DOI:10.16016/j.1000-5404.1989.02.002

人冠状动脉的几何形态学 *

姜宗来 何光篪 (解剖学教研室)

提 要 本文采用8例成人心脏,其中5例制成冠状动脉铸型;3例制备血管墨汁灌注的组织切片,测量左、右冠状动脉的分支共3187个。应用Strahler体系分级方法,对冠状动脉的分支用计算机进行分级归类、分析处理。求得人左、右冠状动脉各级分支的一系列几何形态数据以及相应的直径比、长度比和分支比,冠状动脉的直径、长度及分支数目与分支级数呈指数函数关系,其相关有高度显著性($P<0.005$)。从几何形态学的定量角度,探讨了左、右冠动脉的形态特征,认为左冠状动脉是心脏首要的供血动脉;冠状动脉分布的优势分型标准应考虑血管管径这一重要因素。

关键词 冠状血管; 生物力学

应用生物力学的理论和方法对血液循环进行定量研究,需要有完整的血管几何形态学数据。目前,尚未对人及实验常用动物的所有器官建立起这样的数据库[1]。冠状动脉的形态研究,以往主要是对其分支分布的观察,缺少完整的几何形态学定量资料[2][3][4][5]。

血管系属于分支系统。国外已开始应用地理学的定量形态学方法,即Strahler体系[6],对人支气管树[7]、牛的胆道及肝血管、人和猫的肺血管等分支系统进行定量研究[8][9][10][11]。应用Strahler体系对冠状动脉进行定量分析的报道,国内外均尚未见到。本文试用该体系对人冠状动脉进行研究,从定量的角度探讨冠状动脉的形态特征,为冠状循环的研究提供几何形态资料。

材 料 与 方 法

8例男性尸体,年龄18～25岁,非心脏病死亡,死后2～12 h内,解剖取心待用。

5例人心,制作冠状动脉环氧树脂铸型。本文选用新型固化剂 — T31环氧树脂固化剂,配制环氧树脂填充剂。填充剂灌注压力为13.3 kPa (100 mmHg),持续时间约为10 min。整个灌注和固化过程,将心脏浸于水中,以保持其自然状态。心脏经盐酸腐蚀后,所得冠状动脉铸型,充盈好、收缩率小(0.62%),详细方法已另文发表[12]。

3例人心,在37℃水浴下,冠状动脉以13.3kPa的压力,灌注5%明胶中国墨汁。标本固定后,分别在左、右室游离壁中部取材,常规制备火棉胶切片。切片为贯穿心壁厚度的横切面,厚度分别为25μm、50μm、100μm、150μm和200μm,伊红染色(图1)。



图1 人左室游离壁横切面,示冠状动脉细小分支,墨汁灌注,150μm,× 50

测量方法:先从冠状动脉主干开始对动脉树的各级分支进行粗略观察,然后将左、右冠状动脉树分解成若干小树。每个动脉小树均由直径约600 μm左右的动脉及其分支组成(图2)。



图2 人左冠状动脉小树之一(过繁细小分支已删除),× 8

*国家自然科学基金资助项目

?1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

动脉铸型测量使用JLT－I型台式显微投影仪(无锡光学仪器厂)，其测量误差小于0.001mm，放大20倍。整个动脉树所有直径大于 800 μm 的分支均进行测量和计数。对分离的动脉小树，按左冠状动脉前室间支、旋支和右冠状动脉的近侧、中部和远侧分支区域，分别随机取5个小树样本，进行分支测量和计数。为了便于测量，必要时将小树上的过繁分支进一步删剪。所测的每个血管均测量其入口直径(D_1)、出口直径(D_2)和长度(L)，然后求得该血管的平均直径(D)和锥度(α)：

$$D=(D_1+D_2)/2$$

$$\alpha=\tan^{-1}[(D_1+D_2)/2L]$$

用普通生物显微镜在心壁组织切片中，测量直径约 50 μm 以下的动脉分支，并以直径 10～20μm 的中间微动脉为冠状动脉树第1级分支。

血管分支比的计算方法(以右冠状动脉为例)：首先对动脉小树样本的各级分支进行计数并计算其分支比。表1是从1例右冠状动脉树所取5个动脉小树样本的原始数据。小树分支比的具体计算方法，以动脉小树(1)为例：按照断离分支的残端，确定该小树第8、7和6级分支分别有2、13和75个分支从小树上断离。为补正各级的断离分支，根据粗略观察，先假定1个分支比3。这样，第8级断离的2个分支，可分出2×3=6个第7级分支；2×3×3=18个第6级分支。同样，第7级断离的13个分支，可分出13×3=39个第6级分支。将各级的完整分支数、断离分支数和补正的分支数相加，等于各级补正后的分支总数，列于该表的第5列。将第5列所示的各级分支总数分别取对数，与分支级数作直线回归分析，所得斜率即为该小树的分支比3.61，列于表的第6列。其余4个动脉小树也按上述方法，计算分支比。

表1　人右冠状动脉分支比计算表(例1)

动脉小树	级数	分支数目 完整	分支数目 断离	补正后分支总数目	分支比
(1)	10	1		1	3.61
	9	4		4	
	8	12	2	14	
	7	26	13	45	
	6	51	75	183	
(2)	10	1		1	3.45
	9	3		3	
	8	5	1	6	
	7	17	10	30	
	6	55	61	155	
(3)	10	1		1	3.49
	9	2		2	
	8	6		6	
	7	13	15	28	
	6	45	49	139	
(4)	10	1		1	3.39
	9	2		2	
	8	5	1	6	
	7	17	6	26	
	6	47	51	125	
(5)	10	1		1	3.07
	9	2		2	
	8	4	1	5	
	7	10	5	18	
	6	38	29	91	

本例5个动脉小树分支比的平均值为(3.61+3.45+3.49+3.39+3.07)/5=3.40。以分支比的第1次平均值3.40代替假定的分支比3，依次按上述方法，对5个动脉小树的断离分支进行补正并计算分支比。又可以得到各小树分支比的第2次平均值3.44。然后，又以3.44代替3.40，再依次对5个动脉小树的断离分支进行补正并计算分支比，得到各小树分支比的第3次平均值仍为3.44。一般各小树的分支比平均值，经过如此3～4次反复计算，逐步集中，不再变化。本例右冠状动脉第10级至第6级分支的分支比为3.44。

其余4例右冠状动脉树也同样取动脉小树样本，按上述方法求各小树分支比的平均值。然后，取所有右冠状动脉树样本分支比平均值的均值，作为人右冠状动脉第10级至第6级分支的分支比，并用该分支比，从第10级开始，计算第10级以下分支(第9级至第1级)的数目，见表2。该表中，第10级以上分支(第10级至第14级)的数目，均系在冠状动脉树上实际计数所得。将整个右冠状动脉树第14级至第1级的各级分支数目取对数，与分支级数作直线回归分析，所得斜率即为右冠状动脉树的平均分支比。以同样的方法计算左冠状动脉树的平均分支比。

本文所有测量数据输入计算机(Apple－II型)，用BASIC语言和FORTRAN语言编制计算程序进行处理。求得所测分支的平均直径和锥度，将分支依平均直径，从大到小排列后，再按直径大小分级归类，得到各级分支的直径和长度的平均值与标准差。各级分支直径和长度的平均值分别取对数，与分支级数作直线回归和相关分析，得出各自的斜率

?1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

和相关系数并作相关系数检验。直径和长度的斜率分别为整个冠状动脉树的平均直径比和平均长度比。然后，根据各级分支的直径和长度，计算各级分支的截面积、总截面积、总容积和累计总容积(详见表3注)。

结　　果

人右冠状动树有14级分支；左冠状动脉树有15级分支。人冠状动脉的几何形态学数据见表2至表5。

人左、右冠状动脉各级分支的直径、长度及分支数目与分支级数的关系，见图3至图7。由图3至图7的分析可见，人冠状动脉分支的直径、长度及分支数目与与分支级数呈指数函数关系，见表6，其相关有高度显著性($P<0.005$)。

表2　人右冠状动脉几何形态学数据(Ⅰ)

级数	所测分支数目	直径(μm)			长度(mm)			锥度(°)		分支数目
		MEAN	SD	DR	MEAN	SD	LR	MEAN	SD	
14	5	3250.0	326.2	1.51	101.7560	22.1680	4.53	0.28	0.14	1
13	14	2152.5	178.6	1.58	22.4671	11.7276	0.82	0.41	0.15	3
12	42	1363.7	162.0	1.58	27.5373	17.5145	2.11	0.44	0.29	8
11	142	865.1	89.6	1.50	13.0340	9.6281	1.82	0.48	0.33	28
10	179	577.2	67.5	1.48	7.1603	3.3750	1.65	0.49	0.30	103
9	176	389.2	42.4	1.46	4.3330	2.0213	1.39	0.61	0.42	363
8	153	266.9	29.9	1.64	3.1188	1.3846	1.19	0.55	0.30	1276
7	125	163.0	18.6	1.52	2.6099	1.8838	1.95	0.61	0.36	4492
6	58	106.9	14.8	1.49	1.3353	0.4987	1.50	0.56	0.29	15813
5	114	71.8	8.7	1.37	0.8915	0.3670	1.52	0.62	0.34	55661
4	17	52.3	3.6	1.64	0.5865	0.1822	1.55	0.49	0.22	195927
3	—	31.8	—	1.52	0.3795	——	1.86	——	——	689661
2	—	20.9	—	1.51	0.2041	——	1.60	——	——	2427608
1	—	13.8	—	——	0.1274	——	——	——	——	8545180

注：1) MEAN－平均值；SD－标准差；DR－直径比；LR－长度比，(下同)。
2) N级分支的直径(长度)/N－1级分支的直径(长度)＝直径比(长度比)。

表3　人右冠状动脉几何形态学数据(Ⅱ)

级　数	截面积 (mm^2)	总截面积 (mm^2)	总容积 (mm^3)	累积总容积 (mm^3)
14	8.2958	8.2958	844.1442	844.1442
13	3.6390	10.9168	245.2700	1089.4142
12	1.4606	11.6847	321.7650	1411.1792
11	5.8779×10^{-1}	16.4581	214.5153	1625.6945
10	2.6166×10^{-1}	26.9513	192.9794	1818.6739
9	1.1897×10^{-1}	43.1859	184.1246	2005.7985
8	5.5948×10^{-2}	71.3901	222.6513	2228.4498
7	2.0867×10^{-2}	93.7357	244.6401	2473.0905
6	8.9752×10^{-3}	141.9252	189.5127	2662.6032
5	4.0489×10^{-3}	225.3667	200.9144	2863.5176
4	2.1483×10^{-3}	420.9084	246.8628	3110.3804
3	7.9423×10^{-4}	547.7467	207.8699	3318.2503
2	3.4307×10^{-4}	832.8389	169.9824	3488.2327
1	1.4957×10^{-4}	1278.1131	162.8316	3651.0643

注：截面积为每一分支的值；总截面积为每级所有分支截面积之和；总容积为每级所有分支容积之和；累积总容积是从高序号级数到低序号级数累计相加的总容积，(下同)。

?1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

表 4　人左冠状动脉几何形态学数据(Ⅰ)

级数	所测分支数目	直径(μm)			长度(mm)			锥度(°)		分支数目
		MEAN	SD	DR	MEAN	SD	LR	MEAN	SD	
15	5	4126.0	554.1	1.44	9.2040	1.6815	0.13	1.41	1.04	1
14	10	2870.0	299.8	1.64	68.8810	27.9532	2.21	0.38	0.18	2
13	36	1746.9	237.4	1.47	31.1858	14.8572	1.72	0.42	0.18	7
12	72	1188.5	125.4	1.43	18.1778	9.5719	1.68	0.36	0.19	14
11	241	831.0	82.9	1.40	10.8191	5.9620	1.49	0.48	0.31	48
10	279	594.4	51.7	1.50	7.2373	3.5711	1.46	0.49	0.32	174
9	339	397.4	47.7	1.52	4.9535	2.6672	1.36	0.59	0.48	618
8	321	261.2	32.8	1.56	3.6308	1.8040	1.30	0.54	0.35	2193
7	291	167.0	20.5	1.55	2.7829	1.4834	2.04	0.55	0.34	7785
6	128	108.0	15.4	1.50	1.3617	0.8298	1.42	0.64	0.38	27635
5	217	71.9	9.4	1.40	0.9580	0.8721	1.68	0.66	0.37	98105
4	67	51.3	3.7	1.52	0.5700	0.2015	1.07	0.58	0.33	348273
3	—	33.8	—	1.50	0.5304	—	1.44	—	—	1236368
2	—	22.6	—	1.49	0.3689	—	2.07	—	—	4389106
1	—	15.2	—	—	0.1782	—	—	—	—	15581326

表 5　人左冠状动脉几何形态学数据(Ⅱ)

级数	截面积 (mm^2)	总截面积 (mm^2)	总容积 (mm^3)	累计总容积 (mm^3)
15	13.3705	13.3705	123.0623	123.0623
14	6.4692	12.9385	891.2163	1014.2786
13	2.3968	16.7773	523.2159	1537.4945
12	1.1094	15.5316	282.3304	1819.8249
11	5.4237×10^{-1}	26.0335	281.6594	2101.4843
10	2.7749×10^{-1}	48.2833	349.4406	2450.9249
9	1.2404×10^{-1}	76.6539	379.7049	2830.6298
8	5.3502×10^{-2}	117.3301	426.0022	3256.6320
7	2.1904×10^{-2}	170.5224	447.5468	3731.1788
6	9.1609×10^{-3}	253.1610	344.7294	4075.9082
5	4.0602×10^{-3}	398.3261	381.5964	4457.5046
4	2.0669×10^{-3}	719.8540	410.3168	4867.8214
3	8.9727×10^{-4}	1109.3563	588.7354	5456.5568
2	4.0115×10^{-4}	1760.6897	649.5184	6106.0752
1	1.8146×10^{-4}	2827.2624	503.8360	6609.9112

表 6　人冠状动脉分支的直径、长度及分支数目与分支级数呈指数函数关系

	左冠状动脉	右冠状动脉
直径	$Y=10.1601\cdot e^{0.4006X}$	$Y=9.0657\cdot e^{0.4181X}$
长度	$Y=0.1782\cdot e^{0.3638X}$	$Y=0.0796\cdot e^{0.4711X}$
分支数目	$Y=42442406.44\cdot e^{-1.2142X}$	$Y=27809936.68\cdot e^{-1.2427X}$

表 2 和表 4 中，第 1～3 级分支的平均直径和平均长度值是由图 3 至图 6 中相应的回归方程外推所得。其结果与在墨汁灌注的组织切片上所测得冠状动脉第 1～3 级分支的平均直径和平均长度的值一致，见表 7，说明由回归方程外推值是合理的。

上述结果表明，人左冠状动脉第 10 级以上分支(第 10 级至第 15 级，相当于心外膜下分支)的直径、各级分支的分支数目、截面积、总截面积、总容积以及累计总容积均大于右冠状动脉。左、右冠状动脉的第 1 级分支数目之比为 1.82；累计总容积之比为 1.81，

?1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

表7　人冠状动脉第4—1级分支切片测量值与外推值比较

级数		所测分支数目	直径（μm） 测量值 MEAN	SD	外推值	所测分支数目	长度（mm） 测量值 MEAN	SD	外推值
右冠状动脉	4	5	53.8	4.4	52.3*	—	——	——	0.59*
	3	9	33.6	3.3	31.8	7	0.38	0.10	0.40
	2	32	24.3	2.9	20.9	18	0.26	0.06	0.20
	1	31	14.2	2.2	13.8	19	0.17	0.03	0.13
左冠状动脉	4	5	52.0	3.2	51.3*	—	——	——	0.57*
	3	9	35.9	5.2	33.8	5	0.54	0.20	0.53
	2	33	24.1	3.4	22.6	14	0.27	0.06	0.37
	1	32	14.3	2.5	15.2	15	0.20	0.06	0.18

注：*为铸型标本实测值

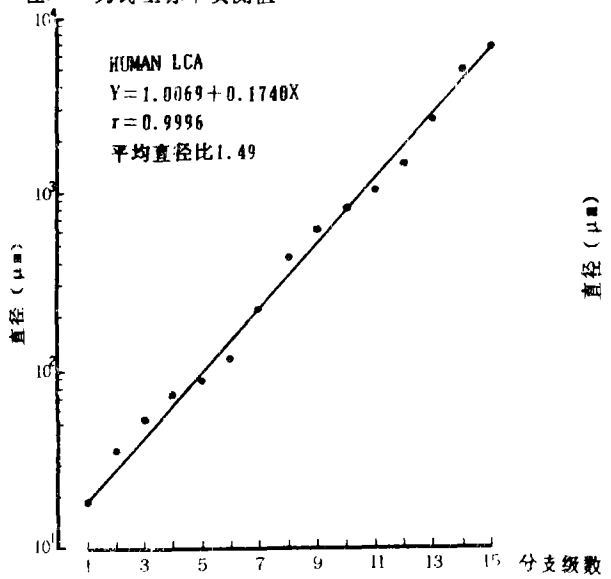


图3　人左冠状动脉各级分支平均直径与分支级数的关系

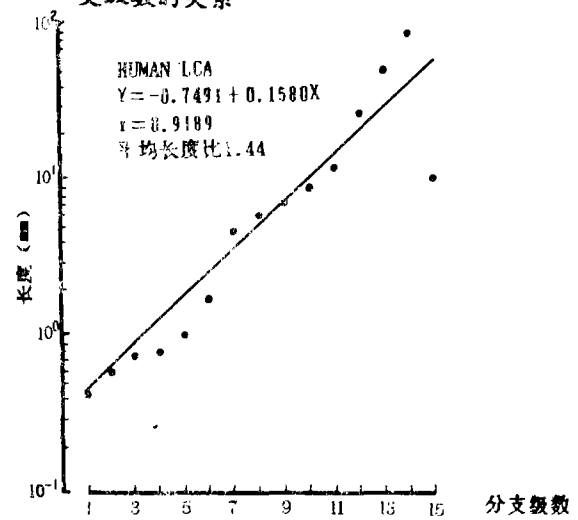


图4　人左冠状动脉各级分支平均长度与分支级数的关系

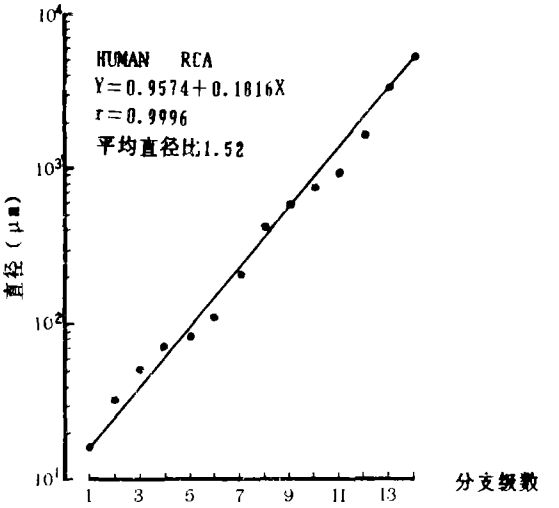


图5　人右冠状动脉各级分支平均直径与分支级数的关系

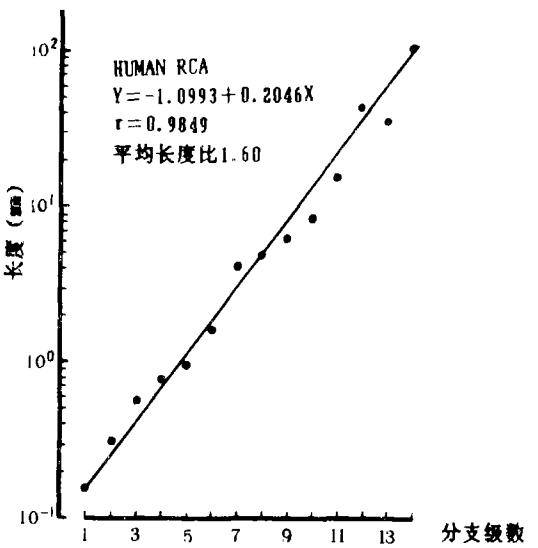


图6　人右冠状动脉各级分支平均长度与分支级数的关系

?1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

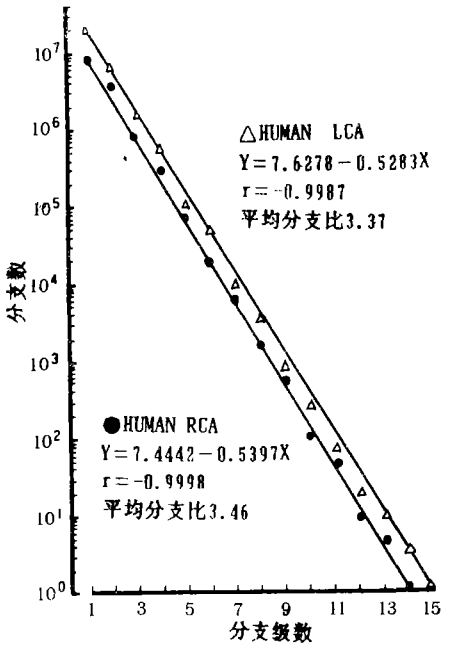


图 7 人冠状动脉各级分支数目与分支级数的关系

人右冠状动脉主干(第 14 级)的长度分别是左冠状动脉主干(第 15 级)的 11.06 倍,前室间支或旋支(第 14 级)的 1.48 倍。然而,人左、右冠状动脉第 10 级以下分支(第 9 级至第 1 级,相当于心肌内分支)的直径和长度彼此都相似。

讨 论

血管系分支模型的可能描述方法有 2 种。其一,是从主干血管开始,向终末分支计算,把各分支依次分级(或分代);其二,是采用 Strahler 体系,从终末分支开始,向主干血管计算,将各分支按管径大小分级,依次排列。冠状动脉是分支数目不对称的分支系统,大小相似的分支可能处在级序不同的分支级上,用第一种方法难以准确表达血管分级与管径的关系。采用 Strahler 体系按照血管管径的大小,将管径相似的分支列入同一级。这样,在多个小分支连于一个较大分支时,采用该体系可以不必在每个分支的连接处,都要增加 1 次分级的级数。因此有可能对诸如冠状动脉一类的不对称分支系统进行较为精确地表达。采用 Strahler 体系描述血管系,分支级数大,管径相应大,分支数目也多,对每级分支供血区的确定较为容易。但是,用第 1 种方法,分一支算一级,难以估计每级分支的供血范围。

冠状动脉的分布在心脏的胸肋面较为恒定,而在膈面变化较大。以往人们根据冠状动脉在膈面的分布变化,确定其分布的优势类型。各家采用的标准不一,结果也很不一致[2][4][13][14],其中以采用 Schlesinger 法者较多[2]。该法根据冠状动脉与房室交点及后室间支的关系,将冠状动脉的分布分为右优势型、均衡型及左优势型 3 种类型。本文采用的 5 例人冠状动脉铸型标本,按 Schlesinger 的分型原则,均属于右优势型。但是,几何形态学研究结果表明,右冠状动脉第 10 级以上分支的长度大于左冠状动脉,而左冠状动脉第 10 级以上分支的直径却大于右冠状动脉。左、右冠状动脉累计总容积之比为 1.81、第 1 级分支数目之比为 1.82。人的左心室壁厚、工作量大、所需氧及营养物质多,左冠状动脉的管径大、分支多、总容积大是适应功能的需要。本文从形态定量的研究结果,认为人左冠状动脉是心脏的首要供血动脉,即生理上的优势动脉。

然而,冠状动脉传统的分型原则,仅考虑了冠状动脉心外膜下分支的走行和分布,即分支的长度特征,忽视了最具生理意义的分支管径因素。根据 Poiseuille 定律,有方程:

$$Q=\frac{\pi R^4 \Delta P}{8L\,\eta}$$

可将上式写成:

$$Q=\Delta P.\ \frac{\pi}{8}\cdot\frac{1}{\eta}\cdot\frac{R^4}{L}$$

在上式中,最后一项是血管的几何因素项,即血流量与血管半径 R 的 4 次方成正比,而与血管长度 L 成反比。在其他条件不变的情况下,血管越长其血流量就越小,而血管半径的变化,将引起血流量以半径 4 次方的比例变化。可见,血管的几何形态因素中,血管的半径最为重要。若在确定冠状动脉的分布类型时,考虑心外膜下分支的管径因素,

?1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

有可能更准确地描述冠状动脉的形态特征。

（本文承蒙重庆大学生物工程研究中心王公瑞教授指正，研究生卓曦协助部分数据处理，谨此致谢！）

参 考 文 献

1. 冯元桢. 生物动力学：血液循环. 戴克刚 译. 长沙：湖南科学技术出版社，1986
2. Schlesinger MJ. Relation of anatomic pattern to pathologic conditions of the coronary arteries. Arch Path 1940;30:403
3. James TN. Anatomy of the coronary arteries. New York: PB Hoeber, 1961
4. 遵义医学院，等. 冠状动脉解剖学. 北京：科学出版社，1977
5. 左焕琛，于彦铮. 国人左心室壁内的动脉构筑. 解剖学杂志 1985;8:85
6. Strahler AN. Quantitative analysis of watershed geomorpholgy. Trans Am Geophys Union 1957;38:913
7. Horsfield K. Are diameter, length and branching ratios meanigful in the lung? J Theor Biol 1980;87:733
8. Singhal S, et al. Morphometry of the human pulmonary arterial tree. Circ Res 1973;33:190
9. Horsfield K. Morphometry of the small pulmonary arteries in man. Circ Res 1978;42:593
10. Yen RT, et al. Morphometry of cat's pulmonary arterial tree. J Biomech Eng 1984;106:131
11. Yen RT, et al. Morphometry of cat's pulmonary venous tree. J Appl Physiol 1983;55:236
12. 姜宗来. T31环氧树脂固化剂在血管铸型中的应用. 解剖学杂志 1988;11:68
13. Ahmed, et al. A new conception of coronary artery preponderance. Acta Anat 1972 3:87
14. Kalbfleisch H, Hort W. Quantitative study on the size of coronary artery supplying areas postmortem. Am Heart J 1977;84:183

（收稿：1989.1.20；修回：1989.2.15）

Geometrical Morphology of the Human Coronary Arteries

Jiang Zonglai and He Guangchi

(*Department of Anatomy, Third Military Medical College*)

Five resin casts of the coronary arteries and the histological sections of three hesrts with the arteries injected Chinese ink were prepared in human adult autopsy subjec s. 3187 branches of the coronary arterial trees were counted and measured. By Strahler's system the branch pattern of the coronary arterial tree was described. According to the analysis of the geometrical morphology data, the relationships between the diameter, the length and the number of branches in each order and the branch order show the exponential function respectively, which have high correlation significance ($p<0.005$). The characteristics of the coronary vasculature have been discussed in a quantitative view. It suggests that the left coronary artery is the major one supplying the heart. The arterial diameter may be considered in describing the preponderance of the coronary distribution.

Key words: Coronary vessels/AH; Biomechanics

（上接84页）

The mitochondrial inhibitory respiratory funcyion becomes evident while the energization function is still normal. Therefore, the mechanism of inhibition of respiratory function by the eschar extract is not clear yet.

Key words: Mitochondria, Liver/UL; Malondialdehyde/PD; Inhibition; Respiratory control ratio; Energization of the inner membranc; Eschar extract

?1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net