



人体骨骼肌含量测定方法综述

王自勉

摘要: 骨骼肌是组织-器官层次上最大的身体组分,也是一切体力活动的物质基础。现在已有若干基于性质或基于组分的方法,能够在活体测定身体的骨骼肌含量。计算机体层摄影(CT)与磁共振(MRI)这两种技术可以作为校验新方法的标准。最新发展的基于双能量X-射线吸收技术(DXA)的方法,可以替代CT及MRI,准确地测定活体的全身骨骼肌含量。

关键词: 骨骼肌含量;活体测定;计算机体层摄影;磁共振技术;双能量X-射线吸收技术

中图分类号: G804.49 文献标识码: A

文章编号: 1006-1207(2009)03-0001-09

Methods for Measuring Body Skeletal Muscle Mass

WANG Zi-mian

(St. Luke's - Roosevelt Hospital Columbia University, NY 10025, USA)

Abstract: Skeletal muscle (SM) is the largest component at the tissue-organ level of human body composition and is the material basis of all physical activities. Several methods are now available to quantify total body SM mass in vivo, including property-based and component-based methods. Computerized tomography (CT) and magnetic resonance imaging (MRI) can be used as the criteria for evaluating SM mass measurement methods. The newly-developed method by using dual-energy X-ray absorptiometry (DXA) offers a reasonable alternative to CT and MRI for accurately estimating total body SM mass in vivo.

Key words: skeletal muscle mass; in vivo measurement; computerized tomography; magnetic resonance imaging; dual-energy X-ray absorptiometry

国家体育总局发布的2009年科技支撑计划,指出了在全民健身领域需着重研究的5项关键技术,其中第一项就是体质测量与评价的关键技术。长期以来,国内的体质测量技术局限于形态(如体重、身高、体围)、机能(如血压、心率)与体能(如跑、跳)方面的测试。在发达国家,体质测量已逐渐深入到对身体成分的测定。近年来,国内陆续有测定人群脂肪含量及骨骼矿物质含量的报道(梁人文,1998;张荣欣等,2000;朱惠莲等,2001;秦明伟等,2003;马军等,2006)。反观身体骨骼肌含量这一指标,除了以尿酸酐方法测定的零星研究(王自勉等,1991),尚未见有在较大规模人群中测定骨骼肌含量的报道,这与发达国家差距甚远。

骨骼肌是指属于运动系统的肌肉。全身共有600多块骨骼肌,分布在身体各部位。每块骨骼肌都有一定的形态、位置和辅助装置,具有丰富的血管,受一定的神经支配,以完成一定的功能。

从体质测量与评价的角度来看,骨骼肌是人体最大的组织-器官层次组分,骨骼肌含量理应作为体质测量与评价的重要指标。我们应当在现有的体质测试体系的基础上,开发对身体骨骼肌含量的测定,从而为进一步提高国民体质测试的水平,提供科技支撑。

从体力活动与体育运动的角度来看,骨骼肌的含量直接影响体力活动能力。对于体能类运动项目,较高的骨骼肌含

量是运动员承受大负荷训练和高强度比赛的物质基础,也是提高技术战术水平与运动成绩的重要条件。

因此,测定中国人群的身体骨骼肌含量,是摆在我们面前的重要课题。本文的目的,是综述现有的活体测定骨骼肌含量的方法,以促进对国人身体的骨骼肌含量的研究。

1 骨骼肌在身体中的含量

从人体组成学的角度来看,骨骼肌是组织-器官层次最大的组分。骨骼肌约占新生儿体重的23%;到10岁时增加到约34%。在健康成年人,骨骼肌占体重的比例约为40%(男性)与30%(女性)(表1)。半个世纪以来,无论在国内或国外,随着营养的改善与体力活动的减少,人群中体脂肪占体重的比例增加,而骨骼肌占体重的比例则减少。

骨骼肌占体重的比例在很大程度上受到体脂肪含量变化的影响。为了排除体脂肪含量的影响,Clarys et al.提出了一个重要指标,即骨骼肌(skeletal muscle,SM)占去脂肪组织身体质量(adipose tissue free mass,ATFM)的比值(SM/ATFM)。ATFM是组织-器官层次的指标,定义为去除了所有脂肪组织的身体质量(Clarys et al., 1985)。如表1所示,从新生儿到成年,SM/ATFM由0.31增长到0.53(男性)与0.47(女性)(Valentin, 2003)。Wang等以MRI技术测定了304名健康成年美国人的SM/ATFM值,男性为(平均

收稿日期: 2009-04-15

基金项目: 美国国立卫生研究院研究基金(PO1-DK 42618及1R21DK074877)

作者简介: 王自勉(1946-),男,哥伦比亚大学研究员、上海体育科学研究所客座研究员。主要研究方向: 人体组成学。Tel: 1-212-523-3562, Fax: 1-212-523-3571, Email: ZW28@Columbia.edu

作者单位: Obesity Research Center St. Luke's - Roosevelt Hospital Columbia University 1090 Amsterdam Avenue, 14th Floor New York, NY 10025, USA



值 $\pm$ SD) 0.528 $\pm$ 0.036, 女性为0.473 $\pm$ 0.037 (Wang et al., 2001), 与表1所列的基准成年人的数据相符。老年人的SM/ATFM比值有所下降。

表1 全身骨骼肌含量的基准值
Table I Reference Value of Total Body SM Mass

	基准男性				基准女性			
	骨骼肌 (kg)	体重 (kg)	% 体重	%ATFM	骨骼肌 (kg)	体重 (kg)	% 体重	%ATFM
新生	0.8	3.5	22.9	31.1	0.8	3.5	22.9	31.1
1岁	1.9	10	19.0	30.6	1.9	10	19.0	30.6
5岁	5.6	19	29.5	41.5	5.6	19	29.5	41.5
10岁	11.0	32	34.4	47.0	11.0	32	34.4	47.0
15岁	24.0	56	42.9	54.5	17.0	53	32.0	49.6
成年	29.0	73	39.7	52.9	17.5	60	29.2	46.7

注: 本表由国际辐射防护委员会(ICRP)基准人体的数据(Valentin et al., 2003)编辑而成。ATFM, 去脂肪组织身体质量(adipose tissue free mass)。

2 尸体解剖是测定骨骼肌含量的标准方法

由尸体解剖测定骨骼肌含量, 是公认的标准方法。人体组成研究史上规模最大的尸体解剖项目是布鲁塞尔尸体研究(Brussels cadaver study), 在组织—器官层次上测定了25具成年人(男性12具, 女性13具)尸体的身体组成, 包括骨骼肌、脂肪组织、骨骼与各种器官(Clarys et al., 1984)。

依据布鲁塞尔研究的数据, 男性的SM/ATFM比值为0.540 $\pm$ 0.046(范围0.49~0.59), 女性的SM/ATFM为0.489 $\pm$ 0.049(范围0.42~0.55)。相应的男性SM/BW(骨骼肌/体重)比值为0.388 $\pm$ 0.064(范围0.27~0.46), 女性的此比值为0.277 $\pm$ 0.048(范围0.19~0.33)。SM/ATFM的变化范围明显小于SM/BW的变化范围(Clarys et al., 1985)。

以尸体解剖测定骨骼肌含量, 是其他所有方法的终极标

准。即使是现在采用的两种活体测定骨骼肌含量的标准方法CT与MRI, 其准确性也是由尸体解剖来验证的(Mitsiopoulos et al., 1998)。

然而, 尸体解剖方法的局限性也是很明显的。一是可供研究的尸体来源很有限。二是尸体大都为年老者或疾病患者, 其身体组成难以代表健康成年人。三是操作步骤繁复, 如何防止死后及解剖过程中身体水分的蒸发与流失, 是一个不易克服的难题。四是人死后某些性质丧失(如尿肌酸酐排出不复存在)或改变(如尸体与活体的生物电性质有显著差别)。因此, 尸体解剖只能用作少数几种骨骼肌含量测定方法的标准。

3 活体测定身体骨骼肌含量方法概述

活体测定骨骼肌含量的研究已有近百年历史。在此期间, 研究者发展出了种种原理迥异的方法。归纳起来, 活体测定骨骼肌含量的方法可以用一个通式来概括(Wang et al., 1995):

$$SM = f(Q)$$

在此式中, SM为待测定之身体骨骼肌含量; Q代表某种可测定量; f代表将Q与SM相联系的数学函数。

可测定量Q分为两类。第一类是可测量之性质, 包括形态学性质(如身高、体重与皮褶厚度)、生理学性质(如尿肌酸酐排出量)与电学性质(如生物电阻)等。这一类方法因而称为基于性质的方法(property-based methods)。例如, 全身骨骼肌含量可由24 h尿肌酸酐排出量来测定, 在此方法中, 24 h尿肌酸酐排出量就是所依据的可测量性质。

第二类可测定量是已知的组分量。例如, 体内的钾元素主要分布在骨骼肌中; 如果全身钾含量已知, 就可以计算出骨骼肌含量。这一类方法因而称为基于组分的方法(component-based methods)。必须指出, 已知组分量的测定归根到底也依赖对某种性质的测量。例如全身钾含量, 就是通过对K-40放射性质的计数来测定的。

表2列出了迄今为止已经发展出来的多数骨骼肌含量测定方法以及校验的标准方法。

表2 全身骨骼肌含量测定方法之分类
Table II Classification of the Methods for Measuring Total Body SM Mass

方法	可测定量	R ²	SEE(kg)	校验的标准方法
标准方法				
计算机断层摄影(CT)	骨骼肌横断面积	0.98	—	尸体解剖
磁共振(MRI)	骨骼肌横断面积	0.98	—	尸体解剖
基于性质的方法				
形态学方法	体重、身高	0.86	2.8	MRI
形态学方法	皮褶厚度等	0.91	2.2	MRI
生物电阻抗方法(BIA)	H ² /R	0.86	2.7	MRI
尿3甲基组氨酸方法	24h尿3甲基组氨酸排出量	0.77	2.3	CT
尿肌酸酐方法	24h尿肌酸酐排出量	0.85	1.9	CT
基于组分的方法				
全身氮与全身钾方法	TBN、TBK	—	—	CT
全身钾方法	TBK	0.96	1.5	MRI

注: H, 身高; R, 生物电阻; TBK, 全身钾含量(total body potassium); TBN, 全身氮含量(total body nitrogen)。



4 基于性质的骨骼肌含量测定方法

迄今,可用于骨骼肌测定之性质主要是形态学性质、电学性质与生理学性质。相应的,基于这些性质的骨骼肌含量测定方法包括形态学方法、生物电阻方法、尿肌酸酐方法等。超声波技术也用于骨骼肌研究,但至今尚未有以超声波技术定量测定身体骨骼肌含量的报道,所以本文不作介绍。

4.1 形态学方法 (anthropometry)

形态学测量包括体重、身高、肢体长度、围长与皮褶厚度等。在人体组成研究史上,先后提出过许多测定体内脂肪含量的形态学方法,然而测定身体骨骼肌含量的形态学方法却不多。这主要是由于长期以来缺乏测定全身骨骼肌含量的标准方法所致。

全身的骨骼肌含量大约有 75% 位于四肢,因此可以由四肢的形态学测量,来估测全身的骨骼肌含量。通常将每个肢体假设为圆柱体,从而将肢体简化为园心重合的内、中、外 3 层(即骨骼、骨骼肌与皮下脂肪组织)。将外层的皮下脂肪组织排除,可以由下式得到只包括骨骼肌与骨骼的圆柱体的围长。以上臂为例,

$$CAG = AG - S \times \pi$$

式中,AG 为上臂之围长(可测定);S 为上臂之皮褶厚度(可测定);CAG 为校正了皮褶厚度后、只包括了上臂骨骼肌与骨骼的上臂围长。

1990 年, Martin et al. 依据布鲁塞尔研究中 12 具尸体的数据,提出了估测全身骨骼肌含量的形态学经验式:

$$SM = H \times (0.0553CTG^2 + 0.0987FG^2 + 0.0331CCG^2) - 2445$$

在此式中,SM 为全身骨骼肌量(g);H 为身高(cm);CTG 是校正了皮褶厚度后的大腿围长(cm);FG 是未经校正皮褶厚度的前臂围长(cm);CCG 为校正了皮褶厚度后的小腿围长(cm)。此估测式的 R^2 为 0.97, SEE 为 1.53 kg。

1997 年, Doupe et al. 应用同一批尸体的数据,提出了另一个估测全身骨骼肌含量的形态学方法:

$$SM = H \times (0.031MUTHG^2 + 0.064CCG^2 + 0.089CAG^2) - 3006$$

在此式中, MUTHG 为校正了皮褶厚度后的大腿上部围长(cm);CCG 为校正了皮褶厚度后的小腿围长(cm);CAG 为校正了皮褶厚度后的上臂围长(cm)。此预测式的 R^2 为 0.96, SEE 为 1.5 kg。这两个预测式只由 12 具老年尸体的数据导出,因此能否适用于健康成年人,是有疑问的。

为了解决这个问题,本文作者所在的研究组以 MRI 方法为标准,在一项大样本健康成年人(N=244)研究中,导出了估测全身骨骼肌含量的形态学方法(Lee et al., 2000)。此方法沿用了上述两个经验式的某些参数,并增加了年龄、性别与种族等变量:

$$SM = H \times (0.0074CAG^2 + 0.00088CTG^2 + 0.00441CCG^2) + 2.4sex - 0.048age + race + 7.8$$

在此式中,SM 的单位是 kg;H 的单位是 m;CAG 为校正了皮褶厚度后的上臂围长(cm);CTG 为校正了皮褶厚度后的大腿围长(cm);CCG 为校正了皮褶厚度后的小腿围长(cm)。Sex 一项,男性=1 kg,女性=0。Race

一项,亚裔=-2.0 kg;非裔=1.1 kg,白人与西班牙裔=0。此预测式的 R^2 为 0.91;SEE=2.2 kg。

Lee et al. (2000) 依据此健康成年人样本,还导出了由体重与身高来估测全身骨骼肌含量的形态学方法。

$$SM = 0.244BW + 7.80H - 6.6age + 0.098sex + race - 3.3$$

在此式中,BW 为体重(kg);H 为身高(m)。Sex 一项,男性=1 kg,女性=0。Race 一项,亚裔=-1.2 kg,非裔=1.4 kg,白人与西班牙裔=0。此预测式的 R^2 为 0.86, SEE=2.8 kg。

形态学方法的优点是对受试者无损伤,所需的测量工具(皮褶卡尺等)价廉且便于携带,适合于田野研究。形态学方法的局限性在于建构模型时,将肢体简化为圆柱体;这个假设必然导致模型误差。其次,由一般人群导出的估测骨骼肌含量的经验式不一定适用于骨骼肌发达的运动员。因此有必要对每个特定人群,建立各自的形态学经验式。

4.2 生物电阻分析方法 (bio-impedance analysis)

BIA 技术测定骨骼肌含量的基本原理是,组织—器官层次的各个组分具有不同的导电性。骨骼肌含有大量水分与电解质,其导电性最好。脂肪组织含有的水分与电解质很少,其导电性很差。Brown et al. (1988) 首先用 BIA 技术测定上臂的骨骼肌含量。这些研究者假设骨骼肌、脂肪组织与骨骼的电阻系数(resistivity)分别为 1.18、16 与 $>100 \text{ ohm} \times \text{m}$ 。由 CT 技术测得上臂骨骼肌横断面积,与由 BIA 测得的骨骼肌横断面积高度相关($R^2 = 0.96$, SEE = 0.22 cm^2)。此后,许多研究者报道了 BIA 可以用来测定四肢的骨骼肌含量。

Janssen et al. (2000) 以 MRI 为标准测定了全身骨骼肌含量,同时 BIA 测定了生物电阻值,从而导出了以 BIA 估测全身骨骼肌含量的经验式:

$$SM = 0.401H^2/R + 3.825sex - 0.071age + 5.10$$

在此式中,SM 的单位是 kg;H 为身高(cm);R 为 BIA 电阻(ohms)。Sex 一项,女性为 0,男性为 1 kg。此估测方程的 R^2 为 0.86, SEE = 2.7 kg。Janssen et al. 导出的此 BIA 经验式适用于白种人、西班牙裔及非洲裔,但不适用于亚洲裔。

与其他方法相比较,BIA 方法的优点在于测定快速、安全、无损伤。BIA 仪器价廉而且便于携带,因而适用于临床测定与田野研究。然而,BIA 测定全身骨骼肌含量的可靠性受到体内含水量以及电极摆放位置等多种因素的影响。再者,以白种人为受试者导出的 BIA 骨骼肌估测式,不一定适用于亚洲人群。

4.3 尿肌酸酐方法 (urinary creatinine excretion)

以尿肌酸酐测定身体骨骼肌含量是一个已有 100 年历史的经典方法,由 Schffer 与 Coleman (1909) 及 Burger (1919) 等首先提出。由尿肌酸酐测定骨骼肌的方法基于下述原理(Heymsfield et al., 1983)。骨骼肌含有的肌酸(creatine)与磷酸肌酸(creatine phosphate)每天以一定比例,脱水生成肌酸酐(creatinine)。同时,肝脏合成新的肌酸来补充,以维持体内肌酸库的稳定。肌酸与磷酸肌酸脱水生成肌酸酐的反应是自发与不可逆的。肌酸酐是代谢终产物,不参与体内任何生化反应。生成的肌酸酐由肌肉细胞扩散到血循环中,几乎全部由肾脏经尿排出。在膳食不含外源性肌酸的



情况下,健康人的尿肌酸酐每日排出量比较稳定,不受尿量及一般运动的影响,逐日测定的变异系数不超过8%。

研究表明,肌酸—肌酸酐是一条独立性相当强的代谢途径,它具有4个明显特点。一是肌酸的特异性分布,体内绝大部分肌酸及磷酸肌酸都存在于骨骼肌中。二是肌酸库的稳定性,体内的肌酸(及磷酸肌酸)每天按一定比例脱水生成肌酸酐。三是终产物肌酸酐的生理惰性。四是肌酸酐完全由尿排出。当来自食物的外源性肌酸受控为零时,这些特点使我们有可以把尿肌酸酐日排出量同全身骨骼肌含量联系起来(Heymsfield et al., 1983)。

人们早就注意到尿肌酸酐日排出量与骨骼肌含量的关系,并提出了肌酸酐当量(creatinine equivalance)的概念,即每日排出1 g尿肌酸酐相当于骨骼肌的kg数。在膳食不含肌酸时,若干研究者测定的肌酸酐当量为18.6~20 kg/g,但变异范围相当大。如Picor et al. (1976)测定肌酸酐当量为 18.6 ± 6.6 kg/g, 变异范围为13.8~31.9 kg/g。这表明,简单地以肌酸酐当量乘以尿肌酸酐日排出量,不能准确地测定全身骨骼肌含量。

Forbes (1987)提出了无肌酸膳食时,由尿肌酸酐日排出量(Cr,g)来计算全身骨骼肌含量(SM,kg)的经验式:

$$SM = 11.8 \times Cr + 10.1$$

依照此式,肌酸酐当量不是一个固定数值,而是随Cr值变化的。当Cr=1 g时,SM/Cr=21.9 kg/g;而当Cr=2 g时,SM/Cr=16.9 kg/g。因此,肌酸酐当量这个概念应当被摒弃。

在上述研究中,Forbes先由测定的全身钾含量(total body potassium)来计算去脂肪身体质量(fat free mass, FFM)。Forbes再假设骨骼肌在FFM中的比例固定为49%,由此来计算全身骨骼肌含量。然而现在知道,由全身钾含量来计算FFM是不准确的(Wang et al., 2001)。骨骼肌占FFM的比例也并非恒定,而是随年龄、性别、健康状况等变化的(Wang et al., 2001)。在Forbes的研究中,由于全身骨骼肌含量的测定不够准确,因而影响了上述方程的可靠性。

Wang等采用CT技术为标准,测定了12名健康成年男性的全身骨骼肌含量。受试者连续7天食用无肉膳食;在实验的最后3天,每天收集24 h尿液,以测定尿肌酸酐日排出量。我们由此导出了较为准确的全身骨骼肌含量的估测式(Wang et al., 1996):

$$SM = 18.9 \times Cr + 4.1$$

此式的 $R^2 = 0.85$ ($P < 0.001$), $SEE = 1.89$ kg。

后来,Wang等将受试者的数目增加到26人(男性14人,女性12人),其中12人由CT技术来测定全身骨骼肌含量,11人由MRI技术来测定全身骨骼肌含量,其余3人由DXA技术来测定全身骨骼肌含量。由此导出了新的估测式(Lee et al., 2001; 2003):

$$SM = 19.4 \times Cr + 2.9$$

新估测式的 R^2 进一步提高到了0.89。

尽管尿肌酸酐日排出量与全身骨骼肌含量之间具有较高的相关性,有两个因素限制了这个方法的实际应用。首先,受试者必须食用无肉膳食至少一周,以排除外源性肌

酸的干扰。其次,受试者必须连续3天准时、完全地收集24 h尿液。做到这两点需要得到受试者的高度配合。

然而,尿肌酸酐方法具有两个显著的优点。一是测定样品尿液是代谢废物,对受试者完全没有伤害。二是不需要昂贵的测定仪器,尿液的肌酸酐浓度可以很方便地用常规化学试剂(苦味酸)来测定。

本文作者曾在上海体育科学研究所,以尿肌酸酐方法测定了青少年运动员的全身骨骼肌含量(王自勉,1990;王自勉等,1991)。我们的经验表明,如能严格控制膳食与完全收集24 h尿液,这不失为一个可供选择的方法。然而当时由于方法学的限制,此项研究未能以CT或MRI等标准方法来校验。

4.4 尿3-甲基组氨酸方法(urinary 3-methylhistidine excretion)

24 h尿3-甲基组氨酸排出量也可以用来测定全身骨骼肌含量,其原理与尿肌酸酐方法相似。体内若干器官(如骨骼肌、心肌、平滑肌、肝、肾等)含有肌动球蛋白(actomyosin),肌动球蛋白分解产生3-甲基组氨酸,后者渗透入细胞外液体,再经尿排出体外。骨骼肌产生的3-甲基组氨酸最多,因此可以由尿3-甲基组氨酸的每日排出量来估测全身骨骼肌含量。

Lukaski et al.(1981)首先提出了由24 h尿3-甲基组氨酸(3MH)排出量来估测全身骨骼肌含量的经验式:

$$SM = 0.118 \times 3MH - 3.45$$

在此式中,SM的单位是kg;3MH的单位是 $\mu\text{mol/day}$ 。此方法的 R^2 为0.83, $SEE = 2.07$ kg。Lukaski以全身氮含量与钾含量方法为标准来测定全身骨骼肌含量(Burkinshaw et al., 1978),而这个方法本身就不够准确(Wang et al., 1996),这就影响了上述经验式的可靠性。

有鉴于此,Wang等以10名健康成年人作为受试者,用CT技术为标准测定了全身骨骼肌含量。受试者连续食用无肉膳食一周,并收集了最后3天的24 h尿液,由此导出了以3MH估测全身骨骼肌含量的经验式(Wang et al., 1998):

$$SM = 0.0887 \times 3MH + 11.8$$

在此式中,SM的单位是kg;3MH的单位是 $\mu\text{mol/day}$ 。此方法的 $R^2 = 0.77$, $SEE = 2.3$ kg。

同尿肌酸酐方法一样,尿3-甲基组氨酸方法的优点是无损伤性。然而这个方法需要受试者的高度配合,需食用无肉膳食一周,并连续3天收集24 h尿液。此外,由心肌、平滑肌及其他器官产生的3-甲基组氨酸可能会影响全身骨骼肌含量的测定准确性。

5 基于组分的骨骼肌含量测定方法

迄今,可用于骨骼肌含量测定之组分主要有全身氮含量、全身钾含量与肢体瘦软组织。这些组分可以分别用中子活化技术、全身K-40计量术与双能量X-射线吸收技术来测定。

5.1 全身氮含量(total body nitrogen)与钾含量(total body potassium)方法

Burkinshaw et al.(1978)将去脂肪身体质量(FFM)分为两个组分,即骨骼肌(SM)与非骨骼肌(non-SM),并观察到在SM与non-SM中,钾与氮的含量比值存在较大

差异。骨骼肌的 K/N 平均值较高 (3.03 mmol/g), 而非骨骼肌的 K/N 比值较低 (1.33 mmol/g)。据此, Burkinshaw et al. 推导出由全身钾含量 (TBK) 与全身氮含量 (TBN) 来计算全身骨骼肌含量的模型:

$$SM = 0.503 \times TBK - 0.0263 \times TBN$$

在此模型中, SM 的单位是 kg; TBK 与 TBN 的单位均为 g。依据此模型, 如能以中子活化分析测定 TBN, 以全身 K-40 计量术测定 TBK, 就可以计算出骨骼肌重量。

此模型的推导虽然机巧, 但其准确性却不高。这是由于骨骼肌的 K/N 比值并非定值, 而是随年龄及运动水平而变化。Wang et al. (1996) 以 CT 方法为标准测定全身骨骼肌含量, 发现 Burkinshaw 模型低估全身骨骼肌重量达 20.1%。再者, 中子活化分析法的放射性也限制了其实际应用。因此, Burkinshaw 模型虽然具有历史意义, 现已不再在人体组成研究中应用。

5.2 全身钾含量 (total body potassium) 方法

体内的钾元素很大部分存在于骨骼肌中。例如在基准成年男性 (Reference Man), 体内的钾约有 60% 存在于骨骼肌中 (Snyder et al., 1975), 而且骨骼肌细胞中钾的浓度相当稳定, 因此全身钾含量 (TBK) 可以用于测定全身骨骼肌含量。

Wang et al. (2003) 测定了 300 人的大样本。受试者为健康年轻人 (男性 139 人、女性 161 人), BMI $25.1 \pm 5.4 \text{ kg/m}^2$ 。该研究以 K-40 计量术测定全身钾含量, 并以磁共振法为标准测定全身骨骼肌重量。男性与女性相比, 骨骼肌重量与 TBK 均显著地高 ($P < 0.001$)。然而骨骼肌重量与 TBK 的比值 (SM/TBK) 却不存在显著的性别差异, 平均为 0.0085 kg/mmol 。全身骨骼肌重量与 TBK 之间的相关系数高达 0.98 ($P < 0.001$)。由此导出了以 TBK 来测定全身骨骼肌重量的经验式 (图 1):

$$SM = 0.0085 \times TBK$$

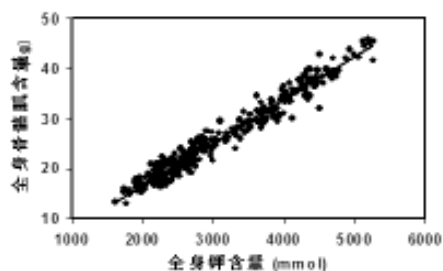


图1 全身骨骼肌重量与全身钾含量之间的线性关系 ($R = 0.98$)

Figure 1 Linear Relationship between Total Body SM Weight and K Quantity ($R=0.98$)

此经验式中 SM 的单位是 kg; TBK 的单位是 mmol。此方法测定全身骨骼肌重量的标准测定误差 (SEE) 为 1.60 kg。

为了提高测定的准确性, Wang et al. (2003) 进一步考量了年龄、性别及种族等影响因素, 导出了较复杂的由 TBK 来计算全身骨骼肌重量的经验式:

$$SM = 0.0093TBK - 1.31sex + 0.59race + 0.024age - 3.21$$

在此经验式中, SM 的单位是 kg; sex 为 0 (女性) 或 1 (男性); race 为 0 (亚洲裔、白人及拉美裔) 或 1 (非

洲裔)。与只包含了 TBK 的方程相比, 此经验式将测定全身骨骼肌含量的 SEE 减小到 1.52 kg。

虽然由 TBK 可以较准确地测得成年人的全身骨骼肌重量, 但是导出的经验式不一定适用于儿童。为此, Wang et al. (2007) 测定了 116 名健康儿童 (男性 66 人、女性 50 人), 年龄由 5 至 17 岁 (平均 11.7 ± 3.5 岁)。全身骨骼肌含量由 MRI 测定 (男性 $18.1 \pm 9.0 \text{ kg}$; 女性 $14.2 \pm 5.2 \text{ kg}$); TBK 由 K-40 计量术测定 (男性 $2480 \pm 1043 \text{ mmol}$; 女性 $1975 \pm 566 \text{ mmol}$)。男性与女性相比, 全身骨骼肌含量与 TBK 都显著地高 ($P < 0.01$), 但是骨骼肌含量与 TBK 之间的比值 (SM/TBK) 却没有显著的性别差异 (男性 $0.0071 \pm 0.0008 \text{ kg/mmol}$; 女性 $0.0070 \pm 0.0008 \text{ kg/mmol}$)。不过, 儿童的 SM/TBK 比值却比成年人的 SM/TBK (0.0085 kg/mmol) 要低得多。这表明儿童与成人的 TBK-SM 关系式是不同的。

与成年人一样, TBK 与全身骨骼肌重量之间的相关系数在儿童也很高 ($R = 0.984, P < 0.001$)。由此, 该研究导出了由 TBK 来计算儿童全身骨骼肌重量的经验式:

$$SM = 0.0085 \times TBK - 2.83$$

在此经验式中, SM 与 TBK 的单位分别为 kg 与 mmol。此方法测定儿童全身骨骼肌重量的 SEE 为 1.39 kg。

上述两项研究表明, 对于健康成年人与儿童, 由 TBK 来估测全身骨骼肌重量是可行的, 但成年人与儿童少年的估测经验式不同。TBK 方法的优点是测试无放射性, 对受试者完全没有伤害, 测试步骤亦简便。然而 TBK 测量装置 (whole body K-40 counter) 很昂贵, 目前在全世界只有 30 余台, 这就限制了 TBK 测定骨骼肌含量方法的普遍应用。

6 活体测定身体骨骼肌含量的标准方法

现在应用的活体测定身体骨骼肌含量的标准方法有两种, 即计算机断层摄影方法与磁共振方法。

6.1 计算机断层摄影方法 (computerized tomography, CT)

CT 是第一个用于人体组成测定的影像学技术 (Housfield, 1973)。CT 技术的原理是, 当 X 射线透过人体时, 组织—器官层次不同组分 (骨骼肌、脂肪组织、骨骼、各种内脏) 对 X 射线的衰耗作用存在着显著差异。

用 CT 技术测定身体骨骼肌含量可以用临床 CT 装置来进行。受试者平躺在测试台上, 双臂向头部前方伸直。CT 能够像普通的 X 光机那样, 方便地得到受试者的正面影像。这样可以在测试开始时, 确定身体中某些特定的解剖位置, 如踝关节、膝关节、耻骨联合下、耻骨联合上、髌骨下、腰椎 (L4-L5、L1-L2)、肩关节、肘关节、腕关节等。然后, 在这些特定的解剖位置获取 CT 横断面影像。从脚尖开始至指尖结束, 全身共获取约 30 幅特定解剖位置的 CT 横断面影像 (图 2), 每幅 CT 横断面的厚度为 1 cm。

以 CT 技术测定全身骨骼肌含量的计算式为:

$$SM = 0.00104 \times \sum [d (S_i + S_{i+1}) / 2]$$

此式中, S_i 与 S_{i+1} 表示相邻两个特定解剖位置的骨骼肌横断面积 (cm^2); d 表示相邻两个特定解剖位置之间的距离 (cm), CT 装置可以自动测出此距离; 0.00104 为骨骼肌的密度 (kg/cm^3), 健康人群的骨骼肌密度相当恒定 (Snyder et al., 1975)。

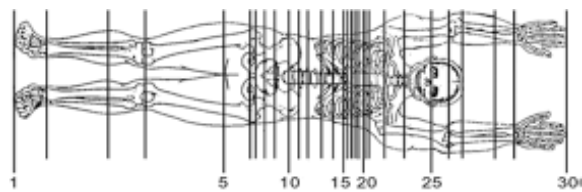


图2 以CT测定全身骨骼肌含量, 图示30个特定解剖位置
Figure 2 CT Measurement of SM Mass, with 30 Specific Anatomical Positions

Mitsiopoulos et al.(1998) 在尸体上验证了CT测定骨骼肌的方法。以CT测定上臂和大腿骨骼肌的横断面积, 与相应的尸体解剖值高度相关($R^2=0.98$, $SEE=3.8 \text{ cm}^2$, $P<0.001$)。这就证实了CT是测定骨骼肌含量的准确方法。然而, 昂贵的装置费用及测试费用, 限制了CT方法在人体组成研究中的普遍应用。更重要的是, CT测试的放射性限制了其应用范围, 例如, 不允许在短时间内对同一受试者进行重复测试; CT也不能用于健康儿童和怀孕女性。这样, CT虽然可以作为标准来校验其他方法, 但在人体组成研究领域里的用途较为局限。

6.2 磁共振方法 (magnetic resonance imaging, MRI)

MRI是一种先进的影像学技术, 其原理基于组织中氢原子核与系统磁场的相互作用, 来区分不同的身体成分。MRI技术在临床医学中已广泛应用, 它既具有CT的优点, 又避免了CT的放射性伤害。

1996年, Ross et al.首次应用MRI进行组织—器官层次上的组分测定。以MRI技术测定骨骼肌的方法, 已在模型研究、尸体研究及活体动物研究中得到验证。1998年, Mitsiopoulos等报道, 当骨骼肌横断面在 $10\sim100 \text{ cm}^2$ 时, MRI可以提供准确的测定值, 与尸体解剖测定的骨骼肌横断面积相差仅1.2%。因此, 这个方法现已用作测定骨骼肌含量的标准。

MRI测试通常以临床应用的1.5 Tesla MRI装置来进行。受试者平躺在测试台上, 双臂向头部前方伸直(图3)。测试分两个阶段进行, 先测定下半身, 再测定上半身。测定开始时先作矢状断面, 确定第4与第5腰椎(L4-L5)的结合部位, 作为上半身与下半身的分界面。下半身的测试自L4-L5向下进行, 直到脚尖为止。每幅MRI横断面的厚度为1 cm, 相邻两幅MRI横断面之间的距离为4 cm。下半身测试完成后, 再以L4-L5为起点, 进行上半身的测试, 直至指尖结束。测试胸部时, 要求受试者屏住呼吸, 以免呼吸时胸廓的运动影响MRI影像的清晰度。成人的全身MRI原始影像大约为40~45幅(图4); 少年儿童的全身MRI原始影像大约为30~35幅。

将取得的MRI原始影像储存在光盘中, 以专门的影像软件(SliceOmatic Image Analysis Software, TomoVision Inc., Montreal, Canada)来分析。该软件以自动分析为主, 辅之以人工分析, 将MRI原始影像上的不同组分区分开来。如图5所示, 骨骼肌被标示为红色, 皮下脂肪组织被标示为绿色, 内脏脂肪组织被标示为蓝色。由此, 该软件能自动测出MRI影像中各种组分的面积。文献报道, 在同一幅MRI影像中对骨骼肌横截面积作重复测定, 其变异系数(coefficient of variance, CV)仅为0.7%。分析完全身所有的MRI影像以后(图6), 该软件依据下面的计算式, 给出全身骨骼肌的质量:

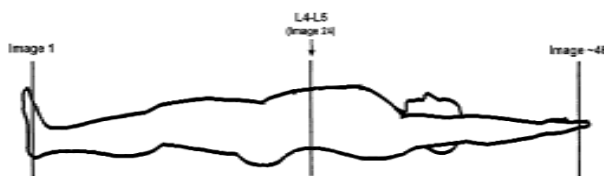


图3 全身MRI测试示意图
Figure 3 Total Body MRI Measurement

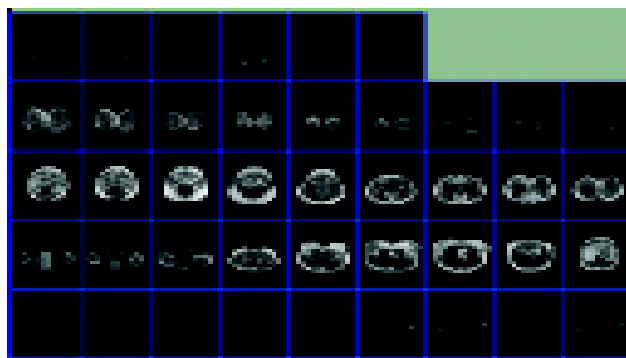


图4 全身MRI测试取得的42张原始影像
Figure 4 42 Original Images Obtained in Total Body MRI Measurement

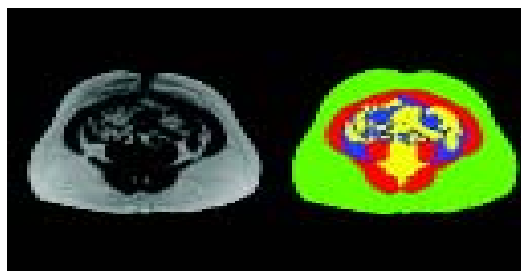


图5 对腹部MRI原始影像(左)的组分分析(右)
Figure 5 Portfolio Analysis of the Original Images of Abdomen MRI

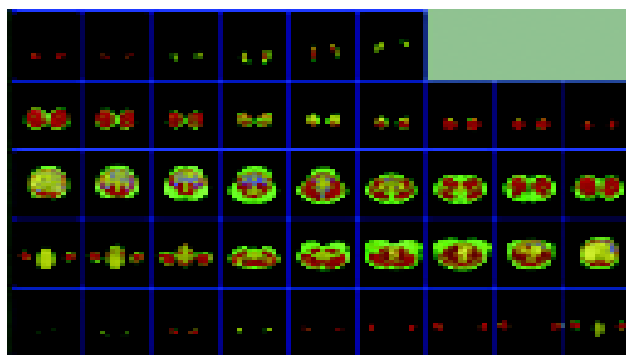


图6 对图4中全身42幅MRI原始影像的组分分析
Figure 6 Portfolio Analysis of the 42 Original MRI Images in Figure 4

$$SM = 0.00104 \times \sum [d (S_i + S_{i+1}) / 2]$$

在此式中, S_i 与 S_{i+1} 表示相邻两幅MRI影像的骨骼肌横断面积(cm^2); d 表示相邻两幅MRI影像间的距离(cm); 0.00104为骨骼肌的密度(kg/cm^3), 健康人群的骨骼肌密度相当恒定(Snyder et al., 1975)。如果作连续测定(即相邻两幅MRI影像之间的距离为零), 那么对骨骼肌含量测定的准确性将大大提高。

与CT技术相比, MRI不具有放射性, 因此MRI可以用于儿童少年骨骼肌含量的测定, 并可以用于跟踪身体骨骼肌含量的长期变化。但是, MRI装置比CT更为昂贵, 测试费用亦更高, 这就限制了MRI方法在人体组成研究中的普遍应用。MRI技术在骨骼肌含量测定研究中的主要应用是作为标准, 来校准测定骨骼肌含量的其他方法(如形态学方法、代谢产物方法等)。迄今为止, 国内尚未有应用MRI技术来测定身体骨骼肌含量的报道。

7 以DXA技术测定身体骨骼肌含量的方法

测定身体骨骼肌含量这个领域里的最新发展, 是应用双能量X-射线吸收技术(dual-energy X-ray absorptiometry, DXA), 来替代MRI技术。DXA最初是为了测定骨骼矿物质(bone mineral)含量和骨密度发展出来的, 后来进一步应用于人体组成研究。

DXA测试比较方便。受试者平躺在测试台上, 双臂自然摆放在身体两侧。全身DXA测试仅需4~5 min即可完成(成人), 少年儿童的测试时间更短些。受试者在测试过程只需保持不动, 无需其他配合。

DXA配置的软件可以将受试者的DXA影像自动区分为左右上肢、头部、胸部、腹部及左右下肢等部位(图7)。DXA技术又可将人体区分为脂肪、骨骼矿物质与瘦软组织(lean soft tissue)3个组分。瘦软组织亦称为去脂肪软组织, 其主要成分为水、蛋白质与软组织矿物质。这样, DXA可以测定各个部位的身体组分含量, 包括每个部位的脂肪、骨骼矿物质及瘦软组织。

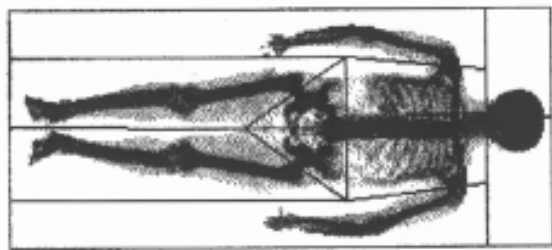


图7 DXA软件将全身影像区分为左右上肢、头部、胸部、腹部及左右下肢

Figure 7 Total Body Images divided by DXA Software into Left and Right Upper Limbs, Head, Chest, Abdomen and Left and Right Lower Limbs

1990年, Heymsfield et al.首次以DXA技术来测定肢体瘦软组织含量(appendicular lean soft tissue, ALST)。肢体瘦软组织含量等于左、右上肢瘦软组织与左、右下肢的瘦软组织质量之和。1996年, Wang et al.以25名成年男性为受试者, 观察到以CT为标准测定的全身骨骼肌重量, 与以DXA测定的肢体瘦软组织含量之间高度相关($R^2=0.90$, $P<0.001$)。全身的骨骼肌约有75%位于上肢与下肢, 而肢体瘦软组织的主要成分就是骨骼肌(Snyder et al., 1975)。因此, 以肢体瘦软组织含量来测定全身骨骼肌含量是可行的(图8)。

其后, Kim等以MRI为标准, 测定了一个大样本($N=414$)的健康成年受试者, 建立了由肢体瘦软组织来推算全身骨骼肌含量的经验式(Kim et al., 2002):

$$SM = 1.19 \times ALST - 1.01$$

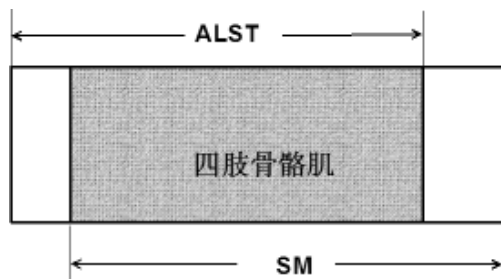


图8 全身骨骼肌(SM)、四肢骨骼肌、四肢瘦软组织(ALST)的相互关系

Figure 8 Relations between Total Body SM, Four Limbs SM and ALST

在此式中, SM与ALST的单位均为kg。此方法的 R^2 为0.96, $SEE = 1.63$ kg。

为了提高计算准确性, 该研究进一步考量了年龄、性别的影响, 导出了下列计算式:

$$SM = 1.13 \times ALST - 0.02 \times \text{age} + 0.61 \times \text{sex} + 0.97$$

此式中, SM与ALST的单位均为kg。Sex一项, 女性为0, 男性为1。与只包含了ALST的计算式相比, 此式的 R^2 仍为0.96, 但SEE减小为1.58 kg。

但是, 由成年人导出的计算式不一定适用于儿童。为此, Kim等以99名5~17岁的健康儿童为受试者, 以MRI为标准, 导出了由肢体瘦软组织来推算全身骨骼肌含量的经验式(Kim et al., 2006):

$$SM = 1.115 \times ALST - 1.135$$

在此式中, SM与ALST的单位均为kg。此方法的 R^2 为0.98, $SEE = 0.57$ kg。该研究进一步考量了体重(BW)的影响, 导出了由肢体瘦软组织及体重来推算全身骨骼肌含量的经验式:

$$SM = 1.003 \times ALST + 0.039 \times BW - 1.315$$

在此式中, SM与BW的单位均为kg。与只包含了ALST的计算式相比, 此式的 R^2 仍为0.98, SEE则减小到0.52 kg。

但是, Kim等导出的以DXA测定全身骨骼肌含量的计算式, 是以美国白人与黑人为受试者的。研究表明, 黄种人的骨骼肌占去脂肪体重(FFM)的比例显著低于白种人及黑种人。因此, 将Kim等导出的计算式简单地套用于黄种人, 很可能会高估黄种人的全身骨骼肌含量, 这显然是不合适的。

为了建立适合于中国人群的基于DXA的骨骼肌含量测定技术, 可以用MRI测得的骨骼肌含量作为因变量, ALST作为主要自变量, 来导出由ALST推算身体骨骼肌含量的经验式。该经验式还可能包含性别、年龄、体力活动状况等自变量。儿童少年的ALST与SM的数量关系可能与成年人的不同; 男性的ALST与SM的数量关系可能与女性的不同。因此, 需要运用统计学来推导与验证各个人群的适用经验式。

DXA与CT及MRI同属影像学方法, 但与CT及MRI相比, DXA方法的设备费用与测试费用都要低廉得多, 许多临床与研究机构现在均已配置DXA装置。DXA技术虽然也具有放射性, 但远比CT的放射性低。因此, DXA适用于除怀孕妇女之外的几乎所有人群。DXA并可以测定局部的骨骼肌含量(Wang et al., 1999, Shih et al., 2000)。这些都是DXA测定骨骼肌含量方法的优点。



应用 DXA 来测定身体骨骼肌含量时, 值得注意的是测定值可能受体液滞留的影响。DXA 可以测定瘦软组织, 却不能区分瘦软组织中的水含量, 因此, 不论是整体或局部的体液滞留, 都可能造成高估骨骼肌的重量。这是在应用 DXA 技术测定骨骼肌含量时必须注意的。

8 结语

测定中国人群的身体骨骼肌含量, 对于深入监测国民体质状况、推动全民健身计划、提高体能类竞技运动项目的水平, 具有重要作用。20 世纪开始的时候, 测定全身骨骼肌含

量的方法唯有一个, 即尸体解剖。而 21 世纪初的今天, 我们已经有一系列的方法可资运用。现有的方法或基于可测量之性质, 或基于已知的组分量。这些方法的原理迥异, 却殊途同归, 都能够在活体测定骨骼肌的含量。表 3 列举的基于性质与基于组分的方法, 具有各自的优缺点, 但没有一种方法能既准确、又无损伤 (或微损伤)、且测试价廉。因此, 这些方法均难以满足体质研究及竞技体育研究的要求。最新发展的以 DXA 技术来测定身体骨骼肌含量的方法, 以其准确、微损伤、比较方便等优点, 在监测国民体质状况与提高体能类竞技水平的研究中, 具有广泛的应用前景。

表 3 全身骨骼肌含量测定方法之比较
Table III Comparison between the Methods for Measuring Total Body SM Mass

测定方法	优点	缺点
计算机断层摄影 (CT)	骨骼肌横断面可直观显现, 准确性高, 可测定全身及局部骨骼肌含量	测定具放射性, 装置昂贵
磁共振 (MRI)	骨骼肌横断面可直观显现, 准确性高 可测定全身及局部骨骼肌含量	装置昂贵, 测定费时
形态学方法	无损伤。装置便宜, 可用于田野研究, 可测定全身及局部骨骼肌含量	测定误差大, 特别对肥胖者。估测方程具人群特异性
生物电阻抗方法 (BIA)	无损伤, 装置便宜。可用于田野研究	测定误差大, 估测方程具人群特异性
尿肌酸酐方法	无损伤, 尿肌酸酐测试便宜	受膳食影响, 需收集 24 h 尿液
尿 3 甲基组氨酸方法	无损伤	受膳食影响, 需收集 24 h 尿液
全身氮与钾含量方法	无需受试者高度配合	测试具放射性, 中子活化分析装置昂贵, 测定误差大
全身钾含量方法	无需受试者高度配合	装置昂贵

参考文献

- [1] 王自勉. 肌酐测试在体育中应用的理论研究[J]. 体育科研, 1990, 5: 13-17
- [2] 王自勉、关莉莉、方晨、金丽萍. 速度、力量型运动员的磷酸肌酸选材[J]. 体育科学, 1991, 11: 48-51
- [3] 马军、冯宁、张世伟, 等. 7~15 岁体重正常儿童身体成分变化分析[J]. 中国学校卫生, 2006, 27: 741-743.
- [4] 朱惠莲、王身笏、许月初, 等. 双能 X 线吸收测量法测量学龄前儿童体成分的研究[J]. 营养学报, 2001, 23: 157-159.
- [5] 张荣欣、薛长勇、王伟琴, 等. 988 名汉族成年人人体测量调查研究[J]. 营养学报, 2000, 22: 179-183.
- [6] 秦明伟、余卫、徐苓, 等. 正常人全身骨量及人体组成变化 (附 292 例 DXA 测量分析) [J]. 中国医学科学院学报, 2003, 25: 66-69.
- [7] 梁人文. 辽宁省地区 1208 人双能 X 线骨密度测定结果分析 [J]. 中国骨质疏松杂志, 1998, 4(2): 50-52.
- [8] Brown BH, Karatzas T, Nakielny R, Clark RG. (1988). Determination of upper arm muscle and fat areas using electrical impedance measurements. *Clinical Physics and Physiology Measurement*;9:47-55
- [9] Burger MZ. (1919). Beitrage zum Kreatininstoffwechsel: I. Die Bedeutung des Kreatininkoeffizienten fur die quantitative Bewertung der Muskulatur als Korpergewichtskomponente. II. Die Kreatin und Kretininausscheidung: die Storungen des Muskelstoffwechsels. (I. The meaning of creatinine coefficient for the quantitative measurement of muscle mass and body composition. II. Creatine and creatinine excretion: relationship to muscle mass.) *Z Gesamte Exp Med*;9:361-399
- [10] Burkinshaw L, Hill GL, Morgan DB. (1978). Assessment of the distribution of protein in the human body by in vivo neutron activation analysis. In: *International Symposium on Nuclear Activation Techniques in the Life Sciences*. Vienna: International Atomic Energy Association;787-798
- [11] Clarys JP, Martin AD. (1985). The concept of the adipose tissue-free mass. In: Norgan NG, editor. *Human Body Composition and Fat Distribution*. The Hague: CIP-Gegevens Koninklijke Bibliotheek (EURO-NUT).p 49-63
- [12] Clarys JP, Martin AD, Drinkwater DT. (1984). Gross tissue weights in the human body by cadaver dissection. *Human Biology*; 56:459-473
- [13] Clarys JP, Martin AD, Marfell-Jones MJ, Janssens V, Caboor D, Drinkwater DT. (1999). Human body composition: a review of adult dissection data. *American Journal of Human Biology*;11: 167-174
- [14] Doupe MB, Martin AD, Searle MS et al. (1997). A new formula for population-based estimation of whole body muscle mass in males. *Canadian Journal of Applied Physiology*;22:598-608
- [15] Engstrom CM, Loeb GE, Reid JG, Forrest WJ, Avruch L. (1991). Morphometry of the human thigh muscles: A comparison between anatomical sections and computer tomographic and magnetic resonance images. *Journal of Anatomy*;176:139-156



- [16] Forbes GB. (1987). *Human Body Composition, Growth, Aging, Nutrition, and Activity*. New York: Springer-Verlag.
- [17] Heymsfield SB, Arteaga C, McManus C, Smith J, Moffitt S. (1983). Measurement of muscle mass in humans: validity of the 24-hour urinary creatinine method. *American Journal of Clinical Nutrition*;37:478-493
- [18] Heymsfield SB, Smith R, Aulet M, Bensen B, Lichtman S, Wang J, Pierson RN Jr. (1990). Appendicular skeletal muscle mass: measurement by dual-photon absorptiometry. *American Journal of Clinical Nutrition*;52:214-218
- [19] Housfield GN. (1973). Computerized transverse axial scanning (tomography). *British Journal of Radiology*;46:1016
- [20] Janssen I, Heymsfield SB, Baumgartner RN, Ross R. (2000). Estimation of skeletal muscle mass by bioelectrical impedance analysis. *Journal of Applied Physiology*;89:465-471
- [21] Kim J, Shen W, Gallagher D, Horlick M, Jones A Jr, Wang ZM, Wang J, Heshka S, Heymsfield SB. (2006). Total-body skeletal muscle mass: Estimation by dual-energy X-ray absorptiometry in children and adolescents. *American Journal of Clinical Nutrition*;84:1014-1020
- [22] Kim J, Wang ZM, Heymsfield ZM, Baumgartner RN, Gallagher D. (2002). Total-body skeletal muscle mass: estimation by a new dual-energy X-ray absorptiometry method. *American Journal of Clinical Nutrition*;76:378-383
- [23] Lee RC, Wang ZM, Heo M, Ross R, Janssen I, Heymsfield SB. (2000). Total body skeletal muscle mass: Development and cross-validation of anthropometric prediction models. *American Journal of Clinical Nutrition*;72:796-803
- [24] Lee RC, Wang ZM, Heymsfield SB. (2001). Skeletal muscle mass and aging: Regional and whole-body measurement methods. *Canadian Journal of Applied Physiology*;26:102-122
- [25] Lee RC, Heymsfield SB, Shen W, Wang ZM. (2003). Total-body and regional skeletal muscle mass measurement methods: An overview. *International Journal of Body Composition Research*;1:93-102
- [26] Lukaski HC, Mendez J, Buskirk ER, Cohn SH. (1981). Relationship between endogenous 3-methylhistidine excretion and body composition. *American Journal of Physiology*;240:E302
- [27] Martin AP, Spenst LF, Drinkwater DT, Clarys JP. (1990). Anthropometric estimation of muscle mass in men. *Medicine and Science in Sports and Exercise*;22:729-733
- [28] Mitsiopoulos N, Baumgartner RN, Heymsfield SB, Lyons W, Gallagher D, Ross R. (1998). Cadaver validation of skeletal muscle measurement by magnetic resonance imaging and computerized tomography. *Journal of Applied Physiology*;85:115-122
- [29] Picou D, Reeds PJ, Jackson A et al. (1976). The measurement of muscle mass in children using creatine-15N. *Pediatric Research*;10:184-188
- [30] Ross R. (1996). Magnetic resonance imaging provides new insights into the characterization of adipose and lean tissue distribution. *Canadian Journal of Clinical Pharmacology*;74:778-785
- [31] Shaffer PA, Coleman W. (1909). Protein metabolism in typhoid fever. *Archives of Internal Medicine*;4:538-600
- [32] Shen W, Wang ZM, Tang H, Heshka S, Punyanitya M, Zhu S, Lei J, Heymsfield SB. (2003). Volume estimates by imaging methods: model comparisons with visible woman as the reference. *Obesity Research*;Feb;11:217-225
- [33] Shih R, Wang ZM, Heo M, Wang W, Heymsfield SB. (2000). Lower limb skeletal muscle mass: development of dual-energy X-ray absorptiometry prediction model. *Journal Applied Physiology*;89:1380-1386
- [34] Snyder WS, Cooke MJ, Nasset ES, Karhausen LR, Howells GP, Tipton IH. (1975). *Report of the Task Group on Reference Man*. Oxford, UK: Pergamon,
- [35] Valentin J. (2003). *Basic Anatomical and Physiological Data for Use in Radiological Protection: Reference Values*. ICRP publication 89. Annals of the ICRP. Oxford: Pergamon Press,
- [36] Wang W, Wang ZM, Faith MS, Kotler D, Shih R, Heymsfield SB. (1999). Regional skeletal muscle measurement: evaluation of new dual-energy X-ray absorptiometry model. *Journal of Applied Physiology*;87:1163-1171
- [37] Wang ZM, Deurenberg P, Matthews DE, Heymsfield SB. (1998). Urinary 3-methylhistidine excretion: Association with total body skeletal muscle mass by computerized axial tomography. *Journal of Parenteral and Enteral Nutrition*; 22:82-86
- [38] Wang ZM, Gallagher D, Nelson M, Matthews D, Heymsfield SB. (1996). Total-body skeletal muscle mass: evaluation of 24-h urinary creatinine excretion by computerized axial tomography. *American Journal of Clinical Nutrition*;63:863-869
- [39] Wang ZM, Heshka S, Pierson RN Jr, Heymsfield SB. (1995). Systematic organization of bod composition methodology: an overview with emphasis on component-based methods. *American Journal of Clinical Nutrition*;61:457-465
- [40] Wang ZM, Heo M, Lee RC, Kotler DP, Withers RT, Heymsfield SB. (2001). Muscularity in adult humans: Proportion of adipose tissue-free body mass as skeletal muscle. *American Journal of Human Biology*;13:612-619
- [41] Wang ZM, Heshka S, Pietrobelli A, Wang J, Gallagher D, Heymsfield SB. (2007). Total-body skeletal muscle mass in children: A total-body potassium prediction approach. *Journal of Nutrition*; 137:1988-1991
- [42] Wang ZM, Pi-Sunyer FX, Kotler DP, Wang J, Pierson RN Jr, Heymsfield SB. (2001). Magnitude and variation of total body potassium to fat-free mass ratio: A cellular level modeling study. *American Journal of Physiology*;281:E1-E7
- [43] Wang ZM, Visser M, Ma R, Baumgartner RN, Kotler DK, Gallagher D, Heymsfield SB. (1996). Skeletal muscle mass: evaluation of neutron activation and dual-energy X-ray absorptiometry methods. *Journal of Applied Physiology*;80:824-831