

高等医学院校选修教材

主编：王天佑

# 血液流变学

新疆科技卫生出版社（W）

XAP4/107

97  
R531.3  
14  
2

# 血液流变学

主编 王天佑  
编委 王天慧 王瑞兴 伍建中 刘泽富  
沈祖培 杨有志 张亚荣 赵润芝  
秦任甲 莫肖琦 雷家甲



3 0151 2882 4

新疆科技卫生出版社 (W)



C 411272

责任编辑：张焕鹏  
封面设计：李齐新

血液流变学  
王天佑 主 编  
张亚鞅 审 订  
郝维洲 责任校对

---

新疆科技卫生出版社(W) 出版

新疆新华书店发行

新疆新华印刷厂印刷

850×1166毫米 大32开 9.375印张 235千字

1992年12月第2版 1992年12月第1次印刷

印数： 精装1—200  
平装1—6800

---

ISBN 7-5372-0608-2/R·109

定价： 精装：11.00元  
平装： 5.90元



## 再 版 序

血液流变学的研究在我国起步较晚，但近年来有较快的发展，尤其在临床应用研究方面相当活跃，并且迅速地同祖国医学中“活血化瘀”理论相联系，在中西医结合研究中开拓了新路。广大医务工作者迫切需要了解血液流变学基础理论及其在医学科学和临床各学科的作用，可惜这方面的书籍太少，难于满足这方面的需要。欣闻王天佑教授主编的血液流变学一书再版，介绍我在教学过程应用此教材的一点体会，以供参考。

血液流变学作为生物流变学的一门分支学科，在研究血液、血细胞、血浆成分和血管形变和流动特性时，常常涉及到生物力学和流体力学的基本理论，要应用一些数学公式，初学者常感困难，本书用简单明瞭文字进行了通俗易懂的科学性阐述，这对从事血液流变学工作有很大的帮助。

血液流变学不仅与血液在大血管内循环流动有关，而且与微循环血液灌注密切相关，血液流变性的变化，直接影响到组织和器官的正常血液供给。本书从血液流变性变化的病理生理学基础上阐述了与许多疾病发病学关系，又对各种疾病血液流变性变化的病理意义作了精辟的解释，对于疾病诊断、治疗和预防有重大作用。

血液流变性测试仪器发展迅速，本书从测试原理进行了综合介绍，着眼我国现状，对当前应用普遍的测试方法作了重点阐述，对测试参数病理生理意义作了浅近的说明，无疑对应用者有较大的参考价值。本书的再版将会受到广大读者欢迎。

张亚荣

1992.9.于上海第二军医大学

## 前 言

血液流变学作为一门新兴边缘学科，近十几年来在我国发展十分迅速。但因基础理论相对比较薄弱，影响了学科的应用和发展。为此，国内许多重点医科大学先后给研究生开课并为医学生增设了选修课。本教材正是为了弥补国内医学院校该学科教材的空白而编写的。

教材第二版在保留第一版特色的基础上对基础理论进行更加深入系统地阐述，并对学科最新研究进展、临床检测手段和方法的改进、改善血液流变性质药物开发等内容进行增补修订，力求能反映该学科国内外研究最新水平并注重普及基础理论和介绍研究方法，从而为临床应用和研究打下基础，着重体现时代性、科学性和实用性。

本教材可作为医学院校研究生教材、医学生选修教材，可供24~42学时教学选用，亦可作为临床医学工作者参考用书。

参加本教材编写人员有石河子医学院王天佑副教授（1~6章），第一军医大学物理教研室杨有恕副教授（1~3章），桂林医学院物理教研室秦任甲副教授（1~3章），石河子医学院一附院王天慧主治医师（4~6章），第二军医大学张亚军教授，龚肖琦老师（4~5章），汉中市传染病医院雷震甲主任医师（4~5章），春光医学仪器厂王瑞兴主治医师（第4、6章），解放军二三八医院伍建中副主任医师（4~5章），第四军医大学二附院刘泽富副主任医师（第5章），南昌医科所沈祖培主任（第5章），延安医学院赵润芝教授（第6章）。

王天佑副教授对全文进行了归纳整理，改写订正。军内著名微循环专家张亚军教授热忱为本书作序，使我们倍感鼓舞。

由于血液流变学还是发展中的学科，研究前景极其广阔，临床应用十分广泛，编写中难免有疏漏之处，望指正。

编 者  
一九九二年九月

# 目 录

<b>第一章 血液流变学概述</b> .....	(1)
§1—1 血液流变学的历史起源.....	(1)
一、流变学.....	(2)
二、生物流变学.....	(2)
§1—2 血液流变学的研究内容.....	(3)
§1—3 研究血液流变学的重要意义.....	(4)
<b>第二章 血液流变学基础</b> .....	(7)
§2—1 应力 应变.....	(7)
一、应力.....	(7)
二、应变.....	(8)
三、应力—应变关系.....	(9)
§2—2 牛顿流体.....	(10)
一、牛顿粘滞性定律.....	(10)
二、本构方程 流动曲线.....	(13)
§2—3 非牛顿流体.....	(14)
一、非牛顿流体 屈服应力.....	(14)
二、表观粘度.....	(15)
三、非牛顿流体的分类.....	(16)
四、非牛顿流体的几种本构方程.....	(18)
§2—4 粘弹性体.....	(22)
一、粘弹性体的特点.....	(22)
二、粘弹性体的力学模型.....	(22)

三、动粘弹性.....	(27)
§2—5 流体在圆管内的流动.....	(30)
一、Stokes关系式.....	(30)
二、非牛顿流体Poiseuille流动的一般表达式.....	(32)
三、牛顿流体的 Poiseuille 流动.....	(35)
§2—6 湍流.....	(36)
一、临界雷诺数.....	(36)
二、阻力系数及湍流的流量.....	(37)
<b>第三章 血液的流变特性.....</b>	<b>(41)</b>
§3—1 血液的组成及其重要理化性质.....	(41)
一、血液的组成.....	(41)
二、血液的重要物理化学性质.....	(42)
§3—2 血液的粘度.....	(45)
一、描述血液粘滞性的几种常用粘度.....	(45)
二、血浆的粘度.....	(45)
三、血液的粘度.....	(46)
§3—3 红细胞的流变性.....	(60)
一、红细胞的悬浮稳定性.....	(61)
二、红细胞的变形性.....	(62)
三、红细胞的聚集性.....	(75)
§3—4 血小板流变性.....	(77)
一、血小板粘附, 聚集.....	(77)
二、血小板流态, 止血及血栓形成.....	(84)
§3—5 白细胞的流变性.....	(87)
一、白细胞的趋边, 粘附.....	(87)
二、白细胞的变形.....	(88)
§3—6 血液在圆管内的流动.....	(89)
§3—7 微血管中的血液流变性.....	(92)



一、血浆层	(93)
二、轴向集中	(95)
三、Fahraeus—Lindqvist效应	(97)
四、Fahraeus—Lindqvist效应的逆转	(101)
五、微循环中的脉动流	(102)
六、血细胞在微血管中的流交行为	(104)
<b>第四章 血液流变诸项指标测定技术</b>	(106)
§4—1 粘度的测定	(106)
一、毛细管粘度计	(106)
二、锥板粘度计	(109)
§4—2 红细胞变形性的测定	(112)
一、粘性法	(113)
二、电导法	(114)
三、激光衍射测量法	(116)
四、微吸管法	(117)
五、核孔膜滤过法	(118)
§4—3 红细胞聚集性测定	(120)
一、粘性测量法	(120)
二、红细胞沉降率	(121)
三、红细胞电泳率测定	(124)
§4—4 红细胞压积与纤维蛋白原测定	(126)
§4—5 血小板粘附和聚集功能的测定	(130)
§4—6 血液粘弹性测定	(136)
§4—7 微循环参数测定	(140)
§4—8 血液流变测定的标准化问题	(156)
<b>第五章 血液流变学在临床中的应用</b>	(160)
§5—1 临床检验中的各项指标及相互关系	(162)
§5—2 高粘滞综合征的诊断分型	(165)

§5—3	在疾病诊断、治疗与预防中的价值·····	(175)
一、	心脑血管疾病诊断、治疗与预防中的价值·····	(176)
二、	癌转移预防中的意义·····	(180)
三、	休克与白细胞·····	(186)
四、	中医机理探讨与中药疗效判定·····	(196)
五、	其它疾病诊断治疗中的作用·····	(199)
§5—4	血液稀释疗法·····	(205)
§5—5	降低血液粘度途径和方法·····	(218)
§5—6	血液流变学及组织供氧与药物治疗的关系·····	(221)
<b>第六章</b>	<b>血液流变学研究进展</b> ·····	(224)
一、	冈小天提出临床血液流变学八个课题·····	(224)
二、	第七届国际生物流变学会议进行20个专题讨论 ·····	(228)
三、	Copley教授提出血管—血液器官概念·····	(230)
四、	电粘性效应的研究·····	(231)
五、	血液流变理论在癌症研究方面的进展·····	(233)
六、	蝮蛇抗栓酶临床应用研究·····	(236)
七、	用微孔过滤法测定红细胞变形性的研究进展·····	(243)
八、	静止层位置对于细胞电泳仪测量精度影响的研究 ·····	(254)
九、	急性脑血管病的预测研究进展·····	(264)
十、	血管的粘弹性研究·····	(282)
十一、	影响血液流变性质的中草药研究·····	(288)

## 第一章 血液流变学概述

血液流变学 (Hemorheology) 是研究循环血液及其组分流动和变形的科学。它是一门新兴边缘交叉学科, 于1951年由 A. L. Copley 首先提出。几十年来, 血液流变学的发展日益广泛深入, 在基础医学和临床医学中越来越显示出它的重要意义。

本章简要介绍血液流变学的历史起源, 研究内容, 以及血液流变学在医学发展中的意义。

### §1—1 血液流变学的历史起源

十七世纪后期, 人们开始注意到血液流变现象。1675年 Leeuwenhok 报导了红细胞通过毛细血管发生变形的现象。1750年 Boerhaave 在球结膜血管中看到红细胞的轴流现象。1840年 Poiseuille 观察了动物肠系膜微血管中的血液流动, 并在玻璃细管中研究了均质流体的流动规律, 提出 Hagen-Poiseuille 定律, 阐述了均质流体在圆管中流动时, 流量、压力和阻力间的关系。1906年 Denning 等看到血液粘度可以随细管管径变化而改变这一现象。1931年 Fahraeus 等观察了血液在不同管径的细管中流动, 发现在一定的管径范围内, 血液表观粘度随管径变细而降低, 提出了 Fahraeus-Lindqvist 效应。随之, 在流变学和生物流变学之后提出血液流变学概念。因此, 我们先介绍流变学和生物流变学。

## 一、流变学 (Rheology)

1920年,美国物理化学家E.C.Bingham研究了油漆、糊状粘土、印刷油墨、树脂、塑料等物质的流动性质,认为物质的流动和变形在科学上具有普遍的重要意义,从而提出了“流变学”的概念。流变学是研究在应力作用下物质流动和变形的科学。

“rheo”是希腊语中“流动”的意思。在他的倡议下,他和其他学者Weissenberg, Reiner, Scott-Blair等,于1929年成立了流变学会,为流变学作为一门独立学科奠定了基础。

在当时,研究变形与流动已有弹性力学和流体力学,为什么还要建立流变学这一新的学科呢?这是因为弹性力学研究的是物体的弹性变形,其基本的物性公式是虎克定律,即应变与应力成正比。流体力学研究的是流体的牛顿流动,其基本的物性公式是牛顿粘滞性定律,即切变率与切应力成正比。流变学是不同于弹性力学和流体力学的学科,它主要研究流体的非牛顿流动和固体的塑性变形,并且用本构方程来表达物质的多样性和个性。

## 二、生物流变学 (Biorheology)

1948年荷兰Scheveningen召开的第一届国际流变学会议上,A. L. Copley做了关于“生物流变学诸问题”的报告,首次提出了生物流变学这一概念。生物流变学是流变学与生物学或医学之间的交叉学科。它研究生物机体内的流变现象,和构成生物机体的物质的流变特性。它既要研究生物流体(如血液、淋巴、脑脊髓液、眼球内的玻璃体液、痰、唾液、关节囊液、精液、子宫颈粘液等等),软组织(血管、肌肉、肺、心脏、膀胱、肠系膜、眼睛晶状体、软骨),骨骼等的流变特性,还要研

究细胞质的流动和细胞的变形等。到目前为止，在生物流变学中研究得最为广泛深入的是血液和血管流变学。

1951年在美国物理学会第二十五届年会流变学会上，A. I. Copley教授在他的报告中又首次提出“血液流变学”的概念。从60年代开始，美国心、肺、血液研究院就大力资助血液流变学方面的研究工作，使血液流变学在美国首先发展起来。以后，西欧、日本、澳大利亚也先后蓬勃开展了血液流变学的研究工作。我国在70年代才开始血液流变学的研究工作。十几年来，这一学科发展非常迅速，不少科研单位、越来越多的医学院校，大、中、小医院开展了血液流变学的教学、科研和临床应用；翻译和编译出版了不少有关专著；加速了检测仪器的研制和开发；特别是“中国血液流变学杂志”于1991年创刊，将进一步推动我国血液流变学研究工作向前发展。

## §1—2 血液流变学的研究内容

血液流变学用物理学的方法研究血液与血管的流变问题；其研究内容非常广泛。A. I. Copley认为“血液流变学是在宏观、微观、亚微观水平上，研究血液的细胞成分和血浆的变形和流动特性，以及与血液直接接触的血管结构的流变特性”。因此，血液流变学首先要研究全血的流变特性。众所周知，可以把血液看成是一个悬浮系统。在有形成分中，大部分是红细胞以及少量的白细胞和血小板，它们悬浮在血浆中。血浆是极复杂的高分子化合物溶液，即是蛋白质—包括白蛋白、球蛋白、纤维蛋白原等溶解在稀盐溶液中，血浆还有少量的其他物质，如激素、酶和代谢产物。可想而知，全血的流变特性非常复杂。其次，血液流变学要研究血细胞，尤其是红细胞的流变特性，白细胞和血小板的流变特性也有不少的研究。第三，血液流变学要研究微循环的流变

性，毛细血管网中血液流动特征，白细胞如何分布在流动着的毛细血管血流中。第四，血液流变学还要研究毛细血管外间隙中组织液和淋巴液以及淋巴管的流变性，并提出“血周流变学”（Parahemorheology）的概念。此外，它还研究血液成分和血管系统与引入的外物，如药物、血浆扩容器、人造装置之间的相互作用。

如按研究水平的不同，血液流变学可分为：

1. 宏观血液流变学（Macroscopic Hemorheology）：它把血液看作连续介质，研究全血在各种切变率下的表观粘度、血浆粘度、血液密度、血液及血管壁上的切应力分布。

2. 细胞血液流变学（Cell Hemorheology）：在细胞水平上研究血液流变特性。如研究红细胞的变形性、红细胞形态和大小、红细胞表面电荷、红细胞密度、白细胞的流变特性、血小板的聚集等等。

3. 分子血液流变学（Molecular Hemorheology）：在分子水平研究血液成分的流变特性。如研究钙离子与红细胞膜糖蛋白之间的相互作用、血浆蛋白各成分对血浆粘度的影响、纤维蛋白原或其他血浆蛋白对红细胞聚集的影响、唾液酸对红细胞表面电荷的作用。

4. 普通血液流变学（Common Hemorheology）：研究宏观血液流变学、细胞血液流变学和分子血液流变学之间的相互关系。

5. 临床血液流变学（Clinical Hemorheology）：就是将血液流变学应用于临床，研究血管—血液器官的功能紊乱、病理状态和疾病过程等的临床表现以及这些疾病的诊断、治疗和预防。

### §1—3 研究血液流变学的重要意义

血液维持着生命，古希腊哲学家认为“血液就是生命”。人

体的正常生理功能及防御功能必须要有正常的血液流变状态，只有这样，才能保证脏器组织得到正常的血液灌注，及时供给氧与营养物质，排出代谢产物，使组织有一个稳定的内环境。正常的血液流变状态，除与心泵、血管结构功能密切有关外，还取决于血液本身的流变性质。如果血液流变性质发生异常，则直接影响到组织的血流灌注、组织缺水缺氧、代谢失调、功能障碍、出现一系列严重的后果。

国内外的研究表明，造成人们死亡和致残率最多的心、脑血管病，恶性肿瘤的发生发展都与血液流变有关。动脉硬化、心肌梗塞、脑血管病变等都伴有血液流变性质的异常。恶性肿瘤时癌细胞的转移有人认为与血液流态有着密切关系。有些资料报导在某些心血管病出现明显症状前，往往一种或数种血液粘滞因素已有改变。因此，血液流变因素的检查可能有利于早期查出潜在的疾病。其它如休克、糖尿病、烧伤、血液病等都有血液流变性质的改变，严重时会导致微循环障碍，出现一系列病理生理学变化。血液流变因素在一些基本病理过程(如炎症、血栓形成等)中，血细胞聚集、血液粘度增高、血细胞变形等也起着重要作用。

目前有些学者已从改善血液流变状态角度来寻找药物与其它有效措施，以期能提高疗效，控制疾病的发展。在这方面已有报道，如 Pentoxifyllin 等对治疗动脉硬化性下支血管病有较好的疗效。人们还在探索寻找一些药物，能特异地吸附在红细胞、血小板以及内皮细胞表面，对这些细胞膜的电双层结构以直接影响，改变膜的 $\zeta$ 电位、电荷、膜间电位曲线，改善由于细胞聚集引起的血液粘度增加，血小板的粘附聚集，从而起到抑制血栓形成的效果。因此，血液流变学的研究对病理学、病理生理学、诊断学、药理学、预防医学都有重要意义。具体来说，第一、血液流变学的研究可以为研究微循环，特别是微血管网中血流调节的

一些物理量（血压、阻力等）提供定量资料，有利于对血流调节机理的阐明，同时亦有可能对某些疾病的发病机理，如动脉粥样硬化形成、血栓形成机理等提出新的看法；第二、进一步认识血液中血细胞结构和功能的关系，有利于对血细胞的深入认识；第三、血液流变学的某些参数可以作为诊断某些疾病的指标之一；第四、根据治疗过程中某些血液流变学指标的变化，可能对预后提出可靠依据；第五、更重要的是随着研究的深入，相信今后可根据血液流变变化及临床其他生理生化指标的变化来预测某些疾病发作的可能性，这在预防医学上将是十分有意义的；第六、根据药物治疗前后血液流变指标的变化，结合临床表现，血液流变学可以作为检查某种药物疗效的一种手段；第七、血液流变学在治疗上也能发挥作用，能为某些疾病提供有效治疗的新方法；第八、血液流变学的研究对人工脏器材料的选择，血液代用品的研究也有较大的帮助。在我国除上述方面以外，采用血液流变学研究方法，来探讨中医理论及阐明中医药的作用机理将会成为重要方面。

### 思 考 题

1. 定性分析影响血液流量的因素。如果人体血流灌注不足，会引起哪些生理变化？应采取什么治疗措施？
2. 血液流变学是一门什么样的学科？有哪些主要研究内容？它在医学发展中有何重要意义？

### 参考文献

1. 陈文杰：血液流变学，天津科学技术出版社，1987
2. 陈槐卿：血液流变学及临床应用，四川教育出版社，1989



## 第二章 血液流变学基础

血液流变学以流变学理论为基础，与多种学科相关联。为了便于学习和研究血液流变学，本章将介绍切应力、切变率、本构方程、牛顿流体和非牛顿流体、粘弹性体等流变学基本概念和理论。

### §2—1 应力 应变

物体受到外力作用后就要产生内力和变形，用以描述物体内部任何部位的内力和变形特征的力学量是应力和应变。

#### 一、应力 (Stress)

为了说明应力的概念，我们设想一个在外力作用下处于平衡状态的物体，P为物体内部任意一点，在P点处任取一微小面积元 $\Delta S$ ， $\vec{\Delta F}$ 为面元下侧对上侧的作用力，且为分布力，如图2—1所示。如令

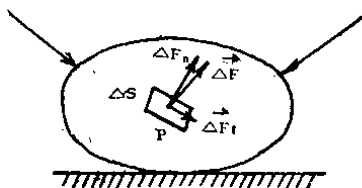


图2—1 应力

$\Delta S$ 无限缩小面趋于P点，则在内力连续分布的条件下， $\vec{\Delta F} /$