

高場不對稱波形離子移動能譜術

High-Field Asymmetric Waveform Ion Mobility Spectrometry

陳崇宇、李茂榮

Chung-Yu Chen, Maw-Rong Lee

高場不對稱波形離子移動能譜術，為一種可在大氣壓環境下分離氣態離子之新技術，其優點為可減少背景之干擾、增加分析之訊號雜訊比，以及具有分離同分異構物之能力。本文將介紹高場不對稱波形離子移動能譜術之原理及影響分析結果之相關參數，並將對於該技術在藥物分析、同分異構物分離以及蛋白質體學之應用作一簡單回顧。

High-field asymmetric waveform ion mobility spectrometry (FAIMS) is a new technique for gas phase ion separation at atmospheric pressure. The advantages of FAIMS are reducing the effect of background, improving signal-to-noise ratio and separation isobaric isomers. This paper introduces the theory of FAIMS and the parameters affecting the analytical results. The applications of FAIMS in the drugs analysis, isobaric isomer separation and proteomics are also reviewed.

一、前言

離子移動能譜術 (ion mobility spectrometry, IMS) 為一可在大氣壓 (atmospheric pressure) 環境下分離不同氣態離子 (gas phase ion) 之技術。其主要是利用氣態離子在電場中受到場力影響及與惰性氣體碰撞程度不同，產生離子漂移速度之差異，使得離子通過漂移管 (drift tube) 所需時間不同，進而分離混合的氣態離子。在過去十幾年中，離子移動能譜術已被廣泛地應用於各領域，特別是在火藥、毒物以及化學生化武器之鑑定與分析⁽¹⁾。而離子移動能譜術與質譜技術之結合，亦廣泛地應用於複雜生化基質與環境樣品之分析⁽²⁾。

高場不對稱波形離子移動能譜術 (high-field asymmetric-waveform ion mobility spectrometry, FAIMS) 與離子移動能譜術的基本原理相似，皆為在大氣壓環境下可分離不同氣態離子之技術。而兩者最大差異是在離子移動能譜術中，加於漂移管之場力為低電場 (200 V/cm)，且場力方向與離子漂移方向平行，而高場不對稱波形離子移動能譜術，其所使用之場力為高電場 (10000 V/cm)，且場力方向與離子漂移方向垂直。與高場不對稱波形離子移動能譜術相關文獻報導，是於 1993 年由 Buryakov 等人所提出⁽³⁾，該群學者利用給予一不對稱波形電壓之兩平行電極板作為離子分離器 (ion separator)，藉以分離四種胺類化合物。1993 年之後，加拿大國

家研究委員會 (National Research Council of Canada) 與美國 Mine Safety Appliances Company 公司共同研究開發，將原本使用兩平行電極板之離子分離器改成圓柱形電極 (cylindrical electrodes) 的樣式。2001 年時則由 Ionalytics 公司開發生產商業化產品，作為質譜儀之配件⁽⁴⁾。此外，Sionex 公司亦開發出商品名稱為 microDMx 的微型高場不對稱波形移動能譜儀，作為攜帶式氣相層析儀之配件⁽⁵⁾。

高場不對稱波形離子移動能譜術亦被稱為場離子譜術 (field ion spectrometry, FIS)、非線性離子漂移譜術 (ion drift non-linearity spectrometry)、無線射頻離子移動能譜術 (radio frequency ion mobility spectrometry) 或是差異離子移動能譜術 (differential ion mobility spectrometry)⁽⁵⁾。本文將針對高場不對稱波形離子移動能譜術之原理與影響參數進行說明，並介紹該技術於各種領域之應用，以作為對此技術有興趣者之參考。

二、高場不對稱波形離子移動能譜術之原理與影響參數

本節將針對一般商用高場不對稱波形離子移動能譜術的儀器構造、基本原理與相關參數進行說明。

1. 高場不對稱波形離子移動能譜儀

目前商業化的高場不對稱波形離子移動能譜儀的主體是由兩個以同心圓形式排列之不鏽鋼電極組合而成，其外圍則包覆有聚二醚酮 (polyetheretherketone, PEEK) 外殼，其構造如圖 1 所示⁽⁶⁾。內不鏽鋼電極 (inner electrode) 係施予一不對稱波形電壓與補償電壓 (compensation voltage, CV)，而外不鏽鋼電極 (outer electrode) 則接地。除電極本體外，還有一波形產生器模組 (waveform generator module) 與控溫模組 (temperature control module)，波形產生器模組主要是用於分析施予內電極之不對稱波形電壓與補償電壓；控溫模組主要是藉由加熱裝置與冷卻氣體，以控制內、外電極之溫度，而用於控溫的冷卻氣體可依照產生方式之不同，採用氮氣或空氣。其次，分析時所使用的載流

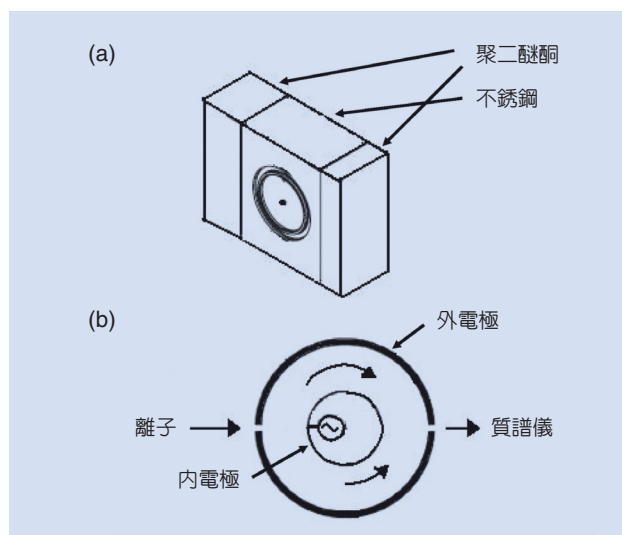


圖 1. (a) 高場不對稱波形離子移動能譜儀之裝置圖，
(b) 高場不對稱波形離子移動能譜儀之側視圖。

氣體 (carrier gas)，主要為純氮氣或氮氣與氬氣之混合氣體。此外，載流氣體使用前需先通過氣體純化裝置管 (gas purification cartridge)，以確保通入高場不對稱波形移動能譜儀載流氣體之潔淨與乾燥。

2. 高場不對稱波形離子移動能譜術之原理

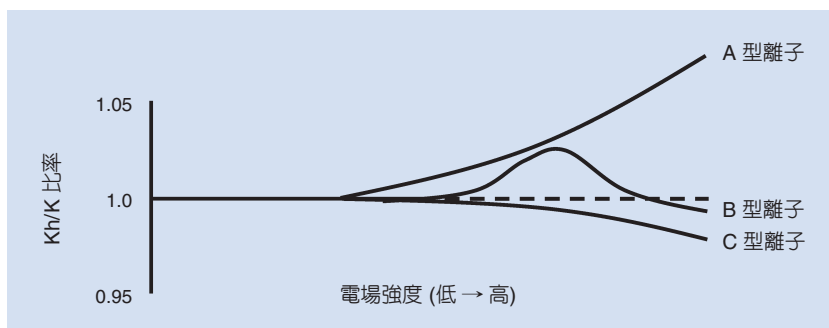
如前言中所述，離子移動能譜術主要是利用在電場中，不同氣態離子受電場影響後所產生的速度不同，因此可藉由電場分離不同的氣態離子。然而在離子移動能譜儀中，離子的漂移速度與電場的強度和離子移動能常數 (mobility constant) 有關⁽⁷⁾，其關係可用下列方程式表示：

$$v_d = K_0 E \quad (1)$$

其中 v_d 為離子速度， K_0 為離子移動能常數， E 為電場之強度。在低電場中，離子移動能常數與電場強度無關。但在高電場中，離子移動能常數則與電場強度呈非線性關係，且離子移動能常數的大小會隨著電場大小而有所改變⁽³⁾。離子移動能常數在高電場中可以利用下列方程式表示：

$$K_h(E) = K_0 [1 + f(E)] \quad (2)$$

圖 2. 高場中移動能常數性質不相同之三種離子類型。



其中 $f(E)$ 是代表離子移動能常數在高電場中會因場力大小而改變，也就是說在高電場下，離子移動能常數與場力大小有關。氣態離子依照在高電場中離子移動能常數受到場力大小影響之不同，可歸類成三種不同離子⁽⁸⁾。第一種離子：離子移動能常數與場力成正比，此類離子歸類為 A 型離子 (type A ions)；第二種離子：離子移動能常數與場力成反比，此類離子歸類為 C 型離子 (type C ions)；第三種離子：離子移動能常數剛開始會與場力成正比，當場力漸漸增大至某一程度後，離子移動能常數會與場力成反比，此類離子歸類為 B 型離子 (type B ions)，圖 2 即為此三種離子之離子移動能常數與場力之關係圖。

高場不對稱波形離子移動能譜儀主要是利用氣態離子在高電場中之移動能不同，進而對於具有不同構形 (conformation) 的氣態離子進行分離，圖 3 為氣態離子於不對稱波形離子移動能譜儀移動軌跡之示意圖⁽⁹⁾。我們可將同心圓形式之裝置視為兩平行電極，上電極給予一不對稱波 $V(t)$ ，而下電極接地，藉以在兩電極中產生分離氣態離子所需之電場。施加於上電極的不對稱波 $V(t)$ 是由施予較短時間 (t_l) 的高電壓 (V_h) 與施予較長時間 (t_h) 的低電壓 (V_l) 所組成。而所施予的電壓與時間關係為：

$$V_h t_l + V_l t_h = 0 \quad (3)$$

當氣態離子由載流氣體 (carrier gas) 帶入不對稱波形離子移動能譜儀中，而在內、外層電極之間漂移時，氣態離子會因在高電場與低電場時離子移動能常數之不同，而導致氣態離子逐漸往某一端的電極漂移，最終碰撞電極板而消失。此時若施予與氣態

離子漂移方向相反的補償電壓，使氣態離子維持在內、外層電極的中央位置，致使氣態離子能順利通過兩電極中之間隙，最終抵達後方之質譜儀，以進行偵測。如前文所述，不同的氣態離子在高電場中所帶有的離子移動能常數也不盡相同，是故不同性質之氣態離子在兩電極之間漂移的程度亦不相同，而其所需的補償電壓也不相同。因此藉由改變給予之補償電壓的大小，可使離子依序通過電極而被偵測，即利用掃描補償電壓，即可達到分離氣態離子的效果⁽⁵⁾。除此之外，由於只需要改變給予之補償電壓，因此所需之分析時間比使用傳統層析技術分離時更短，大體而言，進行一次分析之時間約略僅需兩分鐘。

3. 影響高場不對稱波形離子移動能譜術分析之參數

進行高場不對稱波形離子移動能譜分析時，主

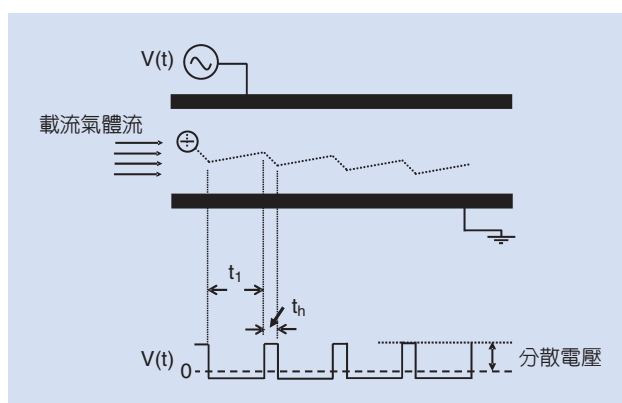


圖 3. 氣態離子於高場不對稱波形離子移動能譜儀之兩平行電極中移動軌跡圖。 t_l 為低電壓作用的時間， t_h 為高電壓作用的時間。

要是藉由給予不同補償電壓而分離具有不同移動能之氣態離子。而影響高電場中氣態離子所具有之移動能的參數有：不對稱波形形式 (type of asymmetric waveform)、分散電壓 (dispersion voltage, DV)、載流氣體組成 (carrier gas composition)、載流氣體流速 (carrier gas flow rate) 與內/外電極溫度 (inner/outer electrode temperature) 等。

(1) 不對稱波形形式之影響

在高場不對稱波形離子移動能譜術中，施於電極上之電壓為一不對稱波形，而使用在該技術中之不對稱波形，主要有 P1N2 模式與 P2N1 模式兩種形式，圖 4 為此二種不對稱波形模式之示意圖。由圖可得知，在 P1N2 模式中，所設定的分散電壓值為正值，而在 P2N1 模式中之分散電壓值為負值。不同於不對稱波形模式之選擇，主要是取決於分析物離子之性質，因此需要使用者針對分析物進行探討⁽⁸⁾。

(2) 分散電壓之影響

由公式 1 與 2 可以得知，無論在低電場或高電場中，離子移動能常數與電場強度有關。而高場不對稱波形離子移動能譜儀中，電場強度之大小則與分散電壓有關，當分散電壓越大，在內、外電極之間的電場強度也越大，因此改變分散電壓的大小，即改變電場強度的大小。當改變分散電壓大小時，可造成離子移動能之改變，進而改變高場不對稱波形離子移動能譜術分析離子之結果。

(3) 載流氣體組成之影響

載流氣體的作用除了攜帶分析物離子通過內、外電極間之間隙外，載流氣體還會在分析物離子通過電極間隙時，與離子產生離子誘導偶極吸引作用力 (ion-induced dipole attractive interactions)，以改變離子形狀，進而改變離子移動能，造成所需補償電壓之改變⁽⁵⁾。目前商業化產品所使用的載流氣體為純氮氣或是氮氣與氬氣的混合氣體，但由於儀器本身設定之限制，混合在氮氣中之氬氣的含量至多只能為 50%。一般而言，載流氣體中氬氣含量愈

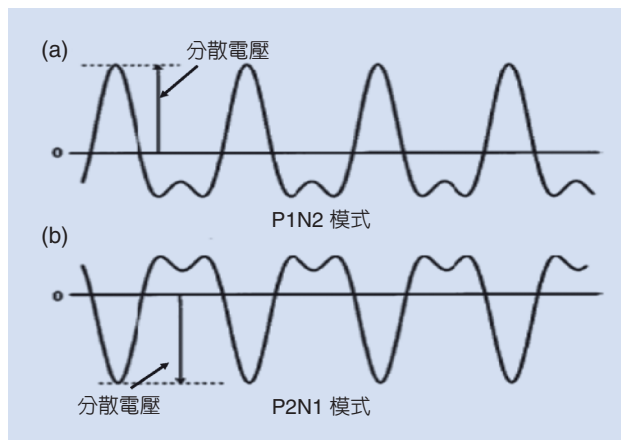


圖 4. 兩種不同的不對稱波形模式，(a) P1N2 模式，(b) P2N1 模式。

多時，所需要的補償電壓也越大⁽⁵⁾。文獻中亦曾提及，將二氧化碳添加於氮氣中，對於離子分離效果亦有影響⁽⁴⁾。

(4) 載流氣體流速之影響

載流氣體除了攜帶氣態離子通過內、外電極間之間隙外，部分載流氣體會由離子入口孔流出，其主要目的在於增加進入不對稱波形離子移動能譜儀之氣態離子去溶劑化 (desolvation) 的效果。載流氣體流速的大小會影響去溶劑化的效果與離子通過內、外電極間間隙之效率。若離子去溶劑化效果不佳，容易使分析物以水合叢聚離子存在，導致高場不對稱波形離子移動能譜儀分析時之誤差。然而，當載流氣體的量過多時，從離子入口孔排出的載流氣體會產生擾流現象，進而影響氣體離子進入儀器的效率⁽¹⁰⁾。

(5) 內/外電極溫度之影響

電極溫度的改變會影響載流氣體的密度，致使分析物離子與載流氣體的碰撞現象改變，進而影響分析物補償電壓數值與補償電壓訊號形狀⁽¹¹⁾。此外，亦有研究指出當電極溫度改變時，儀器之熱能 (thermo energy) 也會改變，間接影響與熱能有關之離子與氣體分子間之離子誘導偶極作用力，而使離子移動能改變，最終影響氣態離子分離之結果⁽⁴⁾。

三、高場不對稱波形離子移動能譜術之應用

高場不對稱波形離子移動能譜術是於大氣壓環境中分離氣態離子，且液相層析質譜術 (liquid chromatography-mass spectrometry, LC-MS) 使用的離子化方式為大氣壓游離化法 (atmospheric pressure ionization, API)，如電灑游離法 (electrospray ionization, ESI) 與大氣壓化學游離法 (atmospheric pressure chemical ionization, APCI) 等，因此當分析物藉由大氣壓游離法離子化後，所生成之氣態離子可直接進入高場不對稱波形離子移動能譜儀進行分離，最後再以質譜儀進行偵測。高場不對稱波形離子移動能譜術結合液相層析質譜術 (LC-FAIMS-MS) 為目前最常被採用的方式，並已廣泛地應用於不同領域之分析。本節將進一步對於 LC-FAIMS-MS 於藥物與飲用水之分析、同分異構物 (isobaric isomer) 之分離與蛋白質體學 (proteomics) 上之應用作簡單的介紹。

1. 高場不對稱波形離子移動能譜術於藥物分析之應用

不同分析物經由高場不對稱波形離子移動能譜儀分析時，在特定分析條件與補償電壓下，唯有特定氣態離子才能通過內、外電極間隙，最後至質譜

儀檢測，因此高場不對稱波形離子移動能譜術之優點為可得到較少背景干擾之質譜圖。圖 5 為筆者實驗室採用注射針幫浦 (syringe pump)，以連續進樣方式注入 20 ng/mL 甲基安非他命，分別以 LC-MS 與 LC-FAIMS-MS 分析所得之質譜圖，由圖 5(a) 可以得知，由於溶劑的干擾，因此甲基安非他命之質子化分子 (protonated molecule, $[M+H]^+$) m/z 150 之訊號，並非圖譜之基峰 (base peak)。圖 5(b) 則是甲基安非他命在特定分析條件與補償電壓下所得之質譜圖，由該圖可以得知，在此一條件下，只有甲基安非他命的離子與少部分之干擾離子能被質譜儀偵測，因此所得之質譜圖較 LC-MS 分析所得減少許多背景訊號之存在。相較於 LC-MS，以 LC-FAIMS-MS 分析時，甲基安非他命之質子化分子訊號即為圖譜之基峰。由上述例子可以得知，使用高場不對稱波形離子移動能譜術進行分析時，可以去除大部分背景訊號之干擾，同時也可增加分析的訊號雜訊比 (signal-to-noise ratio)，因此一優點，LC-FAIMS-MS 已廣泛地應用於微量藥物之分析。

Cui 等學者以 ESI-FAIMS-MS 分析微量抗癌藥物 cisplatin 及其水解產物 monohydrated cisplatin 與 dihydrated cisplatin⁽¹²⁾。在分散電壓值為 +4000 V 與氮氣中添加 40% 氬氣與 3% 二氧化碳作為載流氣體之條件下，由分析結果可知，對於 cisplatin、monohydrated cisplatin 與 dihydrated cisplatin 之補償

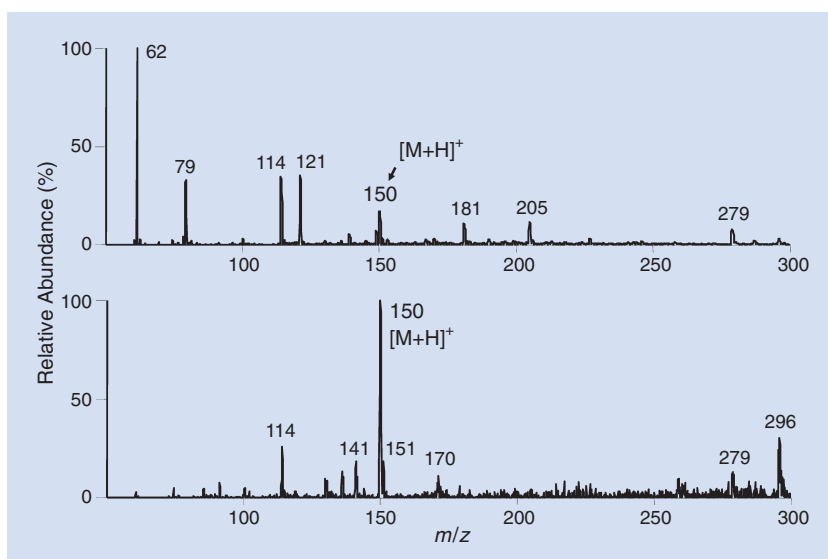


圖 5.
(a) LC-MS，(b) LC-FAIMS-MS 分析
20 ng/mL 甲基安非他命所得質譜圖。

電壓分別為 -17.0 V 、 -13.3 V 與 -10.0 V 。而在此條件下，分析之訊號雜訊比，相較於一般 ESI-MS 約可增加 30 倍，對於 cisplatin 之偵測極限可達到 0.7 ng/mL 。

2. 高場不對稱波形離子移動能譜術於飲用水分析之應用

飲用水於消毒步驟時產生的有機鹵素副產物 (organohalogen species byproduct) 會對於人類與環境造成危害，因此飲用水中微量消毒副產物之檢測已受到人們的重視。1999 年 Barnett 等人利用 ESI-FAIMS-MS 分析水中氯酸鹽 (chlorate)、溴酸鹽 (bromate) 與碘酸鹽 (iodate)，該研究探討不同分散電壓對於分離三種不同鹽類之影響⁽¹³⁾。由研究結果可得知，當分散電壓為 -3000 V 時，ESI-FAIMS-MS 分析水中鹵素鹽類有最佳效果，其分析之線性範圍在 10 nM — $100\text{ }\mu\text{M}$ 之間。同年 Ells 等學者利用 ESI-FAIMS-MS 分析飲用水中六種常見鹵醋酸 (haloacetic acid) 類化合物，包含單、二、三氯醋酸 (monochloroacetic acid (MCAA)、dichloroacetic acid (DCAA)、trichloroacetic acid (TCAA)) 與單、二溴醋酸 (monobromoacetic acid (MBAA)、dibromoacetic acid (DBAA)) 與氯溴醋酸 (bromochloroacetic acid, BCAA)⁽¹⁴⁾。在分散電壓值為 -3300 V 之最佳條件下，分析六種鹵醋酸化合物所得最佳補償電壓為 9.9 V (DBAA)、 11.6 V (BCAA)、 14.5 V (DCAA)、 18.0 V (MBAA 與 TCAA) 及 18.0 V (MCAA)。而採用流動注入法 (flow injection) 在上述分散電壓與補償電壓之條件下，可得知分析飲用水中鹵醋酸類化合物之偵測極限值在 0.5 — 4 ng/mL 之間。此兩篇文章為最早採用高場不對稱波形離子移動能譜術來分析飲用水中有機鹵素化合物之文獻，自此之後，學者仍持續開發以此分析方法為基礎之新技術，對飲水中消毒時產生之有機鹵素化合物進行分析⁽¹⁵⁻¹⁹⁾。

3. 高場不對稱波形離子移動能譜術於同分異構物分析之應用

傳統層析技術中，同分異構物之分離通常十分複雜，因此需要花費較多時間來尋找層析條件，有

時甚至需要購置昂貴的特殊管柱，才能將不同異構物分離。由於同分異構物間構形不同，因此在高場中移動能常數也不相同，可藉由高場不對稱波形離子移動能譜術來分離同分異構物。Barnett 等人以 ESI-FAIMS-MS 分析三種不同的苯二甲酸類化合物，如 phthalic acid (*ortho*-)、isophthalic acid (*meta*-) 與 terephthalic acid (*para*-)⁽²⁰⁾。此三種化合物之分子式相同，因此具有相同分子量，其差異僅是取代基位置不同，故無法單純地利用質譜儀進行分辨，因此採用高場不對稱波形離子移動能譜儀進行分離後，再以質譜儀進行偵測。在研究中發現，當載流氣體組成為純氮氣時，在最佳補償電壓下所得到的分析物質譜圖有斷裂碎片與加成產物 (adduct product) 之訊號。但在氮氣中添加二氧化碳作為混合之載流氣體時，此兩種非分析物之去質子化分子 (deprotonated molecule, $[M-H]^-$) 的訊號會降低，因此可以避免分析時的干擾。

McCooney 等人利用流動注入法結合 ESI-FAIMS-MS 對天然健康食品中所含麻黃鹼 (ephedra alkaloids) 進行分離及定量之分析，研究中所分析的麻黃鹼化合物包含 ephedrine (E)、pseudoephedrine (PE)、norephedrine (NE)、norpseudoephedrine (NPE)、methylephedrine (ME) 與 methylpseudoephedrine (MPE)⁽²¹⁾。由於在天然物中的 E 與 PE、NE 與 NPE 及 ME 與 MPE 互為非鏡像異構物 (diastereoisomers)，因此單靠質譜技術無法進行鑑定與分析。該研究中利用 ESI-FAIMS-MS 法對於此六種分析物進行最佳分離條件之探討，其結果顯示當條件設定為分散電壓 $+4000\text{ V}$ 、載流氣體組成為純氮氣時，分離效果設定為分散電壓 -4000 V 、載流氣體為 50% 氮氣時較佳，但靈敏度卻比較差。該研究採用以分離效果佳之 $+4000\text{ V}$ 與 100% 氮氣條件於往後之分析。以 FI-ESI-FAIMS-MS 分析麻黃鹼類化合物之線性範圍在 1 ng/mL — $1\text{ }\mu\text{g/mL}$ 之間，偵測極限在 0.1 — 3 ng/mL 之間；同時使用所開發方法來分析真實樣品，並將結果與使用傳統液相層析法紫外光偵測器 (LC-UV) 分析結果作比較，發現兩種方法所分析之真實樣品中含麻黃鹼濃度數值，除 MPE 差異較大外，其餘分析物在樣品中含量之數值均很接近。相較於傳統 LC-

UV 之分析方法，若使用 FI-ESI-FAIMS-MS，其優點為快速，且不需複雜的前處理過程與層析步驟即可進行分析。

4. 高場不對稱波形離子移動能譜術於蛋白質體學之應用

因為質譜技術具有高靈敏度與選擇性，使得近年來應用質譜技術於生化分析應用上逐漸受到重視，特別是在蛋白質體學之研究有更重大的突破。而在蛋白質體學之研究中，科學家利用酵素將蛋白質水解成較小的胜肽 (peptide) 片段後，再將混合之胜肽片段以 LC-MS 或 LC-MS/MS 進行分析，最後由所得到的質譜資訊來推測胺基酸的序列，進而鑑定蛋白質的身分或推測轉譯後修飾的位置，因此對於蛋白質體學而言，獲得正確的胜肽片段訊號十分重要。然而蛋白質經水解後的胜肽片段，於液相層析中沖提出之時間相當接近，且微量胜肽於質譜中訊號並不顯著，因此選擇正確的質譜訊號是相當困難的，若能提高所選擇訊號之正確性，對於蛋白質體的分析十分重要。

Guevremont 等人利用 ESI-FAIMS-MS 分析經胰蛋白酵素 (trypsin) 水解血紅素所產生之胜肽，由分析結果可得知經酵素水解出之不同的胜肽訊號，會具有不同的最佳補償電壓值⁽²²⁾。而在特殊分析條件與補償電壓下，可以得到受干擾較少的胜肽質譜圖。藉由此結論，Canterbury 等學者開發以 nanoLC-FAIMS-MS 分析從蛋白質水解後的複雜胜肽，可獲得更佳蛋白質鑑定之結果⁽²³⁾。此外，Barnett 等人使用 ESI-FAIMS-MS 分析經胰島素水解後的胜肽時發現，帶有不同價數的胜肽離子，其補償電壓值通常會落在某一特定範圍之內⁽²⁴⁾。由於胜肽於質譜中通常以二價離子之形式存在，因此藉由設定特定補償電壓，可以減少其他價數之胜肽離子對分析的干擾。

Venne 等學者使用 nanoLC-FAIMS-MS 之方法來分析老鼠血漿中所萃取出之蛋白，結果顯示有使用高場不對稱波形離子移動能譜術之分析法較傳統沒使用的分析法，除分析時不受到其他價數胜肽之影響外，更可偵測到較傳統方法多 20% 的胜肽數量⁽²⁵⁾。

四、結論

高場不對稱波形離子移動能譜術是一種可在大氣壓環境下分離氣態離子之新技術，其原理主要是利用在電場大於 10000 V/cm 時的高電場中氣態離子之移動能常數與電場強度為非線性之關係，使氣態離子具有不同的移動能而進行分離。除了電場強度外，施加於儀器上不對稱波形之形式、載流氣體組成與流速、以及電極的溫度等，皆會影響離子分離之結果。由於高場不對稱波形離子移動能譜術之優點，除分析速度快之外，更可分離同分異構物與降低背景干擾，因此可以克服質譜技術無法區分同分異構物及易受到背景干擾物影響之缺點。

結合高場不對稱波形離子移動能譜術與液相層析質譜術，已被應用於複雜基質中微量成分之分析與同分異構物之分離。在蛋白質體學領域中，高場不對稱波形離子移動能譜術被應用於降低其他干擾物之影響，以獲得最多正確胜肽片段之資訊，俾能得到更準確的蛋白質鑑定結果。

參考文獻

1. A. B. Kanu, P. Dwivedi, M. Tam, L. Matz, and H. H. Hill Jr., *J. Mass Spectrom.*, **43**, 1 (2008).
2. A. A. Shvartsburg, K. Tang, R. D. Smith, M. Holden, M. Rush, A. Thompson, and D. Toutiungi, *Anal. Chem.*, **81**, 6489 (2009).
3. I. A. Buryakov, E. V. Krylov, E. G. Nazarov, and U. K. Rasulev, *Int. J. Mass Spectrom. Ion Processes*, **128**, 143 (1993).
4. B. M. Kolakowski and Z. Mester, *Analyst*, **132**, 842 (2007).
5. R. Guevremont, *J. Chromatogr. A*, **1058**, 3 (2004).
6. D. A. Branett, M. Belford, J. J. Dunyach, and R. W. Purves, *J. Am. Soc. Mass Spectrom.*, **18**, 1653 (2007).
7. R. B. Turner and J. L. Brokenshire, *Trac-Trends Anal. Chem.*, **13**, 275 (1994).
8. R. W. Purves and R. Guevremont, *Anal. Chem.*, **71**, 2346 (1999).
9. R. Guevremont and R. W. Purves, *Rev. Sci. Instrum.*, **70**, 1370 (1999).
10. ThermoScientific FAIMS, Operator's Manual.
11. E. V. Krylov, S. L. Coy, and E. G. Nazarov, *Int. J. Mass Spectrom.*, **29**, 119 (2009).
12. M. Cui, L. Ding, and Z. Mester, *Anal. Chem.*, **75**, 5847 (2003).
13. D. A. Barnett, R. Guevremont, and R. W. Purves, *Appl. Spectrosc.*, **53**, 1367 (1999).
14. B. Eells, D. A. Barnett, K. Froese, R. W. Purves, S. Hrudey, and R. Guevremont, *Anal. Chem.*, **71**, 4747 (1999).

15. R. Handy, D. A. Branett, R. W. Purves, G. Horlick, and R. Guevremont, *J. Anal. At. Spectrom.*, **15**, 907 (2000).
16. B. Ells, D. A. Barnett, R. W. Purves, S. Hrudey, and R. Guevremont, *J. Environ. Monit.*, **2**, 393 (2000).
17. B. Ells, D. A. Barnett, R. W. Purves, S. Hrudey, and R. Guevremont, *Anal. Chem.*, **72**, 4555 (2000).
18. W. Gabryelski, F. Wu, and K. L. Froese, *Anal. Chem.*, **75**, 2478 (2003).
19. A. D. Delinsky, J. V. Bruckner, and M. G. Bartlett, *Biomed. Chromatogr.*, **19**, 617 (2005).
20. D. A. Barnett, R. W. Purves, B. Ells, and R. Guevremont, *J. Mass Spectrom.*, **35**, 976 (2000).
21. M. McCooey, L. Ding, G. J. Gardner, C. A. Fraser, J. Lam, R. E. Sturgeon, and Z. Mester, *Anal. Chem.*, **75**, 2538 (2003).
22. R. Guevremont, D. A. Barnett, R. W. Purves, and J. Vandermeij, *Anal. Chem.*, **72**, 4577 (2000).
23. J. D. Centerbury, X. Yi, M. R. Hoopmann, and M. J. MacCoss, *Anal. Chem.*, **80**, 6888 (2008).
24. D. A. Barnett, B. Ells, R. Guevremont, and R. W. Purves, *J. Am. Soc. Mass Spectrom.*, **13**, 1282 (2002).
25. K. Venne, E. Bonneil, K. Eng, and P. Thibault, *Anal. Chem.*, **77**, 2176 (2005).



陳崇宇先生為國立中興大學分析化學博士，現任國立中興大學化學系博士後研究員。

Chung-Yu Chen received his Ph.D. in analytical chemistry from National Chung Hsing University. He is currently a postdoctoral fellow in the Department of Chemistry at National Chung Hsing University.



李茂榮先生為美國佛羅里達大學分析化學碩士，現任國立中興大學化學系特聘教授兼系主任。

Maw-Rong Lee received his M.S. in analytical chemistry from the University of Florida, USA. He is currently a distinguished professor and chairman in the Department of Chemistry at National Chung Hsing University.