

血液净化模式 与临床应用

MODES OF BLOOD PURIFICATION AND CLINICAL APPLICATIONS

主 编◎王质刚

副主编◎段钟平

人体器官、系统的主要结构与功能及其人工替代

维持人体统一的内在联系与多器官功能支持系统的设计思路

血液净化对肾衰竭的治疗模式与临床应用

血液净化对肝衰竭的治疗模式与临床应用

体外循环对心力衰竭的治疗模式与临床应用

体外循环氧合 (ECMO) 对呼吸衰竭的治疗模式与临床应用

血液净化对多脏器功能障碍综合征 (MODS) 的治疗模式与临床应用

MODS的体外循环多器官支持系统的构想

其他血液净化治疗模式与临床应用

血液净化模式

⑤ 临床应用

血液净化模式在临床应用中，应根据患者的病情、肾功能、电解质紊乱程度、酸碱平衡状态等因素，选择合适的血液净化模式。

1. 连续性肾脏替代治疗（CRRT）

CRRT是一种连续性、缓慢、温和的血液净化模式，适用于急性肾衰竭、严重电解质紊乱、酸碱平衡失调等患者。CRRT通过连续运行的透析器，实现对毒素的清除和电解质的调节。其优点在于血流动力学稳定，对循环系统影响小，适用于血流动力学不稳定的患者。



血液净化模式与临床应用

Modes of Blood Purification and
Clinical Applications

主 编 王质刚
副主编 段钟平

 北京科学技术出版社

图书在版编目(CIP)数据

血液净化模式与临床应用/王质刚主编. —北京:北京科学技术出版社,2008.9

ISBN 978 - 7 - 5304 - 3926 - 5

I. 血… II. 王… III. 血液透析 - 临床应用 IV. R459.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 117015 号

血液净化模式与临床应用

主 编:王质刚

策 划:李金莉

责任编辑:李金莉 杨 帆

责任校对:黄立辉

责任印制:韩美子

封面设计:部落艺族设计工作室

图文制作:北京京鲁创业科贸有限公司

出 版 人:张敬德

出版发行:北京科学技术出版社

社 址:北京西直门南大街 16 号

邮政编码:100035

电话传真:0086 - 10 - 66161951 (总编室)

0086 - 10 - 66113227 0086 - 10 - 66161952 (发行部)

电子信箱:bjkjpress@163.com

网 址:www.bkjpress.com

经 销:新华书店

印 刷:三河国新印装有限公司

开 本:787mm × 1092mm 1/16

字 数:570 千

印 张:23.75

插 页:4

版 次:2008 年 9 月第 1 版

印 次:2008 年 9 月第 1 次印刷

ISBN 978 - 7 - 5304 - 3926 - 5/R · 1054

定 价:98.00 元



京科版图书, 版权所有, 侵权必究。

京科版图书, 印装差错, 负责退换。

编者名单

主 编 王质刚

副主编 段钟平

编 者 (以姓氏笔画为序)

马 锴 首都医科大学附属北京友谊医院

王质刚 首都医科大学附属北京友谊医院

史振伟 首都医科大学附属北京友谊医院

刘 峰 首都医科大学附属安贞医院

刘庆阳 首都医科大学附属北京友谊医院

陈 煜 首都医科大学附属佑安医院

陈绪军 首都医科大学附属北京友谊医院

张 凌 中日友好医院

张 影 首都医科大学附属北京友谊医院

杨 璟 首都医科大学附属安贞医院

郑素军 首都医科大学附属佑安医院

周亦伦 首都医科大学附属朝阳医院

段钟平 首都医科大学附属佑安医院

姜春生 首都医科大学附属安贞医院

韩福生 首都医科大学附属安贞医院

内容提要

Content Abstract

体外循环技术包括心脏直视手术时人工心肺转流术(CPB)和体外循环氧合疗法(ECMO)以及血液净化。这些技术可以单独应用维持某一器官的功能,也可联合应用支持多器官的功能,为实现构建体外循环生命支持系统提出理论依据与技术保障。本书着重论述体外循环技术用于多器官功能支持的治疗模式,旨在达到延长或支持生命的目的。首先阐述了多器官功能障碍及脓毒症的发病机制和体外循环生命支持的理论依据,继而提出多器官功能支持系统的结构、功能与生命支持的思路。进一步具体讲述体外循环技术对心、肾、肝、呼吸系统、多器官功能障碍、脓毒症的治疗模式。最后介绍了血液净化技术在非肾病领域中的应用。

本书邀请了国内血液净化、肝脏以及心肺体外循环方面的专家,他们不但具有深厚的理论知识,也具有丰富的临床实践经验。这里介绍的治疗模式思路清楚,治疗道理讲得明白,治疗效果令人信服。

编写本书的新意在于明确而清晰地提出组合的体外循环技术(体外循环生命支持系统),可以维持多种器官的功能,实现短期体外循环生命支持,为后续治疗或器官移植创造时机,为救治危重疾病开创了新的途径。

主编简介

Modes of Blood Purification and Clinical Applications



王质刚教授,首都医科大学附属北京友谊医院肾内科主任医师,博士研究生导师,享受国务院特殊津贴。任中国医院协会血液净化中心管理分会副主任委员,全国医用体外循环设备标准化技术委员会委员,北京生物医学工程学会血液净化专业委员会名誉主任委员。兼任《中国血液净化杂志》副主编、《国际移植与血液净化杂志》副主编及《肾脏病透析与肾移植杂志》常务编委及多家杂志编委。多年从事肾脏病专业,特长血液净化,先后在国内首先开展 8 项血液净化先进技术,获北京市科技进步奖、卫生局科研进步奖多次。主编和副主编著作 6 部,参编多部,发表论文、综述 100 余篇。

副主编简介

Modes of Blood Purification and Clinical Applications



段钟平教授,医学博士,主任医师,博士研究生导师。现任首都医科大学附属北京佑安医院副院长、北京市人工肝治疗培训中心主任,主要从事疑难重型肝病及人工肝研究。目前兼任全国重型肝病及人工肝血液净化攻关协作组组长,中华医学会肝病分会常委,重型肝病与人工肝学组组长,中国肝炎防治基金会人工肝及血液净化科技攻关基金委员会主任委员,亚太肝病学会会员,中国医院协会血液净化中心管理分会常务委员,北京市和科技部肝病重大科技攻关项目牵头专家,北京市跨世纪人才,国务院政府特殊津贴专家。被聘为《胃肠病学与肝病学杂志》共同主编,《中国血液净化杂志》、《传染病信息杂志》、《实用肝脏病杂志》副主编,《中华肝脏病杂志》等十余个专业杂志的编委或常务编委。先后承担科技部与北京市等攻关课题 11 项,发表论文 30 余篇,获科技进步奖 6 项。

前言

作者 1992 年主编《血液净化学》,2003 年再版,该书深入详细地介绍了血液净化的方法、原理以及临床应用;2006 年主编《血液净化设备工程与临床》,作者从设备角度阐述血液净化的设备结构、功能、原理以及临床应用的选择;此次又著《血液净化模式与临床应用》,本书将血液净化涵义深而广之,超越目前血液净化领域的范围与深度,使其原理及功能进一步升华,名称定位于“体外循环生命支持”。可以如此理解,第一部著作是血液净化的基本理论和方法,后两部作者旨在立足于临床角度论述血液净化设备的结构、原理以及各种血液净化模式与临床应用的重要关系,着眼于设备与技术,落脚点是临床应用。

Cardiopulmonary Bypass(CPB)通常译为“体外循环”或“心肺转流术、心肺体外循环”,Extracorporeal Membrane Oxygenation(ECMO)通常译为“体外膜式人工氧合法、体外氧合疗法、体外循环膜肺支持疗法”,俗称“膜肺”;Extracorporeal Life Support(ECLS)通常译为“体外循环生命支持”。CPB 应用于心脏停跳直视手术时作为心肺功能的支持系统;ECMO 用于心脏手术后不能脱机或患者转移到心脏监护病房(CCU)需延长心肺支持。当前国外经常用 ECMO 救治新生儿、幼儿、儿童以及成人由各种原因导致的肺衰竭,如 ARDS 等,故也称为体外循环生命支持系统。ECMO 有强而有力的心肺支持功能,但没有血液净化作用,而 CRRT 有强大的血液净化作用,却没有直接的心肺支持功能。国外有作者将 ECMO 设备与 CRRT 技术结合起来治疗多脏器衰竭取得了可喜的成功。作者历经少数病例的临床体验以及从动物实验得到进一步验证,ECMO 与 CRRT 结合是治疗多脏器衰竭不可多得的新构思、新技术。

ECMO 与 CRRT 的技术组合衍生一种更广义的体外循环生命支持系统,将它移植在各种原因引起的多器官衰竭,包括 Sepsis 的治疗中,除了支持脏器功能之外,还增加了血液净化功能,即 ECLS 具备了器官支持与血液净化双重

作用,实际是传统的 ECMO 单纯心肺支持和 CRRT 单纯肾脏替代功能的拓展与延伸。

广义的血液净化范畴除了腹膜透析之外,均建立在体外循环的基础上进行,也就是说血液净化无论哪种技术或治疗模式(如血液透析、血液滤过、血液灌流、血浆分离、免疫吸附等)都离不开体外循环,从这个角度讲血液净化也是一种体外循环技术。本书的宗旨是以广义的体外循环技术为基础,全面阐述这项技术概况、结构配置、功能替代、治疗模式、技术特点以及在心脏外科、肾科、肝病科、呼吸科以及急诊医学等危急重症中的治疗作用,同时着重描述了体外循环技术在治疗 MODS 及器官功能支持和维持生命的国内外范例。

近年 CRRT 的技术与功能不断延伸与扩展,特别是在救治多器官功能障碍(MODS)中作用令人惊奇,效果使人折服。CRRT 原意是连续性肾脏替代疗法,从临床实践发现 CRRT 的作用已经超出肾脏替代范围,特别是 CRRT 技术与吸附作用组合形成多种治疗技术与模式,具有排除代谢产物、细胞因子、炎症介质,调节免疫系统,平衡与稳定机体内环境的功用;此外还有修复内皮细胞、保护器官、改善供氧与氧耗失衡的作用。ECMO 也不仅仅是心脏术后的心肺功能支持,在 ARDS、肺移植术后、心肺复苏中以及肺栓塞的干预治疗中发挥重要作用。确切地讲,本书名应该是“体外循环模式与临床应用”,但缘由本书的读者群主要是肾科医生和从事血液净化的专业人员,对体外循环名词与技术不甚熟悉,所以本书名还是采纳广大肾科医生所熟知的“血液净化”一语。

本书邀请的作者多数是国内著名的专家,有的是某专业的顶尖人物,如肝病、血液净化、心脏外科等领域。他们具有高深而前沿的理论,创新的科研成果,更难能可贵的是积累了宝贵的实践经验,他们的文字表述是永久的财富,是激励进步的力量和动力。

我们衷心希望本书能为体外循环生命支持领域的科研、临床做点贡献,期盼为发挥体外循环技术的功能与实践最佳的治疗艺术搭建桥梁。如我们的耕耘结晶能惠及同仁、患者与社会,这就是全体参编人员最大的企盼与愿景。

王质刚

2008 年 5 月于北京

目 录

第一章 人体器官、系统的主要结构及功能及其人工替代

第一节	肾脏的结构与功能及其体外循环支持	1
第二节	肝脏的结构与功能及其体外循环支持	11
第三节	肺脏的结构与功能及其体外循环支持	19
第四节	心脏的结构与功能及其体外循环支持	28
第五节	多脏器功能障碍综合征时免疫、内分泌、血液、胃肠、神经、代谢变化	37
第六节	脓毒症的发病机制及其体外循环支持的理论依据	57

第二章 维持人体统一的内在联系与多器官功能支持系统的设计思路

第一节	人体器官是相互协调的统一体	62
第二节	多脏器功能障碍综合征有相同的发病机制和共同的致病物质	64
第三节	体外生命支持系统的多功能定位	67

第三章 血液净化对肾衰竭的治疗模式与临床应用

第一节	血液透析	69
第二节	血液滤过	99
第三节	血液透析滤过	108
第四节	配对滤过透析及推拉式血液透析滤过	117
第五节	生物滤过	124
第六节	高通量血液透析	129
第七节	血液灌流	137
第八节	高钠透析	144
第九节	长时间透析模式	155
第十节	持续低效血液透析	170
第十一节	血浆置换在肾病领域中的应用	172
第十二节	生物人工肾	181

第四章 血液净化对肝衰竭的治疗模式与临床应用

第一节	肝病血浆置换治疗	187
第二节	肝病血液灌流吸附治疗	195
第三节	肝病血液滤过治疗	205
第四节	分子吸附再循环系统	212
第五节	部分血浆分离吸附系统和 Prometheus	218
第六节	组合式非生物人工肝	220
第七节	生物透析吸附治疗系统	225
第八节	生物型人工肝	229

第五章 体外循环对心力衰竭的治疗模式与临床应用

第一节	心脏直视手术时人工心肺功能支持	239
第二节	心泵衰竭的体外心功能支持	242
第三节	体外循环在非心脏手术中的应用	247
第四节	尿毒症因素相关心衰的体外循环支持	257

第六章 体外循环氧合 (ECMO) 对呼吸衰竭的治疗模式与临床应用

第一节	急性呼吸衰竭的体外循环支持	262
第二节	Ⅱ型呼吸衰竭的体外循环支持	269
第三节	严重一氧化碳中毒的体外循环支持	270
第四节	呼吸道严重阻塞体外循环支持	271
第五节	ECMO 在心肺复苏中的应用	271

第七章 血液净化对多脏器功能障碍综合征 (MODS) 的治疗模式与临床应用

第一节	CRRT 的发展历程	274
第二节	MODS 连续性血液净化的干预时机	277
第三节	连续性血液净化的治疗剂量与稀释方式	279
第四节	治疗 MODS 的连续性血液净化模式	281

第八章 MODS 的体外循环多器官支持系统的构想

第一节	心肾衰竭的体外循环支持	293
第二节	心肺衰竭的体外循环支持	295
第三节	肺、肾衰竭的体外循环支持	296

第四节	肝肾衰竭的体外循环支持	300
第五节	脓毒症的体外循环支持	302
第六节	体外循环生命支持系统的理论依据	305
第七节	体外循环生命支持系统的设想与构建	309

第九章 其他血液净化治疗模式与临床应用

第一节	血浆置换	314
第二节	免疫吸附	334
第三节	血脂净化技术	347
第四节	血液成分分离技术	354
第五节	血液灌流技术的其他应用	360
体外循环疗法中文名词索引		371
体外循环疗法英文名词索引		374

第一章 人体器官、系统的主要结构与功能及其人工替代

本章主要介绍人体器官、系统的结构与功能,只有了解正常生理状态下器官的功能,才可知在病理状态下器官功能的异常变化,才可有有的放矢地应对挑战、解决问题。更深层次的意义是了解器官功能紊乱的变化,旨在研制和应用人工器官支持技术,以期短期维持生命,给实施干预措施创造机会,也为器官自身恢复留有余地。

人工器官的临床应用已经历了近一个世纪的历史,其技术不断成熟,设备日臻完善,功能逐渐提高。目前在临床有效而常规应用的非生物人工器官,包括人工肾、人工肝、人工肺以及各种心功能支持的辅助泵(详见第三章、第四章、第五章)。我们也应注意到,生物人工器官替代方法也在萌芽和发展,其中生物人工肝技术比较成熟,并且已应用到临床;随着组织工程技术的进展,生物人工肾小管及肾小球在动物实验中也取得进展,将来有望在临床应用;由于生命科学、细胞生物学、工程科学、材料科学的进展,用某器官的前体细胞,经定向培养有望长成一个有功能的器官;治疗性器官克隆是一项前沿而有希望的生物技术,如这项技术的成功应用,则人体器官可以随时更换;也不应忘记,异种器官移植技术也在发展,器官来源方便,如果能顺利解决排异问题,器官移植会变得更为方便和容易。但以上技术绝大多数没有应用在临床,这只是远景和期望。

事实是多器官功能障碍综合征(MODS)发病率逐渐增多,一些严峻的问题需要我们回答:上述这些非生物人工器官能否联合应用,可否共同支持多个器官?在正常生理状态下,这些器官相互之间有何有益的影响(friendly cross-talk between organs),而在病理状态下各器官又有什么有害的“对话”(limiting deleterious cross-talk between failure organ)?多器官功能支持设备对各器官和组织系统功能恢复是否能协调,综合地发挥有益作用?多器官功能支持系统与全身的调节网络(神经、内分泌、免疫)又有何相辅相成的作用?多器官功能支持系统在脓毒症治疗方面又有何特殊而全局的作用?本书第八章试图做一设想和回答,以期揭晓体外循环生命支持系统(ELSS)对多器官功能障碍综合征患者生命维持的理论与机制,希望最终实现ELSS,造福于人类。

第一节 肾脏的结构与功能及其体外循环支持

一、肾脏的大体形态和组织结构

肾脏是成对的略呈蚕豆状的实质性器官,成“八”字形分列于脊柱两侧,前有腹膜遮盖,

为腹膜外器官。正常成人男性肾脏的大小为 $(10 \sim 11) \text{ cm} \times (5 \sim 6) \text{ cm} \times (3 \sim 4) \text{ cm}$,平均重量为 $130 \sim 150 \text{ g}$,成人女性肾脏的大小及重量均略小于同龄的男性。肾脏内缘中间凹陷形成中央肾门区,称为“肾蒂”。肾蒂主要结构的排列关系从前至后为肾静脉、肾动脉和输尿管,通常右侧肾蒂较左侧肾蒂短。

肾脏实质的表面由内向外有3层被膜包裹,紧贴于肾实质表面的是一层薄而坚韧的致密纤维膜,纤维膜的外侧为包绕于肾脏周围具有弹性垫样缓冲保护作用的脂肪囊,脂肪囊的外侧为肾筋膜。由于肾筋膜与膈下筋膜相连,肾脏可随呼吸运动而上下移动。

肾脏的实质一般分为皮质和髓质两个部分。肾皮质位于肾脏浅层的 $1/3$,主要由肾小体和肾小管曲部构成;肾髓质位于肾实质的内层,约占肾实质的 $2/3$,主要包括肾小管直部及细段。髓质的髓袢、集合管和血管等管道结构平行排列组成向皮质呈放射状的条纹称为髓放线,向内侧集合形成肾锥体。髓放线之间的皮质称为皮质迷路,主要由肾小体近端小管曲部和远端小管的曲部组成。

二、肾单位的组成及功能

肾脏的基本结构和功能单位是肾单位。肾单位在滤过血液、形成尿液、排泄代谢废物、维持体内水与电解质及酸碱平衡、稳定机体内环境诸方面起着非常重要的作用。肾单位由肾小体和与其相连的肾小管组成。

肾小体由肾小球和肾小囊组成,是滤过血液形成原尿的主要结构。其主要位于肾脏的皮质迷路部分,形态近似球形,直径约为 $200 \mu\text{m}$,肾小体的中央部分是由毛细血管组成的肾小球,包裹于肾小球之外的为肾小囊。

肾小球的毛细血管是由肾小体血管极的入球小动脉入球后,分支形成盘曲袢状毛细血管网,肾小球毛细血管由内皮细胞、肾小球基膜和上皮细胞构成。毛细血管内皮细胞之间紧密连接,其细胞质环绕覆盖着血管基膜,胞体布满直径为 $70 \sim 100 \text{ nm}$ 的窗孔结构,另外在内皮细胞还被覆一层厚约 15 nm 的富含唾液酸蛋白的多阴离子表面糖蛋白,使其表面形成一富含负电荷的电荷屏障,可以阻挡血细胞和大分子蛋白质物质滤出毛细血管。

肾小球基膜的厚度为 $320 \sim 340 \text{ nm}$ (儿童约为 110 nm),主要由胶原、糖蛋白及蛋白聚糖等成分构成,其主要功能是保证肾小球毛细血管壁的完整性和通透性,其中IV型胶原成分在基底膜的选择滤过中具有重要作用,而蛋白聚糖则与基底膜的负电荷屏障有关。

肾小球基底膜外侧的脏层上皮细胞的细胞体呈多突状,形成足突贴附于基膜上,故又称为足细胞。足突呈镶嵌的交叉状,足突之间的空隙形成裂孔,直径约 40 nm ,在上皮细胞胞体及足突表面还覆盖着一层厚为 $20 \sim 60 \text{ nm}$ 负电荷物质。上皮细胞不仅是肾小球滤过屏障的组成部分,它还具有胶原及多糖的合成能力,对基膜的合成与修复有重要作用。有孔的肾小球毛细血管内皮细胞、肾小球基膜和肾小囊脏层上皮细胞层的滤过裂隙膜共同组成肾小球的滤过膜。肾小球在尿液形成过程中的作用主要是对血浆的超滤作用^[1]。

肾小管主要包括近端肾小管、髓袢及远端肾小管。肾小管上皮细胞具有强大的吸收功能,肾小球滤过原尿的99%都可以被肾小管回吸收。近端肾小管直径为 $50 \sim 60 \mu\text{m}$,长约 14 mm ,被覆着单层立方上皮。近端小管分为曲部与直部两段,曲部与肾小体尿极相连,腔面有发达的刷状缘结构,位于皮质迷路部分;直部位于髓放线,又称为降支粗段,其腔面的微绒毛较短。近端小管的主要功能是回吸收原尿中的水、钾、钠、氯化物、钙、重碳酸盐、磷酸盐、

葡萄糖及氨基酸等物质。髓袢是连接于近端小管直部和远端小管直部的细直管部分。其管腔直径约为 $15\mu\text{m}$, 长度不一, 最长可达 10mm 。细段主要被覆着单层扁平上皮, 其主要功能是对水的重吸收, 在尿液浓缩中具有重要作用。

远端小管也分为直部和曲部, 经髓放线又折回所属肾小体附近变为曲部, 迂曲于近曲小管之间, 最后又至髓放线与集合管相连接。远端小管被覆着立方上皮细胞, 但上皮细胞腔面没有刷状缘结构。其直部的管径约为 $35\mu\text{m}$, 长度为 9mm , 曲部直径为 $20 \sim 50\mu\text{m}$, 长度为 5mm , 其主要功能是对钾、钠、氯化物的代谢及酸碱平衡的调节有重要作用^[1,2]。

三、肾小球旁器的基本结构与功能

肾小球旁器, 是位于肾小球血管极旁, 处于入球小动脉、出球小动脉和近端肾小管之间的一个小三角区域。主要由 3 种特殊的细胞群组成, 即入球小动脉的进球细胞、系膜细胞和远曲小管的致密斑。

进球细胞又称球旁细胞, 是由接近肾小球血管极的入球小动脉的管壁平滑肌细胞衍变形成的。进球细胞一般呈椭圆形, 染色较浅, 胞体较大, 细胞质丰富, 弱嗜碱性, 胞浆内可见较多的有膜包绕的分泌颗粒, 利用免疫组织化学技术证实这些分泌颗粒内主要含有肾素。系膜细胞主要是指入球小动脉、出球小动脉和致密斑之间的一群细胞, 又称极垫细胞、球外系膜细胞、Lacis 细胞等。这些细胞与肾小球内的系膜细胞相连, 并与肾小囊壁层基膜相连接, 其作用除了与球内系膜细胞具有相同的收缩作用外, 还可能是肾小囊的一个关闭装置。在某些因素的刺激下, 球外系膜细胞可以转化为胞浆内含有粗大肾素颗粒的近球细胞。致密斑存在于靠近肾小体一侧的远曲小管的起始部位, 这部分的上皮细胞变成高柱状, 局部形成一个斑状隆起, 细胞核密集的积聚在一起, 染色较深, 故称为致密斑。致密斑可以感受小管液中钠离子的浓度变化, 并将信息传递至近球细胞, 调节肾素的释放。

近球小体是一种具有分泌功能的结构, 其主要分布在皮质肾单位, 故皮质肾单位含肾素较多, 而髓旁肾单位则几乎不含肾素。研究表明, 调节肾素分泌的结构基础是近球小体的血管与致密斑接触的面积, 当远端肾小管内原尿尿量及钠离子减少时, 远端小管的直径变小, 致密斑与血管的接触面积减少, 则肾素的分泌增多; 而当远端肾小管内原尿尿量及钠离子增加时, 远端小管的直径扩大, 致密斑与血管的接触面积也增加, 则肾素的分泌减少。

四、肾脏的基本生理功能

泌尿功能是肾脏的基本生理功能, 由肾小球的滤过和肾小管及集合管的重吸收共同完成。肾小球滤过作用的动力是肾小球的有效滤过压。肾小球有效滤过压决定于肾小球毛细血管压、肾小囊内压和血浆胶体渗透压。肾小球有效滤过压 = 肾小球毛细血管压 - (血浆胶体渗透压 + 肾小囊内压)。肾小球的滤过率是指单位时间内(每分钟)两肾生成的超滤液量(即从全部肾小球滤过的血浆毫升数)。据测定, 体表面积为 1.73m^2 的成人肾小球滤过率为 $125\text{ml}/\text{min}$ 左右。影响肾小球滤过的主要因素包括: 肾小球滤过膜的通透性和滤过面积、肾小球毛细血管压、肾小囊内压和血浆胶体渗透压等。

由于肾血流量的自身调节机制, 在血压波动于 $80 \sim 180\text{mmHg}$ 时, 肾小球内毛细血管压可以保持相对稳定, 但是, 当血压降低到 80mmHg 以下时, 肾小球内毛细血管压也相应下降, 可造成有效滤过压和肾小球滤过率的降低。当动脉血压降至 $40 \sim 50\text{mmHg}$ 以下时, 肾小球

滤过率将降低为零,从而出现无尿现象,而在高血压病的晚期,由于入球小动脉可以出现狭窄病变,肾小球毛细血管压亦将明显降低,肾小球滤过率也将明显减少,出现少尿。肾小囊内压一般较稳定,但若出现输尿管梗阻、肾小管阻塞等情况,可能导致肾小囊内压增高,致使肾小球有效滤过压减低而影响肾小球的滤过功能。人体血浆渗透压在一般情况下不会出现较大的变化,但在血液稀释或全身血浆蛋白浓度明显降低的情况下,血浆胶体渗透压可以降低,从而使有效滤过压升高,肾小球滤过率也将随之增高;反之,当血液在浓缩的情况下,血浆胶体渗透压可以增高,可使有效滤过压和肾小球滤过率均明显下降。因此,当肾小球滤过率出现改变时,应该从多方面进行考虑才有可能了解真实的病因。

肾小管和集合管具有重吸收功能。肾小管的重吸收具有选择性,如葡萄糖、氨基酸、维生素能够全部被重吸收,而尿素氮、肌酐等仅小部分被重吸收或不吸收。肾小管重吸收的方式有被动重吸收和主动重吸收两种,一般而言,机体所需要的物质,如葡萄糖、氨基酸、钠离子等都是由肾小管主动重吸收的。80%的钠离子和水均是在近端肾小管重吸收的,葡萄糖、氨基酸、少量的蛋白质、钾离子、镁离子以及磷酸盐等大部分都在此处重吸收。近端小管侧面与底细胞膜上存在着钠泵,可将细胞内的 Na^+ 主动转运到细胞间隙,使细胞内 Na^+ 浓度和电位降低,小管腔内的 Na^+ 便顺着浓度梯度和电位梯度被动地扩散到细胞内,再被钠泵转移到细胞间隙,并形成高渗区,水则顺着渗透压梯度而被动吸收。钠的重吸收与饮食有关,机体缺钠时,钠可被全部重吸收,正常情况下钠摄入较多时排泄也相应增加。钾离子 90% ~ 95% 是在近曲小管主动重吸收的。葡萄糖和氨基酸在近曲小管的重吸收是通过管壁上皮细胞膜上的载体系统转运主动重吸收的,并与钠的重吸收密切相关。肾小管对葡萄糖的重吸收有一定限度,当超过吸收限度时,尿中出现葡萄糖。由于近端小管管壁对水有高度的通透性,随着小管中溶质的重吸收,水也成比例地重吸收,而使小管液的渗透压不发生改变。

Henle 袢的重吸收作用与尿的浓缩功能密切相关,其特点是不同部位对水和钠的通透性不同,袢的降支对水有高度的通透性,而降支周围的组织间隙是由 Na^+ 、 Cl^- 和尿素形成的高渗区,此区小管内的水顺着浓度梯度被动重吸收;袢的升支对水的通透性很低,升支细段对 Cl^- 、 Na^+ 的通透性很高,小管液内的 Cl^- 、 Na^+ 被重吸收;升支粗段可主动重吸收 Cl^- ,而 Na^+ 随着 Cl^- 的主动吸收而被动重吸收,而此段对水的通透性则很低,重吸收的结果使管腔内小管液成为低渗溶液。

远曲小管和集合管可继续重吸收水和 Na^+ ,与近端小管不同的是在此处水钠的重吸收量虽然少,但受抗利尿激素的调节可适应体内的变化,当机体缺水时,重吸收量增多,不缺水时则减少。集合管的髓质部对尿素的通透性较高,尿素可以弥散到组织间液中,并部分再通过袢的升支回到小管滤液中,这样构成了尿素的再循环。该循环对维持髓质渗透压和尿液的浓缩稀释作用有重要意义。

肾小管和集合管还具有分泌作用。在肾小管上皮细胞中有碳酸酐酶可催化二氧化碳和水形成碳酸,在细胞内碳酸解离成氢离子 (H^+) 和碳酸氢根离子 (HCO_3^-)。 H^+ 被小管上皮细胞分泌入管腔, H^+ 分泌时又与 Na^+ 进行交换, H^+ - Na^+ 交换的结果使细胞内的 HCO_3^- 与主动吸收的 Na^+ 相伴随被动地扩散转运回血, H^+ 与小管液中的 HCO_3^- 结合形成碳酸,而碳酸再分解成二氧化碳和水。因此 H^+ 的分泌是与 HCO_3^- 的重吸收密切相关的。另外分泌的 H^+ 还可与滤液中缓冲对反应形成可滴定酸,使尿液酸化。