综述与专论

DOI：10.11949/0438-1157.20251337

超滤膜电渗析技术的应用、挑战及展望

刘珊珊[1]，马溪溪[1]，杨蔚[1]，何金凤[1,2]，孙黎[1,2]，徐婷婷[3]，李传润[1,2]，颜海洋[1,2]

（[1]安徽中医药大学药学院制药工程技术研究中心，安徽 合肥 230012；[2]药物制剂技术与应用安徽省重点实验室，安徽 合肥 230012；[3]中国科学技术大学化学与材料科学学院，安徽 合肥 230026）

摘要： 超滤膜电渗析（EDUF）是基于超滤膜和电渗析分离技术，将孔径筛分和电荷筛分相结合，从而实现溶液中荷电物质与荷电物质、荷电物质与非荷电物质的高效分离与浓缩。目前，该技术在制药、食品、化工和环境等领域展现出广阔的应用前景。本文旨在阐述EDUF技术的分离原理与发展历程，全面综述其在生物制药、中药制药、食品和废水处理等领域的应用进展，并深入探讨EDUF在复杂物系分离中的挑战，展望未来在材料改性、过程优化及多技术耦合等方面的发展趋势，以推动EDUF的工业化应用。

关键词： 超滤膜；电渗析；荷电有机物；分离；选择性

中图分类号： TQ 028　　**文献标志码：** A

文章编号： 0438-1157（2026）08-4656-16

Application, challenges, and prospects of electrodialysis with ultrafiltration membranes technology

LIU Shanshan[1], MA Xixi[1], YANG Wei[1], HE Jinfeng[1,2], SUN Li[1,2], XU Tingting[3], LI Chuanrun[1,2], YAN Haiyang[1,2]

([1] *Pharmaceutical Engineering Technology Research Center, School of Pharmacy, Anhui University of Chinese Medicine, Hefei 230012, Anhui, China*; [2] *Anhui Province Key Laboratory of Pharmaceutical Preparation Technology and Application, Hefei 230012, Anhui China*; [3] *School of Chemistry and Materials Science, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, Anhui, China*)

Abstract: The electrodialysis with ultrafiltration membranes (EDUF) is based on ultrafiltration membrane and electrodialysis separation technology, combining pore size sieving and charge sieving to achieve efficient separation and concentration of charged substances from one another, and charged substances from one uncharged substance in solution. Currently, this technology shows widely application prospects in the fields such as pharmaceuticals, food, chemicals, and the environment. This article aims to elucidate the fundamental principles and developmental history of EDUF technology, providing a comprehensive review of its applications in biopharmaceuticals, traditional Chinese medicine manufacturing, food processing, and wastewater treatment, and conduct an in-depth analysis of the challenges associated with EDUF in the separation of complex systems. Furthermore, the development trends

收稿日期： 2025-12-01　　**修回日期：** 2025-12-26

通信作者： 颜海洋（1990—），男，博士，教授，oceanyan@ustc.edu.cn

第一作者： 刘珊珊（2001—），女，硕士研究生，lss633068@163.com

基金项目： 国家自然科学基金面上项目（22478006，22478007，22478372）；国家重点研发计划项目（2022YFB3805100）；安徽省高校优秀青年科研项目（2022AH030063）；安徽中医药大学人才支持计划项目重大项目（2022rcZD005）

引用本文： 刘珊珊, 马溪溪, 杨蔚, 何金凤, 孙黎, 徐婷婷, 李传润, 颜海洋. 超滤膜电渗析技术的应用、挑战及展望[J]. 化工学报, 2026, 77(8): 4656-4671

Citation: LIU Shanshan, MA Xixi, YANG Wei, HE Jinfeng, SUN Li, XU Tingting, LI Chuanrun, YAN Haiyang. Application, challenges, and prospects of electrodialysis with ultrafiltration membranes technology[J]. CIESC Journal, 2026, 77(8): 4656-4671

with material modification, process optimization, and integration with complementary technologies were also discussed, which promotes the industrial application of EDUF.

Keywords: ultrafiltration membrane; electrodialysis; charged organic compounds; separation; selectivity

引　言

随着制药、食品、化工、环境等领域相关技术的不断发展，对于大分子成分分离的研究日益广泛。目前，传统分离技术如离心、沉淀、层析、萃取和离子交换等，在生物制药、中药制药、食品及化工废水处理等领域被广泛用于处理大分子有机物[1-3]。这些分离方法普遍存在选择性差、高值化成分回收率低、能源消耗高、废水排放量大等问题，严重制约了相关行业向高效、低碳、高质量方向的升级，亟须一种新的方法和技术实现其高效分离[1, 4]。膜分离技术以先进材料为载体，在膜两侧施加驱动力（压力场、电场、浓度场等）可实现不同粒径、不同分子量、不同离子的分离和浓缩，也可实现物料中不溶物和可溶物之间的分离和浓缩，溶液中分子和离子之间的选择性分离和浓缩，具有节能、环保、高效等特点，广泛用于制药、食品、化工和环境等领域[4-7]。

根据分离机制的不同，可以分为压力驱动膜过程[8-9]和电驱动膜过程[10-11]。压力驱动膜过程主要基于孔径筛分和道南效应实现不同组分的分离、纯化和浓缩[8-9]。目前，压力驱动膜技术常用于生物发酵液处理[12]、中药有效成分分离[6]、废水处理[13]等领域。然而，在采用压力驱动膜工艺从复杂蛋白水解基质中分离目标组分（颗粒物、胶体微粒、大分子有机物等）的过程中，常面临选择性低、膜表面污染和膜孔堵塞等问题，从而影响膜的使用寿命[14]。电渗析（ED）是在外加直流电场的驱动下，利用离子交换膜（IEM）的选择透过性[即阴离子通过阴离子交换膜（AEM）向阳极迁移，阳离子通过阳离子交换膜（CEM）向阴极迁移]，以实现荷电成分和荷电成分、荷电成分和非荷电成分的高效分离，具有高效、节能、绿色无污染等优点[10-11]。目前，ED技术已广泛用于乳制品加工[15]、氨基酸生产[16]、小分子有机物分离[17]、废水处理[5, 18]等领域。然而，ED技术依赖致密的IEM对离子进行选择性筛分，在面对分子尺寸更大的有机物时，其分离效率显著下降，制约了该技术在大分子有机物分离中的应用。

因此，为弥补上述两种工艺的不足，可在传统ED装置中加入超滤膜（UFM），用于大分子有机物的分离和纯化。超滤膜电渗析（又称电渗析-超滤膜耦合技术，EDUF）可以将孔径筛分和电荷筛分结合起来，实现有机物和荷电成分的分级分离[19]。此外，利用该技术可提高产品的纯度、质量及生产效率，降低生产成本。目前，EDUF已广泛用于生物制药、中药制药、食品、废水处理等领域[20-23]。本文综述了EDUF技术的发展历程和应用进展，并展望了EDUF技术的未来发展方向，以推动工业生产的连续、高效、可持续发展。EDUF技术的应用研究进展如图1所示。

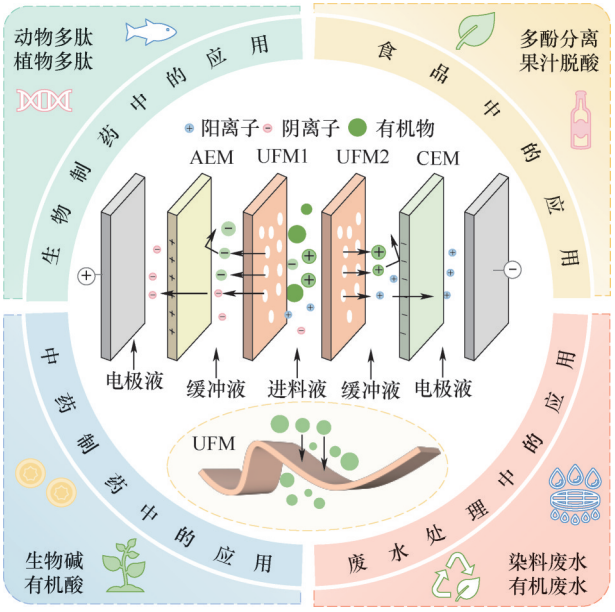


图1　EDUF技术的应用进展

Fig.1　Application progress of the EDUF technology

1　EDUF的发展历程和分离原理

1.1　发展历程

超滤是以压力差或浓度差为推动力，利用高分子材料半透膜将溶液中的离子和有机物分离，根据膜孔径的差异截留不同分子质量的物质[20]。超滤早期使用的UFM是天然的动物脏器薄膜，在19世纪60年代初，研究人员进行超滤试验将水中的悬浮微粒通过天然膜材料截留，但当时超滤未作为一项实验方法而得到发展[24]。1890年，Maigot等[25]结合电解和渗析方法组装出ED装置用于糖浆脱盐处理。1902年，Schollmeyer[26]提出“ED”概念并进行书面记

录。1925年，Michaelis等[27]通过研究均相弱酸胶体膜制备出IEM。1940年，工业应用的需求促进了基于酚醛缩聚的IEM的发展[28]；同年，Meyer等[29]提出ED过程，在此过程中，AEM和CEM交替排列在电极之间形成许多平行的隔室。1950年，Juda等[30]开发出一种高选择性、低电阻的IEM，至此，IEM和ED技术发展迅速，在制药、食品、化工、环境等行业得到广泛应用。

1963年，Loeb等[31]制备出不对称性的醋酸纤维素（CA）半透膜，超滤技术迎来巨大的突破。20世纪60年代初超滤技术兴起，日本等国家将超滤技术代替传统工艺应用于中药生产加工，从而提高产品的质量和纯度，降低生产加工成本[32]。而我国超滤技术兴起于20世纪70年代初。1975年，研究人员将超滤技术应用于电泳涂漆和涂漆废液的回收，并于次年进行技术鉴定[33]。与此同时，Wang[34]设计出ED过程与UFM相结合的实验装置。1978年，Ahlgren[35]采用该装置进行乳清蛋白脱盐生产过程的研究。2001年，Galier等[36]详细描述了采用多孔膜作为分离介质的EDUF装置的传质过程，其可放大电泳实验规模，还拓展了ED的应用领域，如对多肽、氨基酸或小分子蛋白质进行分级分离。2004年，该团队研究了EDUF在二元混合物分离过程中的传质过程，以α-乳白蛋白与牛血红蛋白的分离为例，对工艺性能进行了深入研究[37]。2005年，Bazinet等[38]采用EDUF技术从烟草提取物中选择性分离多酚类成分，此后该团队对乳制品、海洋生物活性肽、植物活性肽等进行一系列研究，分离出多种具有药理活性的多肽类成分[39]。目前，国内外研究开发的UFM材料从CA发展到聚砜（PSF）、聚醚砜（PES）、聚丙烯酰胺（PAM）、聚苯乙烯（PS）、聚丙烯腈（PAN）及聚偏氟乙烯（PVDF）、尼龙材料等[24]，具有高渗透性、抗污染等特点，提高了EDUF过程的分离效率和稳定性。EDUF技术及其相关过程的发展历程时间表如图2所示。

1.2 EDUF的分离原理

如上所述，EDUF技术是一种使用UFM结合传统ED和电泳原理的混合过程，以电势差为主要驱动力，根据离子所带电荷和分子量进行选择性分离，其分离原理如图3所示。图3(a)为通过ED工艺进行有机组分混合溶液脱盐的分离原理，在电场作用下，盐离子（SC^+、SA^-）分别向阴、阳两极发生迁移，而有机物组分（A、C）由于分子尺寸的限制，保留在淡化室中。与传统ED相比，UFM可以选择性筛分溶液中的大分子成分和微粒（如蛋白质、多肽、细菌、病毒、胶体等成分），而电场作用可加速无机离子和荷电有机物在膜表面的迁移速率，从而实现不同组分的分离和浓缩[19, 39]。图3(b)、(c)分别为EDUF的分离与纯化原理[37]。该装置能实现有机物组分的分离纯化，但难以去除无机盐组分。为此，Poulin等[40]采用具有两个UFM的EDUF装置，用于同时从混合有机物中分离阳离子和阴离子多肽，并实现组分中无机离子的去除。如图3(d)所示，在电场作用下荷电的有机物组分（C^+、A^-）和盐离子（SC^+、SA^-）分别向阴、阳两极发生迁移，在通过UFM时，分子质量小于UFM截留分子质量（MWCO）的荷负电有机组分A^-和阴离子SA^-通过UFM1向阴离子隔室移动（隔室1），而分子质量小于MWCO的荷正电有机组分C^+和阳离子SC^+通过UFM2向阳离子隔室移动（隔室2），带中性电荷的分子质量大于MWCO的荷电有机物则会被截留在进料液隔室中。这个过程可实现荷电组分和非荷电组分、不同分子量荷电组分的

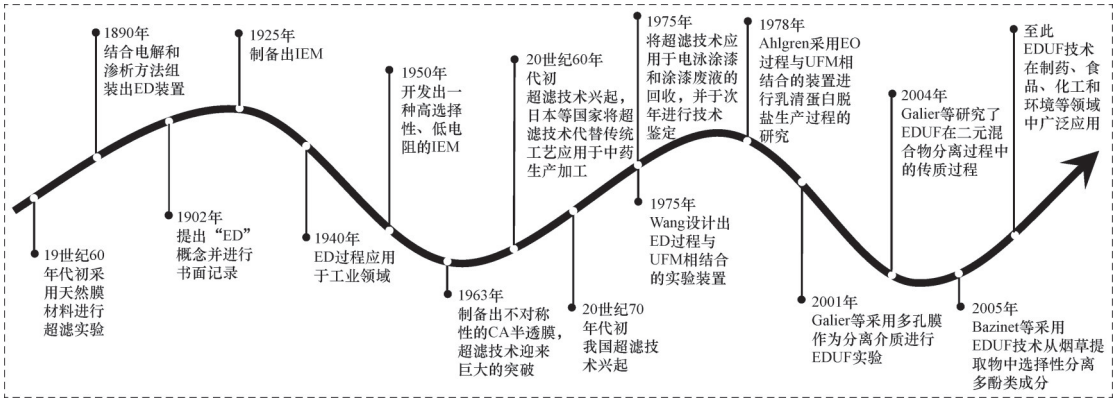


图2 EDUF及其相关过程发展历程

Fig.2 The development of EDUF and related processes

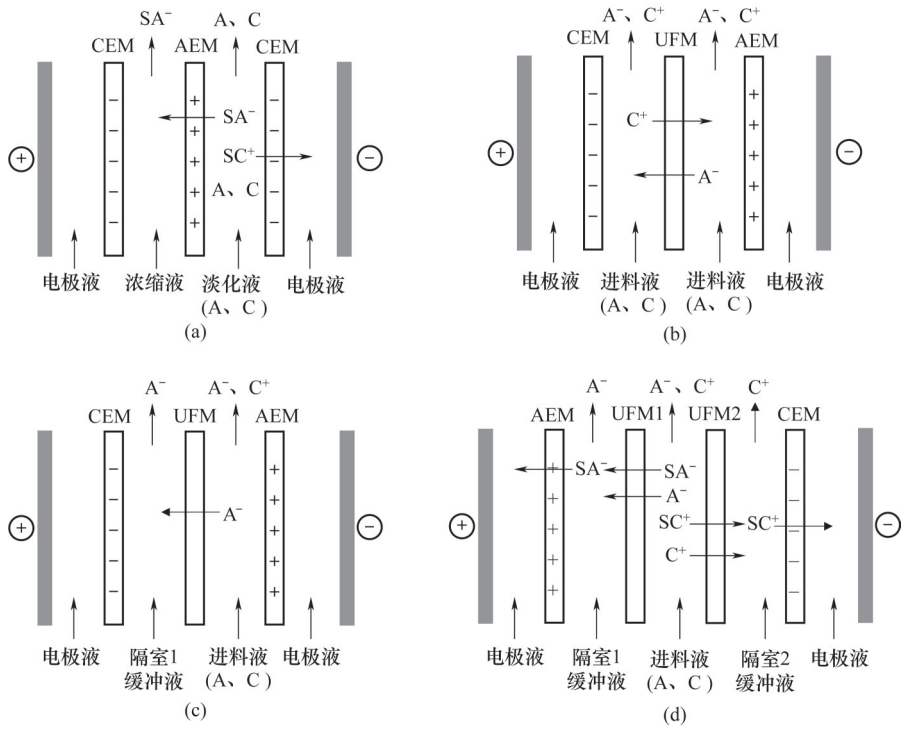


图3 (a) 传统ED分离原理;EDUF的(b)分离和(c)纯化原理[37];(d) EDUF选择性分离原理[40]

Fig.3 (a) Principle of conventional ED separation; (b) Separation and (c) purification principles of the EDUF[37]; (d) Principle of selective EDUF separation[40]

分离。并且由于盐离子可以通过IEM继续迁移,而粒径大于IEM孔径的有机物则被分别截留在隔室1和隔室2中,进一步实现有机物和无机盐离子的分离。此外,相较于压力膜驱动技术,EDUF可通过叠加不同MWCO的UFM实现多种不同分子量荷电有机物的选择性分离,有效减轻了压力驱动过程中UFM的膜污染。

2 EDUF在工业中的应用

采用EDUF技术选择性分离特定的目标组分具有广阔的发展前景,可广泛应用于制药、食品、化工和环境等领域。本节将综述EDUF在生物制药、中药制药、食品、废水处理等方面的应用,详细介绍EDUF工艺的应用进展。

2.1 EDUF在生物制药中的应用

从动物或植物天然成分中分离生物活性成分具有巨大潜力,使用强酸、强碱、蛋白酶进行水解,可以从内源性蛋白中分离纯化得到多种生物活性肽[39]。传统方法从复杂组分中分离特定分子质量的活性肽存在诸多缺陷,亟须进一步的技术变革[41]。EDUF技术可通过不同MWCO的UFM选择性分离出不同分子量的活性成分,为后续制备相关药物提供了更为简洁的分离纯化方法。本节将介绍EDUF在生物制药领域的应用,主要集中于生物活性成分(如动物多肽、植物多肽等)的应用进展,以推动生物制药领域的工业绿色制造进程。

2.1.1 *动物多肽分离纯化* 目前,EDUF已广泛用于分离蛋白质、多肽、酶、氨基酸等成分,通过结合电场驱动作用可实现对复杂生物成分的高效分离和富集,提高产品的分离效率和纯度[39]。例如,EDUF可用于分离生物活性物质,对乳清蛋白[40, 42-45]、牛血清白蛋白[46-47]、蛋白酶[48-49]、雪蟹副产品水解物[50-53]、鲑鱼蛋白水解物[54-56]、鲱鱼蛋白水解物[57]等乳制品或酶解液进行分离纯化,可得到具有抗菌、抗炎、抗氧化、抗血栓、抗肿瘤、降压等药理活性的多肽成分。EDUF在动物多肽中的应用进展如表1所示。

乳清蛋白是乳制品加工中的副产品,主要来源于牛奶中的可溶性蛋白部分,其衍生物包括α-乳白蛋白、β-乳球蛋白、乳铁蛋白、免疫球蛋白等[58]。在乳清蛋白EDUF分离过程中,EDUF技术分离乳清蛋白的肽迁移率和选择性受到操作参数(如有效膜面积、电场强度、进料液pH和流速等)的影响。Poulin等[40, 42-43]采用EDUF从β-乳球蛋白水解物中分离活

表1 EDUF在分离动物多肽中的应用

Table 1 Applications of the EDUF in the separation of animal peptides

来源	UFM参数	操作条件	分离性能	文献
乳清	有效膜面积:10 cm^2 MWCO:20 kDa 膜材料:CA	(1) pH=5、9,U=5.5 V (2) pH=5、7、9,U=6 V	迁移率:7.8~11.9 g/(m^2·h) β-乳球蛋白的回收率可达10.8%	[40]
乳清	有效膜面积:10、40 cm^2 MWCO:20 kDa 膜材料:CA	pH=5,E=2.7、5.5、11.0 V/cm	迁移率:3.1~11.23 g/(m^2·h) 回收率:30%~50%	[42]
乳清	有效膜面积:10 cm^2 MWCO:20 kDa 膜材料:CA	pH=5,U=5.5 V,Q_{feed}=100~250 ml/min	迁移率:3.1 g/(m^2·h)	[43]
乳清	有效膜面积:35 cm^2 MWCO:30、100 kDa 膜材料:CA	pH=4.8、6、8,i=3~20 A/m^2	—	[44]
乳清	有效膜面积:15.6 cm^2 MWCO:5 kDa 膜材料: 聚乙烯醇	E=38.5、77 V/cm	迁移率:0.4~1.9 g/(m^2·h)	[45]
牛血红蛋白	有效膜面积:100 cm^2 MWCO:20 kDa 膜材料:纤维素酯	pH=7,U=8 V	迁移率:1.99~5.06 g/(m^2·h)	[46]
牛血清白蛋白和溶菌酶	有效膜面积:35 cm^2 MWCO:30 kDa 膜材料:PES	pH=10,I=150 mA	—	[47]
蛋清溶菌酶	有效膜面积:51 cm^2 MWCO:100 kDa 膜材料:PVDF	pH=5,U=3、5、8 V,Q_{feed} =20~65 ml/min	迁移率:0.07~0.32 g/(m^2·h) 回收率:21.4%~32.2%	[48]
		pH=5~5.5,U=5 V	迁移率:0.21 g/(m^2·h) 回收率:21.1%	[49]
雪蟹	有效膜面积:100 cm^2 MWCO:20 kDa 膜材料: PES	pH=3、6、9,U=18 V	迁移率:1.32~7.13 g/(m^2·h) 回收率:1.2%~9.1%	[50]
雪蟹	有效膜面积:100 cm^2 MWCO:20 kDa 膜材料:PES、CA	pH=9,E=2 V/cm	迁移率:2.29~2.62 g/(m^2·h) 回收率:1.5%~10.2%	[51]
雪蟹	有效膜面积:100 cm^2 MWCO:20、50 kDa 膜材料:CA	pH=9,E=2、14 V/cm	迁移率:0.43~5.40 g/(m^2·h) 回收率:9.7%~43.1%	[52]
雪蟹	有效膜面积:200 cm^2 MWCO:20 kDa 膜材料:PES	pH=9,E=0.9、1.8、2.7、3.6 V/cm	回收率:0.76%~9.3%	[53]
鲑鱼	有效膜面积:100 cm^2 MWCO:20 kDa 膜材料:PES	pH=3、6、9,E=14 V/cm	—	[54]
鲑鱼	有效膜面积:200 cm^2 MWCO:5、20、50 kDa 膜材料:PES	pH=6,E=6 V/cm	迁移率:0.01~3.19 g/(m^2·h) 回收率:0.15%~9.2%	[55]
鲑鱼	有效膜面积:100 cm^2 MWCO:50 kDa 膜材料:PES	pH=6,E=6 V/cm	—	[56]
鲱鱼	有效膜面积:200 cm^2 MWCO:50 kDa 膜材料:PES	pH=7,U=14 V	迁移率:4.7~5.2 g/(m^2·h)	[57]

注:MWCO—截留分子质量;CA—醋酸纤维素;PES—聚醚砜;E—电场强度;U—操作电压;i—电流密度;I—电流;Q_{feed}—进料液流量。

性肽，探究了不同进料液pH、膜面积和电场强度，以及进料液流速等参数对EDUF分离乳清蛋白中肽迁移率和选择性的影响。研究发现，当进料液pH增加时，有利于阴离子肽的迁移，肽迁移率可达10.2 g/(m²·h)；当进料液pH降低时，有利于阳离子肽的迁移，肽迁移率可达11.9 g/(m²·h)。随着膜面积和电场强度的增加，产物室的肽迁移率可达11.23 g/(m²·h)，回收率可达50%。而进料液的流速对肽迁移率无显著影响[迁移率达3.1 g/(m²·h)]，但值得一提的是，进料流速的增加降低了肽迁移的选择性。如上所述，可通过EDUF有效分离乳清蛋白中的单一生物活性成分，那么对于多种混合物中荷电生物分子的分离纯化，要如何实现其高选择性分离？对此，Galier等[44]采用EDUF工艺从乳清水解物中分离电荷和分子质量相似的生物活性成分（如α-乳球蛋白、β-乳球蛋白），探究不同pH、MWCO的UFM，以及静电相互作用对肽分离性能的影响。结果表明，在pH为8的条件下，由于静电排斥作用抑制了α-乳白蛋白和β-乳球蛋白的传质，其分离未能实现。而在pH为4.8时，使用大尺寸MWCO的UFM能有效避免空间位阻效应，实现α-乳白蛋白和β-乳球蛋白的有效分离。此外，通过开发新型UFM材料，可实现相似电荷和分子量肽成分的高效分离。Wang等[45]采用EDUF技术成功实现了乳铁蛋白与免疫球蛋白的分离。他们采用实验室自制的聚乙烯醇膜作为过滤介质，考察了EDUF过程中不同处理时间及电场强度（38.5 V/cm和77 V/cm）对分离效果的影响。结果表明，自制聚乙烯醇膜能有效截留乳铁蛋白和免疫球蛋白，同时保持其他蛋白的高通量分离。在模拟乳清溶液中实现了乳铁蛋白与免疫球蛋白的分离，其肽迁移率可达0.4~1.9 g/(m²·h)。

上述研究表明，EDUF技术已在乳制品加工生产中得到了广泛的应用。在蛋白酶分离方面，如牛血红蛋白、溶菌酶等，可通过EDUF工艺从复杂蛋白混合物中高选择性分离活性肽。Vanhoute等[46]采用EDUF工艺分离牛血红蛋白水解混合物，评估血红素对牛血红蛋白肽水解产物分离性能的影响，其迁移率可达1.99~5.06 g/(m²·h)。Chen等[47]探究了EDUF分离混合蛋白溶液的可行性，以牛血清白蛋白和溶菌酶作为模型蛋白质，使用30 kDa UFM对两者的二元混合物进行分级分离。孙鲁芹等[48-49]采用EDUF技术从蛋清中直接分离、提取出溶菌酶，考察了电场强度、UFM材料及进料室和产物室内溶液流速对分离性能的影响。结果表明，在电压为5 V，溶液流速为50 ml/min，体积比为1∶1.5的操作条件下，溶菌酶的回收率可达32.2%，所回收溶菌酶的纯度可达100%，其肽迁移率可达0.32 g/(m²·h)。

此外，EDUF技术在分离海洋生物活性蛋白方面展现了显著的优势。研究表明，海洋生物肽类可以增强某些生物活性，如抗癌、抗菌、抗氧化和降血压的药理作用[59]。多肽的生物活性与其分子质量和氨基酸组成密切相关。因此，使用合适的分级分离方法来获得功能性和生物活性更高的纯化肽段尤为重要。Doyen等[50-53]评估了采用EDUF工艺从雪蟹副产物水解物中分离出活性多肽的可行性，探究了不同pH、不同UFM材料、不同MWCO的UFM和电场强度对分离性能的影响。结果表明，对不同的pH分离条件下获得的产物室肽成分进行测试以评估其体外抗癌性能，其肽迁移率可达7.13 g/(m²·h)，回收率可达9.1%。而在不同UFM材料中分离，产物室中所得肽分子质量范围为600~700 Da，其肽回收率为1.5%~10.2%。采用不同MWCO的UFM和电场强度下，产物室中所得肽分子质量范围为300~600 Da，其肽迁移率为0.43~5.40 g/(m²·h)。此外，该团队还探究了电场强度以及IEM和UFM特性对肽迁移率和选择性的影响，其产物室中多肽的回收率可达0.76%~9.3%。研究发现，鱼类及其副产物可以改善与代谢综合征相关的症状，故使用合适的分级方法来获得功能性和生物活性更高的纯化肽段非常重要[59]。Roblet等[54]采用EDUF工艺探究不同pH对鲑鱼蛋白水解物中分离生物活性肽的影响，评估了从复杂混合物中分离或浓缩活性肽的可行性。结果表明，在pH为6的条件下进行EDUF处理后的最终进料室和阳离子肽可使L6骨骼肌细胞的葡萄糖摄取率提高31%~40%。上述研究证明了EDUF工艺对生物活性组分具有显著的分离性能，那么能否对多肽的分离实现规模化生产？Thibodeau等[57]评估在连续长期运行下中试规模的EDUF工艺的可行性，并从整体系统阻力、能耗和肽迁移率等指标评估工艺性能，以及膜污染对分离性能的影响。研究发现，经过12批次连续实验，阳离子肽平均迁移率[5.2 g/(m²·h)]高于阴离子肽[4.7 g/(m²·h)]，且迁移过程具有肽段特异性，两个产物室均仅检出<1 kDa的小分子质量肽段。此外，采用少量盐溶液进行批次后清洗可有效去除膜表面的多肽，膜表征结果显示在EDUF中各膜表面均未出现可见污染。

综上，EDUF工艺对于生物制药中活性组分的分离纯化具有良好的发展潜力和应用前景。2022年，国家发展改革委印发的《“十四五”生物经济发展规划》中明确提出，发展面向绿色低碳的生物组分替代应用，该政策的提出为蛋白行业的发展提供了良好的环境和机遇，面向绿色制药的膜分离技术对于助力蛋白产业发展具有巨大的潜力。未来，研究者可通过不断加强技术研究，实现生物活性成分的有效分离、纯化和浓缩，为生物制药的发展提供新的方向。

2.1.2 植物多肽分离纯化 植物多肽在天然产物中资源丰富，具有很高的药用价值，在抗癌、抗菌、抗炎、抗氧化、降血糖、降血脂等方面具有重要的临床意义和应用潜力[60]。由于植物生物活性成分中含有许多复杂组分，难以用一种方法分离出所需的肽。传统工艺常选择超滤和凝胶过滤色谱法进行分离纯化，再通过高效液相色谱法分离出最终的目标成分，存在选择性低、分离效果差、分离工艺烦琐等问题。EDUF技术可根据目标成分的等电点和分子量，选择合适的操作参数（如电场强度、pH、UFM等）实现高效分离[61]。目前，该技术广泛用于苜蓿[62-63]、亚麻籽[64-66]、油菜籽[61, 67]、大豆[68-70]、小麦[71-72]、藜麦[73]等植物多肽的分离纯化中，其应用进展如表2所示。

EDUF工艺能够生产具有生物活性的目标组分的渗透溶液，通过进一步优化工艺条件，如延长操作时间、调节进料液pH、增加电场强度和膜面积，可以实现更高的迁移速率。因此，Firdaous等[62-63]探究了EDUF工艺从苜蓿蛋白水解物中同时浓缩和分离酸性和碱性肽的可行性，评估了不同进料液pH和膜堆构型对分离性能的影响。结果表明，EDUF工艺可同时实现肽的分离和浓缩，其肽迁移率可达到7.3 g/(m^2·h)，单一肽段的回收率可达18.2%。同时，通过调控产物室的溶液pH，在中试规模下采用总膜面积为0.12 m^{2}的EDUF装置实现抗高血压肽的馏分富集，其肽迁移率可达到8.7 g/(m^2·h)，回收率可达32%。Udenigwe等[64]采用EDUF分离亚麻籽蛋白水解物的可行性，使用控制酶促过程来水解亚麻籽蛋白释放含精氨酸的肽，并使用EDUF将产物室的肽组分浓缩成富含精氨酸的阳离子肽组分，其肽回收率可达9.6%~43.3%。Doyen等[65]使用两种不同MWCO的UFM通过EDUF对亚麻籽蛋白水解物进行分级分离，评估这种双重堆积对肽迁移和分级选择性的影响。研究发现，在pH为3.0条件下分级分离亚麻籽蛋白水解物，可以回收两种阳离子肽组分，其肽迁移率可达1.04~4.70 g/(m^2·h)。此外，由于酚类化合物等成分的存在，从油籽中分离功能性蛋白存在一定困难。Ayan等[67]研究了EDUF分离油菜籽蛋白提取物中芥子酸的可行性，该工艺可实现芥子酸的有效去除并截留蛋白质，其截留率高达88.8%。

酶蛋白水解被广泛应用于食品工业中，如从大豆、小麦蛋白中生产调味料，或改善乳制品和糖果的功能特性。Langevin等[68]比较了压力驱动的纳滤与电驱动的EDUF在用于大豆蛋白水解物中分离活性肽的质量通量和质量平衡方面的性能。在相同条件（膜面积、工艺时长）下，纳滤的物质通量高于EDUF，而EDUF能回收更广泛的肽分子量和极性氨基酸含量。将纳滤和EDUF组合到同一工艺流程中，不仅能提升各自的分离性能，还能比单独使用时获得更特异的肽组分，其肽回收率可达7%~9%。此外，对于藜麦这类蛋白质丰富、氨基酸图谱广泛且具有显著药理活性的伪谷物[74]，可采用EDUF工艺，依据其生物活性肽的电荷与分子质量差异进行选择性分离。González-Muñoz等[73]使用EDUF进行分级生产藜麦肽，并根据抗高血压和抗糖尿病活性测试这些级分。研究发现，分离的多肽分子质量范围在0.4~1.5 kDa，获得了阳离子肽3.01%、阴离子肽1.18%和电中性藜麦蛋白水解物约95%。

综上，从复杂的植物蛋白酶解液中高效分离、纯化生物活性肽，是实现其高值化利用的关键技术瓶颈。EDUF技术通过结合孔径筛分和电场驱动作用，在UFM两侧施加电场，实现对目标组分进行孔径筛分的同时，定向迁移并去除荷电小分子杂质，为植物多肽的高效分离与纯化提供了新途径。

2.2 EDUF在中药制药中的应用

中药组成十分复杂，一味中药可能含有成百上千种不同的成分，且其分子质量大小不一[75]。其中，生物碱、有机酸、黄酮等有效成分的分子质量大多不超过1 kDa；而淀粉、果胶等分子质量在50 kDa以上的高分子物质属于非药效成分，需通过制药生产中的“精制”单元操作加以去除[75-76]。然而，中药有效成分多数为小分子有机化合物，对温度、pH等外界因素较为敏感[77]。传统ED工艺采用致密的IEM进行目标产物的分离纯化，导致中药有效成分难以通过IEM迁移，将孔径较大的UFM或纳滤膜组装至

表2 EDUF在分离植物多肽中的应用

Table 2 Applications of the EDUF in the separation of plant peptides

来源	UFM参数	操作条件	分离性能	文献
苜蓿	有效膜面积:100 cm^2 MWCO:10 kDa 膜材料:PES	pH=3、9,U=70 V	迁移率:1.59~7.3 g/(m^2·h) 回收率:18.2%	[62]
苜蓿	有效膜面积:1200 cm^2 MWCO:10 kDa 膜材料:PES	pH=3、9,U =70 V	迁移率:5.3~8.7 g/(m^2·h) 回收率:32%	[63]
亚麻籽	有效膜面积:200 cm^2 MWCO:20 kDa 膜材料:中性	pH=3,U =6~10 V	回收率:9.6%~43.3%	[64]
亚麻籽	有效膜面积:100 cm^2 MWCO:20、50 kDa 膜材料:CA	pH=3,E=14 V/cm	迁移率:1.04~4.70 g/(m^2·h)	[65]
亚麻籽	有效膜面积:100 cm^2 MWCO:20 kDa 膜材料:PES	pH=3,E=4 V/cm	迁移率:1.35~1.43 g/(m^2·h)	[66]
油菜籽	有效膜面积:100 cm^2 MWCO:20 kDa 膜材料:中性	pH=7,U=20 V	回收率:28.3%~43.6%	[61]
油菜籽	有效膜面积:84 cm^2 MWCO:3 kDa 膜材料:PES	pH=8,U =1.5、3.0 V	迁移率:0.019~0.060 g/(m^2·h) 去除率:90.3% 保留率:88.8%。	[67]
大豆	有效膜面积:1600 cm^2 MWCO:10 kDa 膜材料:PES	pH=3、6、9,U =8 V	迁移率:0.097~0.24 g/(m^2·h) 回收率:7%~9%	[68]
大豆	有效膜面积:200 cm^2 MWCO:20 kDa 膜材料:PES	pH=3、6、9,E=3.6 V/cm	迁移率:1.3~2.4 g/(m^2·h)	[69]
大豆	有效膜面积:100 cm^2 MWCO:100 kDa 膜材料:CA	pH=6,U =50 V	迁移率:0.3~6.1 g/(m^2·h)	[70]
小麦	有效膜面积:57 cm^2 MWCO:4 kDa 膜材料:PESH	pH=6,U =1~12 V	回收率:25%~30%	[71]
		pH=6,U =12 V	回收率:26%~35%	[72]
藜麦	有效膜面积:100 cm^2 MWCO:200 kDa 膜材料:PES	pH=7,E=20 V/cm	回收率:1.2%~3.0%	[73]

注:PESH—亲水化改性的聚醚砜。

ED装置中,通过调节电场强度和膜孔径,可实现对中药荷电有效组分(如氨基酸、生物碱、有机酸等)的纯化和浓缩[76]。

如前所述,Bazinet等采用EDUF技术从苜蓿[62-63]、亚麻籽[64-66]、油菜籽[61, 67]等天然植物中选择性分离多肽类成分。对于天然多糖类成分而言,例如壳聚糖低聚物,其具有抗肿瘤、免疫调节、抗真菌及抗菌等多种药理活性,可有效抵御病原体感染。工业上常用酸水解和酶水解等方法制备壳聚糖低聚物,其最终产物不仅含有不同分子质量的混合物,还含有矿物质成分,难以实现壳聚糖低聚物的有效分离。Aider等[78-79]研究了采用EDUF工艺分离壳聚糖低聚物的可行性,系统性地考察了UFM的MWCO、进料液流速与电场强度对壳聚糖低聚物电迁移动力学及混合物分级分离的影响。结果表明,壳聚糖低聚物的回收率可达1.1%~14.5%,其具体数值取决于操作条件(MWCO和处理时间)的影响。此外,溶液流速对迁移速率的影响并不显著,但电

场强度对壳聚糖低聚物和目标低聚物的迁移速率均具有显著影响。上述研究表明，EDUF技术在大规模分离低聚糖方面极具应用前景。

对于生物碱、黄酮类和有机酸等小分子药效成分，EDUF工艺同样展现出巨大的优势。以中药苦参为例，本课题组[22]采用EDUF从苦参碱提取液中分离得到高纯度的氧化苦参碱，克服了传统ED过程在中药活性成分生物碱分离纯化中的难点，为中药活性成分生物碱的分离纯化提供了新思路。首先比较了CEM与不同孔径UFM的分离效果，研究发现使用CEM时，膜堆电压迅速升高，实验难以继续进行。此外，基于孔径筛分作用，大孔径UFM（3500 Da和5000 Da）分离可得到更多的氧化苦参碱，但相应也有更多的脯氨酸扩散泄漏，使氧化苦参碱纯度降低。因此，孔径较小的UFM更适合用于氧化苦参碱的分离。随后，系统研究了电流密度和进料液浓度对氧化苦参碱回收率、电流效率和整体能耗等的影响。然而，即使是在优选工艺条件下，氧化苦参碱的回收率也只能达到50.6%，且由于产物室含有无机盐成分，回收得到的氧化苦参碱纯度也较低。因此，本课题组设计了EDUF连续批次实验将氧化苦参碱的回收率提高至97.0%，并通过传统ED脱盐将氧化苦参碱的纯度提高至98.7%（如图4所示）。由此可见，对于中药小分子药效成分的分离纯化，EDUF技术应用前景广阔。

综上，基于中药制药过程的生产工艺和技术特点，以膜分离技术为核心构建中药绿色制造关键技术体系，EDUF技术在此过程中具有巨大的发展潜力。现有的EDUF技术应用于中药复杂溶液体系的分离纯化还处于初步探索阶段。对于EDUF技术在中药制药中的应用，可从两个方面着手：一是研究适用于中药药效物质分离的新技术；二是利用已有的和新开发的分离技术进行有效组合，或者采用多膜集成工艺，以达到提高产品纯度和收率，实现过程工艺优化的目的。

2.3 EDUF在食品中的应用

EDUF基于电驱动原理，有效缓解了传统压力驱动对UFM的膜污染，并通过使用不同孔径的UFM可同时对不同分子质量的荷电成分进行选择性筛分。针对天然产物中的某些活性成分，在ED装置中加入UFM，或用UFM替代一些IEM，可根据有机物的荷电性和分子量差异进行选择性分离。如前所述，EDUF技术在乳制品加工中展现出极大的应用前景[40,42-45]。目前，EDUF技术广泛应用于烟草多酚[38]、绿茶中儿茶素[80-81]、蔓越莓汁花青素[21,82-85]等功能成分的提取和分离过程。EDUF在食品生产过程中的应用如表3所示。

酚类化合物是植物界广泛存在的一种天然产物，具有显著的生理活性。Bazinet等[38]验证了通过ED技术选择性分离烟草提取物中多酚类物质的可行性，然而该技术对于多酚类物质的迁移速率较低，难以实现多酚类成分的高效分离。同年，该团队比较了通过ED和EDUF工艺从绿茶溶液中选择性提取儿茶素和咖啡因的分离性能[80]。研究发现，UF-1000 Da膜对绿茶提取液中的表没食子儿茶素和表没食子儿茶素没食子酸酯的迁移率最高可达50%，将该方法与预浓缩工艺相结合，有望实现绿茶提取物的高效分离。在果汁加工生产中，由于有机酸含量较高和pH较低易产生副作用，限制其生产和消费，亟须开发一种既能脱酸又不改变蔓越莓汁理化性质与感官特性的高选择性工艺[83]。Bazinet等[82-83]评估了使用EDUF工艺从蔓越莓汁中分离和浓缩天然酚类抗氧化物质的可行性，并探究了分离过程的工艺参数及膜污染情况。结果表明，浓缩果

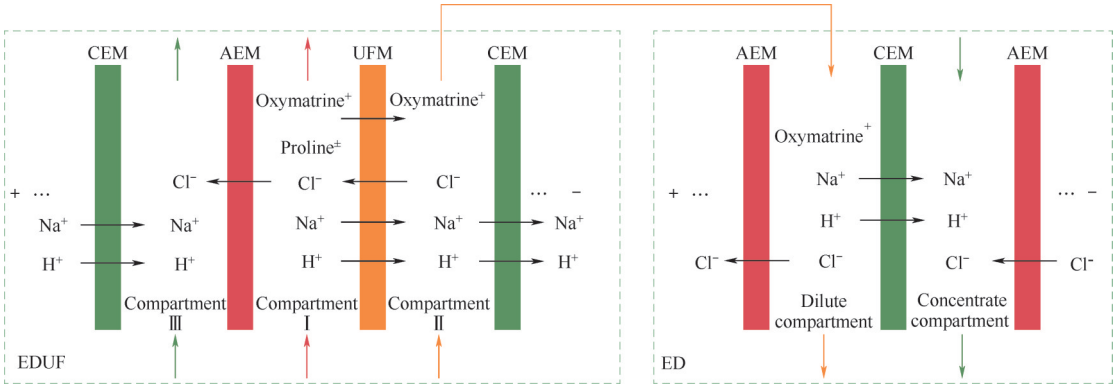


图4 EDUF-ED分离纯化氧化苦参碱示意图[22]

Fig.4 Schematic diagram of separation and purification of oxymatrine using EDUF-ED[22]

表3 EDUF在食品中的应用

Table 3 Applications of the EDUF technology in food processing

来源	UFM参数	操作条件	分离性能	文献
烟草	有效膜面积:100 cm^2 MWCO:0.5 kDa 膜材料:纤维素	pH=5.6~5.8,U=30 V	回收率:8.6%~28.7%	[38]
绿茶	有效膜面积:100 cm^2 MWCO:1 kDa	pH=5.6~5.8,i=10 mA/cm^2	回收率:50%	[80]
绿茶	膜材料:纤维素酯		—	[81]
蔓越莓汁	有效膜面积:10 cm^2 MWCO:500 kDa	pH=2.5,U=30 V	回收率:34.8%~52.9%	[82]
	膜材料:PES	pH=2.5,U=30 V	回收率:19.4%	[83]
蔓越莓汁	有效膜面积:30 cm^2 MWCO:500 kDa 膜材料:PES	pH=2.6,E=15 V/cm	回收率:22%	[84]
蔓越莓汁	有效膜面积:100 cm^2 MWCO:3 kDa 膜材料:PS	pH=2.4,U=10 V	脱酸率:40%	[85]
蔓越莓汁	有效膜面积:10 cm^2 MWCO:250 kDa 膜材料:PVDF	U=30 V	回收率:26.2%~44.2%	[21]

注:PS—聚苯乙烯;PVDF—聚偏氟乙烯。

汁的花青素浓度和抗氧化能力分别提高了19.4%和23.7%。而原花青素浓度和抗氧化能力在整个处理过程中保持不变。Husson等[84]通过叠加3个UFM在ED装置中,以此增加膜面积,研究不同体积比对多酚-UFM相互作用的影响,证实了EDUF能够有效从蔓越莓汁中选择性富集花青素,而不影响其多糖、维生素C、色素的含量。Revellat等[21]研究了处理时间对果汁成分、工艺效率及膜污染的影响。研究发现,处理时间对果汁成分(尤其是花青素和无机盐成分)具有显著影响,通过EDUF工艺能有效提升蔓越莓汁中花青素的含量,回收率达26.2%~44.2%。具体而言,EDUF技术能有效富集蔓越莓汁中的花青素,但需进一步研究以解决在高电流密度条件下花青素的降解问题。

综上,采用EDUF技术对食品生产进行高值化成分富集是一项前景广阔的新兴技术。如前所述,EDUF技术在乳制品加工、果汁生产、脱酸等方面的成功应用,充分展示了其在简化工艺流程、提升产品纯度和降低生产成本等方面的巨大优势,为食品行业提供了一种高效、节能、绿色的分离纯化新方法。

2.4 EDUF在废水处理中的应用

工业有机废液成分复杂,含有高浓度的有机物、氨氮和重金属,传统处理方法往往难以达到绿色清洁、高效节能的处理效果。EDUF技术通过孔径筛分和电场驱动的协同作用,能够同时实现污染物的去除和资源的回收,为工业废水处理和资源循环利用提供了新的解决方案。目前,EDUF可用于废水中有机物、重金属、微量元素等污染物的分离,水资源的回收处理(如去除水中的重金属、有机物、颗粒物),具有高效、节能、绿色无污染等特点,对环境处理和清洁化生产具有重要意义。

Lu等[23]利用EDUF技术从废水中分离青霉素G和SO_4^{2-}。研究发现,在恒定电流下从抗生素废水中分离SO_4^{2-}并同步回收青霉素G,约90%的SO_4^{2-}被去除并浓缩于盐溶液中,约20.3%的青霉素G从进料室迁移至产物室。Tamersit等[86]采用ED/UF技术对制革厂脱毛废水进行脱盐处理,并设计了双抗污染膜结构,对有机污染物高度敏感的AEM用UFM包裹,形成阻隔层防止带负电荷的蛋白质接触膜表面。结果表明,该方法对制革厂脱毛废水的脱盐率可达56%,有效去除硫化物、钙离子和氯离子,而有机物(蛋白质、多肽等)则被截留在稀释室。Meng等[87]采用EDUF工艺将溶解性有机物分级分离为多个分子质量范围,并评估了不同分子质量的溶解性有机物对IEM的污染特性。研究发现,分子质量<1 kDa的溶解性有机物会迁移至AEM内部,使膜电阻增加25.7%,离子交换容量降低3.5%;分子质量在

1~10 kDa的溶解性有机物容易在膜表面(0~100 μm)引发污染;而分子质量>10 kDa的溶解性有机物则未引起明显的不可逆污染。为此,在EDUF中,应重点关注分子质量<10 kDa的溶解性有机物所导致的膜污染问题。

有机物副产品及副产物(包括禽类和鱼类废弃物)因其对环境的有害影响,已成为废水处理的一项重要挑战。EDUF是一种极具潜力的肽类分离替代方法,该工艺不仅能实现肽类物质的分馏分离,还可同步完成组分浓缩与脱盐处理,从而实现大规模生产。然而,悬浮颗粒的存在可能导致膜孔堵塞。因此,选择最合适的膜材料(孔径、聚合物类型、通量等参数)至关重要。Malmali等[88]评估了9种市售UFM的整体性能,用于处理来自禽类清洗和冷却作业的家禽加工废水,废水经过处理后可循环利用。研究发现,由于其生化需氧量、化学需氧量、脂肪油和总悬浮固体含量更高,禽类清洗废水比冷却废水更容易造成膜污染,故在EDUF的实际应用中需要进行有效膜的再生,以及相应的膜清洗工艺。Przybylski等[89-90]采用EDUF技术提高屠宰场副产物水解物中抗菌肽的纯度,考察了不同pH、进料液肽浓度对分离性能的影响。研究发现,进料液pH对肽的分离性能影响显著。在酸性条件下,更多肽段带正电荷,产物室肽组分具有更高的肽段数量(16种)和总肽浓度(38.5 mg/L);而在碱性条件下,更多肽段带负电荷,产物室组分则具有较低的肽段数量(6种)和总肽浓度(8.2 mg/L)。此外,EDUF技术可从水解物中富集α137-141抗菌肽,当进料液浓度为8%时,目标肽段纯度可达18%,浓度提升约4倍,实现24倍富集。Adaile-Pérez等[91]采用EDUF技术分离鸡副产品水解物,基于其电荷和分子量实现肽的选择性分离,并对所得组分进行表征。结果表明,在肽分级过程中,鸡副产品水解物的总肽迁移率为14.97 g/(m^2·h),总肽的相对能耗为31.27 Wh/g。

综上,采用EDUF工艺处理废水中高值组分时,调节操作电压、电流、pH以及流量等操作参数均能影响废水中高值组分的分离效果。通过调整操作参数,可实现有机物与无机盐以及重金属在EDUF中的分离纯化或者协同去除,有效控制重金属以及有机物水污染问题。未来,研究者应着重于开发抗污染、低能耗的UFM材料,优化操作条件,降低运行成本,以推动EDUF技术在废水处理中的应用,实现绿色化清洁生产。

3 EDUF在工业应用中的挑战

基于EDUF技术的分离原理和分离特性,其在当前发展和应用过程中所面临的挑战可总结为水解离[44, 53, 69, 92]和膜污染[93-96],下面将对以上两点进行详细分析和探讨。

在EDUF处理过程中,影响EDUF工艺的主要因素之一是与处理后溶液pH变化有关的水解离。水解离是由于IEM附近边界层中浓度的变化造成的,当IEM一侧的溶液中的离子浓度接近零时,达到极限电流密度,IEM附近边界层的浓度变化而发生水解离,水解离过程中产生的H^+和OH^-通过强电场作用到达IEM边界层,并通过边界层作用使溶液pH发生变化[92]。Galier等[44]的研究表明,生物活性物质的分离基于不同电泳迁移率、不同分子量大小,以及大分子物质相互影响而发生。这个过程可以通过改变ED的电压、流速、进料浓度进行调节,还可以通过pH的变化、UFM特性进行调节。Doyen等[53]研究了电场强度对EDUF过程中水解离的影响。研究发现,当达到极限电流密度时,随着电场强度增加,肽迁移率增加,且观察到肽的选择性没有变化。Roblet等[69]证明了进料液pH会对回收室的组成造成影响,但不影响多肽的迁移率。研究发现,随着pH的变化,阴离子肽室中的迁移率基本保持不变。事实上,由于肽-膜静电吸引或排斥作用,以及高分子肽的堆积,pH的变化可能导致膜选择性发生改变,导致肽迁移速率增加,从而影响产物室的多肽组成。具体而言,水解离对EDUF工艺分离有机物的影响,可通过提高反应物的分离效率,调整进料液的pH、电场强度、电流密度等参数,降低反应能耗,还可能改变污染物在膜表面的生物沉积与结垢现象,从而精准调控EDUF工艺对有机物的分离性能。

在EDUF分离过程中,IEM和UFM都容易受到大分子有机物(蛋白质、多肽、鞣质)的影响,引起膜表面和膜孔内的吸附或沉积,造成膜孔堵塞或变小,使膜的通透性和分离特性产生不可逆的变化[93-94]。因此,膜污染的影响因素不仅与膜本身的性质有关(如膜的亲水性、荷电性、孔径大小、尺寸类型、结构差异、表面粗糙度),也与操作条件(如电场强度、pH、浓度、流速、料液成分等)有关[19, 39]。Langevin等[93]探讨了酸化和碱化预处理对IEM性能及对肽污染的影响。研究发现,IEM膜界面处H^+的

存在导致大豆蛋白水解物在pH 6下带负电的肽与膜发生反应并形成污染，在未施加电流的情况下，静电相互作用是导致膜污染的主要机制。Suwal等[95]研究了EDUF技术分离雪蟹副产品水解物中的膜污染现象。研究发现，实验中UFM未受到表面污垢的影响，但由于游离氨基酸成分进入膜内部的纳米孔中，对其电化学和物理化学特性、电场强度、肽迁移速率造成一定影响。此外，该团队[94]系统梳理了EDUF在蛋白质、多肽及氨基酸导致的IEM与UFM污染表征中的应用。研究发现，在EDUF过程中使用的IEM和UFM受到膜与污染物（蛋白质、肽和氨基酸）之间的静电相互作用影响，导致污染物在膜纳米孔/纳米通道中堆积，膜污染受膜形态和表面特性、溶液特性以及操作条件等参数影响。而在膜分离和清洗过程中，膜材料可能通过多种途径发生降解，蛋白质类成分的表征可能因其他污染源的共存而受阻，从而影响分析结果的准确性。Persico等[96]探究了在乳清蛋白水解物中不同pH条件导致膜污染的肽种类，以及肽-膜静电相互作用对膜污染的影响。研究发现，由于多肽末端带有的负电荷（COO^-）与AEM基团[$N^+(CH_3)_3$]的正电荷发生静电相互作用，在pH为10时污染严重，在pH为6时污染程度降低50%。而在酸性条件下，肽与AEM基团之间呈排斥作用，故在pH为2时AEM污染可忽略不计。此外，膜污染的防治措施还可通过对膜材料进行改性，改变其物理化学性质，避免污染物进入膜内部，从而减少膜孔的堵塞[97-99]。与此同时，还可采用物理、化学或物理化学方法对膜进行清洗，防止颗粒物在膜表面堆积[92]。在EDUF过程中，膜对溶质的截留性能更多依赖于膜的污染状态及污染物的性质，而与初始膜的性质无关。IEM比UFM更容易受到生物活性成分中所含蛋白质、肽、氨基酸等成分的污染。

综上，研究者须不断进行技术革新，探索EDUF技术结合不同纯化方法进行目标产物分离的可行性，通过优化膜材料和操作参数、提高技术的稳定性和可持续性，并将实验室规模试验不断拓展到工业化规模，以推动EDUF技术的变革。

4 总结与展望

EDUF作为一种新兴的跨学科高新技术，已成为制药、食品、化工和环境等多个领域重要的分离手段之一。如上所述，EDUF技术在工业化应用中仍存在一些局限性，限制了其发展。但通过优化膜材料和操作参数，可以提高技术的稳定性和经济性。EDUF技术可通过提高反应物的分离效率，调整进料液pH、电场强度、电流密度等参数，降低反应能耗，从而达到最佳的分离效果。同时，将不同的膜分离技术进行耦合，提高系统的分离精度，并通过对水提液预处理、减少反应物泄漏等，提高膜的选择性和膜通量。此外，EDUF技术在工业应用中须考虑经济性和可持续发展的问题，如通过降低技术成本，提高能源利用率。

未来，EDUF技术的发展方向可集中在以下几个方面。(1)UFM材料改性：开发高性能、功能化和抗污染的UFM材料，通过材料改性提升其分离精度、抗污染能力和长期稳定性；面向特定分离体系，设计具有特定孔径与电荷性质的膜材料，实现从“被动筛分”到“精准分离”的跨越。(2)过程优化与降本增效：借助大数据和人工智能算法对操作参数（如pH、MWCO、电场强度、流速等）进行智能化调控，突破“效率-能耗”的“trade-off”效应，提升分离过程的经济性与可持续性。(3)膜污染防治与工艺集成：致力于构建全过程污染防治策略，一方面通过强化前处理过程，在EDUF膜堆中设置多级膜实现分级分离；另一方面积极开发与其他膜过程或技术的集成工艺，实现污染物深度去除与资源回收的最大化。(4)应用领域拓展与产业化：致力于将EDUF技术应用于高值组分资源回收、难降解废水处理等新兴领域，并加强产学研合作，推动实验室成果向规模化、连续化的工业应用转化。综上所述，EDUF技术作为一种先进的膜分离手段，随着新材料与工业过程的持续革新，有望开辟面向制药、食品、化工和环境等领域的高效、节能新工艺，成为推动工业绿色、低碳转型的重要力量。

参考文献

[1] 郑龙, 田佳鑫, 张泽鹏, 等. 多肽药物制备工艺研究进展[J]. 化工学报, 2021, **72**(7): 3538-3550.
Zheng L, Tian J X, Zhang Z P, et al. Progress on pharmaceutical engineering of peptide-based drugs[J]. CIESC Journal, 2021, **72**(7): 3538-3550.

[2] Oshima K, Nakamura K, Guo H X, et al. Mini-review on application of analytical centrifugation, ultracentrifugation and centrifugal devices to phase equilibria and separation processes [J]. Fluid Phase Equilibria, 2022, **558**: 113457.

[3] Kurniawan T A, Yap P S, Chen Z H. Techniques for pollutant removal, nutrient recovery, and energy production from landfill

leachates: a review[J]. Environmental Chemistry Letters, 2025, **23**(2): 517-577.

[4] 王梓豪, 闫军营, 王报英, 等. 离子膜分离技术在过程工业减排和流程再造中的应用进展[J]. 中国科学: 化学, 2025, **55**(9): 2782-2796.
Wang Z H, Yan J Y, Wang B Y, et al. Applications of ion-exchange membrane separation techniques in process industries decarbonization and manufacturing reshaping[J]. Scientia Sinica (Chimica), 2025, **55**(9): 2782-2796.

[5] 颜海洋, 汪耀明, 蒋晨啸, 等. 离子膜电渗析在高盐废水"零排放"中的应用、机遇与挑战[J]. 化工进展, 2019, **38**(1): 672-681.
Yan H Y, Wang Y M, Jiang C X, et al. Ion exchange membrane electrodialysis for high salinity wastewater "zero liquid discharge": applications, opportunities and challenges[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2019, **38**(1): 672-681.

[6] 顾天宇, 陈献富, 王思琪, 等. 膜技术在杜仲有效成分分离纯化中的应用研究进展[J]. 化工学报, 2024, **75**(11): 4005-4019.
Gu T Y, Chen X F, Wang S Q, et al. Application of membranes for separation and purification of *Eucommia ulmoides* active ingredients[J]. CIESC Journal, 2024, **75**(11): 4005-4019.

[7] Chen Y M L, Wang L C, del Cerro M, et al. Dialysis opens a new pathway for high-salinity organic wastewater treatment[J]. Nature Water, 2025, **3**(1): 49-58.

[8] Zhao C W, Zhang Y J, Jia Y W, et al. Polyamide membranes with nanoscale ordered structures for fast permeation and highly selective ion-ion separation[J]. Nature Communications, 2023, **14**: 1112.

[9] Wu Y, Lu C H, Hu C Z, et al. Combined effect of electrostatic interaction and steric sieving during ion transport in nanochannels [J]. Environmental Science & Technology, 2025, **59**(22): 11377-11388.

[10] Strathmann H. Electrodialysis, a mature technology with a multitude of new applications[J]. Desalination, 2010, **264**(3): 268-288.

[11] Uliana A A, Bui N T, Kamcev J, et al. Ion-capture electrodialysis using multifunctional adsorptive membranes[J]. Science, 2021, **372**(6539): 296-299.

[12] Boukil A, Suwal S, Chamberland J, et al. Ultrafiltration performance and recovery of bioactive peptides after fractionation of tryptic hydrolysate generated from pressure-treated β-lactoglobulin[J]. Journal of Membrane Science, 2018, **556**: 42-53.

[13] Zhang Y H, Chen T, Chen X F, et al. The application of pressure-driven ceramic-based membrane for the treatment of saline wastewater and desalination—a review[J]. Desalination, 2025, **597**: 118327.

[14] Mohammad A W, Ng C Y, Lim Y P, et al. Ultrafiltration in food processing industry: review on application, membrane fouling, and fouling control[J]. Food and Bioprocess Technology, 2012, **5**(4): 1143-1156.

[15] Rulence A, Perreault V, Thibodeau J, et al. One step purification of active nisin by electrodialysis from a commercial product[J]. Chemical Engineering Science, 2023, **281**: 119134.

[16] 汪耀明, 李为, 徐铜文. 电渗析技术清洁分离纯化肌氨酸[J]. 化工学报, 2015, **66**(8): 3137-3143.
Wang Y M, Li W, Xu T W. Electrodialysis for cleaner separation and purification of sarcosine[J]. CIESC Journal, 2015, **66**(8): 3137-3143.

[17] Liu S S, Dong Z G, Zhang L L, et al. Efficient separation of alkaloid from extract of traditional Chinese medicine *via* electrodialysis at over-limiting current density[J]. Journal of Membrane Science, 2025, **734**: 124423.

[18] Richa M, García-Cervilla R, Lobato J, et al. Carboxylic acids selective recovery from wastewater using electrodialysis[J]. Journal of Environmental Chemical Engineering, 2025, **13**(5): 117752.

[19] 苏慧超, 张田明, 吴云奇, 等. 电渗析-超滤耦合技术研究进展[J]. 化工进展, 2020, **39**(S2): 1-7.
Su H C, Zhang T M, Wu Y Q, et al. Development of electrodialysis with ultrafiltration membrane technology[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2020, **39**(S2): 1-7.

[20] Alavi F, Ciftci O N. Purification and fractionation of bioactive peptides through membrane filtration: a critical and application review[J]. Trends in Food Science & Technology, 2023, **131**: 118-128.

[21] Revellat E, Bazinet L. Production of anthocyanin-enriched juices by electrodialysis with filtration membrane process: the influence of duration on juice composition, process efficiency, and membrane fouling[J]. Foods, 2024, **13**(21): 3478.

[22] Dong Z G, Zhou R, Wei Z Q, et al. Electrodialysis with ultrafiltration membrane for efficient isolation of oxymatrine from simulated eluent of traditional Chinese medicine[J]. Desalination, 2024, **592**: 118058.

[23] Lu H X, Zou W X, Chai P, et al. Feasibility of antibiotic and sulfate ions separation from wastewater using electrodialysis with ultrafiltration membrane[J]. Journal of Cleaner Production, 2016, **112**: 3097-3105.

[24] 王湛, 王志, 高学理, 等. 膜分离技术基础[M]. 3版. 北京: 化学工业出版社, 2019.
Wang Z, Wang Z, Gao X L. Fundamentals of Membrane Separation Technology[M]. 3rd ed. Beijing: Chemical Industry Press, 2019.

[25] Maigrot E, Sabates J. Apparat zur läuterung von zuckersäften mittels Elektrizität: DE50443[P]. 1890-10-18.

[26] Schollmeyer G. Reinigung von zuckersäften durch elektrodialyse und mit ozon: DE136670[P]. 1902-07-15.

[27] Michaelis L, Fujita A. The electric phenomenon and ion permeability of membranes(Ⅱ): Permeability of apple peel[J]. Biochemistry Z, 1925, **158**: 28-37.

[28] Wassengger H, Jaeger K. Effecting cation-exchange in removing calcium from hard waters: US2204539[P]. 1940-06-11.

[29] Meyer K H, Straus W. La perméabilité des membranes(Ⅵ): Sur le passage du courant électrique à travers des membranes sélectives [J]. Helvetica Chimica Acta, 1940, **23**(1): 795-800.

[30] Juda W, McRae W A. Coherent ion-exchange gels and membranes [J]. Journal of the American Chemical Society, 1950, **72**(2): 1044.

[31] Loeb S, Sourirajan S. Sea water demineralization by means of an osmotic membrane[C]// Saline Water Conversion(Ⅱ). Washington, DC: American Chemical Society, 1963: 117-132.

[32] 徐玮一, 王征. 超滤膜分离技术在中药生产中的应用[J]. 基层中药杂志, 2002, **16**(2): 46.
Xu W Y, Wang Z. Application of ultrafiltration membrane separation technology in traditional Chinese medicine production

[J]. Primary Journal of Chinese Materia Medica, 2002, **16**(2): 46.

[33] 王杏娣. 超滤技术的发展及其应用[J]. 今日科技, 1990(9): 5-6.
Wang X D. Development and application of ultrafiltration technology[J]. Today Science & Technology, 1990(9): 5-6.

[34] Wang D G J. Ultrafiltration and electrodialysis method and apparatus: US3905886[P]. 1975-09-16.

[35] Ahlgren R M. Ultrafiltration and electrodialysis method and apparatus: US4123342[P]. 1978-10-31.

[36] Galier S, Roux-de Balmann H. Study of the mass transfer phenomena involved in an electrophoretic membrane contactor[J]. Journal of Membrane Science, 2001, **194**(1): 117-133.

[37] Galier S, Roux-de Balmann H. Study of biomolecules separation in an electrophoretic membrane contactor[J]. Journal of Membrane Science, 2004, **241**(1): 79-87.

[38] Bazinet L, DeGrandpré Y, Porter A. Electromigration of tobacco polyphenols[J]. Separation and Purification Technology, 2005, **41**(1): 101-107.

[39] Dlask O, Václavíková N. Electrodialysis with ultrafiltration membranes for peptide separation[J]. Chemical Papers, 2018, **72**(2): 261-271.

[40] Poulin J F, Amiot J, Bazinet L. Simultaneous separation of acid and basic bioactive peptides by electrodialysis with ultrafiltration membrane[J]. Journal of Biotechnology, 2006, **123**(3): 314-328.

[41] 倪雅迪, 徐羚欣, 朱钰雅, 等. 中药蛋白资源提取分离及产业化路径展望[J]. 中草药, 2024, **55**(8): 2828-2842.
Ni Y D, Xu L X, Zhu Y Y, et al. Prospects for extraction, separation, and industrialization of traditional Chinese medicine protein resources[J]. Chinese Traditional and Herbal Drugs, 2024, **55**(8): 2828-2842.

[42] Poulin J F, Amiot J, Bazinet L. Improved peptide fractionation by electrodialysis with ultrafiltration membrane: influence of ultrafiltration membrane stacking and electrical field strength[J]. Journal of Membrane Science, 2007, **299**(1/2): 83-90.

[43] Poulin J F, Amiot J, Bazinet L. Impact of feed solution flow rate on peptide fractionation by electrodialysis with ultrafiltration membrane[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2008, **56**(6): 2007-2011.

[44] Galier S, Balmann H R. The electrophoretic membrane contactor: a mass-transfer-based methodology applied to the separation of whey proteins[J]. Separation and Purification Technology, 2011, **77**(2): 237-244.

[45] Wang Q Y, Chen G Q, Kentish S E. Isolation of lactoferrin and immunoglobulins from dairy whey by an electrodialysis with filtration membrane process[J]. Separation and Purification Technology, 2020, **233**: 115987.

[46] Vanhoute M, Firdaous L, Bazinet L, et al. Effect of haem on the fractionation of bovine haemoglobin peptic hydrolysate by electrodialysis with ultrafiltration membranes[J]. Journal of Membrane Science, 2010, **365**(1/2): 16-24.

[47] Chen G Q, Song W J, Qi B K, et al. Separation of protein mixtures by an integrated electro-ultrafiltration - electrodialysis process[J]. Separation and Purification Technology, 2015, **147**: 32-43.

[48] Sun L Q, Lu H X, Wang J Y, et al. Electroseparation of lysozyme from egg white by electrodialysis with ultrafiltration membrane[J]. Separation and Purification Technology, 2023, **317**: 123710.

[49] 孙鲁芹, 卢会霞, 王建友. 电渗析/超滤内在耦合过程分离蛋清中溶菌酶[J]. 化工进展, 2023, **42**(5): 2262-2271.
Sun L Q, Lu H X, Wang J Y. Separation of lysozyme from egg white by electrodialysis with ultrafiltration membrane (EDUF) process[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2023, **42**(5): 2262-2271.

[50] Doyen A, Beaulieu L, Saucier L, et al. Demonstration of *in vitro* anticancer properties of peptide fractions from a snow crab by-products hydrolysate after separation by electrodialysis with ultrafiltration membranes[J]. Separation and Purification Technology, 2011, **78**(3): 321-329.

[51] Doyen A, Beaulieu L, Saucier L, et al. Impact of ultrafiltration membrane material on peptide separation from a snow crab byproduct hydrolysate by electrodialysis with ultrafiltration membranes[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2011, **59**(5): 1784-1792.

[52] Doyen A, Saucier L, Beaulieu L, et al. Electroseparation of an antibacterial peptide fraction from snow crab by-products hydrolysate by electrodialysis with ultrafiltration membranes[J]. Food Chemistry, 2012, **132**(3): 1177-1184.

[53] Doyen A, Roblet C, Beaulieu L, et al. Impact of water splitting phenomenon during electrodialysis with ultrafiltration membranes on peptide selectivity and migration[J]. Journal of Membrane Science, 2013, **428**: 349-356.

[54] Roblet C, Akhtar M J, Mikhaylin S, et al. Enhancement of glucose uptake in muscular cell by peptide fractions separated by electrodialysis with filtration membrane from salmon frame protein hydrolysate[J]. Journal of Functional Foods, 2016, **22**: 337-346.

[55] Henaux L, Thibodeau J, Pilon G, et al. How charge and triple size-selective membrane separation of peptides from salmon protein hydrolysate orientate their biological response on glucose uptake [J]. International Journal of Molecular Sciences, 2019, **20**(8): 1939.

[56] Henaux L, Pereira K D, Thibodeau J, et al. Glucoregulatory and anti-inflammatory activities of peptide fractions separated by electrodialysis with ultrafiltration membranes from salmon protein hydrolysate and identification of four novel glucoregulatory peptides[J]. Membranes, 2021, **11**(7): 528.

[57] Thibodeau J, Benoit N, Perreault V, et al. Scale-up and long-term study of electrodialysis with ultrafiltration membrane for the separation of a herring milt hydrolysate[J]. Membranes, 2021, **11**(8): 558.

[58] Madureira A R, Pereira C I, Gomes A M P, et al. Bovine whey proteins—overview on their main biological properties[J]. Food Research International, 2007, **40**(10): 1197-1211.

[59] Halim N R A, Yusof H M, Sarbon N M. Functional and bioactive properties of fish protein hydolysates and peptides: a comprehensive review[J]. Trends in Food Science & Technology, 2016, **51**: 24-33.

[60] Wang W Q, Liu Z C, Liu Y J, et al. Plant polypeptides: a review on extraction, isolation, bioactivities and prospects[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2022, **207**: 169-178.

[61] He R, Girgih A T, Rozoy E, et al. Selective separation and concentration of antihypertensive peptides from rapeseed protein hydrolysate by electrodialysis with ultrafiltration membranes[J]. Food Chemistry, 2016, **197**: 1008-1014.

[62] Firdaous L, Dhulster P, Amiot J, et al. Concentration and selective separation of bioactive peptides from an alfalfa white protein hydrolysate by electrodialysis with ultrafiltration membranes[J].

Journal of Membrane Science, 2009, **329**(1/2): 60-67.

[63] Firdaous L, Dhulster P, Amiot J, et al. Investigation of the large-scale bioseparation of an antihypertensive peptide from alfalfa white protein hydrolysate by an electromembrane process[J]. Journal of Membrane Science, 2010, **355**(1/2): 175-181.

[64] Udenigwe C C, Adebiyi A P, Doyen A, et al. Low molecular weight flaxseed protein-derived arginine-containing peptides reduced blood pressure of spontaneously hypertensive rats faster than amino acid form of arginine and native flaxseed protein[J]. Food Chemistry, 2012, **132**(1): 468-475.

[65] Doyen A, Udenigwe C C, Mitchell P L, et al. Anti-diabetic and antihypertensive activities of two flaxseed protein hydrolysate fractions revealed following their simultaneous separation by electrodialysis with ultrafiltration membranes[J]. Food Chemistry, 2014, **145**: 66-76.

[66] Cecile Urbain Marie G, Perreault V, Henaux L, et al. Impact of a high hydrostatic pressure pretreatment on the separation of bioactive peptides from flaxseed protein hydrolysates by electrodialysis with ultrafiltration membranes[J]. Separation and Purification Technology, 2019, **211**: 242-251.

[67] Ayan K, Boom R M, Nikiforidis C V. Electrophoretic removal of sinapic acid from rapeseed protein extract[J]. Separation and Purification Technology, 2025, **357**: 130215.

[68] Langevin M E, Roblet C, Moresoli C, et al. Comparative application of pressure- and electrically-driven membrane processes for isolation of bioactive peptides from soy protein hydrolysate[J]. Journal of Membrane Science, 2012, **403/404**: 15-24.

[69] Roblet C, Doyen A, Amiot J, et al. Impact of pH on ultrafiltration membrane selectivity during electrodialysis with ultrafiltration membrane (EDUF) purification of soy peptides from a complex matrix[J]. Journal of Membrane Science, 2013, **435**: 207-217.

[70] Roblet C, Doyen A, Amiot J, et al. Enhancement of glucose uptake in muscular cell by soybean charged peptides isolated by electrodialysis with ultrafiltration membranes (EDUF): activation of the AMPK pathway[J]. Food Chemistry, 2014, **147**: 124-130.

[71] Giesler L, Linke D A, Rabe S, et al. Hydrolysis of wheat gluten by combining peptidases of flammulina velutipes and electrodialysis [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2013, **61**(36): 8641-8649.

[72] Giesler L, Linke D, Berger R G. Factors limiting the enzymatic hydrolysis of wheat gluten[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2014, **62**(20): 4762-4768.

[73] González-Muñoz A, Valle M, Aluko R E, et al. Production of antihypertensive and antidiabetic peptide fractions from quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) by electrodialysis with ultrafiltration membranes[J]. Food Science and Human Wellness, 2022, **11**(6): 1650-1659.

[74] Graf B L, Rojas-Silva P, Rojo L E, et al. Innovations in health value and functional food development of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.)[J]. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 2015, **14**(4): 431-445.

[75] 宋宏臣, 王建明, 郭立玮. 基于中药"非药效共性高分子物质"分子结构解析的膜材料设计与膜过程优化机制及方法探索[J]. 中国中药杂志, 2019, **44**(18): 4060-4066.
Song H C, Wang J M, Guo L W. Study on mechanism and method of membrane preparation and membrane process optimization based on molecular structure analysis of noneffective common macromolecules[J]. China Journal of Chinese Materia Medica, 2019, **44**(18): 4060-4066.

[76] 董治国, 周容, 何金凤, 等. 膜分离技术在中药绿色制造中的应用与展望[J]. 中草药, 2024, **55**(12): 4225-4234.
Dong Z G, Zhou R, He J F, et al. Application and prospect of membrane separation technology in green manufacturing of traditional Chinese medicine[J]. Chinese Traditional and Herbal Drugs, 2024, **55**(12): 4225-4234.

[77] 徐丽, 张浅, 李益群, 等. 基于膜材料性质的中药化学成分透膜规律研究进展[J]. 中草药, 2019, **50**(8): 1785-1794.
Xu L, Zhang Q, Li Y Q, et al. Research progress on membrane permeation regularity of chemical composition in Chinese materia medica based on membrane performance[J]. Chinese Traditional and Herbal Drugs, 2019, **50**(8): 1785-1794.

[78] Aider M, Brunet S, Bazinet L. Electroseparation of chitosan oligomers by electrodialysis with ultrafiltration membrane (EDUF) and impact on electrodialytic parameters[J]. Journal of Membrane Science, 2008, **309**(1/2): 222-232.

[79] Aider M, Brunet S, Bazinet L. Effect of solution flow velocity and electric field strength on chitosan oligomer electromigration kinetics and their separation in an electrodialysis with ultrafiltration membrane (EDUF) system[J]. Separation and Purification Technology, 2009, **69**(1): 63-70.

[80] Labbé D, Araya-Farias M, Tremblay A, et al. Electromigration feasibility of green tea catechins[J]. Journal of Membrane Science, 2005, **254**(1/2): 101-109.

[81] Labbé D, Bazinet L. Effect of membrane type on cation migration during green tea electromigration and equivalent mass transported calculation[J]. Journal of Membrane Science, 2006, **275**(1/2): 220-228.

[82] Bazinet L, Cossec C, Gaudreau H, et al. Production of a phenolic antioxidant enriched cranberry juice by electrodialysis with filtration membrane[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2009, **57**(21): 10245-10251.

[83] Bazinet L, Brianceau S, Dubé P, et al. Evolution of cranberry juice physico-chemical parameters during phenolic antioxidant enrichment by electrodialysis with filtration membrane[J]. Separation and Purification Technology, 2012, **87**: 31-39.

[84] Husson E, Araya-Farias M, Desjardins Y, et al. Selective anthocyanins enrichment of cranberry juice by electrodialysis with ultrafiltration membranes stacked[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2013, **17**: 153-162.

[85] Serre E, Rozoy E, Pedneault K, et al. Deacidification of cranberry juice by electrodialysis: impact of membrane types and configurations on acid migration and juice physicochemical characteristics[J]. Separation and Purification Technology, 2016, **163**: 228-237.

[86] Tamersit S, Bouhidel K E, Zidani Z. Investigation of electrodialysis anti-fouling configuration for desalting and treating tannery unhairing wastewater: feasibility of by-products recovery and water recycling[J]. Journal of Environmental Management, 2018, **207**: 334-340.

[87] Meng J Z, Shi L, Wang S, et al. Membrane fouling during nutrient recovery from digestate using electrodialysis: impacts of the molecular size of dissolved organic matter[J]. Journal of Membrane

Science, 2023, **685**: 121974.

[88] Malmali M, Askegaard J, Sardari K, et al. Evaluation of ultrafiltration membranes for treating poultry processing wastewater[J]. Journal of Water Process Engineering, 2018, **22**: 218-226.

[89] Przybylski R, Bazinet L, Firdaous L, et al. Electroseparation of slaughterhouse by-product: antimicrobial peptide enrichment by pH modification[J]. Membranes, 2020, **10**(5): 90.

[90] Przybylski R, Bazinet L, Firdaous L, et al. Harnessing slaughterhouse by-products: from wastes to high-added value natural food preservative[J]. Food Chemistry, 2020, **304**: 125448.

[91] Adaile-Pérez V M, Thibodeau J, Ortiz-Basurto R I, et al. Enhanced antihypertensive chicken by-product hydrolysate fraction after its separation by electrodialysis with ultrafiltration membrane (EDUF)[J]. Food Research International, 2025, **202**: 115595.

[92] Nikonenko V V, Vasil′eva V I, Akberova E M, et al. Competition between diffusion and electroconvection at an ion-selective surface in intensive current regimes[J]. Advances in Colloid and Interface Science, 2016, **235**: 233-246.

[93] Langevin M E, Bazinet L. Ion-exchange membrane fouling by peptides: a phenomenon governed by electrostatic interactions[J]. Journal of Membrane Science, 2011, **369**(1/2): 359-366.

[94] Suwal S, Doyen A, Bazinet L. Characterization of protein, peptide and amino acid fouling on ion-exchange and filtration membranes: review of current and recently developed methods[J]. Journal of Membrane Science, 2015, **496**: 267-283.

[95] Suwal S, Roblet C, Amiot J, et al. Presence of free amino acids in protein hydrolysate during electroseparation of peptides: impact on system efficiency and membrane physicochemical properties [J]. Separation and Purification Technology, 2015, **147**: 227-236.

[96] Persico M, Mikhaylin S, Doyen A, et al. How peptide physicochemical and structural characteristics affect anion-exchange membranes fouling by a tryptic whey protein hydrolysate [J]. Journal of Membrane Science, 2016, **520**: 914-923.

[97] Dou Y C, Dong X C, Ma Y C, et al. Hollow fiber ultrafiltration membranes of poly(biphenyl-trifluoroacetone) [J]. Journal of Membrane Science, 2022, **659**: 120779.

[98] Tan L, Gong L, Wang S Y, et al. Superhydrophilic sub-1-nm porous membrane with electroneutral surface for nonselective transport of small organic molecules[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2020, **12**(34): 38778-38787.

[99] Yao Y Y, Mu J J, Li Y, et al. Rechargeable multifunctional anti-bacterial AEMs for electrodialysis: improving anti-biological performance *via* synergistic antibacterial mechanism[J]. Advanced Science, 2023, **10**(30): 2303588.