

冠心病: 解剖、功能及影像学

CORONARY ARTERY DISEASE:
ANATOMY, FUNCTION AND IMAGING

柳景华 吕树铮 / 主 编
杜 杰 温绍君 / 副主编



中国协和医科大学出版社

冠心病：解剖、功能及影像学

柳景华 吕树铮 主 编
杜 杰 温绍君 副主编



 中国协和医科大学出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

冠心病: 解剖、功能及影像学 / 柳景华, 吕树铮主编. —北京: 中国协和医科大学出版社, 2013. 4
ISBN 978 - 7 - 81136 - 841 - 3

I. ①冠… II. ①柳… ②吕… III. ①冠心病 - 研究 IV. ①R541. 4

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2013) 第 058925 号

冠心病: 解剖、功能及影像学

主 编: 柳景华 吕树铮
副 主 编: 杜 杰 温绍君
责任编辑: 吴桂梅 姜淑惠

出版发行: 中国协和医科大学出版社
(北京东单三条九号 邮编 100730 电话 65260378)

网 址: www.pumcp.com
经 销: 新华书店总店北京发行所
印 刷: 中国农业出版社印刷厂

开 本: 889 × 1194 1/16 开
印 张: 31. 25
字 数: 900 千字
版 次: 2013 年 4 月第 1 版 2013 年 4 月第 1 次印刷
印 数: 1—3000
定 价: 240. 00 元

ISBN 978 - 7 - 81136 - 841 - 3/R · 841

(凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页及其他质量问题, 由本社发行部调换)

目 录

第一章 冠状动 - 静脉循环系统解剖与生理	(1)
第一节 冠状动 - 静脉循环系统解剖	(1)
第二节 冠状动 - 静脉循环生理学基本概念	(10)
第三节 侧支循环的生理学	(27)
第二章 冠状动脉狭窄病理解剖与生理	(42)
第一节 冠状动脉血流动力学	(42)
第二节 冠状动脉狭窄与微循环	(54)
第三节 冠状动脉狭窄与血栓	(61)
第四节 慢性闭塞病变	(80)
第五节 冠状动脉狭窄病变和血管重构	(91)
第三章 冠状动脉粥样硬化斑块	(102)
第一节 冠状动脉粥样硬化斑块	(102)
第二节 斑块易损性与基质蛋白酶	(119)
第三节 滋养血管在动脉粥样硬化斑块中的作用	(127)
第四章 冠状动脉狭窄影像学评价：历史与现状	(139)
第一节 历史回顾：冠状动脉狭窄造影评价	(139)
第二节 当今对冠状动脉狭窄的造影分析	(149)
第三节 冠状动脉狭窄评价：血管内超声	(162)
第四节 冠状动脉狭窄评价：光学相干断层显像 (OCT)	(185)
第五节 冠状动脉狭窄评价：血管镜	(202)
第六节 冠状动脉狭窄评价：近红外光谱 (NIRS)	(215)
第七节 冠状动脉狭窄评价：多排螺旋 CT	(232)
第五章 冠状动脉粥样硬化斑块的评价	(242)
第一节 血管内激应图成像	(242)
第二节 拉曼光谱学检查	(247)
第三节 冠状动脉热像图	(257)
第四节 冠状动脉磁共振成像	(269)
第六章 冠状动脉狭窄功能学评价	(280)
第一节 冠状动脉压力导丝相关技术	(280)
第二节 冠状动脉内多普勒相关技术	(302)
第七章 心肌缺血的检测与评价	(325)
第一节 核心脏病学技术	(325)

第二节 超声心动图负荷试验	(328)
第三节 心脏磁共振成像	(342)
第八章 特殊类型冠状动脉狭窄	(354)
第一节 冠状动脉心肌桥	(354)
第二节 冠状动脉痉挛	(369)
第三节 自发性冠状动脉夹层	(386)
第四节 其他先天性冠状动脉异常	(406)
第九章 其他冠状动脉病变	(417)
第一节 大隐静脉桥退行性狭窄	(417)
第二节 支架再狭窄	(434)
第三节 移植心脏血管病变	(459)

第一章 冠状动 - 静脉循环系统解剖与生理

第一节 冠状动 - 静脉循环系统解剖

医学影像技术的不断更新和发展极大地促进了人们对冠状动脉和冠状静脉解剖结构的了解。就临床实践而言,介入医生尤其是从事缺血性心脏病专业的医生,比那些心脏解剖学家会更多地了解冠状动脉、静脉解剖,而且这种趋势在过去的10年日益明显,主要归因于能够实时显示冠状动脉位置和走行的技术手段不断完善。遗憾的是,无论是心脏科介入医生还是采用多排螺旋CT或磁共振显像技术研究心脏血管的学者,目前对冠状血管的命名尚欠统一。经典观点认为,描述人体任何结构均应采取直立位、面向观察者的角度(即所谓的解剖学体位),但解剖学家和病理学家可能更习惯于离体心尖位(即所谓的Valentine位)^[1,2]。后者的描述方法存在一定缺陷,例如,当下壁心肌梗死缘于走行在心室膈面中部的冠状动脉发生闭塞时,尽管该动脉毫无疑问在心室下方,但却通常被描述为后降支。计算机体层扫描技术既显示了动脉起源和走行,又显示了心脏在身体内的真实位置(图1-1),因此,以往描述不准确的情况会更明显。基于此,本章将根据心脏解剖及先进的螺旋CT三维图像重建的观察结果来描述冠状动脉和冠状静脉,希望能被临床医生接受,更好地协助诊断和治疗冠状动脉疾病。

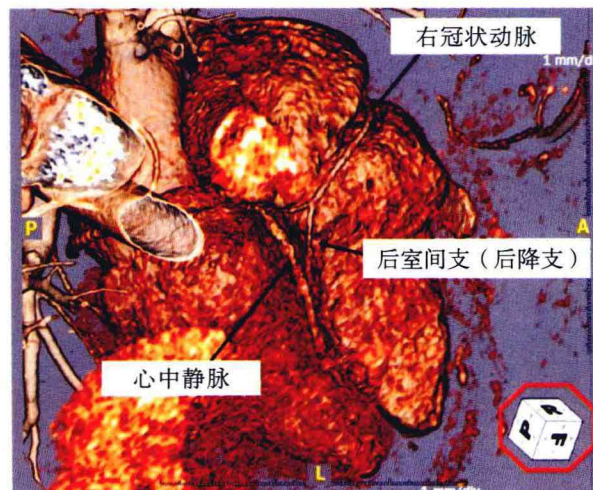


图 1-1 冠状动脉起源和走行

一、冠状动脉

(一) 冠状动脉起源 冠状动脉是主动脉的第一个分支,通常分别发自三个主动脉窦中的两个(图1-2)。有关冠状动脉窦的描述存在争议:过去常按照Valentine位进行描述,但人体解剖的基本

规则应是基于身体的整体来描述，因此，在正常情况下，心脏应描述为呈长轴向下向左的斜位。电生理学家强调正确体位的重要性^[3]，对描述冠状动-静脉起源和走行同样重要。

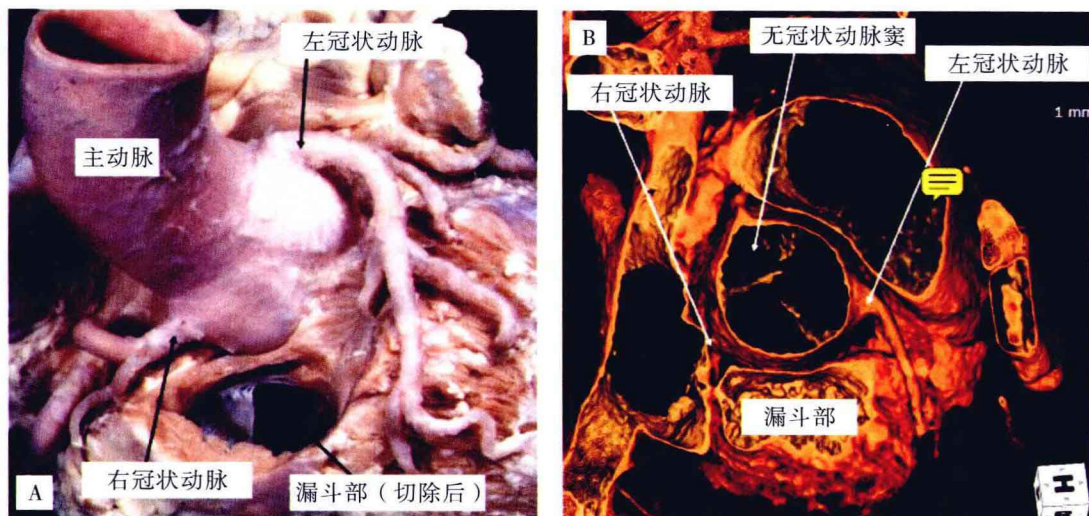


图 1-2 A：心脏解剖：切除肺动脉瓣及其周围漏斗部后，图中主动脉起源第一分支即冠状动脉；B：计算机断层扫描显示漏斗部组织

正常心脏中，靠近肺动脉干的两个冠状窦分别发出冠状动脉，即右冠状动脉和左冠状动脉主干（图 1-3）。就起始部位同主动脉窦管连接处的关系以及与瓣叶交界区的距离而言，这些动脉的起始部位可能存在较大变异^[4]。相对于成人主动脉窦管连接处的距离差值如果在 1cm 以内，则冠状动脉起源属正常变异范围。一旦该差值大于 1cm，则构成异位起源或高位起源^[5]。从远离肺动脉干的主动脉窦发出冠状动脉主支非常罕见。基于上述认识，正常心脏中的三个主动脉窦即分别命名为右冠状动脉窦、左冠状动脉窦和无冠状动脉窦（图 1-3）。事实上，这种命名是建立从非毗邻冠状动脉窦朝向肺动脉干的角度来观察主动脉窦的基础上，因而两个主动脉窦即分别位于观察者的左手侧和右手侧，分别命名为 2 号窦和 1 号窦，发出左冠状动脉主干和右冠状动脉（图 1-4）。

当然，这种命名方式在冠状动脉异常起源的情况下则欠完美。例如，如果正常发出右冠状动脉的动脉窦也异常发出了左冠状动脉，那么本应发出左冠状动脉的动

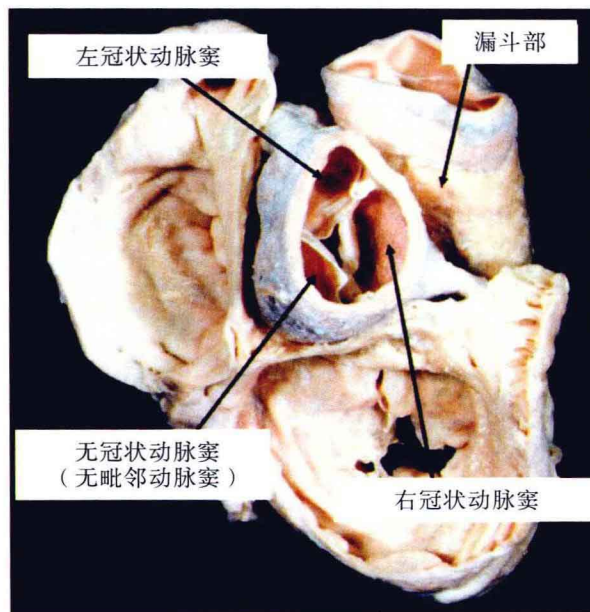


图 1-3 心脏短轴主要显示心房。通过冠状动脉的起源可以识别左冠状动脉窦，右冠状动脉窦以及同肺动脉干未毗邻的无冠状动脉窦

脉窦就不能再称为左冠状动脉窦。在这种情况下，儿童心脏外科医生描述先心病冠状动脉起源的方法就比较可取^[6]。

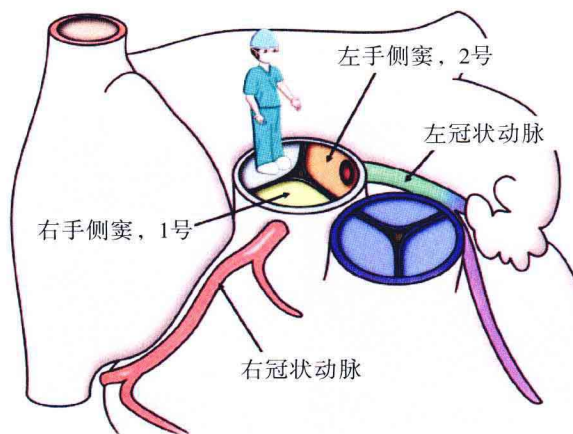


图 1-4 观察者位于非毗邻主动脉窦，发出冠状动脉的动脉窦位于其左右手。根据 Leiden 定律，分别命名为 1 号和 2 号

（二）右冠状动脉及其分支 右冠状动脉起始于主动脉根部右前上方的右冠状动脉窦，为 90% 的人的心室膈面供血。在很多情况下，该窦可有两个动脉口，其中第二个动脉口最常发出的是漏斗部或圆锥动脉，有时也发出窦房结动脉^[7,8]。右冠状动脉自主动脉窦发出后，经行右房室沟（图 1-5）。第一段行至心室右侧缘或锐缘，在此发出锐缘支，同时从血管头侧发出数个心房支。有时，圆锥动脉也可由此处发出。也有稍过半数的人其窦房结动脉也发自于此段右冠状动脉。之后右冠状动脉继续环绕三尖瓣前庭，延伸至心脏房室交叉点，最后发出后降支（下室间支），供血至右心室

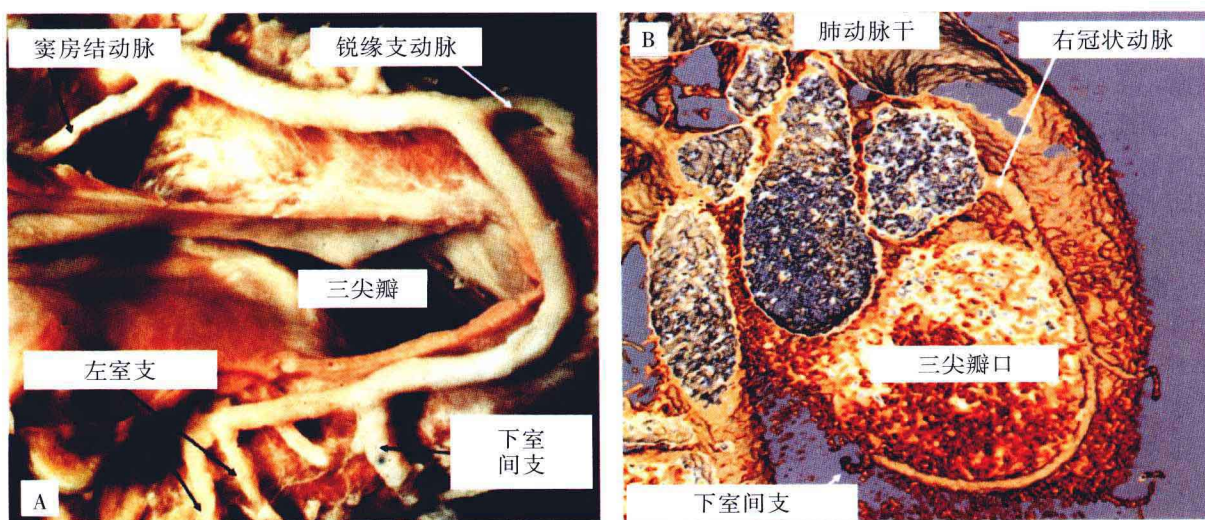


图 1-5 解剖图（A）和计算机断层扫描（B），系来自不同人群，显示右冠状动脉的走行和分支。同 90% 的人群一样，本例右冠状动脉为优势血管

膈面。

在 90% 的人群中，右冠状动脉在心脏房室交叉后发出下室间支以及房室结动脉，继续下行供应部分左心室膈面（图 1-6）。这种分布称为右冠状动脉优势型^[7,9,10]。

在已命名的冠状动脉分支中，圆锥动脉可见于超过 90% 的人群中，其中 30% 单独从主动脉窦发出，其余 70% 则为右冠状动脉发出的第一个分支。

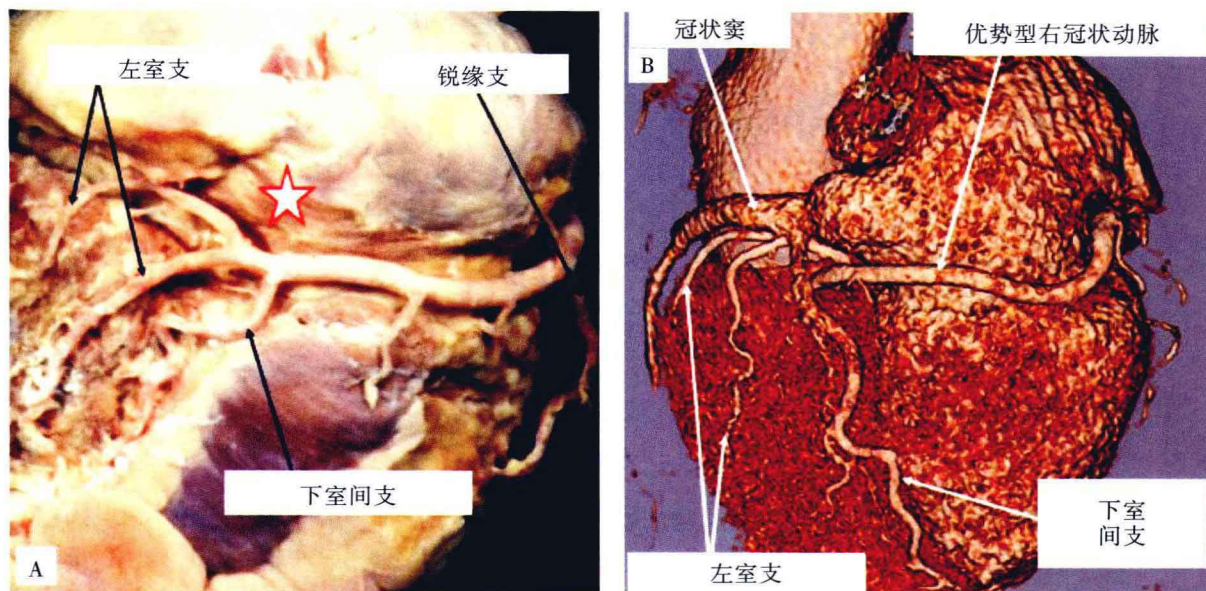


图 1-6 右冠状动脉解剖（图 A）和冠状动脉计算机断层扫描（B）显示，优势型右冠状动脉自下房室间沟行至心脏交叉（星号处）发出下室间动脉，后发出分支至左室膈面

锐缘支动脉也是固有动脉，发自心室的锐缘处，行至心尖，在该处同前降支（前室间支）存在许多重要的血管吻合。锐缘支同前降支（前室间支）的穿隔支一起为房室传导系统的右左分支近端供血。

前面强调过，在占人群 90% 的右冠状动脉优势型的个体中，其下室间动脉（又称为后降支或后室间支）起源于右冠状动脉，其余 10% 个体发自左回旋支动脉。在房室沟下部和心尖处，该动脉分别同平行发自右冠状动脉的右缘支及前室间动脉的垂直分支相交。右冠状动脉穿隔支为室间隔肌部下方的心肌、邻近的心室壁以及右冠状动脉优势时二尖瓣的下间隔乳头肌供血^[11]。

（三）左冠状动脉主干（LM） 左冠状动脉主干通常从左冠状动脉窦发出，略低于窦管交界处，有时也从主动脉窦高位发出，随即走行于左心耳和肺动脉主干之间（图 1-7）。其长度在成人很少超过 1cm 或 2cm，大多数情况下分出回旋支和前室间动脉（前降支），同右冠状动脉组成所谓的“冠状动脉三支病变中的 3 支血管”。左主干直径为 5~10mm，远较右冠状动脉起始部粗大，其分支供血面积远大于右冠状动脉，即使在右冠状动脉优势时依然如此^[10,19]。其分支向左心室大部、室间隔肌部以及二尖瓣上侧乳头肌的大部分供应血液，并发出左房支，在不足 50% 的个体中还向窦房结动脉供血^[12]。约 25% 的人中，从主干处还发出一条中间支（图 1-8），罕见地会发出两条中间支^[9]。

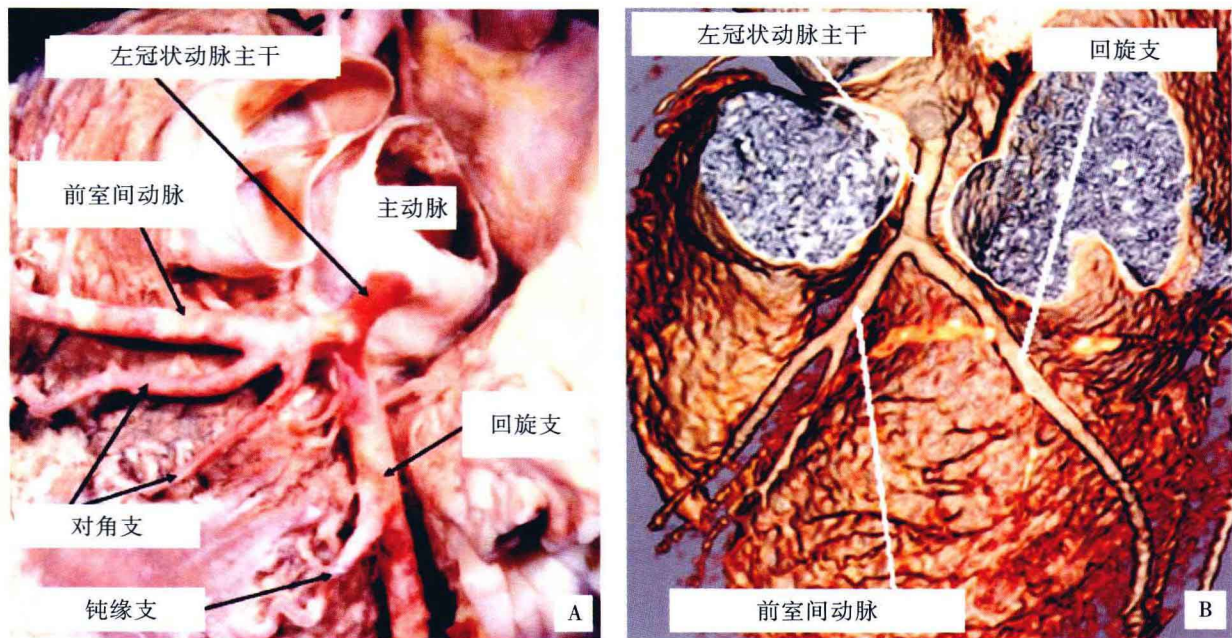


图 1-7 解剖标本 (A) 和计算断层血管扫描 (B) 显示, 左冠状动脉主干分出左室间支 (前降支) 和回旋支

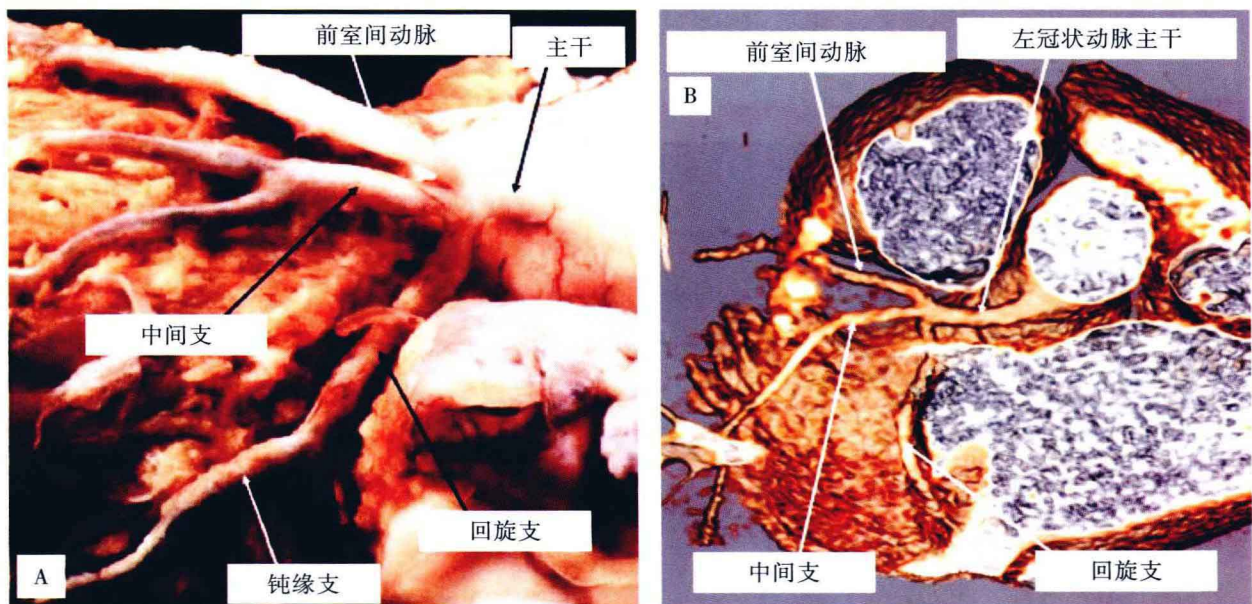


图 1-8 大体解剖 (A) 和计算机断层扫描 (B) 显示, 左主干呈三分叉, 中间支直接从主干发出

（四）前室间动脉（前降支） 前室间动脉又称为前降支，是左冠状动脉主干的主要分支之一。它位于心脏左前上胸肋面，绕行肺动脉主干底部进入前室间沟（图 1-9）。继续前行至心尖，有时绕过心尖，延伸至下室间沟的不同位置，但很少取代下室间支^[13]。左前降支为左心室和右心室的心尖部室壁供血。在前室间沟行进过程中，左前降支可能会发出多达 3 支对角支，朝向心脏左缘为胸肋面心室壁供血。同时，左前降支还发出数目不等的重要血管穿间隔支（图 1-10）。第一及偶尔包括第二或第三条穿隔支向房室传导束供血。左前降支也会发出分支向右心室的漏斗部供血。

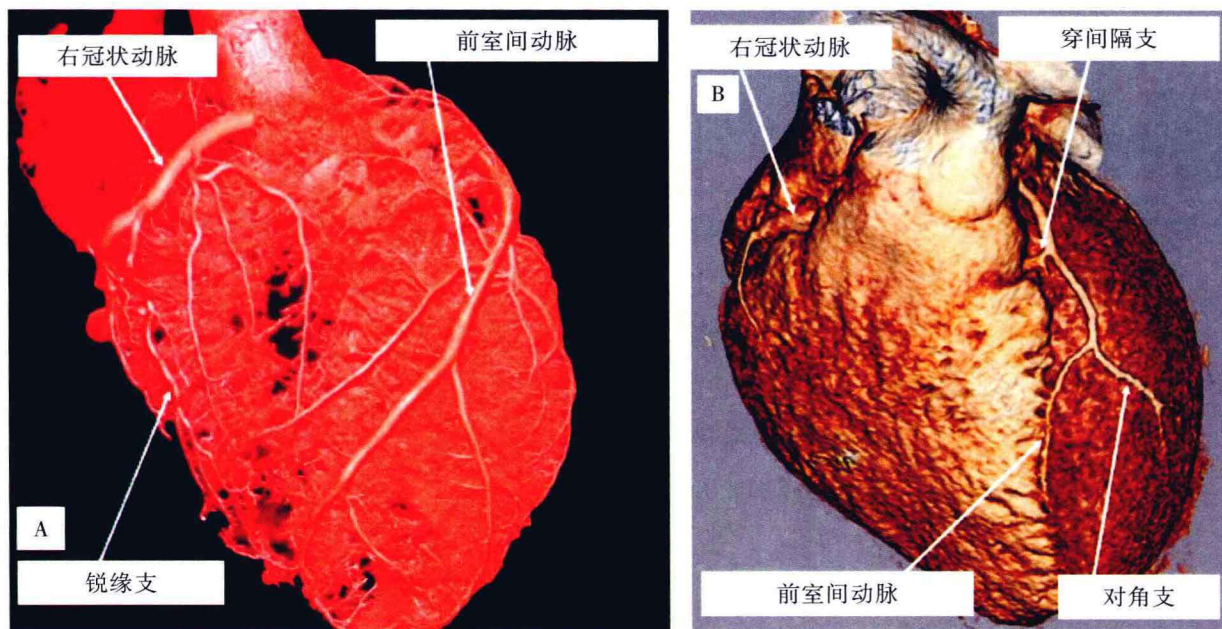


图 1-9 灌注模型 (A) 和计算机断层扫描 (B) 显示典型的左前降支分布

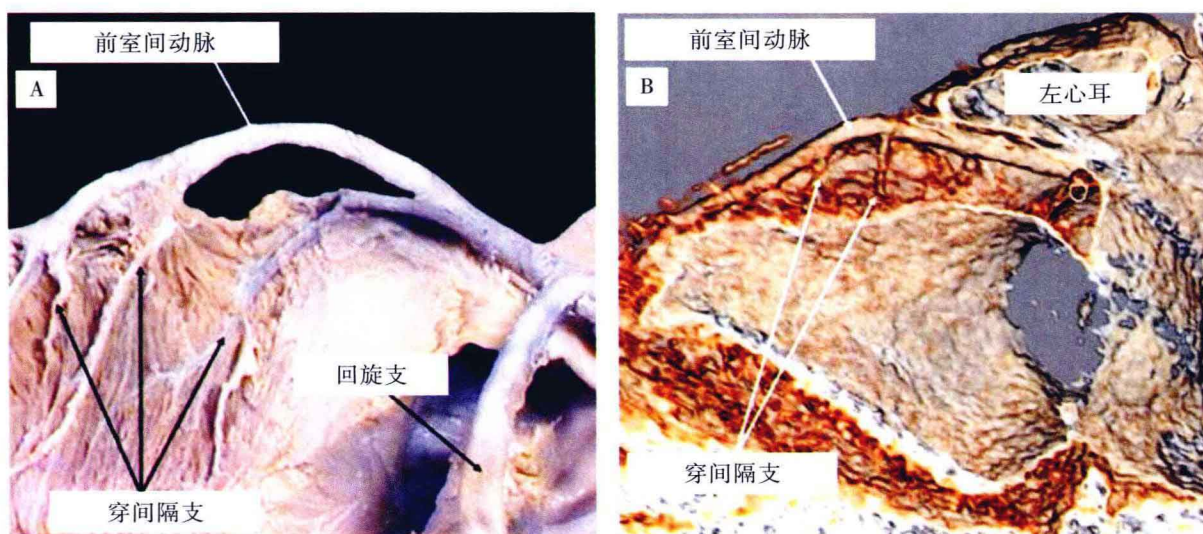


图 1-10 图 A：剥离左心室肌，显示 3 支穿间隔动脉发自前降支。计算机断层扫描 (B) 来自另一患者，显示穿间隔支

（五）左回旋支 左回旋支是左冠状动脉主干的另一分支。它从左主干后部发出后直接进入左房室沟。大多数情况下，左回旋支在左房室沟中行进的长度较短，以钝缘支动脉终止。然而，在 10% 的个体中，左回旋支会延伸至房室交叉处，为房室结供血；甚或延伸到房室交叉处以远，向右心室膈面供血（图 1-11），此即左冠状动脉优势型。该回旋支沿途发出心室支，为左心室侧后壁以及二尖瓣上侧乳头肌供血^[12]。其他更小的或未命名的分支血管也会从左回旋支发出，为主动脉根部以及房室沟附近的心房肌和心室肌供血。偶尔，从左回旋支起始附近会发出一支称为左房支的较大分支，有时甚至超过左回旋支^[7]。

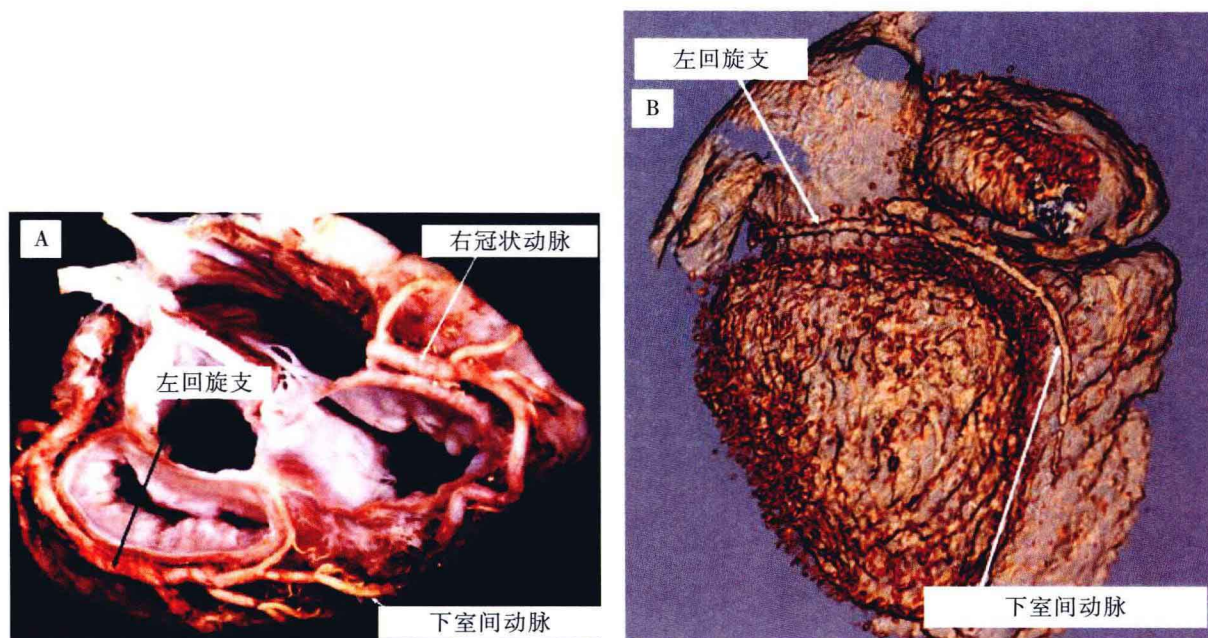


图 1-11 图 A：切除心房肌后从心房面观察，显示左回旋支行至房室交叉处并发出下室间动脉，即所谓的冠状动脉左优势型；图 B：来自不同患者的计算机断层扫描图像，同样显示左优势型冠状动脉

（六）冠状动脉优势分型 大多数人系右冠状动脉向右心室下壁和膈面室间隔肌部供血（图 1-6），而左冠状动脉分支向心脏胸肋面室壁和左心缘供血。多达 50% 的优势型右冠状动脉除了向心室下部供血，还是膈面心肌血供的重要来源。在这些人群中，右冠状动脉为二尖瓣下间隔乳头肌供血，有时还为上侧乳头肌供血^[12]。在右冠状动脉明显优势型并回旋支动脉发育不全的情况下，右冠状动脉为全部左心室下壁供血。

二、心脏静脉

心脏静脉在解剖学上可以分为三大类。最重要的一类是回流入冠状静脉窦的静脉，收集心室壁绝大部分血液。第二类是心前静脉系统，这些血管引流来自右心室前壁以及右心缘的血液，直接汇入右心房。第三类是 Thebesian 静脉，引流心室壁内层和心内膜下部分血液，直接流入 4 个心腔中任何一个腔内^[14~16]。

另一种专为临床使用而设计的分类，是将心脏静脉系统分为两个互通的系统：第一种由大静脉血管组成，引流大部分外层心肌血液；第二种大部分由 Thebesian 静脉系统组成，主要功能是回流心室内壁静脉血^[17]。大静脉血管系统主要来自心外膜下血管，延伸至心房和心室肌表面，不附着于心

肌，在回流至冠状静脉窦之前位于室间沟内。大多数血管很容易识别且有静脉瓣。小血管系统由最小心脏静脉（亦指真正的 Thebesian 静脉）构成，位于心内膜下心肌内。这些血管引流入内腔的开口直径不到 0.5mm，没有静脉瓣。

（一）大静脉系统 大部分心肌血液回流至较大的静脉，最后主要由冠状静脉窦收纳。冠状静脉窦始于心大静脉的末端，经左房室交界处终止于右心房（图 1-12 和图 1-13）。冠状静脉窦在左下房室沟内走行，与左房心肌密切相关。血管直径和长度变异较大，截面为椭圆形，上下径大于前后径，比例为 5:4^[17]。房室沟内走行长度介于 2~5cm，受心脏质量影响较大。当重度充血性心力衰竭时，冠状静脉窦会发生扩张。

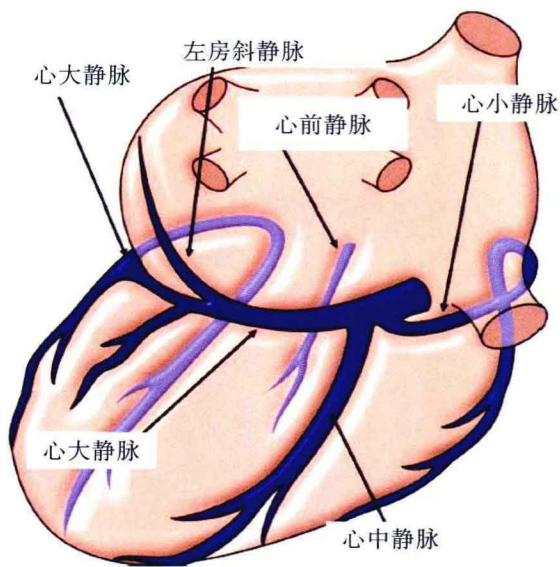


图 1-12 图示为心脏膈面。心脏大静脉回流至冠状静脉窦，由心大静脉与左房斜静脉汇合而成。心前静脉直接回流至右心房内

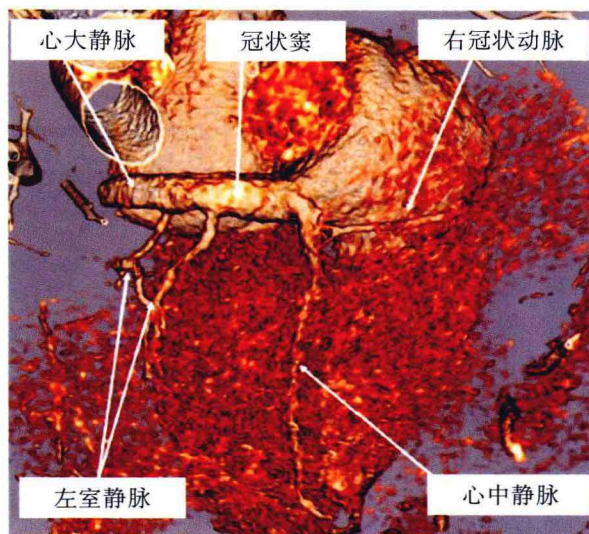


图 1-13 计算机断层扫描显示心脏静脉、冠状静脉窦

较大的冠状静脉止于冠状窦，主要支流包括：心大静脉或前室间静脉、心中静脉，左室下隔面血液回流静脉、左缘静脉、左房斜静脉和心小静脉（图 1-12）。这些支流及其所引流心室肌区域常常变化多端。心大静脉是最大的心脏静脉，也是心脏静脉系统中最固定的一支。其收纳来自前室间隔、两个心室前面、心尖部及部分左心房的血液，沿前室间沟上行，经过肺动脉干起始部和左心耳之间。90% 的人该静脉比左冠状动脉浅表，而另外 10% 则较左冠状动脉深在。心大静脉流经大部分左房室沟后止于冠状窦，其近端常由冠状窦肌袖包绕。心中静脉，也称为后室间静脉（事实上，“下”更准确）引流膈面室壁血液，以及大部分室间隔肌部血液，经由下室间沟上行后，回流至冠状窦。偶尔，终末部也会直接引流至右心房。还有一些静脉负责引流位于心中静脉和心大静脉之间的心肌血流，其中最重要的是下静脉（后静脉）和左缘静脉^[18]。

在组织学方面比较重要的一个静脉是左房斜静脉。左房斜静脉和心大静脉的汇合处，常被大多数研究人员当作冠状窦的起始（图 1-12），当然也有学者认为冠状窦始于 Vieussens 瓣^[17]。斜静脉较短，长度很少超过 2~3cm，当存在左上腔静脉时其意义重大。5% 的先天性心脏畸形中可发现这种血管，也可作为完全性肺静脉异位连接的终止处。心小静脉通常是冠状窦的一条支流，也可以直接流入右心房，亦被称为右冠状静脉，不如冠状窦的其他支流固定，位于右房室沟内，较右冠状动脉或

浅表或深在。心小静脉可引流大部分右心房壁和右心室膈面血流,但取决于其大小。

心前静脉尚有许多其他名称,包括微小静脉、附属静脉和未命名的 Vienussens 静脉。这组静脉引流右心室前壁和前外侧壁的 2/3 的血液。其数量从 1 条至 3 条不等,引流方式也多种多样。每条静脉可单独纳入右心房,或者不同静脉依次汇合形成总的静脉,再流入右心房。

【二】小静脉系统 小静脉系统由全部心肌中的小静脉构成。这些血管包括被称为 Thebesian 血管的微小血管,以及那些最小血管。这些心内膜下的血管系统将壁内冠状循环同心脏的 4 个腔室连接起来。Thebesian 血管长度和数量变异较大,具体起源不详。

小静脉系统可进一步分为四类:静脉窦状隙血管(venosinusoidal)、静脉腔血管(venoluminal)、动脉窦状隙血管(arterosinusoidal)和动脉腔血管(arterioluminal)等。所有这些血管主要由内皮细胞及心腔内皮层延续而成,开口处无瓣膜,因此血流直接进入心腔。Thebesian 血管严格来讲并非静脉,因为动脉窦状隙血管和动脉腔血管直接与动脉相连,因此将其视为动静脉吻合更准确。总体而言,小静脉系统对心肌血液引流的贡献较大。正是这些静脉收集了大部分右心耳、大部分室间隔肌部的血液,也参与了所有心肌壁血液的回流。事实上,右心静脉回流很大程度上依赖于小静脉系统,虽然 Thebesian 血管分布于整个心脏,但左心的分布数量远远少于右心系统。

三、总结

- 冠状循环由冠状动脉和冠状静脉系统组成。
- 2 条冠状动脉是主动脉的第一个分支,起源于毗邻肺动脉主干的主动脉窦,多数情况下分别为左、右冠状动脉窦。
- 为了正确理解动脉起源先天变异,有必要从未毗邻肺动脉的主动脉窦的位置来观察。
- 描述冠状动脉应按其在体内的真实位置加以描述,因此所谓的“后降支”可以更恰当地描述为下室间支。
- 右冠状动脉环绕三尖瓣口,90% 的人自此动脉发出下室间动脉,为所谓的右冠状动脉优势型。
- 左冠状动脉分为前降支和回旋支。
- 冠状静脉比动脉多变,包括大静脉,如心大静脉、心中静脉和心小静脉,将血液引流至冠状窦内;还包括小静脉和微静脉,血液直接回流至心腔。

(马 芹 程姝娟 丛洪良)

参 考 文 献

- [1] Cook AC, Anderson RH. Attitudinally correct nomenclature. Heart, 2002, 87:503-506.
- [2] Anderson RH, Loukas M. The importance of attitudinally appropriate description of cardiac anatomy. Clin Anat, 2009, 22 (1):47-51.
- [3] Cosio FC, Anderson RH, Kuck K, et al. Living anatomy of the atrioventricular junctions. A guide to electrophysiological mapping. A consensus statement from the Cardiac Nomenclature Study Group, Working Group of Arrhythmias, European Society of Cardiology, and the Task Force on Cardiac Nomenclature from NASPE. Circulation, 1999, 100: e31-e37.
- [4] Muriago M, Sheppard MN, Ho SY, et al. The location of the coronary arterial orifices in the normal heart. Clin Anat, 1997, 10:297-302.
- [5] Vlodaver Z, Neufeld HN, Edwards JE. Coronary Arterial Variations in the Normal Heart and in Congenital Heart Disease. New York: Academic Press. 1975.
- [6] Gittenberger-de Groot AC, Sauer U, Oppenheimer-Dekker A, et al. Coronary arterial anatomy in transposition of the great arteries: A morphologic study. Ped Cardiol, 1983, 4:15-24.

- [7] James TN. Anatomy of the coronary arteries. New York: Paul B. Hoeber, 1961.
- [8] James TN. Anatomy of the coronary arteries in health and disease. *Circulation*, 1965, 32:1020-1033.
- [9] Ludinghausen. V. The Clinical Anatomy of Coronary Arteries. New York: Springer, 2003.
- [10] Muresian H. The Clinical Anatomy of the Coronary Arteries. *Encyclopedia*, Bucharest, 2009.
- [11] Estes EH Jr, Dalton FM, Entman ML, et al. The anatomy and blood supply of the papillary muscles of the left ventricle. *Am Heart J*, 1966, 71:356-362.
- [12] Estes EH, Entman ML, Dixon HB II, et al. The vascular supply of the left ventricular wall. Anatomic observations, plus a hypothesis regarding acute events in coronary artery disease. *Am Heart J*, 1966, 71:58-67.
- [13] Gregg DE, Fisher LC. Blood supply to the heart. In: Field J, Magoun H. W., editors. *Handbook of Physiology*. Washington, DC: American Physiological Society, 1963, 1517-1584.
- [14] Ludinghausen MV. Clinical anatomy of cardiac veins. Vv. cardiacae. *Surg Radiol Anat*, 1987, 9:159-168.
- [15] Ansari A. Anatomy and clinical significance of ventricular Thebesian veins. *Clin Anat*, 2001, 14:102-110.
- [16] Singh JP, Houser S, Heist EK, et al. The coronary venous anatomy: a segmental approach to aid cardiac resynchronization therapy. *J Am Coll Cardiol*, 2005, 46:68-74.
- [17] Ho SY, Sanchez-Quintana D, Becker AE. A review of the coronary venous system: A road less travelled. *Heart Rhythm*, 2004, 1:107-112.
- [18] Jongbloed MR, Lamb HJ, Bax JJ, et al. Noninvasive visualization of the cardiac venous system using multislice computed tomography. *J Am Coll Cardiol*, 2005, 45:749-753.
- [19] 包哈申, 柳景华, 刘宇扬. 无保护左主干病变的治疗及术前危险评估. *心肺血管病杂志*, 2009, 28:437-439.

第二节 冠状动-静脉循环生理学基本概念

冠状动脉循环研究的发展得益于研究手段的不断丰富, 包括采用压力导丝技术测量心外膜动脉压力和血流量、采用影像技术评价心肌灌注分布等。心内膜下动脉最易发生缺血, 其充盈灌注受心脏收缩产生的血管外压力影响, 也受冠状动脉自身压力调节。冠状动脉压力-血流关系构成多项临床检测项目的重要理论基础, 如冠状动脉血流储备、冠状动脉血流储备分数、微血管阻力等。冠状动脉压力-血流关系受血管外力的影响, 因此, 不同生理状态下冠状动脉的血流动力学指标也不尽相同。

冠状动脉生理学是一门相对复杂的学科, 作用机制繁多且彼此相互关联。冠状动脉循环系统任何环节受到影响, 均会导致缺血甚至心功能不全的发生。产生缺血的机制多种多样, 除了心外膜动脉狭窄, 其他原因, 如微血管疾病、心肌形态学改变而微循环无相应代偿(如心肌肥厚和心力衰竭等)也会导致心肌缺血。

由于人体研究的局限性, 动物研究构成了探讨冠状动脉生理学的重要基础。随着心外膜血流和压力检测、心肌灌注和组织氧含量水平检测等手段的应用, 对人类冠状动脉生理学机制的认识也将日益完善。本章主要阐述心肌灌注的机械学和血流调节, 以及冠状动脉血流调节机制、心肌灌注的异质性等内容。

一、心肌的血流灌注

心肌的供血来自于冠状动脉。心外膜冠状动脉沿途不断发出分支壁间动脉, 后逐渐演变成微小动脉, 最后止于毛细血管床, 完成对心肌的血流灌注。如图 1-14 所示, 壁间冠状动脉呈树状分布, 肉眼可见的最小血管直径为 $20\mu\text{m}$, 有的壁间动脉直接变成小动脉连接于毛细血管床^[1]。从图 1-14

可以看出, 直径 $300\mu\text{m}$ 的血管为较大区域的心肌供血, 亦即对较大面积的心室壁供血。

对猫跳动心脏中不同直径的心外膜动脉进行压力监测结果显示, 直径 $400\mu\text{m}$ 以下的血管其动脉压力开始逐渐降低。因此, 在直径 $400\mu\text{m}$ 血管下游的亚血管床中, 任何一个分支血管内血流的变化都会对该血管床内其他所有血管产生影响。不同生理状态下血管内压力降速不同, 血管舒张较血管收缩时压力降低缓慢^[2]。

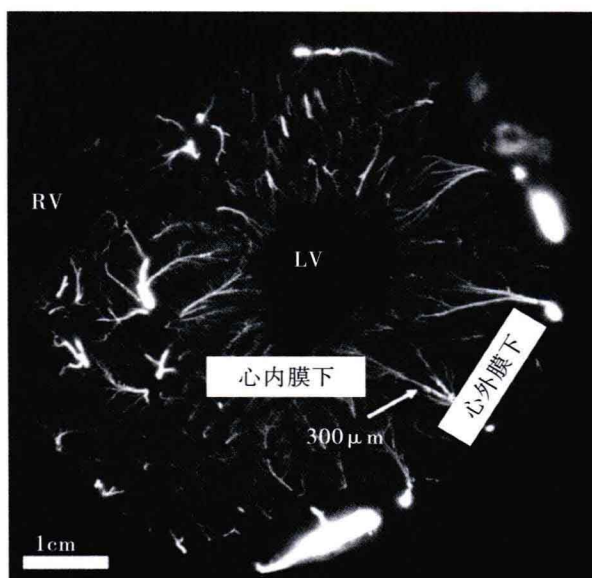


图 1-14 高分辨率相机所拍摄经荧光染色的冠状动脉树, 每层 $40\mu\text{m}$ (改良自参考文献 1)

正常情况下, 局部心肌灌注和局部心肌需氧量相匹配, 与局部线粒体酶活性相关^[3]。血管完成心肌灌注的能力并非一致, 最佳评价指标是血管最大扩张, 即充盈状态下的心肌灌注。临床上和实验中通过应用腺苷或其他小血管扩张剂可以实现血管充盈。充盈状态下血流量的多少取决于多重因素, 包括血管床解剖以及导致壁内血管受压的收缩期外力, 即通常所说的血管外阻力^[4,5]。血流量以单位时间内的血流量 (ml/min) 来定量表示, 适用于较大的冠状动脉; 而灌注量通常以单位质量心肌的血流量 [$\text{ml}/(\text{min} \cdot \text{g})$] 来表示。

心内膜下血管受压最明显。图 1-15 所示为冠状动脉灌注压保持在 100mmHg 时, 心率与心内膜下/心外膜下心肌血流灌注比值的关系, 可以反映心脏收缩对心肌灌注分布的影响。研究显示, 心脏静止状态时, 心内膜下心肌灌注量比心外膜下心肌灌注量多 50%; 当心率为 100 次/分时, 二者相当; 而

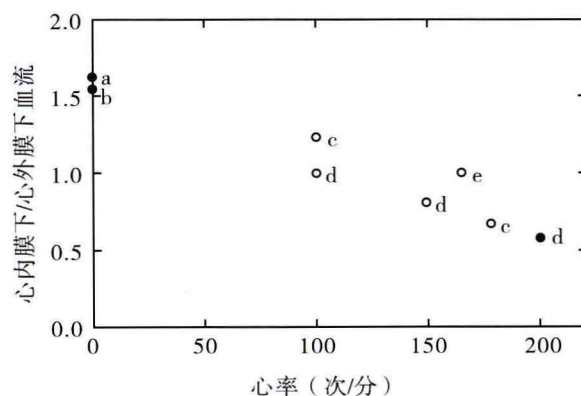


图 1-15 心内膜下和心外膜下心肌充盈血流比值同心率的关系 (改良自狗的系列心脏研究 6, 103, 104 - 106)

当心率达到200次/分时，心内膜下灌注量仅为心外膜下的50%。显然，心内膜下灌注更易受心率影响，亦即血管外力更易对心内膜下心肌灌注产生不良影响。为代偿心脏收缩造成血流受阻的这种情况，血管床会发生适应性改变，内膜下小动脉总量多于心外膜，从而使血管床本身阻力降低^[6]。

由于心内膜下血管承受更强的心肌收缩所造成的挤压力，使管腔同血管周围组织间的压力阶差远低于心外膜下血管，因而血管的可扩张性更大。而且，高压时微循环管径增加，加之较高压力本身，均可促使微循环更快速充盈以及舒张期血管阻力降低。心外膜下血管也会受压力影响，因微循环具有可扩张性，故压力增加时心外膜下血管也能被动扩张。

舒张期血管外力最小，此时心内膜下心肌灌注的重要决定因素为心动周期中舒张期的长短，即舒张时间分数。当然，冠状动脉压力对灌注的影响也不容忽视：冠状动脉压力越高，壁内动脉血流量就越多，微血管阻力也越小，从而心肌内血流量可以在舒张期更迅速恢复。这里引出了一个新的概念——传导性，为血流量除以压力阶差，与阻力成反比。舒张时间分数和冠状动脉压力会影响血流传导性^[10]。如图1-16A所示，心内膜下血管的传导性随舒张时间分数缩短而降低，但其变化幅度取决于冠状动脉压力。换言之，舒张时间分数一定时，心内膜下心肌灌注不一定同压力成比例，而是低于相应的水平，原因在于传导性受二者影响会降低。因此，心内膜下心肌灌注不但随着冠状动脉压力的降低而减少，还会随着冠状动脉压力降低所导致的传导性的降低而进一步减少。

虽然实验研究未能发现心外膜下血管传导性同舒张时间分数明显相关（图1-16），但心外膜下血管的传导性在冠状动脉压力高时较高。

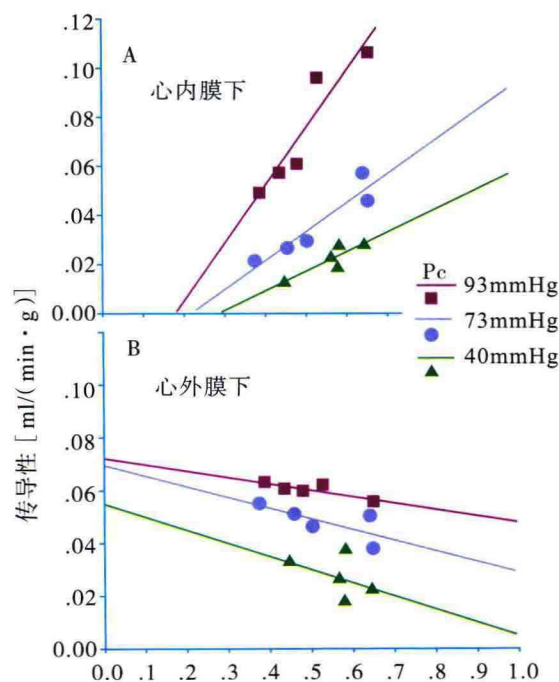


图1-16 传导性和舒张时间分数及冠状动脉压力 P_c 的关系

图A：心内膜下；图B：心外膜下（改良自参考文献7）

从图1-15和图1-16可以看出，当其他因素，如冠状动脉狭窄导致灌注减少时，首当其冲受累的是心内膜下血管。因此，心内膜下血管是最易缺血的血管，同临床实践中观察到的心肌缺血始于心内膜的情况吻合^[11,12]。由于影像技术的限制，临床上还无法评价心内膜下心肌灌注，但随着磁共振