



中文翻译版
原书第4版

透析理论与实践

Principles and Practice of Dialysis

William L. Henrich 主编

钱家麒 主译



科学出版社

中文翻译版

透析理论与实践

Principles and Practice of Dialysis

原书第4版

William L. Henrich 主编

钱家麒 主译

科学出版社

北京

图字:01-2011-3297 号

内 容 简 介

本书由美国著名肾脏病专家 William L. Henrich 主编,全书共 40 章,主要从透析技术的原理、组成及一些新的技术和发展,如血液透析膜和最佳透析方法的选择,以及透析临床实践中所遇到的问题及应采取的相应对策,如感染和治疗特定的肾脏病并发症等方面进行介绍,并在前三版的基础上对各章节进行重新设计,新章节涵盖 ICU 的透析、瓣膜性心脏病和先天性肾移植,以反映现代透析实践的不断变化与发展,书中加入典型插图、表格,以便于读者理解。

本书可供各级医院急诊科、重症监护及其他各科的临床医师参考阅读,亦可作为医学院校教师教学与本科生、研究生学习的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

透析理论与实践:原书第 4 版 / (美)威廉·L. 亨里奇 (William L. Henrich) 主编;钱家麒主译. —北京:科学出版社,2018. 1

书名原文:Principles and Practice of Dialysis

ISBN 978-7-03-053111-7

I. 透… II. ①威… ②钱… III. 血液透析 IV. R459. 5

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 123006 号

责任编辑:马晓伟 杨小玲 / 责任校对:张小霞 李 影

责任印制:肖 兴 / 封面设计:陈 敬

William L. Henrich. Principles and Practice of Dialysis, 4th ed

ISBN: 978-0-7817-8163-3

Copyright © 2009 by Lippincott Williams & Wilkins, a Wolters Kluwer business. All rights reserved.
This is a Chinese translation published by arrangement with Lippincott Williams & Wilkins/
Wolters Kluwer Health, Inc., USA.

本书限中华人民共和国境内(不包括香港、澳门特别行政区及台湾)销售。

本书封面贴有 Wolters Kluwer Health 激光防伪标签,无标签者不得销售。

本书中提到一些药物的适应证、不良反应和剂量,它们可能需要根据实际情况进行调整。读者须仔细阅读药品包装盒内的使用说明书,并遵照医嘱使用,本书的作者、译者、编辑、出版者和销售商对相应的后果不承担任何法律责任。

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京通州皇家印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2018 年 1 月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2018 年 1 月第一次印刷 印张:54 1/4

字数:1 297 000

定价:248.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

《透析理论与实践》(原书第4版)

译者名单

主	译	钱家麒		
译	者	(按姓氏汉语拼音排序)		
		方 炜	顾乐怡	姜 娜
		林爱武	倪兆慧	庞慧华
		王 玲	严玉澄	俞赞喆
		张敏芳	张伟明	朱铭力
学术秘书		张伟明		

译者前言

慢性肾脏病是全球关注的公共健康问题,我国慢性肾脏病发病率已超过10%,终末期肾脏病(ESRD)透析患者的发病率和患病率也在逐年增加。透析治疗是ESRD患者的主要肾脏替代治疗方法。近年来,我国透析治疗蓬勃发展,血液透析和腹膜透析已从省级医院普及到县市级医院,各地透析中心数量和规模正逐步增加和扩大,各种透析新技术亦在临床上得到应用,但各地临床透析技术发展尚不平衡,透析质量及透析从业人员水平亦存在差距。

由美国著名肾脏病专家 William L. Henrich 主编的 *Principles and Practice of Dialysis* (第4版)是一部内容系统、丰富,紧密联系临床实际,并反映近年透析理论与实践新进展的基于循证证据的经典透析专著,具有较强的科学性、实用性,是指导透析从业人员临床工作和临床研究的具有较高学术价值的专著,故我们特翻译此书。

参与本书翻译的译者均为上海交通大学医学院附属仁济医院肾脏科临床一线的医生,他们承担着繁重的临床医疗工作,在百忙之中以认真、严谨的态度完成了本书的翻译工作,在此谨向他们表示深深的感谢!

尽管我们努力提高本书的翻译质量,但译著仍不可避免地会存在一些不妥之处,尚祈读者批评指正。

上海交通大学医学院附属仁济医院肾脏科



2017年5月1日

前 言

《透析理论与实践》第4版同前几版一样,寻求达到学术性、清晰性和实用性之间的平衡。本书由该领域公认的专家编写,为大家提供了透析领域最科学的、建立在临床证据基础上来指导临床的平台。我们感谢许多新作者对本书第4版所做出的贡献,并且对各个主题重新进行编撰,以反映当代透析实践的不断变化。

令人遗憾的是,目前资料表明,美国慢性肾脏疾病(CKD)和终末期肾脏病(ESRD)的负担越来越重,且仍然亟需更多更好的透析治疗方法。本书将继续为繁忙的从业人员和参加各级培训的学习人员提供有用的参考和指导,这是编写《透析理论与实践》一书的所有作者和工作人员的共同愿望。通过完成本书的编写,我们确信随着透析治疗方法的改善,所有肾脏疾病患者的生活质量也会得到改善。

目 录

第一章 血液透析膜的选择	(1)
一、透析膜的分类	(1)
二、膜的特性和溶质清除机制	(2)
三、描述透析器性能的临床术语	(4)
四、生物相容性	(7)
五、临床预后	(10)
第二章 长期透析治疗中血液透析膜的复用	(16)
一、历史介绍	(16)
二、复用类型	(18)
三、复用次数	(20)
四、血液和纤维素相互作用	(20)
五、安全性	(22)
六、透析器复用的潜在长期危险	(23)
七、感染的危险	(23)
八、死亡率	(25)
九、再处理技术	(27)
十、透析器识别	(27)
十一、冲洗	(27)
十二、清洁	(28)
十三、透析器性能测试	(28)
十四、血室容积的测试	(28)
十五、消毒和灭菌	(28)
十六、检查	(29)
十七、总结	(29)
第三章 血液透析和腹膜透析透析液组成	(33)
一、血液透析中透析液组成	(33)
二、腹膜透析液组成	(47)
第四章 血液透析的血管通路	(54)
一、紧急血管通路	(54)
二、永久性血管通路	(58)
三、总结	(76)
第五章 血液透析中的抗凝策略	(82)
一、透析患者的凝血	(82)

二、普通肝素	(82)
三、低分子质量肝素	(84)
四、其他抗凝方法	(85)
五、影响充分抗凝的因素	(88)
六、总结	(89)
第六章 血液透析的动力学模型	(92)
一、历史观点	(92)
二、尿素——清除率和蛋白质分解代谢的标志物	(92)
三、决定透析需要的因素	(95)
四、透析量的目标	(97)
五、单室动力学模型	(99)
六、多腔室动力学模型	(104)
七、测量透析液的方法	(108)
八、透析安排:频率越高越有效	(110)
九、透析量化的简单方法	(112)
十、实践指南和标准	(114)
十一、尿素模型的缺陷	(115)
十二、总结	(116)
第七章 终末期肾脏病患者最佳透析方式的选择	(121)
一、治疗选择概述	(121)
二、透析方式分布	(121)
三、透析方式选择	(121)
四、血液透析与腹膜透析哪个更好	(123)
五、腹膜透析	(125)
六、血液透析	(127)
七、推荐	(130)
第八章 透析充分性及开始透析时间的选择	(132)
一、历史展望	(133)
二、营养状态及透析开始时间的选择	(138)
三、透析的量化	(142)
四、血透剂量与患者预后	(146)
五、充分透析的障碍	(150)
六、总结	(154)
第九章 高通量与高效透析	(158)
一、HE 与 HF 透析的定义	(158)
二、HE 及 HF 透析治疗相关技术要求	(160)
三、HE 及 HF 治疗的临床应用	(164)
四、短时血液透析治疗	(165)
五、HE 与 HF 透析患者的长期生存率	(168)

六、结论	(169)
第十章 长时和每日透析	(171)
一、历史回顾	(171)
二、原理/血流动力学	(174)
三、结局	(177)
四、总结	(183)
第十一章 透析患者的药物处方	(188)
第十二章 持续性透析治疗技术	(227)
一、术语	(227)
二、系统构成	(227)
三、操作特性	(236)
四、增强溶质清除	(237)
五、应用	(241)
六、预测的治疗时间	(244)
七、持续治疗的结果	(245)
八、展望	(249)
九、总结	(249)
第十三章 急性肾衰竭和重症监护病房的最佳透析方式选择	(256)
一、体外血液净化在 ICU 患者中的应用	(256)
二、体外血液净化:现有技术、混合回路及新的治疗方式	(259)
三、特殊情况	(262)
四、ICU 中肾脏科医生的作用	(275)
五、总结	(276)
六、致谢	(276)
第十四章 腹膜透析充分性	(283)
一、我们应该将什么作为透析充分性的标准	(283)
二、推荐的可接受的腹透总溶质清除	(287)
三、残肾功能的重要性	(288)
四、营养状况对患者预后的影响	(289)
五、营养状态的测量	(290)
六、总溶质清除的主要决定因素	(292)
七、特别注意	(297)
八、容量和血压控制问题	(300)
九、怎样监测透析剂量	(304)
十、不顺应	(305)
十一、处方透析	(305)
十二、总结	(307)
第十五章 腹膜衰竭的原因、诊断及治疗	(314)
一、腹膜透析溶质及液体的转运	(315)

二、腹膜功能评估	(318)
三、超滤衰竭的诊断、鉴别诊断及治疗	(323)
四、液体过多,无超滤衰竭	(325)
五、液体过多,有超滤衰竭	(325)
六、总结	(336)
第十六章 透析患者的高血压	(341)
一、引言	(341)
二、终末期肾脏病患者高血压的发病机制	(346)
三、透析患者抵抗性高血压	(378)
第十七章 透析患者左心室功能不全及心脏瓣膜病	(387)
一、左心室肥厚与心力衰竭	(388)
二、心律失常	(397)
三、透析相关性低血压	(398)
四、总结	(398)
第十八章 终末期肾脏病患者的冠状动脉疾病	(402)
一、ESRD 患者动脉粥样硬化的发病机制	(403)
二、ESRD 患者 CAD 的临床表现	(412)
三、ESRD 患者 CAD 的诊断	(412)
四、ESRD 患者 CAD 的治疗	(416)
第十九章 终末期肾脏病血流动力学稳定性和自主神经功能不全	(428)
一、概述	(428)
二、血管再充盈	(429)
三、心脏再充盈和静脉功能异常	(430)
四、心脏的收缩和舒张功能	(430)
五、动脉功能不全	(432)
六、自主神经病变	(433)
七、血透过程中血流动力学不稳定的治疗	(436)
八、透析处方个体化	(437)
九、低血压的急性治疗	(442)
第二十章 终末期肾脏病中的氧化应激	(445)
一、氧化应激的定义	(445)
二、生物系统中活性氧簇的生成	(445)
三、生理性抗氧化系统	(446)
四、透析患者中氧化应激的病理生理	(447)
五、氧化应激的标志物	(449)
六、晚期糖基化终产物	(449)
七、晚期脂类过氧化物	(450)
八、晚期氧化蛋白产物	(450)
九、欧洲尿毒症毒素工作组	(451)

十、氧化应激增加的影响	(451)
十一、氧化应激和进展性动脉粥样硬化	(452)
十二、活性氧簇在 β_2 -微球蛋白病发病机制中的作用	(455)
十三、活性氧簇及其在腹膜透析腹膜功能衰竭中的作用	(455)
十四、活性氧簇及其在炎症和心血管疾病发病机制中的作用	(455)
十五、内皮功能障碍	(456)
十六、能否防止透析相关的氧化应激增加	(458)
十七、总结	(460)
第二十一章 尿毒症中持续低水平的炎症和免疫功能不全	(465)
一、介绍	(465)
二、慢性肾脏病时免疫力的改变	(466)
三、慢性肾脏病时炎症患病率增加的多种原因	(469)
四、临床上尿毒症炎症的结局	(473)
五、炎症的预防和治疗	(476)
六、致谢	(478)
第二十二章 终末期肾脏病患者的肝炎和人类免疫缺陷病毒感染	(485)
一、血透患者 HBV、HCV、HIV 感染的流行病学	(485)
二、血透患者 HIV、HCV、HBV 感染的发病率和死亡率	(486)
三、血透患者 HIV、HBV、HCV 感染的筛查和预防推荐	(486)
四、HCV 的筛查	(488)
五、血透患者 HCV、HBV、HIV 感染的治疗	(489)
六、血透患者 HIV 的治疗	(489)
七、透析中心的感染控制方法	(490)
八、患者和员工接触病毒后的预防指南	(490)
第二十三章 透析患者的内分泌疾病	(493)
一、甲状腺疾病	(493)
二、促肾上腺皮质激素	(503)
三、肾上腺皮质疾病	(504)
第二十四章 终末期肾脏病的胃肠道并发症	(509)
一、食管	(509)
二、胃/十二指肠	(510)
三、消化道出血	(511)
四、胰腺	(512)
五、肾性腹腔积液	(513)
六、便秘	(514)
第二十五章 肾性骨营养不良	(518)
一、终末期肾脏病患者骨病谱	(518)
二、肾性骨营养不良的病理生理学	(519)
三、肾移植—骨营养不良	(532)

第二十六章 终末期肾脏病的酸碱问题	(538)
一、一般原理	(538)
二、腹膜透析中的酸碱平衡	(539)
三、血透中的酸碱平衡	(541)
四、代谢性酸中毒对骨骼和肌肉代谢的影响	(547)
五、透析前血浆 HCO_3^- 浓度对死亡率的影响	(547)
六、低 HCO_3^- 浓度患者的治疗	(548)
七、每日血液透析	(548)
八、连续肾脏替代治疗	(549)
九、终末期肾脏病患者的酸碱失衡	(549)
十、总结	(556)
第二十七章 透析患者的血脂异常	(559)
一、透析患者心血管疾病的危险因素	(559)
二、透析患者的脂质异常	(560)
三、测定和监测血脂水平	(564)
四、脂质异常的处理	(565)
五、高脂血症的药物治疗	(566)
第二十八章 终末期肾脏病的营养不良与透析时的胃肠外营养	(574)
一、持续性透析患者蛋白-能量消耗	(574)
二、维持性透析患者的饮食治疗	(576)
三、推荐的饮食摄入情况	(578)
四、血管疾病危险因素的治疗	(581)
五、矿物质和维生素	(583)
六、优先饮食目标	(589)
七、校正的无水肿体重	(589)
八、透析中的肠道外营养	(589)
第二十九章 透析患者的凝血功能障碍	(595)
一、尿毒症出血的原因	(595)
二、尿毒症患者出血倾向的结局	(598)
三、治疗策略	(600)
四、凝血异常和纤维蛋白溶解	(602)
五、血栓形成的并发症	(603)
六、总结	(603)
第三十章 终末期肾脏病患者贫血的治疗	(607)
一、慢性肾脏疾病的贫血:问题的严重性	(607)
二、红细胞生成素和红细胞生成的生理学	(607)
三、临床和实验室特征	(612)
四、肾脏疾病贫血的病理生理	(613)
五、肾性贫血的治疗	(616)

六、重组人红细胞生成素治疗的不良事件	(622)
七、贫血的治疗	(623)
第三十一章 透析及慢性肾功能不全患者神经系统并发症	(638)
一、中枢神经系统异常	(638)
二、尿毒症的周围神经系统病变	(646)
第三十二章 老年透析患者	(652)
一、老年终末期肾脏病的人口统计学特征	(652)
二、开始透析的指征	(655)
三、选择肾脏替代治疗方式	(656)
四、透析技术考虑	(659)
五、老年透析患者的特殊状况	(663)
六、老年腹膜透析患者的特殊状况	(668)
七、护理院环境中的透析	(668)
八、老年透析患者的伦理问题	(669)
第三十三章 糖尿病和糖尿病肾病肾衰竭的透析治疗	(677)
一、流行病学	(677)
二、糖尿病对患者和国家资源的影响	(678)
三、糖尿病肾病	(679)
四、肾脏替代治疗的准备	(679)
五、血透相关的并发症	(683)
六、糖尿病患者的持续性非卧床腹膜透析	(689)
七、糖尿病肾病患者的肾移植	(692)
八、结论	(692)
第三十四章 透析患者的生活质量和康复	(695)
一、生活质量的定义	(695)
二、生活质量的评估	(696)
三、终末期肾衰竭的生活质量	(701)
四、生活质量的影响	(702)
五、早期转诊	(703)
六、睡眠障碍	(703)
七、照顾者的社会支持和生活质量	(704)
八、贫血	(705)
九、抑郁	(706)
十、人口统计学变量	(707)
十一、健康相关的生活质量	(708)
十二、透析相关的因素	(708)
十三、营养和躯体活动	(709)
十四、结论	(709)
第三十五章 中毒和药物过量的体外治疗	(714)
一、流行病学	(714)

二、一般治疗措施	(714)
三、解毒的体外治疗	(716)
四、外源性中毒时使用体外技术的标准	(722)
五、乙烯乙二醇	(724)
六、甲醇	(729)
七、异丙醇(异丙基酒精)	(731)
八、水杨酸	(732)
九、锂	(735)
十、茶碱	(737)
十一、乙醇	(740)
十二、对乙酰氨基酚过量	(740)
第三十六章 儿童的长期透析	(748)
一、流行病学	(748)
二、儿童透析的原理:腹膜透析	(750)
三、儿童透析的原理:血液透析	(753)
四、儿童急性肾衰竭的透析	(754)
五、儿童终末期肾脏病的透析	(756)
六、儿童的长期腹膜透析	(757)
七、儿童长期腹膜透析的并发症	(762)
八、儿童长期血液透析	(763)
九、预防超滤相关的症状	(766)
十、新生儿和婴幼儿血液透析	(767)
十一、儿童透析患者的其他临床问题	(768)
第三十七章 儿童的紧急透析	(784)
一、儿童急性肾衰竭	(784)
二、肾脏替代治疗的适应证	(785)
三、腹膜透析	(785)
四、血液透析	(788)
五、持续肾脏替代治疗	(792)
六、总结	(797)
第三十八章 腹膜透析患者的感染	(800)
一、腹腔感染	(800)
二、流行病学、发病机制和易感因素	(800)
三、出口和隧道感染	(814)
四、结论	(817)
第三十九章 透析患者的肾脏移植准备	(821)
一、选择合适的移植类型	(821)
二、终末期肾脏病患者的医学评估	(823)
三、尸体肾移植等候患者的管理	(834)
第四十章 透析患者预后及提高透析患者的看护质量	(840)

第一章 血液透析膜的选择

Leslie L. Ford, Richard A. Ward, Alfred K. Cheung

一、透析膜的分类

血液透析膜通常采用下列 3 种方式进行分类:①根据膜的化学组成为纤维素膜或合成膜;②根据对小分子质量溶质的清除能力,分为高效透析膜或低效透析膜,小分子质量溶质以尿素(分子质量为 60 Da)为标志;③根据对中分子质量溶质的清除能力,分为高通量透析膜或低通量透析膜,中分子质量溶质以 β_2 -微球蛋白(分子质量为 118 00 Da)为标志。美国食品药品监督管理局(FDA)根据透析膜对水的通透能力将其分为常规透析膜或高通透性透析膜。目前,由于超滤控制透析机已在美国和其他许多国家广泛使用,使得透析膜和水通透能力无关,因此,临床上不使用后一种分类方法。还有一些将透析膜分为生物相容性或生物不相容性透析膜。这种分类方法过于单一,因为生物相容性是相对的,并且有许多标准用于判断生物相容性。下面就基于化学组成的透析膜分类进行介绍,随后在“描述透析器性能的临床术语”部分再讲述基于性能的透析膜分类。

纤维素膜

纤维素是植物细胞壁基质的组成成分,是第一个用于制造血液透析膜的天然高分子物质。纤维素可在用铜氨处理时沉淀析出形成膜,或皂化熔纺乙酸纤维素而形成膜。前者这种工艺生产出铜仿膜(由 Membrana 公司制造),在开展长期血液透析治疗的前 30 年这种膜曾被广泛使用。纤维素膜是一种水凝胶,它的实用性较强是因为其可以做得很薄(干时厚度 6~15 μm),具有很强的机械强度,能较好地扩散转运小分子溶质。由于“生物相容性”一部分中所提出的原因,人们已经关注纤维素膜的生物不相容性及其所导致的临床不良预后。这种关注使得纤维素膜在血液透析中的应用逐渐减少,2006 年铜仿膜已在血液透析中停止使用。

纤维素膜的相对生物不相容性是因为在构成纤维素的纤维二糖单位上存在亲水性羟基。20 世纪 70 年代起,开始使用一些用其他基团取代这些羟基的膜。羟基的取代减弱了补体蛋白和中性粒细胞的激活,改善了膜的生物相容性(见下文“生物相容性”部分)。这些膜被称为改良的纤维素膜,它们不同于未取代羟基的纤维素膜,如铜仿膜。在这些取代羟基的基团中有乙酸(各制造商生产了双乙酸纤维素膜和三乙酸纤维素膜)、二乙氨基(DEAE)(血仿膜,Membrana 公司)、苯甲基(合成的改良纤维素,SMC,Membrana 公司)、聚乙二醇酸(AM-BIO,Asahi 公司)和维生素 E(Excebrane,Asahi 公司)。血仿膜的 DEAE 基团除了降低补体激活外,也使膜能够结合阴离子分子(如肝素和磷),可减少全身抗凝剂量,增加磷的清

除。同时,Excebrane 膜上的维生素 E 可能有助于减少血液透析相关的氧化应激反应。

合成膜

20 世纪 70 年代开发了一些水通透性(或超滤系数)高的合成膜,主要应用于血液滤过^[1]。与薄而对称的纤维素膜相比,这些合成膜比较厚(厚度为 35 μm 以上),具有横截面上均匀(如 AN96, Hospal 公司)和非对称(如聚砜膜)结构。一些合成膜的非对称结构是指这些膜在横截面观察时,其空心纤维壁具有两层结构。约 1 μm 的薄的内层与血液接触,在调节溶质清除上起主要作用;厚的外层为膜的支撑基质。基质的变化从相对均匀的海绵状结构到手指状结构^[1]。一些早期合成膜(例如合成的聚砜膜),具有显著的疏水性,导致过度将血浆蛋白吸附到膜表面。为了避免这个问题,在疏水性的聚砜中加入了亲水性的聚乙烯吡咯烷酮(PVP)以减少膜的疏水性^[2]。聚乙烯吡咯烷酮除了可影响合成膜孔径大小分布外,当使用次氯酸钠复用透析器时还易使膜改变(见后文“复用对透析器生物相容性的影响”部分),见第二章。

各种合成膜已在临床上应用于血液透析,包括聚砜、聚醚砜、聚芳醚砜、聚丙烯腈、聚碳酸酯、聚甲基丙烯酸甲酯及聚(乙烯-乙醇)。大部分合成膜实际上含有一种以上聚合物,而它们通常简称为一个单一的聚合物名称。例如, Polyflux 系列透析器透析膜由聚芳醚砜、聚酰胺和 PVP 混合组成; AN69 膜是聚丙烯腈和钠甲磺酸的共聚物。AN69 膜中含有的钠甲磺酸非常重要,因为它是一个很强的阴离子,因此是一种血浆接触蛋白的强烈催化剂(见后文“生物相容性”部分)。这也意味了聚丙烯腈膜不含有钠甲磺酸,可能与 AN69 膜的理化特性有很大的差别。因此,对各种合成膜之间做出明确的区分很重要,即使这些膜都含有合成聚合物,或它们简称为相同的聚合物名称。

必须强调的是,尽管文献中存在一些误解,透析膜不能只分成两类:①纤维素生物不相容性、低效能、低通量膜;②合成的生物相容性、高效能、高通量膜。这两种分类之间有大量重叠,这种分类是没意义和有误导性的。每种膜的特性必须分别说明。

二、膜的特性和溶质清除机制

血液透析溶质清除有 3 种不同机制:通过膜的扩散、通过膜的对流和吸附到膜的表面。在血液透析过程中,这 3 种不同机制对给定的溶质清除所起的作用依赖于膜的特性和溶质的特性。

溶质的扩散清除

溶质的扩散清除是由血浆液体与透析液之间溶质的浓度梯度所驱动。溶质通过溶剂扩散遵守 Fick 第一定律,其中涉及溶质的摩尔通量(J_A)、溶质在溶剂中的扩散系数(D_{AB}),以及溶质的浓度梯度(dC_A/dx):

$$J_A = -D_{AB} \frac{dC_A}{dx} \quad (1.1)$$

在没有对流的情况下,溶质扩散通过透析膜,利用 Fick 第一定律可得出:

$$J_{\text{Diff}} = \frac{\varepsilon D^{\text{M}} S (\Delta C)}{\tau t} \quad (1.2)$$

此处 J_{Diff} 是溶质通过膜的扩散通量, ε 是膜的孔隙率, D^{M} 是溶质在膜中的扩散率, S 是膜的筛系数, τ 为曲折因子, ΔC 是膜表面血液和透析液的浓度差, t 是膜的厚度^[3]。在相同的浓度梯度 ($\Delta C/t$) 条件下, 小分子质量溶质的扩散转运能力最大, 这是因为 D^{M} (溶质的扩散率) 随着分子质量的增加呈对数下降趋势^[4], 而且小分子溶质能更好地接触膜孔。扩散转运也随着膜的厚度 (t) 的降低而增加。

溶质的对流清除

溶质的对流清除是水通过膜的过程中, 膜两侧静水压力差的结果, 这个过程称为超滤。水携带溶质通过膜的程度取决于溶质的大小和膜孔的大小。在没有扩散的情况下, 对流量 (J_{Conv}) 可以近似地采用表示液体流经一个圆柱形通道和膜的性能的 Hagen-Poiseuille 等式:

$$J_{\text{Conv}} = \frac{\varepsilon r^2 S C_{\text{B}} (\Delta P)}{8 \eta \tau t} \quad (1.3)$$

此处 r 是膜孔半径, C_{B} 是膜的血液侧表面溶质浓度, η 是膜孔中液体的黏度系数, ΔP 是膜的血液侧和透析液侧的静水压力差^[3]。等式 (1.3) 也描述了当 $S=1$ 和 $C_{\text{B}}=1$ 的情况下, 膜对水的通透能力。对于对流清除来说, 溶质的筛系数 (S) 随着分子质量的增大而下降; 然而, 与溶质扩散率 (D^{M}) 相比, S 在同一分子质量范围内是逐渐下降的, 如图 1.1 所示的纤维凝胶膜^[4,5]。这种差别导致的结果是, 对流治疗可提供获得优越的低分子质量蛋白质清除的基础, 如血液滤过和血液透析滤过与以扩散治疗为基础的高通量血液透析相比, 因此, 随着溶质分子质量的增大, 对流清除比扩散清除更重要^[6,7]。

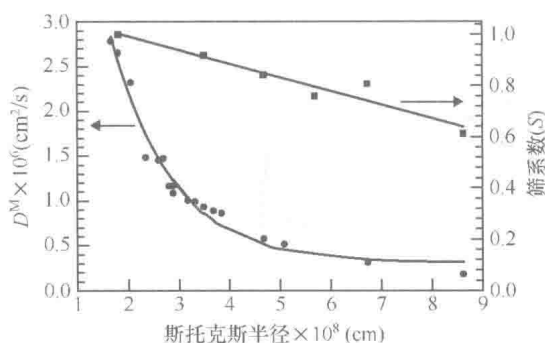


图 1.1 纤维素膜的扩散率 (D^{M}) 和筛系数 (S) 与分子质量的关系。膜的扩散率数据摘自 Farrell 和 Babb, 筛系数数据摘自 Wendt 等 (Farrell PC, Babb AL. Estimation of the permeability of cellulose membranes from solute dimensions and diffusivities. *J Biomed Mater Res*, 1973, 7: 275-300; Wendt RP, Klein E, Bresler EH, et al. Sieving properties of hemodialysis membranes. *J Memb Sci*, 1979, 5: 23-49.)

溶质的吸附清除

膜的吸附依赖于膜表面和被吸附溶质的物理化学特性。通常, 蛋白质的吸附是有限的。吸附对小分子质量蛋白质的清除作用在不同的膜和蛋白质之间有很大的差异, 即使是那些由相似聚合物合成但具有不同物理化学特性的膜^[8]。然而, 决定膜对蛋白质吸附的物理化