胞亚群。淋巴细胞液配制，约为 1 万~2 万个/mm³ 为宜。

5、巨噬细胞：人巨噬细胞可以悬液通过皮肤斑鳌发泡制备，动物巨噬细胞可以通过消毒石蜡油注射动腹腔注射 4~14 天内从动物腹腔中制备，经离心除去石蜡油和洗涤。可配成 7000-10000 个/mm³。

6、脾细胞：一般取自动物脾脏，用剪刀充分剪碎，经八层纱布过滤获得。一般一个小鼠脾脏可以获得 10⁷ 个脾细胞，一般配成 8000~12000 个/mm³ 作电泳。

7、腹水瘤细胞：通过接种动物腹腔制备，一般有小鼠艾氏腹水瘤，SRS 淋巴性腹水瘤等，一般用瘤细胞接种于腹腔中。随着小鼠腹水瘤细胞产生，即可取用，但大约 20 天以内小鼠将因腹水瘤而死亡。配成 7000~10000 个/mm³，作电泳测定。

三、细胞电泳实验技术上的影响因素规范化的研究

1、方形毛细管静止层的位里的理论计算

前人已经从理论上计算了长方扁平式电泳小室电渗静止层的位置为厚度的 0.21 离壁处，圆柱形电泳小室为半径的 0.703，即直径的 0.1465 离壁处。我们用有限元素分析法计算正方形和矩形毛细管的电渗静止层的结果。

2、介质的影响

常用的介质有两大类：1) 非离子蔗糖溶液；2) 离子溶液有 0.145 mol/L NaCl, 0.172 mol/L 磷酸缓冲液，Hank's 液，199 培养液，1640 培、血清、血浆、腹水上清液，脑脊液等，对介质主要要求是等渗、中性、富于营养。介质有两大影响：1) 流动曲线抛物线的曲度不同，非离子溶液曲度最大，生理盐水次之，血清最平坦；2) 流动曲线对于管腔大小的依核性不同，非离子溶液为叠帽形，生理盐水为顶点相切形，血清为顶点相交形。

3、电极

1) 铂电极。只适用于非离子溶液；2) 可逆电极 Ag-AgNO₃、Zn-ZnSO₄、Cu-CuSO₄、Ag-AgCl 等适用于离子和非离子溶液；3) Ag 电极，在电泳过程中即自动产生 Ag-AgCl 电极。可用于离子和非离子溶液。最后一种是最有价值的电极。

4、电压和电压梯度

电压和电压梯度，与电泳速度成正比，在一定范围以上，与电泳率无关，但在一定范围以下，与电泳率并非是一个常数，因为推动细胞发生位移，在电压极低情况下，要有一个最小的力才能推动细胞发生移，因此在电压较小的情况下，电压与电泳率的关系并非是一个常数。测定细胞电泳需要 10V/cm 以上，电压梯度超过 10V/cm。因细胞运动太快，人眼视觉不能适应，也不合适。

5、电流和离子强度

电流与细胞悬液离子强度和电泳小室的横截面有关，若用蔗糖和 NaCl 配成不同离子强度的等渗溶液测定红细胞电泳率，可以发现如下规律：离子强度由小至大，则电泳率由大至小，电流强度由小至大，反之亦然。从细胞要求来看，等渗离子溶液好于非离子溶液，又培养液好于非培养液。

6、细胞浓度

与电泳率虽无关，但太多大小均妨碍操作人员的测定，对每种大小细胞要求不同，请参考细胞制备方法中

各种浓度为宜。

7、温度和粘度:

同一种介质, 不同温度. 测定电泳率有很大差异, 原因在于温度的作用, 温度的升高, 可使介质粘度下降, 故电泳率也下降. 不同介质对温度依赖性不同, 其中以非离子溶液依赖不大, 生理盐水次之, 血清较小.

8.盐桥中的盐浓度

盐桥中氯化钠, 以大大地超过小室介质浓度为宜, 因为只有在这种情况下. 才能认为电阻接近于零, 看作是电极的延长, 电压降可以被认为几乎 100%地落在方形毛细管的两端上. 我们从实验也表明, 只有盐桥离子强度大大地大于电泳小室的, 电泳测定才是满意地. 否则会出现电极极化, 发生起泡, 使电泳无法进行.

9、电泳小室几何状对电泳率的影响

从方形管和圆形管比较来看, 其电泳曲线接近, 但方形管在观察上, 比较清晰, 而圆形管易产生畸变, 但经四周磨成外方内圆, 也不会畸变, 这就也可观察, 与方形管差不多.

10、细胞下沉效应

细胞有下沉效应, 但这有两种情况, 在高浓度下是在上下翻腾中逐步下沉, 在低浓度下是在细胞逐步地下沉, 这种下沉运动正好与电泳方向相垂直, 故易导致管内涡流, 使电泳测定受到了明显干扰. 细胞电泳要在 75% 细胞未下沉前完成才能避免涡流影响。

四、细胞电泳在医学和生物学中的应用

一、淋巴细胞和脾脏细胞电泳

1、 单克隆化杂交瘤细胞的电泳

将抗北京鸭 RBC 和 1gM 的 Bal/c 小鼠脾细胞与非分泌型的骨髓瘤细胞 NS-1 进行杂交 即产生了抗北京鸭 RBC 和 1gM 的杂交瘤细胞 CBH1 和 CBH2. 分别将其杂交瘤细胞及其亲本细胞进行电泳行为的观察, 表明: 1) Bal/c 小鼠脾细胞为快慢两种电泳成份, 其快成分电泳率众数和均数为 1.35, 其慢成分电泳率众数和均数为 0.9, 呈两个正态分布, 证明快电泳分布部分为 T 淋巴细胞, 而慢电泳成分为 B 淋巴细胞为主; 2) NS-1 为非分泌型 B 淋巴细胞. 其电泳众数和均数电泳率均为 1.0. 呈现为一个正态分布. 电泳率与 Bal/c 小鼠脾细胞的 B 细胞电泳峰相一致; 3) CBH-1 和 CBH-2 的电泳率众数和均数分别为 1.0, 均呈单个正态分布. 从上述结果观察到, 上述 NS-1, CBH-1 和 CBH-2 均属于在表面电荷上十分均一细胞, 其电泳率与 Bal/c 脾细胞和脾细胞 B 亚群相一致. 以上结果表明电泳法, 是检查单克隆杂交瘤细胞及其亲本细胞的品种和纯度的有效方法之一【91】.

2、 正常小白鼠和 SRS 腹水细胞和脾细胞电泳行为

上海医科大学程立等证明小鼠 SRS 株, 系属于 RNA 肿瘤病毒密切相关的一种淋巴细胞性腹水瘤, 在其生物学研究过程中, 得知它有高度的可移植性, 但对其细胞的免疫学性质尚不完全明了, 而其腹水瘤细胞, 脾细胞电泳研究, 将有助于这一问题的解决, 为此我们对昆明正常小鼠和 SRS 腹水瘤小鼠的腹腔细胞和脾细胞进行了电泳行为研究, 结果表明: 1) 正常小鼠腹腔细胞和脾细胞电泳: 其共同性在于均呈双峰型: 快峰电泳率腹腔细胞众数为 1.59(SD= 0.31), 均数为 1.6(SD=0.29); 脾细胞的众数为 1.54 (SD= 0.28), 均数为 1.6(SD=0.29); 慢

细胞电泳在医学和生物学中的应用

一、淋巴细胞和脾脏细胞电泳

1、 单克隆化杂交瘤细胞的电泳

将抗北京鸭 RBC 和 1gM 的 Bal/c 小鼠脾细胞与非分泌型的骨髓瘤细胞 NS-1 进行杂交 即产生了抗北京鸭 RBC 和 1gM 的杂交瘤细胞 CBH1 和 CBH2. 分别将其杂交瘤细胞及其亲本细胞进行电泳行为的观察, 表明: 1) Bal/c 小鼠脾细胞为快慢两种电泳成份, 其快成分电泳率众数和均数为 1.35, 其慢成分电泳率众数和均数为 0.9, 呈两个正态分布, 证明快电泳分布部分为 T 淋巴细胞, 而慢电泳成分为 B 淋巴细胞为主; 2) NS-1 为非分泌型 B 淋巴细胞. 其电泳众数和均数电泳率均为 1.0. 呈现为一个正态分布. 电泳率与 Bal/c 小鼠脾细胞的 B 细胞电泳峰相一致; 3) CBH-1 和 CBH-2 的电泳率众数和均数分别为 1.0, 均呈单个正态分布. 从上述结果观察到, 上述 NS-1, CBH-1 和 CBH-2 均属于在表面电荷上十分均一细胞, 其电泳率与 Bal/c 脾细胞和脾细胞 B 亚群相

一致. 以上结果表明电泳法, 是检查单克隆杂交瘤细胞及其亲本细胞的品种和纯度的有效方法之一【91】.

2、 正常小白鼠和 SRS 腹水细胞和脾细胞电泳行为

上海医科大学程立等证明小鼠 SRS 株, 系属于 RNA 肿瘤病毒密切相关的一种淋巴细胞性腹水瘤, 在其生物学研究过程中, 得知它有高度的可移植性, 但对其细胞的免疫学性质尚不完全明了, 而其腹水瘤细胞, 脾细胞电泳研究, 将有助于这一问题的解决, 为此我们对昆明正常小鼠和 SRS 腹水瘤小鼠的腹腔细胞和脾细胞进行了电泳行为研究, 结果表明: 1) 正常小鼠腹腔细胞和脾细胞电泳: 其共同性在于均呈双峰型: 快峰电泳率腹腔细胞众数为 1.59(SD= 0.31), 均数为 1.6(SD=0.29); 脾细胞的众数为 1.54 (SD= 0.28), 均数为 1.6(SD=0.29);

慢峰电泳率腹腔细胞众数为 1.31 (SD= 0.27), 均数为 1.24(SD=0.27); 脾细胞的众数为 1.21 (SD= 0.25), 均数为 1.15(SD=0.27). 虽然腹腔细胞的均比脾脏的稍高一些, 但大致上两者相近, 两者所不同的, 但快慢的比例上, 腹腔中

快成份大于慢成份，而脾脏中则相反，慢成分大于快成分。2)SRS 腹水瘤小鼠的腹水细胞电泳：与健康小鼠腹腔相比，随着接种后的发展，在电泳行为上有着巨大的变化，主要变化有：(1) 接种后，约第 4 天起，小鼠腹腔中慢电泳成分，占绝对优势，一直维持到第 9 天左右，在腹水中则出现慢快成分多变的情形，大约到 18 天左右因腹水过多而死亡；(2) 在电泳率的绝对值上表现为，在第 4 天以后电泳率明显加快细胞数也增多，即出现快的电泳率成分增多；(3) 在峰型上，在第 4 天以后出现多峰型。有 3~5 个峰出现；(4) 在腹水细胞中，其电泳成分部分，未与形成 E 花环细胞数目相一致。以上提示腹水细胞中，存在 T 细胞族，但也存在着非 T 细胞的成分，因此从以上结果得出如下结论：SRS 腹水瘤细胞是一株 T 细胞密切相关的细胞株，但除 T 细胞以外，还存在着其他细胞（当然很可能是 B 细胞）。3)SRS 腹水瘤小鼠的脾细胞电泳行为：与其腹水瘤细胞相比，不论在电泳率慢快成分比例上，电泳快移程度上，电泳峰数上，两者之间均呈平行性变化，但变化程度上均为腹水细胞变化快电泳成分上大大地大于脾细胞的比例，而且形成 E 花环的数目也是腹水的大大地多于脾细胞的，从以上结果展示 SRS 腹水瘤细胞系与 T 细胞相关，但也不能排除与其他细胞相关性存在[10-11]。根据电泳和黏附性的检测表明，T 细胞电泳快，黏附性差；B 细胞电泳慢，黏附性高。

3、人淋巴细胞电泳

我们曾经测定了 10 例人的淋巴细胞，发现其电泳图呈两个峰形，其中快电泳成分与 ERFC 花环形成相一致，而慢电泳含有一部分带 C 的 FBC 花环的 B 细胞特征，但平均约有 18.5% 的细胞无 T. B 细胞标志，表明除此还有其它无标志的细胞。说明应用电泳率研究人淋巴细胞亚群有明显的价值[12]。

二、巨噬细胞电泳试验 (MEM)

1、诊断脑瘤和其他恶性肿瘤

英国 Field 等和 Pritchard 等先后报道。从脑组织中提取的脑脂脂蛋白 (MBP) 和从恶性肿瘤组织中提取的钙性蛋白 (CaBp) 存在着共同的抗原决定簇。能致使癌症病人淋巴细胞在体外释放巨噬细胞电泳减缓因子，致使巨噬细胞电泳减缓，而健康人淋巴细胞则无此种作用，以此可以诊断病人的否患有恶性肿瘤，并认为这是与巨噬细胞移动抑制试验相一致的姐妹方法，但对于脑瘤钙性蛋白及其他癌组织的钙性蛋白有否也对脑瘤有诊断价值等均未报道，为此我们曾从脑胶质瘤中提取钙性蛋白 (GBP)，用来诊断脑瘤，其他部位恶性肿瘤的研究，我们还从胃癌组织提取胃癌的钙性蛋白 (SBP)，用来诊断脑部、胃部及身体其他部位的恶性肿瘤。结果展示 (3BP 对于诊断脑瘤 (包括恶性脑瘤和良性脑瘤)、诊断身体其他部位的肿瘤有 90% 以上的准确度，但对良性肿瘤，对神经系统疾病有 5-7% 的假阳性，结果也展示 SBP 不仅对胃癌有诊断价值，而且也对脑瘤和身体其他部位的恶性肿瘤也有诊断价值 {13—20}。

2、检查肿瘤抗原的有效性

MEM 试验，可以检查肿瘤抗原的有效性 (21) 我们从小鼠 S180 肉瘤中提取 S180-CaBp，从正常组织中提取 NBP，用 MEM 试验检测正常小鼠，带 s180 肉瘤小鼠脾细胞和带脑瘤小鼠细胞对于上述 S180CaBp 和 NBP 的敏感性。结果发现 S180-CaBp 对带 S180 肉瘤小鼠和带脑瘤的脾细胞是敏感的，而对健康小鼠是不敏感的，反之 NBP 对健康小鼠，带 S180 肉瘤小鼠和带脑瘤小鼠均不敏感。因而证明 S180 肉瘤 CaBp 是其本身及脑瘤的共同抗原。

3、抗原对动物致敏性的检验

我们曾分别以 S180CaBp 和 GBP 致敏豚鼠，结果致敏豚鼠的淋巴细胞，在分别接触 S180BP 的 GBP 时，则产生 MEM 致缓，说明 MEM 试验是检测动物致敏性的有效方法 {21}。

4、抗 GBP、抗 S180CaBp 和抗 HbsAg 的免疫 RNA 及转递免疫信息的检测

我们曾从以上抗原致敏的动物淋巴样细胞中，提取免疫 RNA，并用这些免疫 RNA 转递免疫信息给正常人的淋巴细胞或动物的脾细胞，结果表明正常人淋巴细胞或动物的脾细胞可以通过温育接受细胞免疫信息。当其再次与以上抗原接触时，则产生 MEM 致缓，因而以上结果展示，MEM 试验不仅是反映免疫 RNA 传递免疫信息的手段 (22-24)，也是检测其免疫活动力的根据之一。

5、MEM、鞣化 RBC 电泳，淋巴细胞电泳对抗原的反应性：

由于 MEM 试验中需要在豚鼠腹腔内预先注射消毒石蜡油，培养出巨噬细胞并且须事先约 10~12 天前注射好，而且还要精心饲养好豚鼠，否则实验就无法进行，此外分离豚鼠腹腔内巨噬也是麻烦事，有时因腹腔血性，使巨噬细胞分离不到而遭实验中断或失败。为此我们根据 Shenton 报道，摸索了鞣化绵羊 RBC 代替豚鼠巨噬细胞电泳。证明效果如同 MEM 一样可以检查淋巴细胞对抗原的反应性。在此基础上我们又发现当淋巴细胞接触鞣化绵羊 RBC 代替豚鼠巨噬细胞电泳。证明效果如同 MEM 一样可以检查淋巴细胞对抗原的反应性。在此基础上我们又发现当淋巴细胞接触鞣化绵羊 RBC 代替豚鼠巨噬细胞电泳。证明效果如同 MEM 一样可以检查淋巴细胞对抗原的反应性。在此基础上我们又发现当淋巴细胞接触抗原时，其自身电泳加快，这种加快作用是淋巴细胞对抗原反应性标志。我们观察了 100 个淋巴细胞加抗原和不加抗原电泳图谱，发现前者加快电泳率细胞频数明显增加 [25]。

三、RBC 和血小板电泳行为的研究

1、正常人 RBC 电泳和血小板在血浆中的电泳行为的关系

正常人 RBC 电泳和血小板在其自身血浆电泳呈线性相关性。设血小板电泳时间为 Y，血小板电泳时间为 X，则 $Y = -11.3 + 1.89X$ 。正常人 RBC 电泳时间平均值为 16.78 (SD=1.08)s，血小板电泳时间为 19.45 (SD=1.69)s。血小板与 RBC 之比为 1.18 (SD=0.07) [26]

2. 各种病人 RBC 电泳与血小板在血浆中电泳行为关系 也存在着两者间的相关关系 [26]，通过 162 例病人结果表明，凡 RBC 电泳减慢者与血小板电泳减慢者之间的符合率达 95%，仅仅只有 5% 不符合性。

3、RBC 电泳减级与疾病的关系

RBC 电泳减级是许多疾病的一种非特异的变化，主要疾病有：心血管疾病，脑血管疾病，血栓闭塞性脉管炎，中央视膜血管栓塞，高血压，糖尿病，肿瘤、自身免疫病（如 SLE）、小儿硬肿症和中医血淤症[27-30]。

4. RBC 和血小板电泳减级主要因子

已证明血浆中脂质（胆固醇、甘油三酯、脂蛋白）、血清中 Ig 水平、纤维蛋白原水平、血浆和血清粘度增加，还有 RBC 和血小板表面所带表面电荷多少是决定 RBC 和血小板电泳快慢的主要因子[27-30]，

5、血液黏度增加的影响因素之一

红细胞电泳减级是血液黏度的重要影响因素，特别是红细胞的聚集性增高引起的血液黏度增高疾病[27-31]

6. ADP 诱导血小板和 RBC 电泳减级作用

(1) 对血小板的作用：ADP 可诱导血小板凝聚，此外 ADP 还可以诱导血小板和 RBC 电泳减级，致级率上，健康人平均为 1.75(SD=4.5)%，而缺血性中的病人则为 16.59(SD=16.2)%，冠心病为 12.88(SD=2.6)%，健康人与缺血性中风和冠心病患者明显的区别。

(2) 对 RBC 的作用：虽然 RBC 在 ADP 作用下的减级率与血小板相比要弱，但两者之间存在着相关性，令血小板电泳减级率为 X，RBC 的减级率为 Y，则其归方程为 $Y=0.32X-1.66$ ($P<0.05$)，故两者之间存在着一定的相关性。通过以上结果，我们计算了 RBC 和血小板表面的 ADP 受体数，结果表明对正常人而言，单位面积上的受体数为血小板上的 ADP 受体要比相应 RBC 的大 146 倍。而对血小板的受体数言，脑梗塞的、短暂性脑缺血发作者和冠心病者的血小板表面受体数，要比健康人大 8.5 倍。

7. 活血化淤中药对 RBC 电泳行为影响

一些活血化淤药物如丹参制剂，在病人应用后，有提高 RBC 电泳率的作用，有下降 ADP 对之诱导减级的作用。此外还有一些其他药物也有此种类似作用。

8、血小板和红细胞的等电点研究

温度对于血小板和红细胞的等电点有影响，温度低至 10℃，血小板等电点约为 3.08，红细胞为 3.06，温度 18℃是，血小板为 2.65，红细胞为 2.25。相同温度下血小板和红细胞的等电点差不多，可能红细胞比血小板低一点。等电点的数值与疾病有关，健康人的血小板和红细胞的等电点低，高黏血症患者（特别是高黏血浆症患者）等电点增高。

四、 心 血 细 胞 电 泳

本室顾玉苏等研究表明（顾玉苏：心肌细胞电泳行为研究，上海医科大学硕士研究生毕业论文，1987），正常乳鼠心肌培养细胞表面也带有负电荷，其等电点为 4.5 大大地高于一般的 RBC。他们测定了正常乳鼠心肌培养细胞的电泳率为 2.34(SD=0.64) 当应用神经氨酸处理后，其电泳率可下降 17%，说明其负电荷不像 RBC 那样地几乎都由神经氨酸所贡献的，除此以外还有别的化学基团所贡献。丹参制剂可使心肌细胞电泳明显地增加。而且有抗神经氨酸醉下降电泳率的作用。丹参酮 11-A 磷酸钠也有提高心肌细胞电泳率的作用。也有抗神经氨酸醉下降电泳率的作用。丹参素对心肌细胞电泳率无影响，但具有对抗神经氨酸醉下降电泳率的作用。原儿茶醛不仅没有提高电泳率的作用，而且还有下降电泳率的作用，在对抗神经氨酸酶的作用上，不仅有对抗作用，而且此对抗作用超过神经氨酸酶本身。

五、其他

如寄生虫学、药学、植物学均有应用的报道。如邓彼加对两株溶组织阿米巴细胞的等电点进行测定，结果为 2.2 和 2.15，阿米巴细胞的运动能力（出现伪足数）与电泳率数值呈正相关，盐酸依米丁、磷酸氯奎、硫双二氯酚等药引起阿米巴电泳率下降（邓彼加：溶组织内阿米巴细胞的细胞电泳研究，上海医科大学硕士研究生毕业论文，1986）。张龙兴等人报道，感染约氏疟原虫小鼠淋巴细胞的电泳行为发生改变，T 细胞峰型增加。上海医科大学马月鸣研究显示，钡剂颗粒动电位，与其分散力有关，动电位越高，分散性越好（个人通讯）。上海植物生理研究所李德光研究了叶绿体的电泳行为（个人通讯），说明叶绿体电泳率与光合作用能力有关。

国际上对于细胞电泳的研究十分热烈，有一个国际细胞电泳学会，平均每 3 年开一次国际会议。并正式出版论文集。这是一个值得注意的生物物理领域。

参考文献

- 1 梁子钧、施永德：细胞电泳技术及其在生物学与医学中的应用. 生物化学与生物物理进展, (1): 54, 1976
- 2 梁子钧、施永德：细胞电泳. 生物物理学. 主编程极挤、林克格, 北京. 人民教育出版社. 1982.P267
- 3 施永德写, 梁子钧, 章谷生校：细胞电泳技术. 临床免疫学检验 (上海), 上海市医学化验所主编, 上海科技出版社 1983 年, P92—97
- 4 施永德、梁子钧：细胞电泳. 医学百科全书, 生物物理学分册, 林克格主编, 上海科技出版社 1985, P91
- 5 上海第一医学院生物物理学教研室, 微生物学教研室, 仪器室, 玻璃小组：简便微量方形毛细管细胞电泳装置, 上海第一医学院学报, 1); 80. 1976
- 6 梁子钧、施永德等：简便, 微量的方形玻璃管式细胞电泳装置. 生物化学与生物物理学学报, 11(3): 199. 1977
- 7 施永德、梁子钧：细胞电泳测量条件及影响因素. 生物化学与生物物理进展 (2): 13, 1978
- 8 梁子钧. 水样炳：电泳电子计时装置. 生理学报, 32(1): 92, 1980
- 9 施永德、步燕芳等：单克隆杂交瘤细胞及其亲本细胞株的电泳行为的研究. 上海第一医学院学报, 10(3): 21, 1983
- 10 施永德、步燕芳、程立等：小鼠 SRS 腹水瘤细胞电泳行为的研究. 上海第一医学院学报, 11:413, 1984
- 11 李丽春、步燕芳, 吴展琪、曹式芳、施永德、姜小玲、熊小玲等：正常小鼠脾细胞和体外培养 SRS 腹水瘤电泳和黏附性行为的观察. 医学生物物理学, 6: 5—10, 1994
- 12 章谷生、关惠贞、梁子钧、吴秀琴：人淋巴母细胞表面电荷研究：T 和 B 淋巴细胞电泳能力, 上海第一医学院学报, 8(2): 110. 1981
- 13 施永德、唐镇生：巨噬细胞电泳实验的实验与应用. 生物化学与生物物理进展, (5):5, 1978
- 14 上海第一医学院生物物理学教研室：巨噬细胞电泳诊断肿瘤的初步报告. 肿瘤防治简报 (3) 24. 1975
- 15 上海第一医学院生物物理学教研室：巨噬细胞电泳对脑瘤与恶性肿瘤的诊断. 新医学 (神经病学副刊) 3 (2): 112, 1977
- 16 唐镇生、施永德、吕传真：巨噬细胞电泳试验诊断恶性肿瘤的方法和初步应用观察. 中华内科杂志 (6): 336, 1977
- 17 Shi Yongde, Tang Zhengsheng, Lv Chuazhen, Xiao Baoguo, Liang Zijun, Shan Yifei, JiangYanfeng, Yang Xiidi Lv Meizhen, Sun Xuezen: Macropage electrophoretic mobility test for brain tumor and malignancies. Chinese Medical Journal, 92(3): 211-215, 1979
- 18 施永德写、章谷生, 孙荫校：巨噬细胞电泳试验. 临床免疫学检验 (上海). 上海市医学化验所主编. 上海科技出版社出版, 1983 年, P172—174
- 19 施永德、唐镇生, 赵武华, 胡继康执笔：脑胶质和胃癌组织中碱性蛋白的提取及其肿瘤共同抗原的研究. 上海第一医学院学报, 6 (5): 35. 1979
- 20 YD Shi, ZS Tang, Zijun Liang, CZ Lv, BG Xiao: Reactivity of lymphocytes to basic proteins prepared from brain glioma and stomach cancer with MEM test. British journal of Cancer 43: 532-536, 1981
- 21 施永德、唐镇生、肖保国、叶庆伟、杨松龄、章国成：小鼠 S180 肉瘤碱性蛋白抗原的初步研究. 肿瘤, 1 (6): 243-244, 1981
- 22 施永德、唐镇生、叶庆伟执笔：人脑胶质瘤碱性蛋白及其免疫学检测的研究 (摘要). 上海第一医学院学报, 6(1):24. 1979
- 23 郑裸芬、董鹤林、施永德、吕妹珍、葛治华：抗乙型肝炎表面抗原 RNA 及其 mRNA 分离和活性鉴定. 上海第一医学院报. 9(1)33-38, 1982
- 24 Shi Yongde, Tang Zhengsheng, Xiao Baoguo: The transfer of cellular immunity in the in vitro MEM test by immune RNA isolated from guinea-pig, immunized with basic protein of human glioma. Cell Electrophoresis. Ed by W S Chuett, H. K. Lunkmsmn, 1985, Walter de Gruyter & Co., Berlin-New York
- 25 施永德、唐镇生、步燕芳, 杨涵铭：淋巴细胞电泳试验检测细胞免疫反应性. 上海免疫学杂志, 8 (2): 132, 1988

26. 施永德、梁于钧、步燕芳、唐镇生、肖保国、吕传真：血小板和红电泳细胞行为的比较和对红细胞电泳减缓因子的探讨。生物化学和生物物理学报 15 (3): 23, 1983
27. 吕伶宾、施永德、唐镇生、肖保国：中风病人的血液流变学和血小板电泳行为的研究。中华神经科杂志, 12 (1):34, 1979
28. 施永德、梁于钧、杨学义、庄汉忠、韩琴琴：冠心病及高血脂者的红细胞电泳率、血清电导率、血浆粘度与血脂的关系。中华心血管病杂志, 8 249, 1990
29. 施永德：增加红细胞带电量预防中风和冠心病。大众医学, (9): 25, 1985
30. 上海第一医学院华山医院中医科、神经科、生物物理学研究室、神经病学研究室：恶性肿瘤与活血化淤（附 71 例分析）。中医药研究参考, (3): 8, 1978
31. 金勤立、金汉贞、徐凤尽、梁于钧、吴秀琴：超微量的红细胞电泳时间测定及其在新生儿临床上的应用。上海医学, 3 (1), 30, 1990
32. 施永德、梁于钧、金时芳、金培焕、孙齐康：在不同切变率下血液五因素线性逐步线性回归分析。上海第一医学院学报, 12 (6): 442, 1985
33. 施永德、梁于钧、步燕芳、唐镇生、肖保国、吕传真：细胞电泳观察 ADP 对血小板和红细胞作用。生物化学与生物物理进展, (4): 49, 1982
34. 张龙兴、邱云、施永德：感染约氏疟原虫小鼠淋巴细胞的电泳行为。上海免疫学杂志, 8' (2):95, 1988