

# 生物流变学

第二版

日岡小天 著

科学出版社



# 生物流变学

第二版

(日) 岡 小天 著

吴云鹏 陶祖莱 刘志威 译  
文宗曜 刘国华

科学出版社

1988

## 内 容 简 介

本书系统地阐述了生物流变学(重点是血液流变学)的基础理论、实验分析、医学应用及近年来的研究成果。内容丰富,推导简明,参阅文献广泛,且密切联系应用,是有关生物流变学的一本较好读物。全书共分十四章,主要介绍生物流变学的理论基础、血液的粘度及红细胞变形、血液与血管的电特性、微循环及血管流变学、临床血液流变学。本书还附有若干“拾遗”,介绍了有关人物及事件的起源、历史背景内容等,饶有趣味。

本书可供从事医学、力学、生物学、生态学以及生物医学工程的科技人员和医务人员阅读,也可作为大专院校有关专业师生的参考书。

岡 小天 著

バイオレオロジー

(改订改题)

葦華房, 1984

## 生 物 流 变 学

### 第 二 版

〔日〕岡 小天 著

吴云鹏 陶祖莱 刘吉成 译  
文宗曜 刘国华

责任编辑 马素卿

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

\*

1980年11月第 一 版 开本: 787×1092 1/32

1988年 3月第 二 版 印张: 11 3/8

1988年 3月第二次印刷 字数: 250,000

印数: 3001—8,400

ISBN 7-03-000241-5/Q·46

定价: 3.20 元

## 中译本序言

由重庆大学生物工程研究所吴云鹏教授告知,拙著《生物流变学》(袁华房,1984)在吴云鹏教授诸先生的努力下已译为中文。对此表示衷心的祝贺。

据知,在中华人民共和国,以重庆、北京、上海、武汉、成都为主的各地的大学、研究所的生物工程专家们早已开展了不少活动。此中译本若对中国各大学和研究生的学生及研究工作者在教育、研究方面起到一定的作用,则作者将不胜欣慰。

可以看出,生物工程、生物力学、生物流变学等研究领域,的确在全世界正迅猛发展。十分明显,这些领域作为医学、生物学的边缘学科今后将会进一步发展。众所周知,对于近代医学,将各种理工科手段引入诊断、治疗而获得的成果日益增多。并且,对于以血液循环为主的生命中诸多运动的理解,生物流变学是必不可缺少的。

恳望本书对中华人民共和国的科学技术发展聊有所助。仅此为中译本序。

周 小天

1987 年秋

袁华房

## 译 者 的 话

生物流变学是近代发展起来的一门新兴学科,它对医学、生物学、生态学和生物医学工程等都具有重要的理论意义与实用价值。目前,有关生物流变学的国内外学术会议频繁,“生物流变学”、“临床血液流变学”等国际学术专刊相继问世。

生物流变学可以说是医学、生物学、流体力学、固体力学、生物化学、物理学等方面综合起来的学科。它研究构成生物体主要物质的流变特性及生物组织的力学特性,观察分析生物体内器官、组织乃至细胞的流变现象和它们的应用,特别是在临床医学方面的应用等问题。随着医学和流变学的进展,生物流变学亦得到迅猛发展。

本书作者是日本著名学者岡小天教授,他在原作《流变学——生物流变学》\*基础上进行了较大的修订,删去了一些繁琐的数学推导,增加了红细胞的变形、血液的电特性、红细胞的沉降、血管壁的电特性及通透性,以及临床血液流变学等内容。

本书第一、二、三、四、七章由吴云鹏译,第八、十、十一、十四章由陶祖莱译,第五、六章由文宗曜译,第九章及十二、十三章分别由刘国华、刘志成译。全书分别由吴云鹏、陶祖莱校阅。原书的印刷错误或其他需解释的问题,译文已作了纠正和注释。但是,由于译者的水平有限,译稿中一定会有许多错误或不当之处,恳望广大读者予以批评指正。

译者

1986年3月

---

\* 中译本书名为《生物流变学》,吴云鹏、陶祖莱译,科学出版社,1980年。——译者注

## 序 言

本书为物理科学丛书(7)《流变学——生物流变学》的修订版。第一版约500页,由于采用小号铅字,读者阅读颇感困难。并且,自初版问世以来,已有十年。在这一时期,生物流变学的确又有惊人的发展。因此,有必要出修订版。

生物流变学是关于生物方面的流变学,它的范围甚广。首先记述其国际活动。由于美国生理学家 Copley 教授的促进,生物流变学国际杂志 BIORHEOLOGY 于1962年由 Pergamon 出版社发刊。而且,国际血液流变学学术讨论会(International Conference on Hemorheology)于1966年在冰岛首都雷克雅未克召开。当时成立了国际血液流变学学会。在此会议上,决定每三年召开一次国际会议,每次将 Poiseuille 金质奖章授予一名学者。1969年,在海德堡会议上,决定将国际血液流变学学会的范围,扩大成为国际生物流变学学会(International Society of Biorheology)。此后,生物流变学国际会议又分别在雷霍沃特(以色列)、里昂(法国)、拉霍亚(美国)、东京-大坂、巴登-巴登(联邦德国)召开。

我国于1977年12月成立了日本生物流变学学会,此后每年年会在各地召开。生物流变学的研究日益盛行,从年会论文集所收集论文的数量与质量就可窥见一斑。

生物流变学的研究对象,涉及的范围非常广泛。目前,研究最盛行的是关于血液和血管的生物流变学,亦即血液流变学。本书限于篇幅,仅限于血液流变学。

在撰写中,较第一版增加了若干新的章节——红细胞的

可变形性、血液的电特性、红细胞的沉降速度、血管壁的电学特性、血管壁的通透性,以及临床血液流变学,内容新颖。

由于本书为物理科学丛书之一,在阐述中着重从物理学角度建立逻辑的严密性和连贯性,并力图使生物流变学系统化。另一方面,由于本书内容是以血液循环为主题,常常考虑医学方面的读者,故尽可能地减少数学公式,而着重于理解现象的本质。

本书尽可能引入国内、外最新研究成果。从杂志、单行本等引用的图表,均标记出文献的出处。对被引用文献较多的著者,在此深表谢意。由于篇幅所限,其他很多重要文献未能引用,对此深感遗憾,并希鉴谅。

生物流变学是多种学科所形成的边缘学科。涉及流体力学、流变学、生物力学、循环生理、微循环、心血管系统医学等等。这是有生命力的学科,其范围和对象在不断地变化中。

本书是生物流变学的入门书,若能对有关的各分支领域的理工科和医学的研究工作者有所裨益,则笔者诚感幸甚。此外,这些内容若对正在进行新的研究的学生以指导和激励,则更会使笔者喜悦。

裳华房的远藤恭平先生从修订版约定后的两年多的时间里,给笔者以耐心的鼓励。在整个出版过程中,真喜屋富孜先生和小林雅子女士竭尽全力予以细心的校正,对此,笔者表示由衷的谢意。

周 小天

1984年7月

# 目 录

|                        |     |
|------------------------|-----|
| 中译本序言.....             | i   |
| 译者的话.....              | ii  |
| 序言.....                | iii |
| 第一章 流变学与生物流变学.....     | 1   |
| § 1. 流变学与生物流变学 .....   | 1   |
| a. 流变学 .....           | 1   |
| b. 流变学同其他领域的关系 .....   | 2   |
| c. 生物流变学 .....         | 3   |
| d. 有关流变学的学会和国际会议 ..... | 3   |
| 第二章 流变学概念.....         | 6   |
| § 2. 固体与流体 .....       | 6   |
| a. 应力与应变 .....         | 6   |
| b. 固体与流体的区别 .....      | 8   |
| § 3. 牛顿流动 .....        | 8   |
| § 4. 非牛顿流动 .....       | 11  |
| § 5. 圆管内的层流 .....      | 12  |
| a. 层流 .....            | 12  |
| b. Stokes 关系式 .....    | 13  |
| c. 速度分布 .....          | 14  |
| d. 流量 .....            | 15  |
| e. 平均速度 .....          | 16  |
| f. 牛顿流体 .....          | 16  |
| g. 切变率 .....           | 17  |
| § 6. 锥板粘度计 .....       | 18  |
| § 7. 湍流 .....          | 20  |



|                       |    |
|-----------------------|----|
| a. 湍流 .....           | 20 |
| b. 阻力系数 .....         | 21 |
| § 8. 悬浮液 .....        | 23 |
| a. 粘度 .....           | 23 |
| b. 粘度和颗粒形状 .....      | 24 |
| c. 颗粒的运动 .....        | 26 |
| § 9. 胡克弹性 .....       | 27 |
| § 10. 粘弹性 .....       | 27 |
| a. 时间效应 .....         | 27 |
| b. 粘弹性 .....          | 28 |
| c. 动态粘弹性 .....        | 30 |
| d. 向量与复数表示 .....      | 31 |
| § 11. 应变能密度函数 .....   | 33 |
| § 12. 触变性 .....       | 35 |
| <b>第三章 循环</b> .....   | 37 |
| § 13. 循环系统 .....      | 37 |
| a. 血液循环 .....         | 37 |
| b. 体循环与肺循环 .....      | 38 |
| c. 微循环 .....          | 39 |
| d. 血液的压力、速度、切变率 ..... | 40 |
| § 14. 血管 .....        | 43 |
| a. 动脉的成分 .....        | 43 |
| b. 动脉的几何学性质 .....     | 44 |
| c. 动脉内的血流 .....       | 44 |
| d. 小动脉 .....          | 45 |
| e. 毛细血管 .....         | 46 |
| f. 小静脉与静脉 .....       | 47 |
| § 15. 血液 .....        | 50 |
| a. 血液 .....           | 50 |
| b. 红细胞 .....          | 50 |

|                            |           |
|----------------------------|-----------|
| c. 白细胞 .....               | 53        |
| d. 血小板 .....               | 54        |
| e. 血浆 .....                | 54        |
| f. 血浆蛋白 .....              | 56        |
| <b>第四章 血液的粘度</b> .....     | <b>58</b> |
| § 16. 血液的非牛顿性 .....        | 58        |
| § 17. 红细胞悬浮液的非牛顿性 .....    | 59        |
| a. 压差-流量曲线 .....           | 59        |
| b. 流体阻力 .....              | 61        |
| § 18. 血浆和血清的粘度 .....       | 61        |
| § 19. 红细胞的变形及取向 .....      | 63        |
| a. 红细胞的变形 .....            | 63        |
| b. 红细胞的取向 .....            | 64        |
| § 20. 红细胞的聚集 .....         | 65        |
| § 21. 血液非牛顿性的机理 .....      | 68        |
| § 22. Casson 公式 .....      | 68        |
| a. Casson 图形 .....         | 68        |
| b. 血液的屈服应力 .....           | 71        |
| c. 圆管内的定常流动 .....          | 72        |
| § 23. 影响血液粘度的因素 .....      | 75        |
| a. 红细胞压积 .....             | 75        |
| b. 红细胞的可变形性 .....          | 77        |
| c. 渗透压 .....               | 78        |
| d. 血浆蛋白 .....              | 79        |
| e. 注入液 .....               | 79        |
| f. 抗凝剂 .....               | 80        |
| § 24. 触变性 with 粘弹性 .....   | 80        |
| § 25. 血液的凝固 with 粘弹性 ..... | 84        |
| a. 血液的凝固 .....             | 84        |
| b. 血液在凝固过程中的粘度 .....       | 86        |

|                           |     |
|---------------------------|-----|
| c. 血液在凝固过程中的粘弹性 .....     | 87  |
| § 26. 疾病与血液粘度 .....       | 89  |
| a. 循环的异常 .....            | 89  |
| b. 血浆的异常 .....            | 89  |
| c. 红细胞的异常 .....           | 90  |
| d. 白细胞和血小板的异常 .....       | 91  |
| e. 疾病与血液的粘度及粘弹性 .....     | 92  |
| f. 血管内红细胞的聚集 .....        | 93  |
| <b>第五章 红细胞的可变形性</b> ..... | 94  |
| § 27. 红细胞的可变形性 .....      | 94  |
| § 28. 红细胞的形态 .....        | 96  |
| a. 形状 .....               | 96  |
| b. 膜的构造 .....             | 99  |
| § 29. 可变形性的测量方法 .....     | 100 |
| 1a. 粘度法 .....             | 101 |
| 1b. 逆向旋转流变仪 .....         | 102 |
| 1c. 衍射法 .....             | 102 |
| 1d. 离心沉积法 .....           | 104 |
| 2a. 底部附着法 .....           | 104 |
| 2b. 纤维约束法 .....           | 105 |
| 3a. 微吸管法 .....            | 106 |
| 3b. 过滤法 .....             | 107 |
| § 30. 影响红细胞可变形性的诸因素 ..... | 108 |
| a. 膜的弹性 .....             | 108 |
| b. 膜的粘弹性 .....            | 109 |
| c. 内粘度与渗透压 .....          | 109 |
| d. ATP 含量 .....           | 109 |
| e. 胆固醇含量 .....            | 110 |
| f. 氧分压 .....              | 110 |
| § 31. 可变形性的临床意义 .....     | 111 |

|                           |     |
|---------------------------|-----|
| a. 闭塞性动脉疾病 .....          | 111 |
| b. 湍流的产生与可变形性 .....       | 113 |
| c. 异常红细胞 .....            | 113 |
| <b>第六章 血液的电性质</b> .....   | 115 |
| § 32. 界面的动电现象 .....       | 115 |
| a. 电偶层 .....              | 115 |
| b. 电泳 .....               | 117 |
| c. 流动电位 .....             | 118 |
| d. 固相的表面电荷 .....          | 119 |
| e. 电渗 .....               | 119 |
| § 33. 血液细胞的电性质 .....      | 119 |
| a. 迁移率 .....              | 119 |
| b. 疾病与迁移率 .....           | 120 |
| c. 血液细胞的电荷 .....          | 121 |
| § 34. 细胞膜间的势能曲线 .....     | 122 |
| <b>第七章 红细胞的沉降速度</b> ..... | 124 |
| § 35. 红细胞沉降现象 .....       | 125 |
| § 36. Stokes 公式 .....     | 127 |
| § 37. 不伴随红细胞聚集的沉降现象 ..... | 129 |
| a. 红细胞形状的影响 .....         | 129 |
| b. 红细胞可变形性的影响 .....       | 130 |
| c. 壁的影响 .....             | 131 |
| d. 雷诺数的影响 .....           | 131 |
| e. 扩散的影响 .....            | 131 |
| f. 颗粒间相互作用的影响 .....       | 132 |
| g. 红细胞的沉降速度 .....         | 132 |
| h. 沉降曲线 .....             | 133 |
| i. 沉降现象的观察 .....          | 133 |
| j. Puccini 等的理论及其修正 ..... | 134 |
| § 38. 红细胞发生聚集的沉降现象 .....  | 136 |

|                                     |     |
|-------------------------------------|-----|
| a. 沉降曲线 .....                       | 136 |
| b. 沉降管内红细胞压积的分布 .....               | 137 |
| c. 沉降现象的显微镜观察 .....                 | 140 |
| d. 缗钱状的平均长度 .....                   | 142 |
| e. 交换实验 .....                       | 143 |
| f. 倾斜管内的沉降现象 .....                  | 144 |
| § 39. ESR 增大的机理 .....               | 145 |
| § 40. 伴随聚集的 ESR 理论 .....            | 146 |
| <b>第八章 微循环</b> .....                | 149 |
| § 41. 微循环的流变学和生理学意义 .....           | 149 |
| § 42. 低切变率流场中的颗粒运动 .....            | 151 |
| a. 径向迁移 .....                       | 151 |
| b. 刚性球的运动 .....                     | 152 |
| c. 液滴的运动 .....                      | 152 |
| d. 棒形颗粒和板形颗粒的运动 .....               | 153 |
| e. 径向迁移的理论 .....                    | 154 |
| § 43. 高切变率流场中颗粒的运动 .....            | 157 |
| § 44. 血浆层 .....                     | 158 |
| § 45. 二相流 .....                     | 160 |
| a. 中心部为牛顿流体时的情形 .....               | 161 |
| b. 中心部为 Casson 流体时的情形 .....         | 162 |
| c. 血浆撇取效应 .....                     | 163 |
| § 46. Fåhræus 效应 .....              | 163 |
| a. Fåhræus 效应 .....                 | 163 |
| b. Barbee 和 Cokelet 的研究 .....       | 164 |
| c. 动态红细胞压积 .....                    | 166 |
| § 47. Fåhræus-Lindqvist 效应 .....    | 169 |
| a. Fåhræus-Lindqvist 效应 .....       | 169 |
| b. $\Sigma$ 效应 ( $\sigma$ 效应) ..... | 171 |
| c. $\Sigma$ 效应的理论 .....             | 171 |

|                              |     |
|------------------------------|-----|
| § 48. 管壁效应 .....             | 174 |
| a. Copley 等的实验结果 .....       | 174 |
| b. 其他实验结果 .....              | 176 |
| c. 壁面滑移 .....                | 176 |
| d. 计及壁面滑移的理论 .....           | 177 |
| § 49. 毛细血管壁水的通透 .....        | 179 |
| a. 毛细血管壁的通透性 .....           | 179 |
| b. 在闭塞毛细血管内的流动 .....         | 181 |
| c. 毛细血管内血浆的流动与水的通透 .....     | 182 |
| d. 毛细血管内压力周期性变化的影响 .....     | 190 |
| e. 毛细血管与组织间的水的交换 .....       | 191 |
| § 50. 团流 .....               | 195 |
| § 51. 临界闭锁和界面张力 .....        | 202 |
| <b>第九章 血管壁的电性质</b> .....     | 204 |
| § 52. 血管的电性质与内皮损伤 .....      | 204 |
| § 53. 毛细血管壁上电荷的影响 .....      | 205 |
| § 54. 毛细血管壁的负电荷分布 .....      | 206 |
| § 55. 表观粘度的电偶层理论 .....       | 206 |
| <b>第十章 血管流变学</b> .....       | 211 |
| § 56. 血管壁 .....              | 211 |
| § 57. 血管壁的张力 .....           | 213 |
| a. 周向张力和轴向张力 .....           | 214 |
| b. 弹性张力与主动张力 .....           | 214 |
| c. 周向张力与压力、半径的关系 .....       | 214 |
| d. 压力脉动的影响 .....             | 219 |
| § 58. 血管壁内的应力分布 .....        | 219 |
| a. 管壁为均质、各向同性及胡克弹性体的场合 ..... | 220 |
| b. 管壁为层状结构时的情形 .....         | 224 |
| § 59. 毛细血管的可膨胀性 .....        | 225 |

|                                          |     |
|------------------------------------------|-----|
| § 60. 血管壁的粘弹性 .....                      | 226 |
| § 61. 血管壁的非线性 .....                      | 229 |
| § 62. 增量粘弹性 .....                        | 231 |
| a. 增量应力与增量应变 .....                       | 231 |
| b. 大变形 .....                             | 231 |
| c. 动态增量应力与动态增量应变 .....                   | 232 |
| d. 本构方程 .....                            | 233 |
| e. 增量杨氏模量与增量泊松比 .....                    | 233 |
| f. 系数 $C_{ij}$ 的确定 .....                 | 234 |
| § 63. 非线性理论 .....                        | 235 |
| a. Green-St. Venant 应变 .....             | 235 |
| b. 应变能密度函数 .....                         | 235 |
| § 64. 血管壁的张紧作用 .....                     | 237 |
| <b>第十一章 脉动流</b> .....                    | 241 |
| § 65. 脉搏波 .....                          | 241 |
| § 66. 脉动流理论的历史回顾 .....                   | 243 |
| § 67. 刚性管内的振荡流 .....                     | 248 |
| a. 振荡流的解 .....                           | 248 |
| b. $\alpha$ 值 .....                      | 250 |
| § 68. 动脉内压力波的传播 .....                    | 251 |
| a. 波的传播速度和衰减 .....                       | 251 |
| b. 波形峰化 (peaking) 和陡化 (steepening) ..... | 254 |
| c. 压差-流量关系 .....                         | 255 |
| d. 粘弹性流体的振荡流 .....                       | 256 |
| § 69. 微血管中的脉动流 .....                     | 256 |
| <b>第十二章 血管壁的通透性</b> .....                | 259 |
| § 70. 血管对高分子的通透性 .....                   | 259 |
| a. 通透性 .....                             | 259 |
| b. 扩散系数 .....                            | 261 |

|                             |     |
|-----------------------------|-----|
| § 71. 动脉壁的蛋白质吸收 .....       | 262 |
| § 72. 接合部 .....             | 267 |
| § 73. 小泡 .....              | 268 |
| § 74. 机械作用引起的蛋白质通透性提高 ..... | 272 |
| a. 原生质的新的分子图像 .....         | 272 |
| b. 机械扰动引起的扩散活化能降低 .....     | 274 |
| c. 壁面切应力效应 .....            | 275 |
| d. 伸长效应 .....               | 276 |
| e. 全身振动 .....               | 277 |
| § 75. 动脉壁内的应力与通透性 .....     | 277 |
| a. 高血压与通透性 .....            | 277 |
| b. 在动脉分支处的应力集中 .....        | 279 |
| c. 动脉瘤处的通透性 .....           | 279 |
| d. 血管内压与表面伸展和通透性 .....      | 280 |
| e. 血管壁的电荷与通透性 .....         | 281 |
| <b>第十三章 临床血液流变学</b> .....   | 283 |
| § 76. 动脉硬化 .....            | 284 |
| § 77. 血液循环力学理论 .....        | 287 |
| a. 压力理论 .....               | 287 |
| b. 湍流理论 .....               | 288 |
| c. 流动分离理论 .....             | 288 |
| d. 切应力理论 .....              | 288 |
| e. 表面化学理论 .....             | 289 |
| § 78. 狭窄管内的流动 .....         | 290 |
| a. 定常流 .....                | 290 |
| b. 脉动流 .....                | 294 |
| § 79. 狭窄后部的扩张 .....         | 294 |
| a. 湍流理论 .....               | 295 |
| b. 流动分离理论 .....             | 295 |
| c. 压力理论 .....               | 295 |



|                               |     |
|-------------------------------|-----|
| .....d. 切应力理论 .....           | 295 |
| § 80. 分支处的流动 .....            | 295 |
| § 81. 血栓形成 .....              | 297 |
| a. 湍流与血栓形成 .....              | 299 |
| b. 瘀积与血栓形成 .....              | 299 |
| § 82. 动脉疾患与血液流变学因素 .....      | 301 |
| a. 闭锁性动脉疾患的危险因素与血液流变学因素 ..... | 302 |
| b. 动脉疾病与血液流变学因素 .....         | 302 |
| § 83. 抗血栓性材料和多相高分子物质 .....    | 303 |
| <b>第十四章 优化原理与血管的分支</b> .....  | 307 |
| § 84. 物理学的优化原理 .....          | 307 |
| § 85. 生物学的优化原理 .....          | 308 |
| § 86. 血管系统的优化原理 .....         | 309 |
| a. 目标泛函 .....                 | 309 |
| b. 分支 .....                   | 311 |
| c. 与 Roux 经验法则相比较 .....       | 315 |
| d. 特殊情形 .....                 | 317 |
| § 87. 一般化理论 .....             | 318 |
| § 88. 从主动脉到毛细血管 .....         | 321 |
| a. 毛细血管 .....                 | 321 |
| b. 主动脉半径和湍流 .....             | 322 |
| <b>参考文献</b> .....             | 324 |

## 拾遗

|                        |    |
|------------------------|----|
| 流变学的语源 .....           | 5  |
| 牛顿粘性定律 .....           | 12 |
| Poiseuille 定律的历史 ..... | 18 |
| Toms 效应 .....          | 22 |
| William Harvey .....   | 39 |
| 毛细血管的全长及总表面积 .....     | 43 |