

# 动脉血压离心脏越远越低吗? ——对动脉血压的一点再认识

王臻<sup>1</sup>, 张星<sup>1</sup>, 陶凌<sup>2</sup>, 高峰<sup>1</sup>

(中国人民解放军空军军医大学 1. 航空航天医学系飞行人员疗养与康复教研室,  
2. 西京医院心内科, 陕西省西安市 710032)

[作者简介] 王臻,男,1984年10月生,中国人民解放军空军军医大学(第四军医大学)心血管生理学在站博士后,研究方向为心血管血流动力学、心血管超声。长期致力于动脉僵硬度超声评价、心血管功能无创评价、心血管系统压力无创检测等领域的科学研究,积累了丰富经验。目前以第一作者或通信作者发表科研论著15篇,其中在《Clin Exp Rheumatol》《PLoS One》《Ultrasound Med Biol》等SCI期刊发表论著5篇,主持国家自然科学基金1项,获陕西省科学技术奖一等奖1项,国家发明专利3项,国家实用新型专利1项,副主编专著1部,参编、参译专著2部,担任《Life Sciences》等SCI期刊审稿人。

[关键词] 血压; 主动脉; 外周大动脉; 脉搏波反射

[摘要] 传统生理学教科书中“动脉血压随着远离心脏而逐渐降低”的相关表述不够准确。大量研究表明,动脉收缩压和脉压在由中心动脉向外周大动脉这一区段传播的过程中不仅没有逐渐降低,反而逐渐升高。这一现象可能与脉搏波反射等因素有关。笔者呼吁传统教科书中的相关表述应予以修正,使之更加准确,以避免对广大医学生或临床医生造成误导,同时脉搏波反射具有重要的生理及临床意义,应予以进一步重视。

[中图分类号] R5

[文献标识码] A

## Does the arterial blood pressure gradually decrease as it moves away from heart? --a rethinking on human arterial blood pressure

WANG Zhen<sup>1</sup>, ZHANG Xing<sup>1</sup>, TAO Ling<sup>2</sup>, GAO Feng<sup>1</sup>

(1. Department of Rehabilitation for Flight Crew, School of Aerospace Medicine; 2. Department of Cardiology, Xijing Hospital, Airforce Military Medical University, Xi'an, Shaanxi 710032, China)

[KEY WORDS] blood pressure; aorta; peripheral large arteries; pulse wave reflection

[ABSTRACT] The traditional physiology textbooks hold the opinion that arterial blood pressure gradually decreases as it moves away from heart, which we think is not precise saying. A large number of studies have shown that the arterial systolic pressure and pulse pressure will gradually increase during the pressure wave transmitting from aorta to the peripheral large arteries. This phenomenon can be explained by pulse wave reflection theory. This paper suggests that the relevant expressions in traditional textbooks should be corrected to make them more accurate, so as to avoid misleading medical students or clinicians. Pulse wave reflection has potential physiological and clinical significance, which should be paid more attention to.

自以为知道而实际并不知道,是我们每一个人都容易犯的致命错误。

——伯特兰·罗素(1872-1970)

1 生理学教科书认为人体动脉血压随着远离心脏而逐渐降低

全国高等医学院校多个版本的生理学教科书

[收稿日期] 2018-11-16

[修回日期] 2018-12-21

[基金项目] 国家自然科学基金项目(81801865)

[作者简介] 王臻,博士后,研究方向为心血管超声、心血管血流动力学,E-mail 为 swzwang@126.com。通信作者高峰,博士,教授,博士研究生导师,研究方向为心血管生理,E-mail 为 fgao@fmmu.edu.cn。

中,关于人体动脉血压在不同部位的变化做了如下描述:“由于血液从大动脉流向心房过程中不断消耗能量,故血压将逐渐下降”<sup>[1]</sup>,“血液从主动脉流向外周的过程中,由于不断地克服血管对血流的阻力而消耗能量,血压会逐渐降低”<sup>[2]</sup>,“血液流经各类血管时,受到的阻力不同,流速不同,因而各类血管的血压逐段降低,其中在小动脉和微动脉段降低幅度最大”<sup>[3]</sup>,“各段血管的血压并不相同,从左心室射出的血液流经外周血管时,由于不断克服血管对血流的阻力而消耗能量,血压逐渐降低……在主动脉和大动脉段,血压降幅较小……到小动脉时,血流阻力增大,血压降落的幅度也变大”<sup>[4]</sup>。国外的一些生理学教科书也写道:“In the systemic circulation, the highest pressure occurs in the aorta and reflects the pressure created by the left ventricle”(体循环中主动脉血压最高,并反映了左心室产生的压力)<sup>[5]</sup>。此外,国内一些生理教科书采用了图 1<sup>[1]</sup>(或者类似图)来说明各段血管血压、血流速度与血管总横截面积的关系。

首先,需要说明的是,通常所说的动脉血压包括收缩压、舒张压、平均动脉压和脉压。临床上使用最多的也是收缩压、舒张压和脉压。从图 1 可以看出,动脉血压随着逐渐远离心脏,收缩压、舒张压均逐渐降低,由于舒张压降低的幅度小于收缩压,因此脉压亦逐渐降低。由此图亦可大致推断平均动脉压也随着远离心脏而逐渐降低。

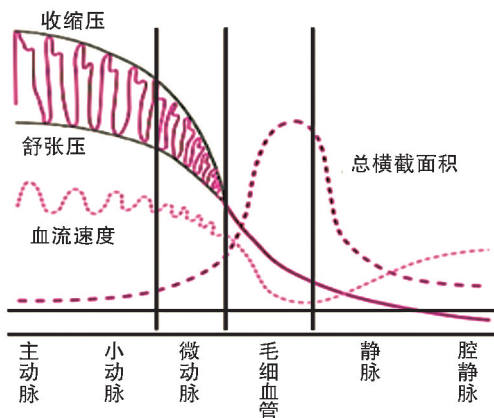


图 1. 传统生理学教科书认为动脉血压随着不断远离心脏而逐渐下降<sup>[1]</sup>

Figure 1. Traditional physiology textbooks hold the opinion that arterial blood pressure gradually decreases as it moves away from the heart<sup>[1]</sup>

目前使用的生理学教科书中多数均笼统地采用“动脉血压”一词,而不具体说明,这样便会给广

大医学生造成这样一个印象:动脉血压中的收缩压、舒张压、平均动脉压和脉压均随着远离心脏而逐渐降低。

然而,如果上述的“印象”与真实情况不符,那么这就可能给广大的医学生带来一定的误导。就此,笔者随机抽取了空军军医大学新近毕业的 10 名临床医学专业(五年制本科)学员进行提问,问题是:主动脉处的收缩压和桡动脉处的收缩压,哪一个更高? 10 名学员(100%)均认为主动脉处的收缩压要高一些,因为其距离心脏更近。然而,事实是:桡动脉的收缩压高于主动脉的收缩压!由此可见,传统的生理学教科书确实给医学生关于不同部位动脉血压变化情况的认知带来了一定的误导。也正是这个原因,促使笔者写下这篇文章,与同行商榷,并呼吁对生理学教科书中的这一笼统表述予以纠正,避免对广大医学生及临床医生造成误导。另外,此文或许能起到抛砖引玉的作用,引发大家对动脉血压进行更为深入的思考。

## 2 前期研究表明动脉收缩压及脉压在传至外周大动脉这一区段不仅不降低反而会升高

长期以来,对于人体血压和血流相互作用关系的研究一直吸引着众多的研究者。虽然对于血压和血流的测量相对比较容易,但是,二者的相互作用却是一个极为复杂的问题,诸多问题仍然像谜一样困扰着无数生理学家。动脉脉搏波在向远端外周动脉传播的过程中,其波形为什么会发生改变便是这样一个难题<sup>[6]</sup>。

前期学者发现,动脉脉搏波在向外周大动脉传递的过程中,收缩压呈逐渐升高的趋势,舒张压几乎不变或有下降的趋势,脉压逐渐增大(图 2)<sup>[6]</sup>。研究发现,在隐动脉处(膝关节水平)测量的脉压约为主动脉根部的两倍。

O'Rourke<sup>[7]</sup>早在 1967 年就报道,将测压导管从一只袋熊的股动脉插入,然后从距主动脉瓣口 5 cm 的主动脉弓开始,每远离心脏 5 cm 就记录一次动脉内的压力波形,直至距离主动脉瓣口 50 cm 的髂内动脉,得到了图 3 所显示的血压波形。从图 3 中可以看出,随着逐渐远离心脏,动脉血压的收缩压逐渐升高,脉压逐渐变大。

另外,Rowell 等<sup>[8]</sup>在其一项研究中同步记录了正常人体的主动脉和桡动脉处的压力波形(图 4)。图中可以看出,桡动脉的压力波形与主动脉明显不同,桡动脉收缩压明显高于主动脉收缩压。

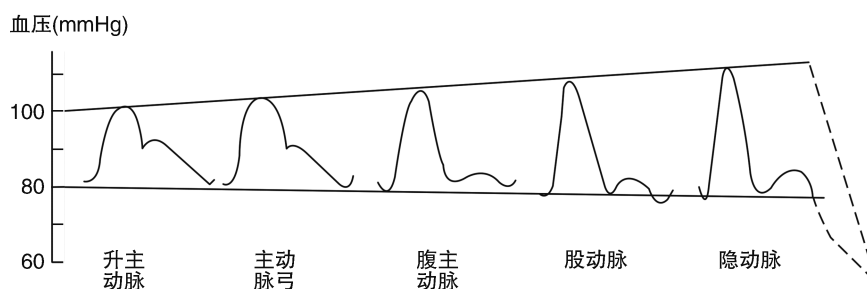


图 2. 动脉压力波形在远离心脏传递过程中的变化情况<sup>[6]</sup>

Figure 2. Changes of arterial pressure waveforms as they travel away from the heart<sup>[6]</sup>

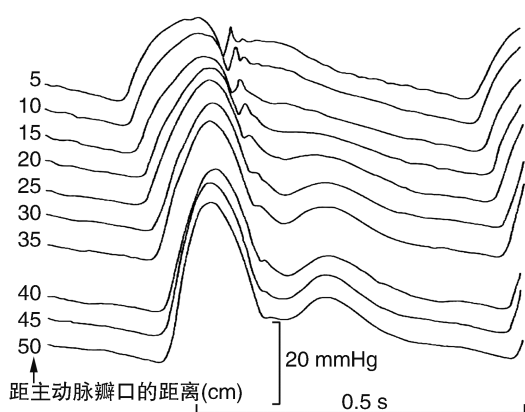


图 3. 实验中每隔 5 cm 记录的动脉压力波形变化<sup>[7]</sup>

Figure 3. Changes of arterial pressure waveforms were recorded at every 5 cm away from aortic valve from O'Rourke MF' study<sup>[7]</sup>

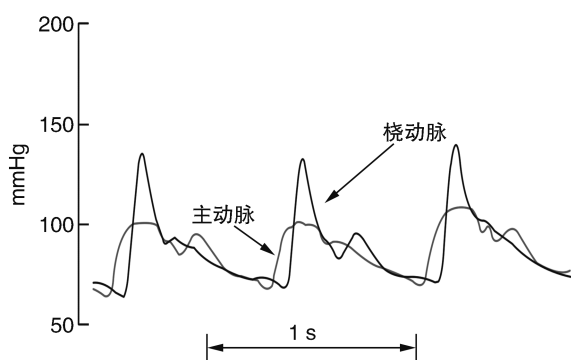


图 4. 正常人体主动脉和桡动脉处的压力波形<sup>[8]</sup>

Figure 4. Pressure waveforms at the aorta and the radial artery from a normal human<sup>[8]</sup>

前期学者们的观察研究均表明,动脉收缩压和脉压在由中心动脉向外周大动脉这一区段传播的过程中不仅没有逐渐降低,反而逐渐升高。从这一点来看,传统生理学教科书中“动脉血压随着远离心脏而逐渐降低”的表述不够准确。

笔者认为,科学研究应当以事实为基础,避免“thinking that you know when in fact you don't(自以为是)”这样的错误,才有可能探索真相、接近真理。

### 3 脉搏波反射——一个不能被忽视的重要现象

如前所述,动脉脉搏波在向外周动脉传播的过程中,其波形发生改变的机制是一个公认的难题。为什么动脉的收缩压和脉压从中心动脉到外周大血管这一区段不下降反而会升高?这也是笔者目前感兴趣并正在探讨的一个问题。笔者认为,脉搏波反射(pulse wave reflection)可能是其中一个重要原因。

脉搏波(pulse wave)是一种由心脏收缩射血产生的并沿动脉管壁向外周血管传播的压力波,其平均传播速度一般约为 10 m/s,这一速度远大于血流在血管内的速度。由于脉搏波是心室收缩并射血产生的,而人体左心室的射血时间约为 300 ms。因此,根据波长公式  $\lambda = v \cdot T$  (其中  $v$  代表波速,  $T$  为周期) 可以大概计算出动脉脉搏波波长约为 3 m,这一距离明显大于人体身高,可见在射血中期,脉搏波就已经传遍全身。脉搏波作为压力波向前传播的过程,实际上也是一种能量的传播,脉搏波所到之处压力开始升高,血流同时也开始加速。另外,研究发现,动脉管壁弹性越好,脉搏波传播的速度也就越慢,相反,管壁越僵硬,脉搏波传播的速度也就越快。因此,脉搏波传播速度(pulse wave velocity, PWV)目前已经作为衡量动脉血管僵硬度的“金指标”。新近研究揭示,PWV 与血管老化及多种心血管病密切相关,已成为一项强有力的心血管疾病、心脑血管不良事件和全因死亡率的独立预测指标。

脉搏波的本质是一种压力波,其向前传播的过



程也遵守波的传播规律。这就意味着,当遇到反射条件时,脉搏波也会像其他类型的机械波一样发生反射。左心室收缩产生的脉搏波通过主动脉传向动脉树的分支,在遇到动脉血管壁阻抗不一致时,部分脉搏波就会被反射回来,这一现象称为脉搏波反射。图 5<sup>[6]</sup> 概略地显示了脉搏波反射的基本原理。在生物体中,脉搏波向前传播的过程中遇到传播介质的不均一性变化时,例如遇到动脉分叉、动脉弹性改变和高阻力性微小动脉等情况,便会发生不同程度反射<sup>[6]</sup>。由于生物体血管树的构造和功能,反射回来的波也为正向波(如图 5 所示)。反射回来的脉搏波一般振幅减低,这是由于存在能量消耗和不同程度透射(继续向前传播)的缘故。反射波振幅的大小由发生反射的两种介质的弹性模量差异决定,差异越大,反射系数越大;差异越小,反射系数越小。从图中可以看出,反射波与下一个波叠加会导致压力波波形的改变,导致压力升高。需要指出的是,人体脉搏波的波长较长,同一脉搏波的前部分发生的反射波会与脉搏波的后部分叠加,导致波形的改变,因此,在主动脉及其较大的分支(如肱动脉)处记录到的压力波,其实是前向脉搏波和反射波的复合波形。但是,其所遵循的基本原理与图 5 所示相同。

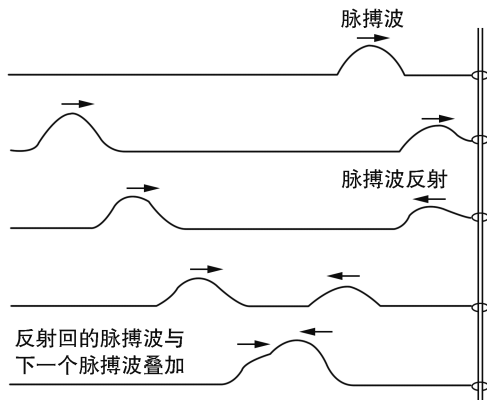


图 5. 脉搏波反射原理<sup>[6]</sup>

Figure 5. Schema of pulse wave reflection<sup>[6]</sup>

实际上,早在 17 世纪著名生理学家、血液循环理论的创始人威廉·哈维在其血液运行的著作中就提出了脉搏波反射的概念。但这一概念至今长期被忽略,以至于很多心血管病医生甚至一些心血管生理学家对这一概念还相当陌生。

脉搏波反射是一个不应被忽视的重要现象。研究发现,脉搏波反射在临床上也具有重要的价

值。例如,动脉僵硬度和脉压是心血管事件发生的独立预测指标,脉压在心血管疾病患者和老年人中的增加主要是由于脉搏波反射造成的<sup>[9-12]</sup>。另外,多项研究表明,在老年人<sup>[13]</sup>以及冠心病<sup>[14]</sup>、心肌梗死<sup>[15]</sup>、高血压<sup>[16]</sup>、脑卒中<sup>[17]</sup>、糖尿病<sup>[18]</sup>、终末期肾病<sup>[19]</sup>等患者中,中心动脉僵硬度增加,脉搏波反射增强。在生理状态下,年轻人的大动脉弹性较好,顺应性高,所以 PWV 较慢,也意味着在心脏远处发生的反射波向回传播的速度也较慢,因此在这种情况下,在靠近心脏的主动脉处,反射波主要落在中心动脉压力波的舒张期,使舒张压升高较为明显,在一定程度上有利于增加冠状循环灌注。然而,对于老年人或者动脉硬化等生理病理状态,由于 PWV 较快,反射波会主要落在中心动脉压力波的收缩期,使收缩压升高,脉压差增大,这在一定程度上会增加左心室的后负荷。

从图 5 可以看出,人体反射回来的脉搏波为正向,反射回的血流必然会与之前相反,因此,脉搏波与反射回波的叠加会导致压力的升高和血流的降低。这一点令笔者想起了伯努利方程,在理想流体定常流动时,在同一水平面,忽略摩擦力,任意两点的动能和压强之和为一常数。血液流动也近似遵守伯努利方程,在中心动脉至外周大动脉这一区段,摩擦力导致的能量损失一般不超过 2%,如果人体平卧位,此时处于同一水平面,理论上讲,中心动脉处血液的压强和动能之和应与外周大动脉处压强与动能之和相差不多。然而,外周动脉的总血管面积大于主动脉,根据液流连续性方程,外周动脉的血流速度应该低于主动脉,因此,外周动脉内的压强应该会高于主动脉。由此可以推想,脉搏波反射可能就是血液的动能向压强能转换的一种作用方式,在本质上遵守能量守恒定律,就像单摆从最低点速度最快的状态向高处运动实现动能向势能的转换。当然,以上只是笔者粗略的理解,人体血压和血流脉动性的特性使这一问题更为复杂,尚需要更为深入的仔细探究。

在人体循环系统中,血压和血管内的血流受多种因素的影响,血管壁对血液的摩擦力,血细胞之间的摩擦力等会导致能量的消耗,是血压和血流降低的因素;脉搏波反射又是血压升高的因素,同时也是血流降低的因素。血压和血流正是在这些因素的共同影响下,呈现出最终我们所观察到的现象。在不同的空间和时间,各个因素影响的程度也不同。在人体的主动脉和外周动脉这些大动脉,血

管对血流的阻力较小,从左心室射出的血液在运行时的能量损耗也较小,而此时脉搏波的反射却很强,因此,此时脉搏波反射占据主导,导致了我们在主动脉和外周动脉这些大动脉内观察到的收缩压升高的现象。

目前已经证实,脉搏波反射这一现象在心血管压力波传递过程中是确定存在的。对于脉搏波反射这一概念的长期忽视,会阻碍人们对于动脉压力、血流及其相互作用本质的深入认知。因此笔者呼吁,在研究人体动脉系统压力、血流时,应该重视脉搏波反射这一现象。

综上所述,传统生理学教科书中“动脉血压随着远离心脏而逐渐降低”的观点不够准确。大量研究表明,动脉收缩压和脉压在由中心动脉向外周大动脉这一区段传播的过程中不仅没有逐渐降低,反而逐渐升高。这一现象可能与脉搏波反射等因素有关。笔者呼吁,传统教科书中的相关表述应予以修正,使之更加准确,以避免对广大医学生或临床医生造成误导,同时脉搏波反射具有重要的生理及临床意义,应予进一步重视。

**致 谢** 感谢俞梦孙院士、曹铁生教授对本文提出的宝贵建议。

#### [参考文献]

- [1] 管又飞, 刘传勇. 医学生理学[M]. 第3版. 北京: 北京大学医学出版社, 2013: 93-94.
- [2] 姚泰. 生理学[M]. 第2版. 北京: 人民卫生出版社, 2011: 167.
- [3] 朱妙章. 大学生理学[M]. 第4版. 北京: 高等教育出版社, 2013: 224.
- [4] 朱大年, 王庭槐. 生理学[M]. 第8版. 北京: 人民卫生出版社, 2013: 120.
- [5] Silverthorn DU. Human physiology: an integrated approach [M]. 5th edition. New Jersey: Prentice-Hall, Inc, 2001: 448.
- [6] Nichols WW ORM. McDonald's blood flow in arteries; theoretical, experimental and clinical principles [M]. 6th edition. London: Hodder Arnold, 2011: 226.
- [7] O'Rourke MF. Pressure and flow waves in systemic arteries and the anatomical design of the arterial system[J]. J Appl Physiol, 1967, 23(2): 139-149.

- [8] Rowell LB, Brengelmann GL, Blackmon JR, et al. Disparities between aortic and peripheral pulse pressures induced by upright exercise and vasomotor changes in man[J]. Circulation, 1968, 37(6): 954-964.
- [9] Vlachopoulos C, Aznaouridis K, O'Rourke MF, et al. Prediction of cardiovascular events and all-cause mortality with central haemodynamics: a systematic review and meta-analysis[J]. Eur Heart J, 2010, 31(15): 1865-1871.
- [10] Wang KL, Cheng HM, Sung SH, et al. Wave reflection and arterial stiffness in the prediction of 15-year all-cause and cardiovascular mortalities: a community-based study [J]. Hypertension, 2010, 55(3): 799-805.
- [11] Weber T. Wave reflection in acute ischemic stroke [J]. Am J Hypertens, 2010, 23(7): 704.
- [12] Amar J, Ruidavets JB, Chamontin B, et al. Arterial stiffness and cardiovascular risk factors in a population-based study[J]. J Hypertens, 2001, 19(3): 381-387.
- [13] McEniery CM, Yasmin, Hall IR, et al. Normal vascular aging: differential effects on wave reflection and aortic pulse wave velocity: the anglo-cardiff collaborative trial (ACCT) [J]. J Am Coll Cardiol, 2005, 46(9): 1753-1760.
- [14] Gatzka CD, Cameron JD, Kingwell BA, et al. Relation between coronary artery disease, aortic stiffness, and left ventricular structure in a population sample [J]. Hypertension, 1998, 32(3): 575-578.
- [15] Hirai T, Sasayama S, Kawasaki T, et al. Stiffness of systemic arteries in patients with myocardial infarction: a noninvasive method to predict severity of coronary atherosclerosis [J]. Circulation, 1989, 80(1): 78-86.
- [16] Boutouyrie P, Tropeano AI, Asmar R, et al. Aortic stiffness is an independent predictor of primary coronary events in hypertensive patients: a longitudinal study [J]. Hypertension, 2002, 39(1): 10-15.
- [17] Lehmann ED, Hopkins KD, Gosling RG. Atherosclerosis in the ascending aorta and risk of ischaemic stroke [J]. Lancet, 1995, 346(8975): 589-590.
- [18] Wilkinson IB, MacCallum H, Rooijmans DF, et al. Increased augmentation index and systolic stress in type 1 diabetes mellitus [J]. QJM, 2000, 93(7): 441-448.
- [19] Blacher J, Guerin AP, Pannier B, et al. Impact of aortic stiffness on survival in end-stage renal disease [J]. Circulation, 1999, 99(18): 2434-2439.

(此文编辑 朱雯霞)