



# 身体成分测量与评价的理论和方法

江崇民<sup>1</sup>, 张一民<sup>2</sup>

**摘要:** 身体成分评价是指体内各种成分的含量, 常用各种物质的组成和比例表示。一旦机体内部各成分比例失衡, 将会严重危害人类的健康, 所以, 关注身体成分的测量与评价已经成为世界性话题。多年的研究证实, 身体成分评价的理论模型多见于“2-成分”模型和“多-成分”模型。现在较为流行的测量和评价方法包括水下称重法、皮褶厚度法、生物电阻抗法和双能量X吸收法等。

**关键词:** 身体成分; 体脂率; 测量; 评价

中图分类号: G804.49

文献标识码: A

文章编号: 1006-1207(2008)01-0001-08

## Theory and Methods of Body Composition Measurement and Evaluation

JIANG Chong-min<sup>1</sup>, ZHANG Yi-ming<sup>2</sup>

(China Institute of Sports Research, Beijing 100061, China)

**Abstract:** Body composition evaluation means the quantity of the various elements inside the body. It is usually indicated by the proportion of the compositional elements. Once the ratio is unbalanced, the health of man will be seriously damaged. Therefore, the measurement and evaluation of body composition have become the topic of the world. Years' study has proved that "2-Composition Model" and "Multi-Composition Model" are the theoretical models often applied for body composition evaluation. The methods for measurement and evaluation usually applied are underwater weighing method, skinfold thickness method, bioelectrical impedance method, dual-energy X absorption method, etc.

**Key words:** body composition; body fat ratio; measurement; evaluation

身体成分是指体内各种成分的含量(如肌肉、骨骼、脂肪、水和矿物质等), 常用体内各种物质的组成和比例表示, 所以, 身体成分是反映人体内部结构比例特征的指标。由于个体遗传和所处环境因素的差异, 造成了机体内部结构的差异。从人体解剖学、生理学和体质学的角度分析, 人体内部结构保持一定的比例, 将有助于维持机体的正常结构和功能。一旦机体内部各成分比例失衡, 不仅会使人体正常结构和功能遭到破坏, 而且还会影响人体的生长发育和体质水平。伴随人类生存条件和饮食结构的改变, 高热量、高脂食物的过量摄入已经成为威胁人类健康的危险因素。所以, 关注身体成分的测量与评价已经成为世界性话题。

## 1 测量与评价的理论模型

人体包括30余种主要成分, 它们以原子、分子、细胞和组织系统, 以及整体水平的形式存在身体内(Wang et al. 1992)<sup>[1]</sup>。在活体中, 直接测量身体成分是不现实的。所以, 研究人员开发了各种间接推测身体成分的理论模型。其中, 2-成分化学模型(Two-component chemical model)是最基本的一种。这种模型是将体成分区分为脂肪含量(Fat mass, FM)和去脂肪量(Fat Free Mass, FFM)。脂肪是指分子水平的身体成分, 不应与脂肪细胞或脂肪组织相混淆, 而后者是指细胞和组织系统水平的身体成分。在2-成分化学模型中, 脂肪成分包括所有的脂类, 而剩余的其它成分则都被包括在FFM中; 在更复杂的模型中, 如“3-成分”

或“4-成分”化学模型中, 则把FFM再区分为它的主要组成成分, 即水、矿物质和蛋白质(Boileau & Lohman 1977)<sup>[2]</sup>。

### 1.1 “2-成分”模型

该模型由Behnke(1942)提出, 以将人体区分为去脂体重和脂肪两个部分。其中, 脂肪分为基础脂肪(essential fat)和非基础脂肪(nonessential fat)两种, 前者是维持生命活动必须的成分, 约占2%~3%。

有3种标准评价方法, 被广泛地用于将身体划分为脂肪含量和FFM, 它们是密度测试法、氘化水稀释法和钾(<sup>40</sup>K)分光镜测量法。这些方法以及其它的以两种身体成分模型为基础的方法, 有一点是相似的, 即它们都依赖于所测量的独立部分(FFM)与将要被测成分之间, 所具有的一种已知的和稳定的关系。

例如, 使用氘化水稀释方法推测FFM时, 首先要知道身体的总水量(TBW)。推测身体总水量的方法是: 口服小剂量(10~30ml)同位素标记的水, 待它均匀地扩散到全身体液后, 通过测量其稀释度, 推测TBW。然后, 根据FFM的平均含水量, 通过TBW计算FFM。在普通人群中, FFM的平均含水量, 被假设为大约73%(Brozek et al. 1963)<sup>[3]</sup>。与此相类似的是, 可以通过全身总钾量(K)计算FFM。推测全身总钾量的方法是: 测量体内含有的放射性<sup>40</sup>K的量(Forbes 1987; Flynn et al. 1989)<sup>[4][5]</sup>, 或测量体内总交换钾的量(Forbes 1987)。当全身总钾量已知后, 将

收稿日期: 2007-11-5

第一作者简介: 江崇民(1962-), 男, 汉族, 研究员, 主要研究方向: 体质与健康。E-mail: jiangchongmin@263.net, Tel: 010-87182582

作者单位: 1. 国家体育总局体育科学研究所. 北京 100061; 2. 北京体育大学. 北京 100084



它除以 FFM 中钾的平均重量 (kg), 便可以推测 FFM。普通成年男子,  $FFM = \text{全身总钾量 (g)} / 2.66 \text{ (g} \cdot \text{kg}^{-1})$ , 成年女子, 分母是 2.55 (Forbes 1987)。应用同位素稀释法和钾分光镜测量法推测身体成分时, 在很大程度上, 它们的有效性和准确性依赖于对所有的个体都使用同一个转换常数是否合适。不幸的是, 从惯于久坐的人群中所获得的常数, 往往不能很好地应用在耐力运动员。

密度测试法的基础是身体密度 ( $D_b$ ) 与其各组成成分的密度 (无论是那个部分) 之间的关系 (Behnke & Wilmore 1974)<sup>[6]</sup>。总的原则是, 密度的变化与身体脂肪百分比 (%BF) 相反, 如:

$$FM = f(1/D) \quad (1)$$

在等式 (1) 中, FM (脂肪含量) 是指在身体质量中, 用乙醚萃取的脂类部分;  $f$  是描述脂肪和密度关系的函数。为了使等式 1 更简化和实用, 需要做另一个假设, 如对所有的人来, 两种成分即 FM 和 FFM, 它们各自的密度都是一个常数。著名的 Siri (1956)<sup>[7]</sup> 和 Brozek 等 (1963)<sup>[8]</sup> 公式就体现了一个最简化的等式 1。在这些等式中, %BF 是通过身体密度 ( $D_b$ )、脂肪密度和去脂成分的密度来计算的, 其中, 脂肪的假设密度是 0.9 (Fidanza et al. 1953)<sup>[9]</sup>, 去脂成分的假设密度是 1.1 (Brozek et al. 1963)<sup>[8]</sup>。

$$1/D_b = FM/d_{FM} + FFM/d_{FFM} \quad (2)$$

在等式 (2) 中,  $1/D_b$  是指身体质量 (将它看作一个整体) 除以身体密度 ( $D_b$ ),  $FM/d_{FM}$  和  $FFM/d_{FFM}$  是指脂肪含量和去脂含量除以它们各自的密度。在成年人中的不同个体之间, 其体脂密度是相当恒定的, 为  $0.9 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 。在最简单的化学模型中, FFM 主要由水、蛋白质和矿物质所构成; DFFM ( $1.1 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ) 来自水、蛋白质和矿物质与它们各自密度常数值之比 (Lohman 1992)<sup>[10]</sup>。

$$1/d_{FFM} = W/d_w + P/d_p + M/d_m \quad (3)$$

在等式 (3) 中, W、P 和 M 是 FFM 的组成部分, 分别为水、蛋白质和矿物质。因为  $d_{FFM}$  是常数, 所以, 水、蛋白质和矿物质与其各自的密度之比一定也是常数, 或者它们可以变化, 但变化的方式是必须保持  $d_{FFM}$  不变。

在密度测试法中,  $D_b$  的任何偏差, 都被认为是由于体脂增加的结果。然而, 大量研究清楚地表明, FFM 的化学成分不是一个常数, 更确切地说, 还存在着较大的个体差异。可以推测, 随着生长、发育和老化, FFM 的成分也将发生着变化 (Lohman 1992)<sup>[10]</sup>。长期的专门化训练, 也可改变 FFM 的成分, 如通过提高肌肉骨骼的含量 (Modlesky et al. 1996)<sup>[11]</sup>。相反, 在某些项目中, 运动员的肌肉和骨骼含量都低于一般水平。使用密度测试法时, 实际 FFM 的化学成分都偏离假设的化学成分, 就可导致过低或过高地评价体脂含量。至于高估, 还是低估, 这取决于  $d_{FFM}$  是高于, 还是低于假设的密度 1.1。因此, 在骨骼含量低于平均值, 肌肉含量高于平均值的个体中, 将会过高地估计 %BF; 而在骨骼含量高于平均值、肌肉含量低于平均值的个体中, 则会低估 %BF。

评价任何项目运动员身体成分时, 应切记这种潜在的误差, 并正确地解释结果。用实验室外技术进行评价时, 如皮褶厚度和围度法, 对结果的解释也必须谨慎。因为, 如果这些简易方法的有效性是建立在这种显像密度测试法的

基础上时, 这种类型的误差也就会传给简易的方法。例如, 一名女子长跑运动员, 她的骨骼含量低于平均水平, 那么, 她的 %BF 推测值将会高于她的实际值 (Bunt et al. 1990)<sup>[12]</sup>, 这是因为标准方法高估了她的实际体脂。

## 1.2 “多-成分”模型

因为“2-成分”模型的局限性, 所以, 又发展了“多-成分”模型 (Multicom-component chemical models) 的方法。在该模型中, 用标准方法测量 FFM 的两种或多种成分。对于推测身体成分, 多种成分模型的方法要比两种成分模型的更精确 (Siri 1961; Lohman 1992)<sup>[13]</sup>。

把 FFM 再划分为它的基本成分, 即水、蛋白质和矿物质时, 就形成了 4 种成分模型:

$$1/D_b = FM/d_{FM} + W/d_w + P/d_p + M/d_m \quad (4)$$

其中,  $FM/d_{FM}$  是指身体总量由脂肪除以脂肪含量密度组成;  $W/d_w$ 、 $P/d_p$  和  $M/d_m$  构成 FFM, 包括水、蛋白质和矿物质, 除以它们各自的密度。若将 FFM 中的两种成分, 合并成一种成分后, 就形成了 3 种成分模型。例如, 如果将 FFM 中的蛋白质和矿物质合并, 那么:

$$1/D_b = FM/d_{FM} + W/d_w + S/d_s \quad (5)$$

$S/d_s$  表示 FFM 中的非水部分 (固体) 除以它的密度。当预测 FFM 时, 身体中水成分会发生变化, 且与假设的生物学常数 0.73 不一致, 所以, 这是一种有用的标准方法。在普通人中, 身体内水的变化是引起  $d_{FFM}$  变化的最主要原因 (Siri 1961)<sup>[14]</sup>。

通过合并水和蛋白质, 构成了 FFM 中的瘦软组织 (LST) 后, 也就形成了第二种 3 种成分模型:

$$1/D_b = FM/d_{FM} + M/d_m + LST/d_{LST} \quad (6)$$

当预测 FFM 时, 矿物质将偏离假设常数 6.8% 时, 这是一种有用的方法 (Brozek et al. 1963)<sup>[8]</sup>。这种方法可能适用于某些项目中的运动员, 如游泳运动员、闭经的长跑运动员和健美运动员。

在评估 %BF 时, 应用多种成分模型有助于减少潜在的误差, 这种潜在的误差是由于 FFM 中的成分发生了变化所致。理想的实验室方法是, 测量身体密度的同时, 测量体内的水和骨矿物质, 并且使用这样的公式来推测身体成分, 即这个公式是以 4 种身体成分模型为基础而建立的。对于测量身体成分的实验室外方法来说, 上述理想的实验室方法是确定它们有效性的最好效标。同样, 测量身体密度的同时, 测量身体的水分或骨矿物质含量, 并使用以 3 种成分模型为基础而建立的公式, 来推测身体的脂肪含量。尽管, 这些公式比以两种成分模型为基础而建立的公式要准确, 但是, 它们还是做了一种假设, 即假设蛋白质、矿物质与它们的密度之比 (公式 5), 或蛋白质、水与它们的密度之比 (公式 6) 是一个常数。因此, 对于与假定比率有差异的个体, 仍然会导致误差的出现。因为, 身体水分或骨骼内矿物质含量, 受运动员的年龄、性别和种族, 以及运动训练类型的影响。所以, 测量身体的水分或骨矿物质含量时, 应该根据所研究人群中, 该成分的变化特征来进行。

## 2 测量与评价的常用方法

目前, 由于实验技术的飞速发展, 身体成分测定的研究手段较为丰富。其研究方法大致可分为原子、分子、细胞、整体水平 5 个层次; 常用的研究手段有直接测量法、间接测



量法等。直接测量法也就是化学分析法,但在实际工作中无法进行;间接测量法有水下称重法(hydrodensitometry)、皮褶厚度法(Skinfold Method)、身体指数法(Body Mass Index)、超声测定法、核磁共振测定法、双能量X线吸收法(Dual Energy X-ray Absorptiometry, DEXA)、血氧稀释法、呼吸商测定法等。

## 2.1 水下称重法

### 2.1.1 测量原理

水下称重是一种应用广泛、经典的实验室方法,且常常被作为一种评价身体成分的标准方法。这一方法将人体分为脂肪及非脂肪成分(包括骨骼、肌肉及其它非脂肪组织),通过对身体密度(body density,  $D_b$ )的测量,间接推测体脂率和去脂体重的有效测量方法。研究人员通过尸体解剖后,分析发现脂肪组织密度为  $0.901 \text{ g/cm}^3$ ,骨骼及肌肉等非脂肪组织密度为  $1.100 \text{ g/cm}^3$ ,根据阿基米德定律(浮力的大小便是该物体水中的重量),利用水下称重获得身体体积(以身体完全没入水下测得)和重量,由体重除以身体体积获得身体密度( $D_b$ ),以此来推测体脂率(以%BF表示)。

该方法认为体脂含量高的人比含量低的人更易浮于水中。这是因为“胖人”体内的脂肪组织相对于其他组织对水的密度要小得多(肺组织除外)。于是,可通过对身体密度的测量,从而推算身体的脂肪含量和瘦体重,这样推测结果比较合理、精确。这种测量是建立在尸体瘦体重和脂肪组织的密度测量的基础上,所以,通过水下称重推测的体脂含量和体脂率还是相当准确的,并且曾作为比较和评定其他方法的“金”标准(gold standard)。

但是,由于该方法依赖以下的假说:即(1)脂肪组织和瘦体重的密度是已知的;(2)每个个体的组成成分相对恒定的;(3)瘦体重(如骨骼、肌肉)相对于机体组成是相对恒定的,并且它们构成瘦体重的相对比例也是恒定的。

### 2.1.2 误差来源

主要包括:(1)陆地体重:如脱水(腹泻、运动、桑拿浴等)、过多摄入水分、吃药、膳食、月经期等多方面因素会影响陆地体重;(2)水下称重次数;(3)水波冲击:若在游泳池中测量,必须在池角进行,可减小水波冲击影响水下称重的读数;(4)肺残气量的测量和误差以及尽力呼气末肺内的残气量,以及头发、泳衣、泳帽及皮肤表面的气泡。

### 2.1.3 体脂率的推测

(1)水中称重“代表值”的选择和确定:取10次测量值中最高3次的水下称重的数值。误差不超过25g。

(2)计算身体密度( $D_b$ ) 身体密度  $D_b =$

$$\frac{W_a(\text{陆上体重g})}{$$

$$[(W_a(\text{陆上体重g}) - W_w(\text{水中体重g})) / D_w(\text{水密度g/mm}^3)] -$$

$$RV(\text{残气量ml}) - GV(\text{胃肠道容积ml})$$

胃肠道容积一般以100ml计。

(3)身体密度转化为脂肪率

Siri公式:  $\%BF = [(4.95/D_b) - 4.50]$  或 Brozek公式:

$$\%BF = [(4.57/D_b) - 4.412].$$

据研究上述两个公式的相关系数为0.995-0.999,如将受试者的身体密度1.0589代入公式,便得出Fat%分别为17.37%

和17.46%。但是,Siri公式和Brozek公式推测结果间还存在1%左右的误差。所以,该推测公式一般适用于20~50岁的成年人,因为这个年龄段的人群脂肪组织密度为  $0.901 \text{ g/cm}^3$ ,非脂肪组织密度为  $1.100 \text{ g/cm}^3$ 。

## 2.2 皮褶厚度法

### 2.2.1 测量假说

(1)皮下脂肪测含量可反映全身皮下脂肪的总量;(2)相同性别的所有受试者皮下脂肪分布相似;(3)皮下脂肪含量与身体脂肪总量高度相关,可代表身体脂肪总量。

### 2.2.2 测量原理

皮褶厚度测量是测量脂肪含量最为常用的方法。人体的脂肪主要分布在皮下、大网膜、肠系膜等处,其中40%~60%的脂肪集中于皮下,而皮褶厚度是指身体皮下脂肪的厚度,因此用皮下脂肪的厚度(或辅之以身体围度、宽度的形态测量)来推测全身的脂肪含量,在理论上是可行的。多年研究表明,皮褶厚度推测脂肪含量,其结果与水下称重求体密度法所测得的体脂有显著相关。Lohman(1988年)<sup>[15]</sup>报道其相关系数为0.957~0.987之间,研究还发现12部位皮褶之和推算的脂肪比例和核磁共振法测定的数值无明显差异。因此,采用测量皮下脂肪的厚度来推测全身脂肪的含量或体脂%,在理论上是可行的。

但是,该方法存在(1)尽管同性别者皮下脂肪总量与身体密度显著高度相关,但是,不同人群的相关程度不一致,即推测公式仅仅适用于某一人群,不是对所有人群都适用;(2)年龄是预测男女身体密度的独立变量;所以,应使用年龄和脂肪总和的平方来预测身体密度。

### 2.2.3 推测公式

各国学者在对不同人群研究的基础上,提出了许多采用皮褶厚度测量结果推测体脂率的方法和公式,比较著名的是日本长岭公式(1964年,适用于9~18岁和成年人)<sup>[16]</sup>,美国Jackson和Pollock公式(1977年,适用于18~61岁)<sup>[17]</sup>。国内学者郑四勤(1981年,适用于17~24岁大学生),元田恒(1987年,适用于7~18岁学生),姚兴家等(1994年,适用于7~12岁)。Jackson和Pollock公式:

成年男性:体密度 =  $1.10938 - 0.0008267X1$  (胸部皮褶厚度 + 腹部皮褶厚度 + 大腿部皮褶厚度) +  $0.0000016X2$  (胸部皮褶厚度 + 腹部皮褶厚度 + 大腿部皮褶厚度) -  $0.0002574$  (年龄)

成年女性:体密度 =  $1.0994121 - 0.000992X1$  (上臂部皮褶厚度 + 肩胛下部皮褶厚度 + 大腿部皮褶厚度) +  $0.0000023X2$  (上臂部皮褶厚度 + 肩胛下部皮褶厚度 + 大腿部皮褶厚度) -  $0.0001392$  (年龄)

综合国内外的研究,在过去的半个多世纪中,国内外的学者以水下称重、排水法、空气置换法为参照标准,建立不同性别不同年龄人群的皮褶厚度推算公式,样本多为几十人至几百人。在近五十个用皮褶厚度或围度推算体脂率的公式中入选率最高的皮褶测量部位依次是:肱三头肌部、肩胛下部、腹部、髂部、大腿部。研究表明,黄色人种和白色人种皮褶厚度在不同部位的分布特点并不相同(J.WANG, 2000)<sup>[18]</sup>。除大腿部的皮褶平均厚度,白种人>黄种人外,在肩胛下部、髂部、腹部、肱三头肌部,皆是黄种人>白种人。研究还表明,黄种人与白种人相比,BMI相对较低,



而体脂率较高 (J.WANG, 1994)<sup>[19]</sup>。因此, 套用国外的公式推算中国人的体脂率, 其准确性值得质疑。而且, 国外缺学龄前幼儿和老年人的推测公式。

而且, 国内的研究成果还存在测试技术不统一, 肺残气量和皮褶厚度测试的精度不一致, 年龄划分不细致, 适用面偏窄等不足之处, 特别是成年人体脂推算普遍采用 Siri 和 Brezek 公式, 这不符合人群体脂分布特点。研究显示, 皮褶厚度的分布不光有性别差异, 而且随年龄的变化而变化, 女性在 40~60 岁, 男性在 50~70 岁, 身体各部分的皮褶最厚 (WANG, 2000 年)。因此, 研究成果存在争议, 一直未大面积的推广使用。

#### 2.2.4 测量工具

皮褶厚度测量仪在国外常用的主要有 4 种 Adipometer, Lange, Harpenden 和 Holtain, 其中 Adipometer 和 Lange 的最大测量范围可达 60~80 mm, 可适用于肥胖人群; Harpenden 和 Holtain 的最大测量范围为 40mm。价格最便宜为 Adipometer, 使用最广泛为 Lange, Harpenden 和 Holtain 的可靠性相对较高, 但价格相对也较高。对相同部位的测量读数, WANG 等人 (2000)<sup>[17]</sup>研究发现 Adipometer > Lange, Lohman 等人<sup>[20]</sup>则认为 Lange 最高。目前国内体质研究等领域进行较大面积的皮褶测量时, 使用的主要是国产仿荣研式皮褶厚度计, 由于材质、工艺、技术规格等方面的相对落后, 在实际使用中精度和稳定性都存在不足, 耐用程度也差, 测试误差较大, 用于基础研究明显不太适合。

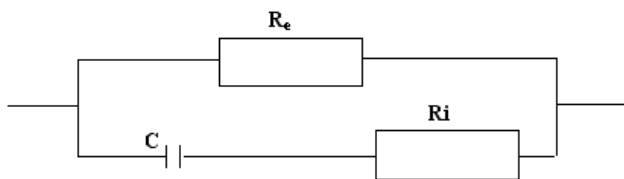
需要强调的是皮褶厚度测量推测体脂率的有效性已为许多研究所证实, 且实施简单, 成本低廉。但在实际操作中, 皮褶厚度法存在着测量精度较难控制的现象, 另外, 对于肥胖者的测量也有一定困难。因此, 皮褶厚度测量推测体脂率公式的精确程度取决于测量过程的误差控制。

### 2.3 生物电阻抗法

生物电阻抗法是利用人是导电体的原理, 人体水分与瘦体重密切相关, 而脂肪几乎不含水分的原理, 通过测量人体的电阻和导电性并转化为相对脂肪重量。电阻法仪器要求简单, 测试易操作, 但是易受饮水及活动水平影响<sup>[21]</sup>。

#### 2.3.1 测量原理

采用生物电阻抗法 (Bioelectrical Impedance Analysis, BIA) 测量人体的身体成分是比较新的方法<sup>[22]</sup>。其原理为人体细胞浸浴于导电的细胞外液之中, 而细胞则由能选择性通透某些离子的细胞膜包裹着导电的细胞内液组成。细胞外液、细胞内液的电学性质接近于电阻, 而细胞膜则可等效于电容。因此, 人体的等效电路应当是若干电阻、电容构成的串并网络。为此, 人们提出了多种等效电路模型。应用最为广泛的三元件等效电路模型 (见图 1)。



Re 为细胞外液电阻, Ri 为细胞内液电阻, C 为细胞膜电容

图 1 三成分等效电路模型

Figure 1 Three-Component Equivalent Circuit Model

由于非脂肪组织具有比脂肪组织更小的电阻抗, 当交流电流加于人体时, 电流将主要通过非脂肪组织, 通过细胞内、外路径电流的比例与频率有关。在低频情况下, 由于细胞膜电容的存在, 细胞内路径的电阻相当大, 电流基本上只通过细胞外路径。随着电流频率的增加, 通过细胞内路径的电流的比例将增大<sup>[23]</sup>。按照 Hoffer 所描述<sup>[24]</sup>, 如果将人体简化为电阻率为  $\rho$ , 长为  $L$ , 横截面为  $S$  的圆柱体, 则人体的阻抗为:  $R = \rho L/S$ , 整理后, 可得:  $V = \rho L^2/R$ , 即当  $\rho$  为常数时 (通常情况下可以满足), 人体导电物质的体积正比于  $L^2/R$ 。L 一般用人体身高  $H$  代替。低频下 (理想为直流) 测得的阻抗导出的体积正比于细胞外液体积 (Extracellular Fluid Volume, ECW), 高频下阻抗测量所得的体积正比于总体水 (Total Body Water, TBW) 体积。当然, 人体远不是上述简单模型所能描述的, 但上述等式给出了一个阻抗指数  $H^2/R$ 。通过统计学方法, 可以发现阻抗指数  $H^2/R$  和一些人体参数显著相关, 从而可以用阻抗指数  $H^2/R$  对感兴趣的人体成分参数 (如 TBW) 进行评价。从这一意义上讲, 生物电阻抗分析法不是建立在物理学或生物物理学的推理上的对所感兴趣的生物量 (如脂肪) 的直接测量, 而是建立在统计学基础上的<sup>[25]</sup>。

正如上面所描述的, BIA 得到的是对人体水分 (TBW 或 ECW) 的测量, 而非脂肪物质中水的含量是相对固定的, 通过 TBW 或 ECW, 人们可以估计非脂肪物质 (FFM)、脂肪物质, 还有人尝试通过 BIA 来测量人体细胞质量 (Body Cell Mass, BCM)<sup>[26]</sup>。

#### 2.3.2 数据分析方法

##### (1) 全身阻抗方法

用人体总阻抗来评定人体成分在应用中精度不高, 其原因之一是人体形状复杂, 四肢与躯干间的横截面积相差很大, 如躯干占人体总体积一半左右, 但其阻抗仅占人体总阻抗的 5% 左右。由于上肢、躯干、下肢 3 段阻抗是串联的, 总阻抗等于 3 段阻抗之和, 这意味着即使躯干体积有很大的变化, 总阻抗的变化也很小, 容易被忽略。而在手腕或脚踝处测量电极位置即使有小的变化, 也会引起总阻抗较大的变化。所以总阻抗测量法对人体躯干部位组织体积变化不灵敏, 用总体阻抗测量法几乎不能评定躯干部分的人体成分分布。原因之二是人体成分在各部分分布不均匀, 因此  $\rho$  并不是一个常数。

##### (2) 分段阻抗方法 (Segmental impedance)

鉴于此, 人们建议用分段阻抗测量法<sup>[27]</sup>, 把人体分成 3 段, 即上肢、躯干与下肢, 分别测各段的阻抗及人体参数。但是这增加了测量技术的复杂性, 使其实用性受到影响。如果能在不增加测量复杂性的基础上实现分段测量功能是最理想的解决办法。要解决的问题分两个, 其一是分段阻抗的测量, 采用多电极方法<sup>[28]</sup>, 这种测量方法可同时测量身体各段阻抗, 而结构并不比测总阻抗的四电极法复杂。其二是身体各段人体参数的测量。

若将前面的电阻公式用于各段, 得到分段电阻公式  $R_s = \rho_s \cdot L_s / S_s$ , 式中下标  $s$  代表身体各段。

变换公式得到两种不同形式的电阻公式, 即  $V_s = \rho_s L_s^2 / RS$  (1) 或  $V_s = \sigma_s R_s S_s^2$  (2),  $\sigma_s$  为各段的电导率。

利用 (1) 式, 可通过测各分段长度来求得各段的 FFM, 这是目前人们常用的方法, 利用 (2) 式, 可通过测各分段横截面积来求得各段的 FFM, 这是本文首次提到的方法。也就是



说, 要么通过测量人体各段的长度和阻抗, 要么通过测量人体各段的横截面积和阻抗, 来确定各段的FFM。

(3) 多频率阻抗方法(Multi)

考虑到频率可能提供对包括ECW、TBW、FFM等生物变量的更为精确的阻抗指数, 近年来人们对多频率下的阻抗测量的兴趣越来越大。对多个频率下测得的阻抗数据的分析方法一般有选择多种频率和Cole - Cole 分析法。

多种频率通过对多个频率下测得的阻抗指数和其他参考方法测得的ECW、TBW的相关性的比较, Segal 测量36位健康人得出5kHz 下测得的阻抗指数H<sup>2</sup>/R 和ECW显著相关(r = 0.86), 而100kHz 下测得的阻抗指数H<sup>2</sup>/R 和TBW显著相关(r = 0.89)<sup>[29]</sup>。尽管从理论上讲, 这种方法有它的优点, 但由于在相当宽的频率范围内测得的阻抗指数H<sup>2</sup>/R 和TBW相关性差别不大<sup>[30][31]</sup>, 因此, 在具体选择预测TBW的合适频率上没有一致的结论, 一般的选择为大于50~100kHz。这种方法的另一优点为在高频下的阻抗与低频下测得的阻抗之比可能作为TBW与ECW相对大小的指数<sup>[32]</sup>。在不需要TBW和ECW的绝对值的情况下, 这个比值的变化对临床来说可能是有用的, 而且这种方法可以避免预测公式带来的误差。

(4) Cole - Cole 分析法

这种分析方法建立在Cole理论<sup>[33]</sup>的基础之上。Cole理论认为, 生物组织的阻抗可以由下式表达:

$$Z = R_{\infty} + [(R_0 - R_{\infty}) / (1 + (j\omega f / f_c)^{\alpha})] \quad (7)$$

这里, Z 是阻抗, R<sub>0</sub> 是0频率(直流)下的电阻, R<sub>∞</sub>是无穷大频率下的电阻, ω是角频率, f 是和细胞膜有关的时间常数, α是时间常数的分布。公式(7)被称为Cole方程。

KA(jω)<sup>-α</sup>为表示阻抗的容性成份。(c)为阻抗的模型随频率的变化曲线,(d)为阻抗的虚部随频率的变化曲线,(e)为Cole 轨迹图, 其中R<sub>0</sub>为直流时的阻抗, 为频率无穷大时的阻抗值, α为散射系数(dispersion parameter), f<sub>c</sub>为组织的特征频率, R<sub>s</sub>为阻抗的实轴, -XS 为阻抗的虚轴。

2.3.3 误差来源

下列因素可影响生物阻抗法测量身体成分的误差<sup>[34]</sup>。

(1) 体侧: 因为左侧电阻比右侧高8~10欧姆, 因此使用生物阻抗法测量身体成分必须根据仪器预测公式建立时所用的一侧, 一般用身体右侧;(2) 体液变化: 体液变化(腹泻、运动、桑拿浴等)、过多摄入水分、吃药、膳食、月经期等多方面因素;(3) 电极位置: 电极位置不同, 所测量电阻不同, 因此电极位置可影响实验结果;(4) 体温: 体温往往会影响到体液水平, 所以生物电阻法测量身体成分需要在温度相对恒定和舒适的环境中测量;(5) 年龄、性别: 一般年龄、性别影响不大, 但是因为这两个因素可影响体液含量, 所以年龄、性别可能会影响测定的效度。

2.4 双能量X线吸收法

2.4.1 DEXA技术的产生和发展

上世纪60年代以前, 医学界一直采用X光拍摄技术诊断骨质丢失或测定BMC(Bone Mineral Content)和BMD(Bone Mineral Density); 但是, 该技术诊断的敏感性和鉴别能力一直不足, 只有当BMC丢失30%以上, 才能从X光片上显示出骨质疏松; 同时, 该技术还受到投射角度、胶

片质量、冲洗条件等因素的影响, 所以, 该技术在活体骨密度测量时, 误差大, 准确性也低<sup>[35]</sup>。

1963年, SPA(Single photon absorptiometry, SPA)测试技术的出现, 无疑是在诊断骨质疏松症技术上的一个飞跃。该技术的测试原理是建立在以水作为软组织等效物和把骨矿含量测量扫描点上全部软组织作为等厚度的基础上; 因为厚度相同, 吸收γ线也相等, 就不会影响骨矿含量的测量值。所以, 在骨密度测量和骨质疏松的诊断上, SPA具有准确性较高, 精度高, 易操作, 费用低, 辐射量小等优点, 在临床上具有一定的应用价值。不过, SPA还仅局限在定量测定周围骨的骨矿含量(如: 桡骨远端1/3), 即主要反映皮质的骨密度, 不适合测量骨小梁成分较多骨或软组织含量不恒定部位的骨量, 尤其是不能对体脂百分率等反映软组织的指标进行测定。

从骨质疏松发生和发展的变化规律看, 早期骨量的变化首先发生在富含松质骨的区域, 而周围骨恰好相对缺少松质骨, 同时, 单能照射源无法准确测量某些软组织变异大的部位(如: 全身、中轴骨和大腿等)。以上这一切, 都为DEXA(Dual energy X-ray absorptiometry, DEXA)的出现提供了重要的实践依据。以后, 学者们经过大量的研究发现: 采用两种不同能量的放射源, 利用其高能和低能射线, 通过被测部位不同组织的衰减程度和分布, 来校正照射部位软组织所带来的偏差, 并计算骨量。DEXA骨密度测量仪于1987年正式进入市场, 从此奠定了在骨密度测量技术中的领导地位。

2.4.2 DEXA测试技术的原理

DEXA的测试原理是建立在“X线分光光度测定法”基础上, DEXA与DPA采用相似的检测原理。DEXA的照射源为X线。

DEXA优于DPA的方面在于: X线管球能产生更多的光子流而使得扫描时间缩短, 图像更清晰; 测量结果的准确性与精确性提高, DEXA不存在放射源衰变, 减少更换放射源及校正参数及因换放射源而不得不中止的测量和跟踪疗效观察。

该测试技术采用X线, 并利用其对入射光子束, 在低能状态(30~140Kev)时, 通过骨骼而产生的主要能量衰减原理而进行, 散射的光子通过准直的小而平行的入射光子束和准直探测器加以除外。通过骨与软组织层的光子能量的大小, 由入射光子能量, 穿过物体的性质及厚度决定。计算公式如下<sup>[36]</sup>:

$$I_x = I_0 e^{-\mu x}$$

其中, I<sub>x</sub>是光子透过物体后的强度, I<sub>0</sub>是光子入射前的强度, μ是线性吸收系数, 一般认为对于给定的能量而言, 其μ值是恒定的, X是所测物体的厚度。

此外, 在DEXA测量部位软组织的差异较大, 因此不可能用软组织“等同物质”(Softtissue-equivalent materied)包裹。

2.4.3 DEXA对身体成分的评价

身体成分研究有助于对身体能量消耗、能量储存, 蛋白质及骨骼状况及含水情况的了解, 以及在营养学上、生长发育上的研究、运动医学及药物对身体成分影响的监测。区分脂肪肉组织及骨矿物含量。

DEXA通过对人体的扫描, 区分出脂肪、肌肉组织及骨矿含量, 而且价格相对低廉, 容易被接受。



2.4.3.1 测试原理

采用 DEXA 进行身体成分分析一般分为两个步骤：(1) 首先人体被认为是包含有骨矿物质和软组织，采用骨密度测量方法进行分析；(2) 通过对骨外软组织的吸收校准，将软组织量分为脂肪和非脂肪的肌肉组织。具体测量原理如下：

$$R_{st} = \frac{R_{st} \ln(I_{44}^{100} / I_{44}^{100}) - \ln(I_{44}^{44} / I_{44}^{44})}{U_{st}^{44} - U_{st}^{100} \times R_{st}}$$

$$M_{st} = \frac{\ln(I_{44}^{44} / I_{44}^{100}) - R_{st} \times \ln(I_{100}^{100} / I_{100}^{100})}{R_{st} \times U_{st}^{100} - U_{st}^{44}}$$

$$R_{st} = U_{st}^{44} / U_{st}^{100} \quad R_{bm} = U_{bm}^{44} / U_{bm}^{100} I_{st}$$

公式中：

$B_{bm}$  为进入组织之前的光子密度；

$M_{bm}$  为骨的密度， $M_{st}$  为软组织密度，R 值为在 44Kev 和 100Kev 能量中组织量的吸收率，V44 和 V100 分别包括了骨组织 (BM) 和软组织 (ST) 中的量。

包含有骨组织和软组织的像素衰减通过模拟覆盖骨的软组织及骨外软组织来校正，从这个不含骨组织的像素得到一个二维线性内推方程，用来分析整个软组织的衰减和软组织平均值，得到如下公式：

$$R_{st} = \frac{\ln(I_{44}^{44} / I_{44}^{44})}{\ln(I_{100}^{100} / I_{100}^{100})}$$

转化每一个  $R_{st}$  值成为脂肪百分比的准直线，将软组织密度分为脂肪密度和非脂肪密度。纯脂肪的  $R_{st}$  值与纯非脂肪的  $R_{st}$  是通过校正含纯脂肪物和非脂肪物的模型得到的。

纯脂肪  $R_{st} = \text{脂肪衰减} \times 1.274$ ，纯非脂肪 = 非脂肪物衰减  $R_{lean} \times 1.473$ 。这些数据是通过扫描硬脂酸 100% 脂肪) 和扫描 0.6% 的盐溶液 (100%) 得到的。

2.4.3.2 评价的效度和信度

双能量 X 线吸收法越来越多地被用来评价身体成分和测量其变化，DEXA 目前已经被广泛的应用到活体测量骨和软组织成分<sup>[37]</sup>。采用 DEXA 评价身体成分时，其测量数据的“有效性” (效度) 受身体水分 (Hydration)、软件版本、硬件 (扇形扫描或线性扫描) 和受试者状况的影响。

目前经常采用的方法有两种。双光子吸收法 (DPA, Dual-photon absorptiometry) 测试原理是根据组织对两种能量信号产生不同的衰减<sup>[38]</sup>，经常采用的射线源是  $^{153}\text{Gd}$  (钆)，且可以测量身体不同部位的 BMD (Bone Mineral Density) 和 BMC (Bone Mineral Content)，尤其是脊柱和股骨大转子。

双能 X 光吸收法 (DEXA, Dual-energy X-ray absorptiometry) 是近期发展的一种采用无侵入射线伤害的新技术，该技术能量的来源是 X 线，不同于  $\alpha$ ，并明显提高了对身体成分各种参数进行准确测量的能力：产生的射线量最小，降低的扫描时间，提高了预测的准确性等。Lunar 公司生产的 DPX-L 就是将身体重量 (body weight) 区分为“3-化学成分”模型—瘦体重、脂肪和骨<sup>[39]</sup>。与水下称重法不同的是，DEXA 并没有受到假设的“2-成分模型”的限制，可以对组织密度进行直接测量和区分，所以，对于确定身体成分而言，这也是明显优于水下称重法的。

$\alpha$ <sup>[40]</sup>和 DEXA<sup>[41]</sup>的信度 (Reliability) 和效度 (Validity) 能够被确定，脂肪的推测误差 (precision errors) 小于 3%，肌

肉小于 1.1kg，骨小于 30g。采用 DPA 测量的身体成分参数与水下称重法、中子激活法 (neutron activation analysis) 的相关系数 (r) 超过了 0.9 ( $r \geq 0.9$ )。在采用 DEXA 进行隔日测试时，也发现 13 个骨密度测试参数的信度，相关系数为 0.9~0.99，两次测量值间的差值范围在 0.01~0.08g/cm<sup>2</sup> 之间。

由此可见，双能量 X 线吸收测量法 (DEXA) 是一项相当新的技术，它是建立在 3 种成分模型的基础上。它能够将身体质量分解为脂肪、瘦体重和矿物质，而无需估计身体密度。因此，在很大程度上，DEXA 不受 FFM 中水和矿物质变化的影响，而这种变化却对显像密度测量法，以及其它以两种成分模型为基础的测量方法影响大。到目前为止，已有的研究表明，DEXA 能可靠地、准确地估计骨和软组织成分 (Lohman 1996)。

但是，由于双光子测试方法比较昂贵，需要花费较多经费，尤其是针对个人来说。所以，这也限制了 DPA 和 DEXA 在实验室和临床上的实际应用。但是，这也无法限制 DEXA 作为替代水下称重法的方法，直接应用于测量身体脂肪含量的研究。

2.4.3.3 测试结果的校验

目前，能够进行软组织成分测量的仪器有 Hologic、Lunar 及 Norland 公司生产的产品。由于测量软组织成分的技术还有待于进一步提高，而且目前还没有标准的方法对各种型号的仪器进行比较校正。每一个厂家的设计也都是独立的，因此每种型号的仪器测量结果也是不完全一样的。

就一般意义上讲：对一种仪器的评价分 4 步走：(1) 对已知的脂肪标本或水或类似的纯化学物质进行单种的或混合物的测量；(2) 用具有统一组织成分的单一模型进行校正；(3) 是用混合成分的复合模型进行校正，复合模型中包括：骨、脂肪、非脂肪物，另外还可以采用动物及化学物质进行测量比较。(4) 采用人体测量的数据进行比较。

2.4.3.4 不同仪器测量结果比较

美国著名的临床实验室对 Hologic-QDR 和 Lunar-DPX 仪器进行比较。结果发现：在对 25 名正常妇女 (33~84 岁) 采用两种仪器在同一天内进行测量，结果显示两者在全身骨和软组织含量估计均及体重上均存在明显、良好的相关性。两种仪器测量的全身骨矿物质密度 (TBBMD) 无差异，在腰椎部位，Lunar 测量的 BMD 值比 Hologic BMD 值高 8%~10%。但是，在推测身体成分指标上还是有不可估量的前景<sup>[36]</sup>。

3 小结

身体成分的评价是关系到人体体质与健康评价的问题，为此，各国学者做了许多艰苦卓绝的努力。从当前流行的观点认为，身体成分由身体脂肪和去脂体重构成，并以体脂率表示。如果身体脂肪过度的堆积将会引发许多医学和社会问题，给人们的生活带来损失。一些研究表明，营养摄入增加，体力活动下降正在成为现代人的标志，那么，由此产生的超重和肥胖将会严重影响社会的发展。

对身体脂肪含量和体脂率的评价，有许多理论模型和方法。对于大多数的实验室方法来说，均需要花费较多时间和经费。所以，在许多大样本调查和研究中，都采用了较简易的实验室外的方法 (如人体测量法和生物电阻抗法)。从研究历史上看，实验室外的方法是使用公式推测身体密



度, 这些公式的有效性是以水下称重结果为效标的; 然后, 再使用传统的公式和用身体密度推算身体成分。尽管水下称重法可以较准确地估计身体密度, 但是, 使用的推测公式是以 2-成分模型为基础, 在利用身体密度推算体脂率时 (如 Brozek 和 Siri 公式), 就会出现一定的推测误差。所以, 最好的方法是使用以 3 或 4-成分模型为基础的推测公式。在这些公式中, 体脂率可由人体测量学的方法直接测量出来的, 不幸的是, 至今还没有这样的公式。

总之, 针对体脂率和去脂体重的测定方法很多, 但基本上可分为直接测定法和间接测定法两种。直接测定法也可称为“化学分析法”, 采用乙醚对体脂进行直接萃取, 然后通过称重, 获得体脂含量, 进而推测体脂率, 显然, 这一方法具有很好的科学性和准确性。但是, 由于无法直接推测人体体脂率, 故一般应用在动物体。从目前的研究现状看, 能够直接应用于人体的测定方式就是间接测定法, 目前常用的是水下称重法、皮褶厚度法、围度测量法、生物电阻抗法 (BIA)、双能量 X 线吸收法 (DEXA), 此外还有比重法、红外线法、核磁共振法等。

#### 参考文献:

- [1] Wang, Z, Pierson, R.N. & Heymsfield, S.B. (1992). The five level model: a new approach to organing body composition research. *American Journal of Clinical Nutrition*, 56, 19-28.
- [2] Boileau, R.A. & Lohman, T.G. (1977). The measurement of human physique and its effect on physical performance. *Orthopedic Clinics of North America*, 8, 563-581.
- [3] Brozek, J., Grande, F., Anderson, J.T. & Keys, A. (1963). Densitometric analysis of body composition. Revision of some quantitative assumptions. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 110, 113-140.
- [4] Forbes, G.B. (1987). *Human Body Composition. Growth, Aging Nutrition and Activity*. Springer-Verlag, New York
- [5] Flynn, M.A., Nolph, G.B., Baker, A.S., Martin, W.A. & Krause, G. (1989). Total body potassium in aging humans: a longitudinal study. *American Journal of Clinical Nutrition*, 50, 713-717
- [6] Behnke, A.R. & Wilmore, J.M. (1974). *Evaluation and Regulation of Body Build and Composition*. Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ.
- [7] Siri, W.E. (1956). The gross composition of the body. *Advances in Biology, Medicine and Physiology*, 4, 239-280.
- [8] Brozek, J., Grande, F., Anderson, J.T. & Keys, A. (1963). Densitometric analysis of body composition. Revision of some quantitative assumptions. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 110, 113-140
- [9] Fidanza F.A., Keys, A. & Anderson, J.T. (1953). Density of body fat in man and other animals. *Journal of Applied Physiology*, 6, 252-256.
- [10] Lohman, T.G. (1992). In: *Advances in Body Composition Assessment*. Monograph Number 3. Human Kinetics, Champaign, IL.
- [11] Modlesky, C.M., Cureton, K.J., Prion, B.M., Slonjger, M.A. & Rowe, D.A. (1996). Density of the fat-free mass and estimates of body composition in male weight trainers. *Journal of Applied Physiology*, 80, 2085-2096.
- [12] Bunt, J.C., Going, S.B., Lohman, T.G., Heinrich, C.H., Perry, C.D. & Pamenher, R.W. (1990). Variation in bone mineral content and estimated body fat in young adult females. *Medicine and Science in Sports and Exercise* 22, 564-569.
- [13] Siri, W.E. (1961). Body composition from fluid spaces and density. Analysis of methods. In: Brozek, J. & Henschel, A. (eds) *Techniques for Measuring Body Composition*, pp. 223-244. *National Academy of Science*, Washington DC.
- [14] Siri, W.E. (1961). Body composition from fluid spaces and density. Analysis of methods. In: Brozek, J. & Henschel, A. (eds) *Techniques for Measuring Body Composition*, pp. 223-244. *National Academy of Science*, Washington DC.
- [15] Lohman, T.G. (1988). *Anthropometry Standardization Reference Manual*, Human Kinetics, Champaign, IL.
- [16] 陈明达等. 实用体质学[M]. 北京: 北京医科大学, 中国协和医科大学联合出版. 1993, 142
- [17] ACSM. *Guidelines For Exercise Testing and Prescription* (Sixth Edition). 2000, 66
- [18] J. Wang, *Anthropometry in Body Composition An Overview*, In *VIVO Body Composition Studies*. 2000, 317-326
- [19] WANG, J., Asians have lower body mass index (BMI) but higher percent body fat than do white: comparisons of anthropometric measurements. *Am. J. Clin. Nutr.* 60:23-28, 1994.
- [20] Lohman, T.G. (1996). Dual energy X-ray absorptiometry. In: Roche, A.F., Heymsfield, S.B. & Lohman, T.G. (eds) *Human Body Composition*, pp. 63-78. *Human Kinetics, Champaign, IL*.
- [21] Heyward V. H. and Stolarczyk L. M. (1996). *Applied Body Composition Assessment*. Champaign, IL: Human Kinetics. pp 9.
- [22] Lukaski HC, Johnson PE, Bolonchuk WW et al. (1985). Assessment of fat-free mass using bioelectrical impedance measurements of the human body [J]. *American Journal of Clinical Nutrition*, 41 (4):810-817.
- [23] De Lorenzo A, Andreoli A, Matthie J et al. (1997). Predicting body cell mass with bioimpedance by using theoretical methods: a technological review. [J]. *Journal of Applied Physiology*, 82 (5): 1542-58.
- [24] Hoffer EC, Meador CK and Simpson DC. (1969). Correlation of wholebody impedance with total body water volume [J]. *Journal of Applied Physiology*, 27(4): 531-534.
- [25] Bioelectrical impedance analysis in body composition measurement: National Institutes of Health Technology Assessment Conference Statement [J]. *American Journal of Clinical Nutrition*, 1996, 64 (3 Suppl): 524S-532S.
- [26] Baumgartner RN, Chumlea WC, Roche AF. (1990). Bioelectric impedance for body composition [J]. *Exercise and Sport Sciences Reviews*, 18:193-224.
- [27] Baumgartner RN, Chumlea WC, Roche AF. (1989). Estimation of body composition from bioelectric impedance of body segments [J]. *American Journal of Clinical Nutrition*. 50(2):



- 221-226.
- [28] Organ LW, Bradham GB, Gore DT et al.(1994). Segmental bioelectrical impedance analysis: theory and application of a new technique [J]. *Journal of Applied Physiology*, 77(1): 98-112.
- [29] Segal KR, Burastero S, Chun A. et al. (1991). Estimation of extracellular and total body water by multiple-frequency bioelectrical-impedance measurement [J]. *American Journal of Clinical Nutrition*, 54(1):26-9
- [30] Van Loan MD and Mayclin PL. (1992). Use of multi-frequency bioelectrical impedance analysis for the estimation of extracellular fluid [J]. *European Journal of Clinical Nutrition*, 46(2): 117-24.
- [31] Deurenberg P and Schouten FJ. (1992). Loss of total body water and extracellular water assessed by multifrequency impedance [J]. *European Journal of Clinical Nutrition*, 46(4): 247-55.
- [32] Lusseveld EM, Peters ET and Deurenberg P. (1993). Multifrequency bioelectrical impedance as a measure of differences in body water distribution [J]. *Annals of Nutrition and Metabolism*, 37(1):44-51.
- [33] Cole, KS. Membranes, Ions and Impulses: A Chapter of Classical Biophysics. Berkeley, CA: *Univ. of Calif. Press*, 1972.
- [34] Maud PJ and Foster C.(1995). Physiological Assessment of Human Fitness [M]. *Champaign, IL: Human Kinetics*, 185-191
- [35] 刘中厚主编. 骨质疏松症[M]. 北京: 化学工业出版社. 1992, 169-199
- [36] 刘中厚主编. 骨质疏松症[M]. 北京: 科学技术出版社. 1998, 372-418
- [37] Mazess,R.B., Barden, H. S, Bisek, J.P.(1990). Dual-energy x-ray absorptiometry for total-body and regional bone-mineral and soft-tissue composition. *American Journal of Clinical Nutrition*, 51: 1106-1112
- [38] Witt, R.M, Mazess, R.B. (1978). Photon absorptiometry of softtissue and fluid content. The method and its precision and accuracy. *Physics in Medicine and Biology*, 23: 620-629
- [39] Heymsfield,S. B., Waki, M.(1991). Body composition in human: Advance in the development of multicompartment chemical models. *Nutrition Review*, 49(4): 97-108
- [40] Peppler, W,W. Mazess, B.,B.(1981). Total body bone mineral and lean body mass bby dual photon absorptiometry. I Theory and measurement procedure. *Calcified Tissue International*, 33: 353-359
- [41] Haarbo ,J ., Gotfredsen ,C. (1991).Validation of body composition by dual energy X-ray bone desitometer (DEXA).*Clinical Physiology*, 11: 331-341

(责任编辑: 何聪)