

肾脏生理学

——原理和功能

[美] E. 考香泡尔 著



科学出版社

肾 脏 生 理 学

——原 理 和 功 能

(肾-体液调节系统的整合分析)

[美] E. 考香泡尔 著

吴 襄 主译

科 学 出 版 社

1984

内 容 简 介

本书共分十三章和两个附录。第一章肾-体液调节系统的概观,从第二章到第十一章是描述体液和肾功能及其机制,第十三章对肾 体液调节系统进行了详细的分析与综合,附录 A 介绍系统分析与综合的原理及其对于生理系统的可能应用,附录 B 叙述了本书所应用的稀释原理的数学基础。

可供生理学工作者、医学院校师生以及临床工作者参考。

ESMAIL KOUSHANPOUR, Ph. D.

RENAL PHYSIOLOGY:

Principles and Functions

An integrated analysis of renal-body fluid regulating systems

W. B. SAUNDERS CO., 1976

肾 脏 生 理 学

原 理 和 功 能

[美] E. 考香泡尔 著

吴 襄 主译

责任编辑 姜朋逊

科 学 出 版 社 出 版

北京朝阳门内大街 137 号

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1984 年 4 月第 一 版 开本: 787×1092 1/16

1984 年 4 月第一次印刷 印张: 21 1/2

印数: 0001—5,400 字数: 498,000

统一书号: 13031·2496

本社书号: 3429·13-10

定 价: 3.30 元

译者前言

肾脏生理学的基本理论和临床应用,近年来都有长足的进展。肾脏已不再被认为是单纯的排泄器官,而是机体内环境调节系统的至为重要的组成部分——通过对细胞外液容积和成分的排出的调节,保持了内环境的相对恒定。肾脏在对体液进行调节时,肾本身的功能也不断地受到肾内和肾外各种机制的调节,而这些机制的运转又同细胞外液的容积及其成分浓度的改变密切关联。此外,肾脏还是产生一些生物活性物质的器官。

在自然科学发达的国家中,生理科学和医学的许多期刊上发表的关于肾脏生理和病理生理的研究报道越来越丰富,国际上关于肾脏的专门期刊和专著也日益增加。但回顾我国,除医学杂志上曾刊登少量有关肾功能测定及其应用的资料外,在基础理论研究方面,肾生理学还是一个空白部门,这同我们社会主义大国的地位显得很不相称。为改变这一情况,生理科学界和医学界应有相当一部分力量投入肾生理的研究中。本书的翻译,其目的就在介绍肾生理学的新近进展,借以引起我国生理科学和医学工作者重视,考虑如何结合我们自己的情况逐步开展肾生理学的理论和应用的系统研究,包括中西医结合的研究,以求填补空白,为本门科学的发展作出应有的贡献。

本书的特点在原著的前言中已经叙述明白,即“企图对于肾功能及其在保持体液内环境恒定中的作用提供一个完整的定量的分析。本书应用系统分析和综合的方法处理各有关课题,这同用传统的和习惯的方法是有明显区别的。”

本书材料比较丰富新颖,叙述由浅入深,重点放在机制的探讨上,因此对医学院校的高年级学生、研究生、教师、生理科学研究人员及临床医师,均有参考价值。象这样的肾生理学专著在我国似乎还是首次出版,我们希望本书能在实现生理科学和医学现代化过程中起着一定的作用。由于本书是原作者在其大学讲稿的基础上整理而成的,不可避免地有些地方存在着不必要的重复,但此却也有利于全书的连贯性。本书原著各章之后附列复习题,很多是计算题,全书末尾附各章习题的答案,这些在译本中均从略。惟各章参考资料目录仍照印,以利于深入查考。

我们在翻译中,力求内容符合原著,文字叙述通顺。各章译稿除相互校阅外,均由主译者逐段逐句核对。本书名词除参考已出版的各种英汉辞典加以选用外,个别的还由我们自己拟定试用,附注原词。参加本书翻译,除主译吴襄外,还有冯镇沅、张希成、张炳南、林茂樟、闻立荣、萧盘荣、黄龙、黄辰格、崔肇春。限于我们的水平,错误和不妥之处肯定会存在的,尚请各方面同志给予批评指正,以便日后修改。

译者

1981.3.

前 言

生理学者和临床学者关注到已历时一世纪之久的 Claude Bernard 关于内环境恒定是正常生命存在的先决条件一语的真理。保持内环境这种恒定性的机制包括好几个器官系统的动态之间的相互作用，其中肾脏是最为突出的。然而肾功能的教科书竟极少企图或更少有成效地把这种动态间的相互作用向医科学生和有关卫生专业的学生们进行解释。

这种相互依赖性在患原发性或继发性肾脏疾病的病人身上可明显地显示出来，这些病人往往表现广泛的临床症候，似乎与肾功能衰竭无关。在这些症候中包括有：高血压和门脉高压，急性肾功能衰竭、充血性心力衰竭和肝硬化所常伴有的下肢液体滞留，以及与异常的代谢(如糖尿病和胃肠功能失常)有关的酸碱紊乱。虽然这些患者的肾调节功能紊乱不很明显，但在仔细分析病人的体格检查和实验室资料、以及肾功能的生理学后，就会发现在这些无关的症候中，绝大多数(即使不是全部)的症候，可以追溯到他们的正常的肾调节功能中有某些紊乱。因此，为了有利于明智地进行病因诊断和临床症候处理，就需要彻底地了解肾功能与其他有关的主要器官系统在内环境恒定的调节中的动态的相互作用。

本书是著者在过去 12 年中为美国西北大学医学院医科学生所作的肾生理学二十讲的教程基础上发展起来的。本书企图对于肾功能及其在保持体液内环境恒定中的作用提供一个完整的定量的分析。本书应用系统分析和综合的方法进行处理，这同传统的和习惯的方法来处理课题是有明显差别的。这种处理所提供的认识，不是对现象的描述，而是对机制的探讨；它对概念的形成赋予数学的严密性。它便于探索关键性的因素、各种不同的可能性和漏掉的环节，从而指导实验取得成效。在进展的每一阶段，它都能以明确的形式总结出当时的理解程度，这样就把不足之处暴露出来，以激励进一步工作。这样处理并不代替实验的技巧，也不妨碍对课题知识的深入探讨，而恰恰是便利和促使这两方面的发展。因此，本书所应用的研究肾功能的系统分析，乃是代表一种用来描述这样复杂的生理系统的新途径。

此书共有十三章和两篇附录。第一章是关于肾-体液调节系统的概观。这一章不仅把著者对这个课题的处理方式介绍给读者，而且引导读者把注意集中于肾脏在调节体液使其保持内环境恒定上所起的独特的作用。从第二章直到第十一章，严密地描述了体液和肾功能及其机制。在这些章中的每一章，都包括有恰当的和充分的背景资料，这就使所需要的复习尽量减少。例如第七章提供了生物化学的和定量的概念，以便于理解第八、九和十一章关于肾转运机制及尿的浓缩和稀释机制。为了更好地理解肾脏在酸碱平衡调节中的作用，在第十章里对于缓冲和有关的概念，以及呼吸对酸碱的调节，也作了广泛的讨论。就这样，每一章的材料不仅对肾功能的某些方面进行介绍和系统阐述，并且还还为以后的章节提供必要的基础。此外，其它肾生理的专著对肾脏的解剖是分开阐述的，本书则不是这样，我们是把解剖的知识同肾功能的讨论整合在一起。还有，在每章之末，列了许多

问题¹⁾,这是为了便于学生们进一步领会正文的叙述。

第十二、十三两章对于肾-体液调节系统进行详细的和完整的分析与综合,这是按照前面已经叙述过的知识,既从正常生理的角度也从病理生理功能紊乱的角度进行论述的。其内容包括对疾病中肾功能机制的描述,以及在以下各种病理情况中肾功能受损的程度:如急性肾小球肾炎、肾盂肾炎、肾病综合征、高血压、肝硬化和充血性心力衰竭。著者希望这些临床例子将会向读者清楚地表明本书前文所提供的材料是有用的和恰当的,以及对于他们理解各种疾病状态下的不同表现有所帮助。

附录 A 是企图给学生介绍系统分析和综合的原理及其对于生理系统的可能的应用。附录 B 叙述了本书所应用的稀释原理的数学基础。最后,在全书末尾对各章之末所附问题的一部分提供答案,这些问题是为了使学生对正文所述的原理增加理解的。(全书末尾所附的问题答案,在译本中也略去——译者。)

本书应是为满足所有各类学生的需要、包括那些极少或没有数学基础的人的需要而撰写的。初看起来,对于本课题的定量的和严密的论述,可能被认为或多或少是超出医科学生的需要的。但我们在西北大学医学院的经验证明其并非如此。本书所陈述的材料和系统分析的处理,不仅为医科学生所热忱欢迎,而且为理疗学科和医疗工程学科的学生所欢迎。当然,对于后面这部分学生,我们是尽力缩减数学表达的范围的,但在处理流程图解和功能图解时,则未加缩减。

最后,虽然著者的主要目标曾经是使本书满足好几类学生的需要,但也可能对于肾生理学的科研人员以及从事医疗实践的人员特别有兴趣。对于后一类读者来说,本书乃是对于迄今尚难于掌握的一个复杂领域提供新的探索途径。

(接着的一段乃是著者对于给本书编写提供帮助的各方面人士的感谢,译文从略。)

原著者 Esmail Koushanpour

(吴 襄译)

1) 每章之末所列的问题,由于数量过多,在译本中略去。——译者注

目 录

第一章 肾-体液调节系统绪论	1
第二章 体液: 正常的容积和成分	8
第三章 体液: 周转率和液体移动的动力学	22
第四章 肾脏系统的概观	42
第五章 肾小球超滤液的生成	43
第六章 肾清除率: 肾小球滤过率及肾血流量的测定	57
第七章 肾小管转运的生物化学基础	73
第八章 肾小管对肾小球超滤液的处理: 电解质和水的转运机制	88
第九章 肾小管的重吸收和分泌: 根据全面清除率测定进行分类	131
第十章 肾对酸碱平衡的调节	155
第十一章 尿的浓缩和稀释的机制	184
第十二章 肾对细胞外液量及其渗透浓度的调节	226
第十三章 肾功能紊乱的病理生理学	278
附录 A 生物控制系统的定量描述引论	319
附录 B 稀释原理的数学基础	335

第一章 肾-体液调节系统绪论

身体的全部细胞都浸浴于液体之中,这液体称为细胞间液 (interstitial fluid),它是细胞的内环境。细胞间液的容积和成分,都必须保持在狭窄的变动范围内,否则就要造成功能失常。血管内液和细胞间液的容积发生异常变化时会损害心血管功能,而细胞间液的成分异常时要损害细胞的功能。细胞间液的物质浓度,包括电解质、氢离子、代谢废物的浓度,以及甚至水的浓度(渗透效应),都要适当。

许多扰乱性动因会使这些体液的容积和成分失常,这些动因包括水的摄取、缺乏或丧失;电解质的摄取、缺乏或丧失;酸或碱的意外变动;以及代谢废物的产生或有毒物质的投给。

很明显,面对这些扰乱性动因时,机体必须有主动的调节,以保持生命所必需的内环境的恒定性。事实上,这调节控制系统具有两个代偿的组成部分,一是胃肠系统,它能适当地调整摄取量(口渴、食欲等等);另一就是肾脏,这是本书所要集中探讨的,它能适当地调整排出量。在肾-体液调节系统中,肾脏所起的代偿作用,正象骨髓为血红蛋白调节器、或者肺为血液气体调节器所起的作用一样。

肾-体液调节系统的流程图解

图 1-1 所表示的乃是肾-体液调节在正常稳态时的流程图解,图上确定了体液的几个主要部分 (compartment) 以及各部分之间液体流入和流出的主要渠道。审查这个图解,可以对这一系统获得一个入门的定向性认识。简单地说,在流程图解中标明了物质流入和流出亚系统(以方框表示)的渠道。在这些亚系统中,物质可以进行转变。物质进出于

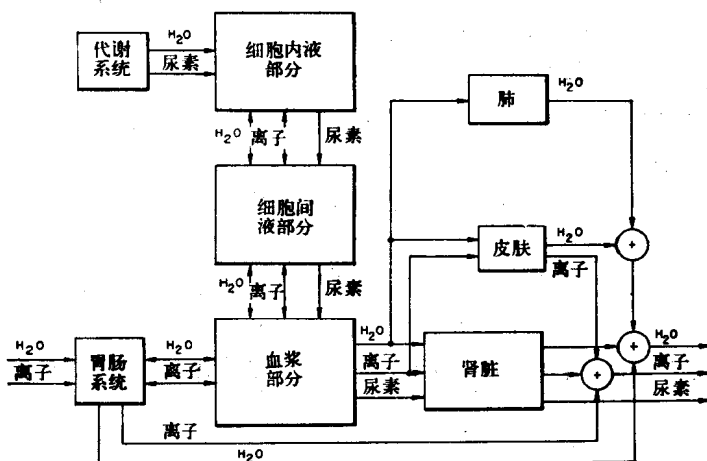


图 1-1 正常肾-体液调节系统的流程图解

每一亚系统,是以箭头指向或离开方框的同侧或对侧表示。与此不同,功能图解是说明因果关系,说明一种或多种亚系统的输入和输出的关系,以及影响它们功能关系的因素。因此,以这样的图解为基础,可以对于系统进行定量的以及机制性的描述。流程图解和功能图解,在本书中都将适宜的场合自由地加以运用,关于这两种图解的详细讨论,感兴趣的读者可以参阅本书的附录 A。

关于体液的血浆部分,读者已经熟悉,一个体重为 70 公斤的健康男子,血浆量约为 3.2 升。由于血浆是在全身循环流动的,它成为水和溶质在流通渠道中运输的媒介,又是血液与基本上不循环的细胞间液交换水和溶质的媒介。

细胞间液部分约有 8.4 升,在图上表明细胞间液与血浆之间具有双向的交换(two-way exchange)。这种交换发生于组织交换器,即体循环毛细血管中,在这里,部分地去掉蛋白质的血浆从毛细血管动脉端逸出而至细胞间隙,然后又在毛细血管的静脉端重新吸收入血。这种双向交换的机制是滤过作用。这里交换的流通量(flux)每分钟可达 4.5 升左右,这就使得血浆每 0.7 分钟周转 3.2 升,细胞间液每 1.9 分钟周转 8.4 升。在稳态(steady state)时,液体的逸出率和重吸收率是相等的,但在瞬变态(transient state)时,液体的交换率可以暂时不相等,这样就造成从体液的这一部分到另一部分的净的液体转移。

细胞内液部分约有 23.1 升之多,如图解所示,在细胞内液和细胞间液这两部分之间,也是双向交换。在稳态时,水的双向流通量极大,但各种离子的流通量则小得多,因为离子的透过细胞膜是受着严格限制的。水的交换是借助于被动的弥散,而离子交换则借助于弥散和(或)主动的转运。在瞬变态时,水的双向流通量可以暂时不相等,这就在两个体液部分之间造成净的水转移。这种转移的机制是渗透(osmosis)。由于细胞也是代谢水和代谢废物(如尿素)的一个来源,因此,代谢系统给水造成一个额外单向流通,并给尿素造成一个单向流通,尿素的转移也是借助于简单的弥散。

由此可见,作为身体水分和离子贮藏库的三个主要体液部分,都是动态的周转池(turnover pool)。其中只有循环着的血浆有来自体外的流入和向体外的流出,尽管这种反应或多或少是被动的,但是细胞间液和细胞内液两个部分,能够对血浆容积和成分的变化迅速地起反应。

水和溶质进入体液的主要渠道是经过胃肠道。水和 NaCl 的每天平均进入量可分别达 2.5 升和 7.0 克左右。此外,还要加上 0.3 升的代谢水(来自营养素的氧化作用)和 30 克代谢尿素(来自氨基酸的脱氨基)。在稳态时,上述进入量与每天的排出量(包括 2.8 升水、7.0 克 NaCl 和 30 克尿素)相平衡。在四条排出的渠道中,肾脏的重要性远远超过其它三条,因为两侧肾脏每天约排出 1.5 升水、6.2 克 NaCl 和基本上全部尿素。还有一些水分通过呼吸道排出,以及少量的水和离子随粪便和经皮肤排出。通过肾外途径丧失的水分,在 24 小时内约为 1.3 升。

很清楚,在总的进入量和排出量之间的任何暂时的不相等,都将改变临界体液各部分的容积和(或者)成分。在这里,所有进入和排出的渠道,除肾脏外,都构成可能的扰乱性动因,而肾脏对这些动因的反应乃是通过对被它本身所控制的排出量进行代偿性的调整。

生物物理化学的基础知识

在进一步讨论之前,有必要复习一些生物物理化学的基础知识。

体液中物质的浓度有几种表达方法,各具有特殊的用处。

1. 容积百分比 (volume %), 每 100 毫升液体中所含物质的毫升数。这常用于血中气体含量,以及表达体液中的含水量。例如血浆的含水量为 94 容积%,但红细胞只含 72 容积%。

2. 重量百分比 (weight %), 每 100 毫升液体中所含溶质的克数。这种重量/容积的混合单位被广泛地应用。血浆蛋白质平均为 7 克/100 毫升,红细胞的血红蛋白为 35 克/100 毫升。这些蛋白质数值在很大程度上说明了细胞和血浆的不同含水量。

3. 克分子浓度 (molar concentration), 每升液体中溶质的毫克分子数 (mM/L)。“正常的”或“生理的”盐水含 NaCl 0.9 克%,这就是:

$(9 \times 10 \text{ 克/升}) / (58.5 \text{ 克/克分子} \times 1000 \text{ 毫克分子/克分子}) = 154 \text{ mM/L}$ 。式中 58.5 为 NaCl 的分子量。

4. 当量浓度 (equivalent concentration), 每升液体中所含溶质的毫克当量数 (mEq/L)。当量的定义是原子量、化学根量或分子量除以化合价:

1 克分子的尿素 = 1 当量

1 克分子的 NaCl = 1 当量

1 克分子的 CaCl_2 = 2 当量

1 克分子的 Na_2SO_4 = 2 当量

就电解质来说,负电荷的总和必定等于正电荷的总和。由于离子的价数相当于离子电荷数,所以负离子当量数的总和将等于正离子当量数的总和。因此,体液离子浓度的最好表达方式是以 mEq/L 为单位。

5. 渗透克分子浓度 (osmolar concentration) (本书译文一概简称为“渗透浓度”),如每升液体所含的溶质的毫渗克分子数 (mOsm/L, 本书译文简称为毫渗/升)。渗透克分子数等于克分子数乘以解离的离子数:

1 克分子尿素 = 1 渗透克分子 (osmole)

1 克分子 Na^+Cl^- = 2 渗透克分子

1 克分子 $\text{Ca}^{++}\text{Cl}^-\text{Cl}^-$ = 3 渗透克分子

1 克分子 $\text{Na}^+\text{Na}^+\text{SO}_4^-$ = 3 渗透克分子

一种溶液的随粒子数目改变而变化的特性,包括冰点降低,沸点升高,潜在的渗透压,等等,称为依数性 (colligative property),都是渗透浓度的函数。血浆的正常渗透浓度约为 $290 \pm 10 \text{ mOsm/L}$,而生理盐水(0.9 克%, 154mM/L, 154mEq/L)的渗透浓度为 308mOsm/L,因此并不与血浆完全等渗。以上都是以“总溶液”的浓度 (“bulk” concentration) 来表示的,也即以溶液的单位容积所含的数量来表示。但有时候以“水”中的浓度为表示更有意义,也即以液体中水分的单位容积所含的溶质数量表示。换算的方法很简单:

$$\text{“水”中的浓度} = \frac{\text{总的液体中的浓度}}{\text{液体中 H}_2\text{O 所占的容积\%}} \quad (1-1)$$

据此,液体中的含水量越低,则“水”中的浓度超过“总的液体”中的浓度就越多。兹将两种浓度的区别点列下¹⁾:

“总的溶液”中的浓度	“水”中的浓度
克%	克%在水中
mM/L (容积克分子浓度)	mM/L _{H₂O} (重量克分子浓度)
mEq/L	mEq/L _{H₂O}
mOsm/L (容积渗透浓度)	mOsm/L _{H₂O} (重量渗透浓度)

表 1-1 列举了血浆的主要电解质及其用不同单位表达的浓度。

表 1-1 血浆电解质浓度的换算(换算为毫当量/升或毫克%)

电 解 质	计算时所按照 的形式	原子量	原子价	当 量	换算系数 从 mg% 换算 为 mEq/L 时, 除以系数; 从 mEq/L 换算 为 mg% 时,乘 以此系数	血浆中的浓度 (正常变动范围)	
						mg/100ml	mEq/L
正离子							
钠	钠	23	1	23	2.3	310—335	136—145
钾	钾	39	1	39	3.9	14—21.5	3.5—5.5
钙	总钙	40	2	20	2.0	9—11	4.5—5.5
镁	镁	24	2	12	1.2	1.8—3.6	1.5—3.0
负离子							
碳酸氢根	CO ₂ 含量			22.26	2.2	53—75 (平均 62) 容积%	24—33 (平均 28)
碳酸氢根	CO ₂ 结合力			22.26	2.2	53—78 (平均 65) 容积%	24—35 (平均 30)
氯	氯	35.5	1	35.5	3.5	350—375	98—106
氯	氯化钠	58.5	1	58.5	5.8	570—620	98—106
磷酸根*	磷	31.0	1.8	17.2	1.7	2—4.5	1.2—3.0
硫酸根	硫	32.0	2	16.0	1.6	0.5—2.5	0.3—1.5
蛋白质	蛋白质				0.41	6—8 克	14.6—19.4

* 磷酸根是以磷计算的,其原子价=1.8。其所以如此,乃是因为在细胞外液的正常 pH 时,有 20% 的磷酸根离子是以 NaH₂PO₄ 形式存在,而 80% 以 Na₂HPO₄ 存在,所以总的原子价为 (0.2×1)+(0.8×2)=1.8。
[由 Goldberger, E. (1975)]

渗透是指水从膜的一侧溶液中透过膜而到另一侧溶液中去,这后一侧溶液中所含的溶质具有较高的渗透浓度,而这种溶质是不能透过这种膜的。水是从含水量较高处移到较低处,这正象一个弥散过程。但由于水是溶剂,而不是溶解的溶质,所以水的流动是一个对流过程,类似于滤过作用。

渗透对溶质浓度的依赖性同溶质加入所引起的水的化学势能的改变有关。纯水的化学势能或重量克分子自由能(μ)的定义是:在恒定的周围温度和压力下,水的总自由能的变化(ΔF_{H_2O})对于水的克分子数目的变化(Δn_{H_2O})的比值。以算式表示如下:

- 1) 在英文文献上, molarity 系指容积克分子浓度,即 1 升溶液中的克分子数; molality 系指重量克分子浓度,即 1 公斤(仟克)溶液中溶质的克分子数,两者是稍有区别的。与此相应的名词: osmolarity 系指容积渗透克分子浓度, osmolarity 系指重量渗透克分子浓度。本书原著对这两对名词的使用并不严格区分,例如这里在“水”中的浓度项下, mM/L H₂O 和 mOsm/L H₂O 的右侧括弧内既分别注明 molal 和 osmolal, 但其分母所用水的单位仍为 L(照理应为 kg)。——译者注

$$\mu = \frac{\Delta F_{H_2O}}{\Delta n_{H_2O}} \quad (1-2)$$

事实是：水在溶液中的化学势能比之纯水的化学势能要低些。因此，当溶液与纯水之间隔着一层只对水通透的膜的时候，膜两侧就产生不相等的化学势能。这种化学势能的差别至少能够被三种过程所消除：（1）溶质能够自由地分布于膜的两侧。这就使两侧水的化学势能达到相等；但如果膜只能让水透过的话，这种效应就不可能发生。（2）水弥散过膜，从而使膜两侧的化学势能达到相等。（3）对溶液施加机械压力，以增加溶液的化学势能，使其达到与纯水的化学势能相等的水平。由此施加的机械压力即称为渗透压，这是衡量溶液与纯水的化学势能之差的一种尺度。

按照上述的定义，溶液的渗透压乃是衡量由于溶质的加入以致纯水的化学势能降低的一种尺度。由于化学势能的降低只是决定于所加入的溶质的粒子数目，因此渗透压的大小就取决于溶液中溶质的粒子数目，而不取决于粒子的大小或重量。

如果膜的一侧是纯水，而另一侧是具有一个渗透克分子强度的完全不通透的溶质，那末所产生的渗透压为 22.4 大气压或 17,024 毫米汞柱。生理盐水的渗透浓度为 308 mOsm/L_{H₂O}，则其潜在的渗透压为 5,244 毫米汞柱。这里之所以说是潜在的，乃是因为实际上能产生的渗透压不仅取决于渗透浓度，而且还取决于所采用的膜系统的通透性特征。

身体细胞的膜是具有一些通透性限制的。例如 NaCl 不能透过细胞膜，而水却很容易通过。因此，当细胞内所含的不能通透的溶质浓度为 154 mOsm/L_{H₂O}，而细胞间液所含的不能通透的溶质浓度也是 154 mOsm/L_{H₂O} 时，这两部分体液乃处于渗透平衡之中，这样，两部分之间就没有渗透流动，也即没有水的转移。凡含有不通透溶质的溶液，其渗透浓度为 154 mOsm/L_{H₂O} 时，即称为等张溶液¹⁾；而含有可通透的溶质如尿素，其渗透浓度也是 154 mOsm/L_{H₂O} 时，则称等渗溶液而不是等张，因为它不会产生跨膜渗透压。

每当细胞被暴露于高渗(或低渗)的细胞间液时，水将从细胞内流出(或流入细胞内)，直至细胞内外两部分的渗透浓度重新达到相等。总之，任何细胞内外液体中渗透浓度的不相等且溶质为不通透时，则这种渗透浓度的不相等只能通过水向细胞内或向细胞外转移而得到矫正。换句话说，细胞内液容积的所有变化(当然除生长外)，都是由改变细胞间液的渗透浓度所造成的。

已经辨明的各种正常排出的渠道，其排出液的渗透浓度都是不相等的。例如由肺排出的是水蒸汽，其渗透浓度为零。皮肤排出的、即使在大量出汗时，也是低渗的。从胃肠道流出的(例如呕吐或腹泻)，一般是等渗。由于肾脏对低渗和高渗的排出物，必定都能代偿，所以尿的渗透浓度可以按需要而随时调整，从等渗浓度的 1/6，到等渗的 4 倍。

肾-体液调节系统的典型的扰乱性动因和反应

引起水和电解质的进出不平衡的扰乱性动因²⁾ 包括以下三类：液体经过流入渠道的

1) 由于等张溶液必然是等渗的，所以为简便计，本书译文对等张、低张和高张溶液，都相应地译作等渗、低渗和高渗溶液。——译者注

2) 这里以及本书许多处，原文均为 disturbance forcings 或 forcings，难于找到恰当明瞭的译名。鉴于本章开始第二段有 disturbance factors 一词，及本书附录 A 指出 forcings 与刺激及输入可作同义语用，乃暂译为扰乱性动因或刺激。——译者注

意外获得,液体经过流出渠道的意外丧失,以及两者兼而有之。在实践中,这些扰乱性动因大多是间断地发生,而且往往历时很短,因而它们可以恰当地被称为脉波型的 (pulse forcings)¹⁾,而不是阶梯型,在此之后,乃出现恢复。因此,肾脏的代偿性反应是加速恢复过程,从而促使体液的容积和成分迅速趋于正常。

由于在意外获得或丧失的液体中,所含的水和电解质之间的比例可以不同,上述两大类的扰乱性动因又可再分为等渗的、低渗的或高渗的三种。这样,在流入的一侧,可以有等渗、低渗或高渗的意外获得;而在流出的一侧,可以有等渗或低渗的意外丧失。高渗液体的意外丧失只发生在患有抗利尿激素不恰当分泌综合征 (syndrome of inappropriate secretion of antidiuretic hormone, 缩写 SIADH) 的病人,这一情况将在第三章讨论。

表 1-2 总结了肾-体液调节系统对于上述各种扰乱性动因的不同反应。对于每种扰乱性动因所引起的液体容积和渗透浓度的变动,凡是比正常增加的,就以加号(+)表示;凡是比正常降低的,就以减号(-)表示;凡是不偏离正常的,就以零(0)表示。水在细胞外液(包括细胞间液和血浆两部分)与细胞内液之间的转移方向,则以水平的箭头(→向细胞内或←向细胞外)表示。

表 1-2 典型的扰乱性动因所引起的体液不同部分的异常变化和被控制的肾排出的反应

扰乱因素	在体液不同部分发生的效应						肾排出(尿)的变化	
	细胞外液		水的转移 (方向)	细胞内液		术 语	容 积	渗透浓度
	容 积	渗透浓度		容 积	渗透浓度			
1. 意外的液体流入								
a. 等渗的	+	0	0	0	0	等渗水合	+	0
b. 低渗的	+	-	→	+	-	低渗水合	+	-
c. 高渗的	+	+	←	-	+	高渗水合	+	+
2. 意外的液体流出								
a. 等渗的	-	0	0	0	0	等渗脱水	-	+
b. 低渗的	-	+	←	-	+	高渗脱水	-	+

对液体流入的反应

等渗液 大量的等渗盐水通过口服或由肠外输注体内时,会使血浆容积增加,导致液体继发性地转移于细胞间隙,其净的结果乃是细胞外液容积均匀地扩张。由于摄入的液体是等渗的,细胞间液的渗透浓度不发生改变,因而细胞内水分没有净的透入或透出。意外的等渗液体的流入在体液各部分所引起的这些特征性的改变,被称为等渗性水合作用。在本书中,除非另有说明,渗透浓度改变和水合作用 (hydration), 都是指细胞外液部分而言的。

肾脏对于这种细胞外液容积扩张的反应乃是增加盐和水的排出,引起尿量增加(利尿)。这种被控制的利尿很快就使细胞外液容积返回正常。

低渗液 饮用大量清水后,可增加血浆容积,使血浆渗透浓度变稀,于是液体从血浆转移于细胞间隙,这就增加细胞外液容积而降低其渗透浓度(低渗性水合作用)。细胞间

1) 原注: 关于 forcings 的分类及其特征,参阅本书附录 A。

液渗透浓度的降低,导致水分渗透入细胞内,引起细胞膨胀并使细胞内液的渗透浓度变稀。这种情况称为细胞的水中毒。肾脏对此的反应是:增加稀释尿(低渗透浓度)的排出,从而使细胞内液和细胞外液的容积和渗透浓度返回到正常。

高渗液 口服或经肠外摄入大量高渗液体,能增加血浆的容积和渗透浓度。这就引起水分从细胞间隙渗透至血浆,并引起盐分往相反方向弥散。净的结果是,细胞外液的容积和渗透浓度都增加(高渗的水合作用)。这将引起水分从细胞内渗透出来,因而减少细胞的水分和增加其渗透浓度。肾脏对此的反应是排出浓缩尿,从而使细胞内液和细胞外液恢复正常状态。

对液体流出的反应

由于肾脏只能缓和液体的异常流出量所带来的影响,因此需要调整液体的流入量以矫正之。

等渗液 等渗浓度的水和电解质液体的异常丧失,导致细胞外液容积减小,但不改变细胞内液的容积或渗透强度(等渗性脱水)。这种情况发生于出血,烧伤皮肤的血浆丢失,和胃肠道液体损失(例如呕吐和腹泻)。在所有这些情况下,肾脏的反应是保存盐和水。

低渗液 低渗汗液的大量损失导致细胞外液容积的减小及其渗透浓度的增加。这将引起水分从细胞内移向细胞间隙。净的结果是细胞脱水伴同细胞外的高渗脱水。肾脏的反应是保水排盐。

本章前面所示的流程图解,显示了肾-体液调节系统的三个重要的运转特征:(1)肾脏系统在保持内环境恒定中起着中心作用,这种内环境的恒定乃是稳定循环血液的容积和成分的直接结果;(2)由于血液是细胞外液的不可分割的部分,血液的调节对各种体液的容积和成分的最后调节是必需的;(3)肾脏调节器的功能,部分地受其它器官系统的影响。

以此一般性叙述作为基架,就可进而对肾-体液调节系统作系统的分析和综合。在下一章就开始考虑体液的组成。

(吴 襄译)

参 考 文 献

1. Gamble, J. L.: *Chemical Anatomy, Physiology and Pathology of Extracellular Fluid. A Lecture Syllabus*. 6th ed. Harvard University Press, Cambridge, Mass., 1967.
2. Goldberger, E.: *A Primer of Water, Electrolytes and Acid-Base Syndrome*. 5th ed. Lea & Febiger, Philadelphia, 1975.
3. Benson, S. W.: *Chemical Calculations*. John Wiley & Sons, Inc., New York, 1954.
4. Hammett, L. P.: *Introduction to the Study of Physical Chemistry*. McGraw-Hill Book Co. Inc., New York, 1952.

第二章 体液：正常的容积和成分

我们刚学过,肾脏在保持体液的容积和成分的稳定中,起着主要的作用。继续深入下去,我们就必须对液体和电解质的平衡,有一个基本的了解,这个课题在临床上是极为重要的。

手术后的病人,严重呕吐、腹泻或大量出汗的病人,以及水肿、休克、糖尿病昏迷或肾上腺皮质功能不全的病人,都有液体和电解质平衡的问题。本章就有关测量方法和体液的容积与成分的正常分布等方面,提供基本的知识,作为了解正常和异常情况下体液的容积和成分交换的动力学的必要背景。

测 量 方 法

体液的各个不同部分 (compartment) 的容积,是应用稀释原则来测量的。在理论上,如果我们有一种试验物质,当把它注入体液的某一部分时,它能均匀地分布于这一部分而不从尿中排出,那么,就能够测量这一部分体液的容积。在实践中,我们将一已知量的试验物质注射到待测的体液中,让它均匀地透入和扩散开来,然后从该体液采样来测定试验物质的浓度。于是,根据浓度的重新组合,即可算出该试验物质所透入的体液的容积:

$$\text{透入的容积} = \frac{\text{所注射物质的已知量}}{\text{该物质的测得浓度}} \quad (2-1)$$

在应用此法测量整体内各部分体液的容积时,试验物质通常是注入血浆的,它既可以透到体液的一部分或更多部分中,也可以被肾脏所排泄。结果,血浆中该试验物质的浓度便不断地降低,以致于难以按照标准的形式来应用稀释原则。为了克服这一困难,根据已知的试验物质的肾排泄率,设计了两种测试程序。不论采用哪一种程序,所应用的试验物质必须是: (a) 无毒; (b) 在受测的体液部分中分布均匀; (c) 在测试期间不致被代谢掉; (d) 不会改变正在测量中的体液的容积。

1. 单个剂量注射法 这可用于肾排泄率缓慢的试验物质。在此程序中,当向血浆注射一个已知量的试验物质时,该试验物质以后在血浆中的浓度,决定于两个因素: 肾对它的排泄和它可能透入其他体液部分中。当一种试验物质透入其他体液部分中并已达到均匀分布之后,它在血浆中的浓度的降低速率,就将保持恒定,并且同肾的排泄率相等。

在实践中,用此法测量某一部分体液的容积时,是将一定量的试验物质注入静脉,接着就测定随后几个时间间隔内该物质在血浆中的浓度。然后将血浆浓度的对数值同时间的关系,绘成曲线图,如图 2-1 所示。

为了测定该试验物质所透入的体液部分的容积,我们必须测到当这试验物质既已均匀地分布于这部分体液中而又未被肾排泄时那一瞬间的血浆浓度。为了获得这一瞬间的血浆浓度,需要把曲线的那一段反映恒定的肾排泄率的直线部分,向后延伸至零时。然后以此零时的血浆浓度值去除原先注入的试验物质的量,即可得到该试验物质所透入的体

液的容积。

关于稀释原则的数学基础及其应用,将在附录 B 中详细讨论。

2. 恒定输注平衡法, 这可用于肾排泄率较快的试验物质。在此试验程序中, 我们首先注射一个大剂量的试验物质, 以提高其血浆浓度。然后, 再以相当于肾排泄率的速率, 缓慢地输注试验物质。这样运用的结果, 试验物质在血浆中的浓度的变化, 将只是由于它透到其他各部分体液中去。一旦这试验物质已经均匀地分布于整个体液部分时, 它的血浆浓度就应当保持恒定, 此时即可停止输注。然后收集尿液, 直到输注结束时存留在体内的试验物质全被排出为止。这个由尿中排出的试验物质的量, 就代表输注停止时存留在体内的试验物质的量以及所产生的血浆浓度。将这一排出的试验物质的量, 除以该物质的血浆浓度, 便可求得试验物质所均匀透入的那部分体液的容积。

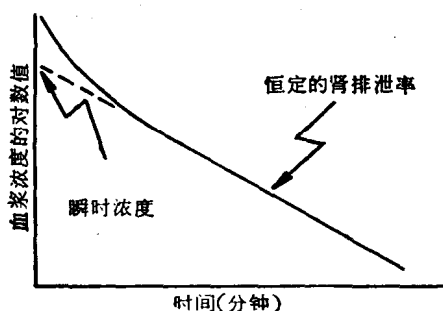


图 2-1 单个剂量注射后, 试验物质的血浆浓度

各部分体液的成分, 也都已应用稀释原则测定过。在各种试验物质容易进入的体液, 如血浆, 试验物质的浓度是用化学分析法直接测定的。然而, 在一些试验物质不易进入的体液, 如细胞间液, 溶质的浓度是间接地用稀释原则来测定的。这种方法包括测定体内的可交换的溶质的量, 以及测定含有这种溶质的体液的相应容积。然后, 在溶质容易进入与不易进入的体液部分之间, 对溶质的量和体液的容积两者都进行区分, 就可以确定在不易进入的那部分体液中的溶质浓度。

任何溶质, 例如钠离子, 它的可交换量的测定方法是: 输入一个示踪剂量的带标记 (具有放射活性) 的钠, 用 Na^* 表示之, 测量单位为每分钟的计数 (cpm); 然后, 经过一个适当的平衡期, 再测定它在血浆中的比放射活性 (specific activity), 用 Na^{**}/Na 表示之, 测量单位为每分钟的计数/毫升/毫当量 (cpm/ml/mEq)。 Na^{**} 为抽取供分析用的血浆样本中所含放射性标记钠的量 (cpm/ml), 而 Na 为此样本中所含钠离子的总量 (包括标记的与非标记的钠), 单位为毫当量/毫升 (mEq/ml), 这是用化学分析法测定的。于是, 应用稀释原则, 就可由下式得出体内可交换钠的总毫当量数:

$$\begin{aligned} \text{可交换的钠(毫当量)} &= \frac{\text{标记钠的注射量 (cpm)}}{\text{血浆中钠的比放射活性 (cpm/mEq)}} \\ &= \frac{\text{Na}^*}{\text{Na}^{**}/\text{Na}} \end{aligned} \quad (2-2)$$

体液各部分的容积

身体的总水量 (简称总体水)

完整人体的总体水, 可用三种试验物质来测定: 安替比林 (antipyrine) 及其衍生物, 重水 (D_2O), 氚化水 (HTO)。其中以安替比林为最合用, 因为它的测定方法容易, 而且分布速率很快。

用安替比林法测定的总体水,在出生时约占体重的 70%, 出生后的头两年内,就下降到体重的 60% 左右。这是由于原先较大的细胞外液容积,随着生长而逐渐减小的缘故。造成这种结果的因素有三:(1)细胞数目增多;(2)那些细胞内含水分较多的组织体积加大,如肌肉等;(3)体内脂肪量增加。

在成年人(以 70 公斤体重计),用安替比林法测定的总体水,男子平均约为 42.0 升(占体重的 60%),女子平均约为 35.0 升(占体重的 50%)。用重水和氟化水作为试验物质时,也得到相似的结果。

按组织来分,总体水的分布,如表 2-1 所列。注意:身体水分的绝大部分,分布于肌肉(占体重的 32%)、皮肤(13%)和血液(7%);只有极少一部分,分布在骨骼(3.5%)和脂肪组织(0.01%)。

表 2-1 一个体重 70 公斤的男子,水分在各种组织中的分布及其运动的动力学

组 织	占体重的%	含 水 %	组织中水分占体重的%	水含量(升)	重水达到平衡的时间(分钟)
肌肉	41.7	75.6	31.53	22.10	38
皮肤	18.0	72.0	12.96	9.07	120—180
血液	8.0	83.0	6.64	4.65	红细胞 1/60
骨骼	15.9	22.0	3.50	2.45	120—180
脑	2.0	74.8	1.50	1.05	
肝	2.3	68.3	1.57	1.03	10—20
胃肠*	1.8	74.5	1.34	0.94	胃液 20—30
脂肪组织	±10.0	10.0	0.01	0.70	
肺	0.7	79.0	0.55	0.39	
心	0.5	79.2	0.40	0.28	
肾	0.4	82.7	0.33	0.25	
脾	0.2	75.8	0.15	0.10	
全身总计	100.0	62.0	60.48	43.40	180

注:表中第三纵列的数值,是由第一纵列乘以第二纵列,再除以 100 而得。

表中第四纵列的数值,是由第三纵列乘以 70 公斤,再除以 100 而得。

[引自 Ruch, T. C. 和 Patton, H. D. (1974) 而略加修订。水分的数值引自 Skelton (1927); 重水平衡的数值引自 Edelman (1952)]

* 原文仅写肠,实际应包括胃在内,是指整个消化道。——译者注

总体水还随性别而异。这种差异主要是由于体脂量不同所致,正常情况下,体脂约占体重的 15%。由于按单位重量计算时,脂肪组织的含水量较少,因此在一个胖的个体,其水分相对地要比一个瘦的少。女子在青春期以后,按单位体重计算的总体水,要比男子为少。这是由于女子体脂量较多的缘故,这同血液中的雌性激素的水平是有关系的。

总体水的这种个体间的正常差异,主要是由于体脂量的变动,不论在男性还是女性,总体水所占体重的百分比,是同脂肪组织的总量成反比的。可是,瘦的身体质块(lean body mass)所含水分的百分比,基本上恒定在 73% (瘦的身体质块的定义为:骨占 15%,脂肪占 10%,组织占 75%)。这一恒定性就是下述测定过量脂肪(excess fat)的经验公式(Pace 和 Rathbun, 1945)的基础:

$$\text{过量脂肪的 \%} = 100 - \frac{\text{水的百分比}}{0.732} \times 100 \quad (2-3)$$