

腺素分泌降低,以后甲状腺组织被粗纤维组织和钙盐所代替。当甲状腺受10戈瑞照射,则先出现甲状腺机能增强,以后转入降低,机能降低发生的时间取决于放射剂量。当剂量在1戈瑞范围内,则甲状腺机能降低发生在3~4年之后。

甲状腺机能无论是增强或降低都能引起代谢紊乱,主要表现细胞代谢障碍。而甲状腺机能障碍对器官、系统和整个机体的功能状态关系很大。

内分泌系统在保持机体统一,各功能互相协调起重要作用。甲状腺损伤先引起垂体-甲状腺系统的障碍,而后进一步引起其他内分泌器官的病理变化。甲状腺受放射损伤是内分泌平衡失调的基础,不仅在核裂变产物所致急性损伤的发病机制上起重要作用,并且对损伤的修复及产生远期病理性变化亦起一定作用。

免疫反应性改变是内照射的最早反应。免疫功能障碍是并发症的产生、损伤的转归及远期病理变化形成的一个重要因素。动物实验发现在疾病隐蔽期组织屏障的渗透性增高、微生物丛的数量和质量改变、皮肤抗菌力和吞噬能力降低。在疾病进展期各种障碍达高峰,动物对内源性和外源性感染的敏感性增高。损伤严重的动物,主要死于合并感染。

炎症和坏死过程促使了机体中毒和免疫变异,表现细胞毒性作用的自身致敏和自身抗体形成。自体变态反应过程发生在疾病早期,实验证明最易受自体抗体影响的器官是肠、甲状腺、肝、肾等。自身免疫状态的进一步发展导致机体的自身感染抵抗力下降。自身免疫反应测定是评价疾病严重度和恢复完全与否的一

个指标。

核裂变产物所致急性损伤的结局分临床治愈,转为慢性及死亡。胃肠及呼吸器官损伤引起机体脱水、电解质丧失和中毒是死亡的主要原因。从死亡动物发现,某些器官出现明显血液动力学改变、坏死性溃疡形成和营养不良性变化。

核裂变产物进入机体不久,体内就出现亚分子、分子、细胞、器官和整个机体的积极恢复过程,核裂变产物进入体内的开始阶段以损伤过程占优势,后来以恢复过程占优势,而内分泌改变对恢复过程起重要作用。核裂变产物损伤的恢复过程缓慢,其残存的损伤比 γ 射线外照射大。恢复过程的强度取决于整体吸收剂量和机体的生理状态。生理调节功能较好和细胞分裂频繁的器官,则恢复较早且完善;再生能力差的组织则恢复过程缓慢。因此,在损伤的各个阶段机体的器官和系统的发病与修复处在一个动态过程。

损伤能否治愈决定于疾病的严重度。重度损伤动物先出现短期恢复,以后再度恶化约半年左右死亡。轻、中度损伤动物,约2~3个月恢复。

核裂变产物所致损伤具有致癌和其他远期效应,其中致癌作用的危险性最大。已证明受损后可诱发良性和恶性肿瘤,主要发生在内分泌器官,其中甲状腺的放射性致癌作用最明显,因此,甲状腺被认为是形成远期病理变化的临界器官。但核裂变产物所致损伤的远期效应机制复杂,尚须深入研究。

总之,研究放射性物质进入机体所致的放射损伤特点不仅在理论上有价值,并且有很大现实意义。

〔金性江节译 王贻琮校 杨品清审〕

人甲状腺参数变动性及食入 ^{131}I 所致的剂量估算

Dunning DE et al: Health Phys 40 (5):661~675, 1981 (英文)

放射性污染对人的剂量通常是按参考人的数学模式估算的。这些模式所用的参数通常是用参数分布中代表“最佳估算”或“保守”的某一数值来表示,而忽略了已确认的个体差异。迄今几乎都未注意到系统地确定人体生物学参数的差异及其在预估剂量时所造成的不精确性。

本文对三个基本生物学参数的变动性进行定量研究:即食入的碘被甲状腺吸收的分数(f),生物半滞留期(T_b)和甲状腺质量(m)。在按年龄组估算

食入的 ^{131}I 对人甲状腺剂量时涉及了这三个参数。从有关文献中计算出的统计学数据来估计约定剂量当量预估中所包含的变动性,以及在给定条件下可预期的某一特定剂量出现的几率。Hoffman等的研究支持这种分析的重要性,说明在 ^{131}I 经由牧草-奶牛-奶途径对人所致的剂量预估中,总变动性主要是由于剂量换算因子(食入单位活性所致的剂量)估算中的变动性。

剂量学模式

因为食入碘所致甲状腺剂量主要来自沉积于该腺

的放射性碘，故可忽略周围器官及组织释出的贯穿辐射。食入 ^{131}I 所致的甲状腺剂量当量可用(1)式表示：

$$D(\text{甲状腺}) = S(\text{甲状腺} \leftarrow \text{甲状腺}) \times \tilde{A}(\text{甲状腺}) (Sv/Bq) \quad (1)$$

式中， $\tilde{A}(\text{甲状腺})$ ——甲状腺中碘的积分放射性(衰变/Bq)；

$S(\text{甲状腺} \leftarrow \text{甲状腺})$ ——甲状腺中均匀分布的放射性核素每次衰变对该器官的平均剂量当量(Sv/衰变)，可表示为：

$$S(\text{甲状腺} \leftarrow \text{甲状腺}) = 1.6 \times 10^{-10} / m \sum E_i n_i \phi_i (\text{甲状腺} \leftarrow \text{甲状腺}) (Sv/\text{衰变}) \quad (2)$$

式中， $\phi_i(\text{甲状腺} \leftarrow \text{甲状腺})$ ——释出的辐射强度为 n_i (衰变 $^{-1}$)，能量为 E_i (MeV)的第 i 种辐射被质量为 m (克)的甲状腺吸收的分数：

$$1.6 \times 10^{-10} (\text{克} \cdot Sv/\text{MeV}) = 1.6 \times 10^{-16} \text{焦耳} / \text{MeV} \times 10^6 \text{克/公斤} \times Sv \cdot \text{公斤/焦耳}。$$

式(2)中假设非贯穿辐射的吸收分数为1，并采纳Snyder等提出的成人体内光子吸收分数来计算相加项。由于 ^{131}I 主要是非贯穿辐射，所以这个假设引入误差不大(<6%)。按这些假设，相加项数值为0.2MeV/衰变， $S(\text{甲状腺} \leftarrow \text{甲状腺})$ 可近似表示为：

$$S(\text{甲状腺} \leftarrow \text{甲状腺}) = 3.2 \times 10^{-11} / m (Sv/\text{衰变}) \quad (3)$$

假定这些参数不随时间变化，由于食入 $1\text{Bq } ^{131}\text{I}$ 在 t 时间内甲状腺剂量负担可近似表示为：

$$D(\text{甲状腺}) = (8.64 \times 10^4 \text{秒/天}) f(T_{eff}/0.693) [1 - e^{-\frac{0.693t}{T_{eff}}}] \times (3.2 \times 10^{-11}) / m (Sv/Bq) \quad (4)$$

式中， f ——甲状腺对食入碘的吸收分数； T_{eff} ——甲状腺有效半滞留期(天)； t ——食入后天数。

当 t 大于数周时，(4)式可简化为：

$$D(\text{甲状腺}) = f T_{eff} (4.0 \times 10^{-6}) / m (Sv/Bq) \quad (5)$$

参数资料依据的说明

引自文献的某些参数依据常常是很不够的，某些参数对模式严格来说可能也不适用。例如，模式常需时间平均值来模拟长期摄入，但通常没有时间平均的器官质量、吸收分数及生物半滞留期资料可供利用。因此，本文采用的一个重要的简化假设是在整个摄入和积分期间生物学参数保持不变。由于此期间个体代谢和生长，部分误差就可能引入剂量计算。因为 ^{131}I 和全部剂量负担基本上是在摄入后头数周内接受的，文献中报道的参数值也主要来自单次摄入实验，所以可把上列模式视为单次摄入的合理近似。对于慢性摄入，尤其是新生儿，会有相当误差。尽管如此，还仍广泛地把这类模式及资料用于慢性辐照估算。本文引用了已发表的有关甲状腺正常健康人的这三个参数资料，并认可它代表该人群。

甲状腺质量

Mochizuki等测量了纽约市尸检中各年龄组个体正常甲状腺重量。Kay等根据美国六个医院正常儿童和青少年尸检资料中甲状腺重量，观察到平均质量有明显的地区差别。Gaffney等报道了欧、亚及美国不同地区许多个体的甲状腺质量。McInroy等也报道了美国不同地区的人甲状腺质量。表1是根据这4篇文献中对本研究可用的单次观测值及平均值综合并按年龄分组的甲状腺质量估计值。对0.5~2岁组和6~16岁组取自文献报道的平均值，表1中没有观测范围。从成人组甲状腺质量观测值可见分散范围甚广，估计其它年龄组也是类似的广泛分布。本文采用成人甲状腺质量范围为2~62克。为确定其基本的统计学分布，将255

表1 人甲状腺质量统计参数的估算值(克)

年龄组	对数正态分布参数 $L(\mu, \sigma)$		例数	甲状腺质量分布			99%累计几率值	观测范围		NRC ^d 值
	μ^b	σ^b		众数 X_o	中数 X_m	均数 \bar{X}		最小	最大	
新生儿	0.254	0.450	89	1.0 (0.33) ^a	1.3 (0.50)	1.4 (0.59)	3.7	~0.5	e	2 ^c
0.5~2岁 儿童	0.737	0.477	124	1.7 (0.32)	2.1 (0.50)	2.3 (0.59)	6.3	e	e	2 ^c
6~16岁 青少年	1.787	0.488	108	4.7 (0.31)	6.0 (0.50)	6.7 (0.60)	18.6	e	e	15 ^d
大于18岁 成人	2.801 ^f	0.463	890	13.3 (0.32)	16.5 (0.50)	18.3 (0.59)	48.3	2.0	62	20

a. 括号内值表示累计几率， $P(X \leq X_U)$

b. 为清晰起见，只取三位有效数字

c. 对0~1岁儿童的推荐值

d. 对11~17岁青少年的推荐值。

e. 本估算不采用单次观测值。

f. 美国核管理委员会所用的数值。

次成人甲状腺质量的单次观测值在对数概率纸上作图, 给出的对数正态性与其他研究者的结果完全符合。

碘在甲状腺中的吸收

Ogborn等人的及其他三篇文献报道了美国新生儿甲状腺中24小时吸收 ^{131}I 的资料, 范围为6.3%~97%。Oliner等人及另三篇文献报道的2.5月~18岁的儿童及青少年甲状腺 ^{131}I 吸收值为18%~84%。Anoussakis等对希腊儿童和Karhausen等对比比利时儿童的观测发现其 ^{131}I 吸收均处于已报道的美国新生儿和儿童范围内的高端。Rosenberg的及其他七篇文献报道了成人的碘吸收值。本文同样按这四个年龄组综合了文献资料(表略)。所有年龄组观测值范围均出现相当程度的重叠(见图1), 它们之间的差异只有有限的统计学意义。新生儿与0.5~2岁儿童组无显著差异($P \approx 0.46$), 所有其他组间差别均有统计学意义($P < 0.05$)。

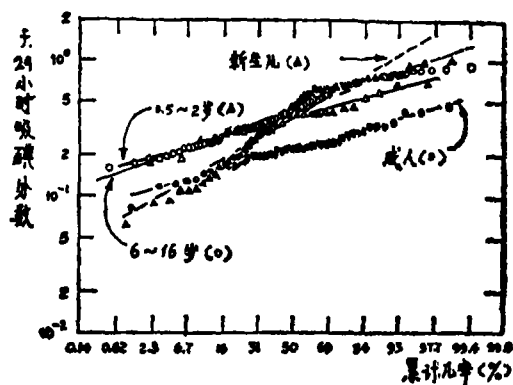


图1 人甲状腺24小时吸碘分数与年龄关系的对数正态几率图

Karhausen等注意到小于6个月的儿童24小时吸碘量以及无机和蛋白质结合碘水平均高。Anoussakis等也观察到新生儿的高吸 ^{131}I 率随着成长至壮年逐步降低。Oliner等提到在4岁以内或更长时期甲状腺功能处于亢进状态。即使其24小时吸收量并不明显高于正常成人, 但其蛋白结合碘的水平增高。然而, Fisher等报道新生儿最初的高吸收峰约出现在第二天, 第五天即降为一般低水平。这是由于新生儿应力作用及(或)体温波动引起甲状腺刺激素作用加强的缘故。对于从消化道来说本文采用的假设是基本完全吸收。

碘在甲状腺内的生物半滞留期(T_b)

有关碘在儿童甲状腺内生物半滞留期的可供采用的资料不多。Rosenberg报道对成人的数值为20~

200天。估计其他年龄组也会有类似的分散程度。他注意到生物半滞留期与个体年龄间有明显相关, 在22~50岁对象中吸碘能力与年龄之间呈负相关。据此可估计, 儿童 T_b 较小和吸收碘较多。Morrison等认为新生儿 T_b 为15~25天。Fisher等对9名新生儿观测表明平均值约为11天(4~40天)。另二篇文献估计新生儿 T_b 分别为23和6天。本文对碘在同前所分的4个年龄组也进行了文献资料的综合估算(表略)。0.5~2岁组估算均值为13天; 新生儿组估算均值为16天; 6~16岁组估算均值为50天; 成人组则估算均值为85天。相应的对数正态几率图示于图2。不同年龄组观测值范围出现相当大的重叠。在新生儿和0.5~2岁组间无显著差异($P \approx 30$)。所有其他样品按1%水平而言均有显著差异。但是, 对某些年龄组来说, 图2显示的差异可能是人为的, 因为本文可用的资料有限。

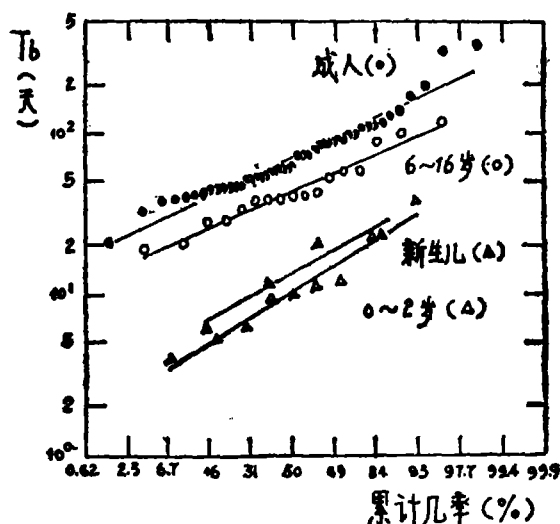


图2 不同年龄组人甲状腺中碘生物半滞留期的对数正态几率图

参数不确定性对预估剂量的影响

参数变动性对模式估算变动范围的影响可根据以下方法, 如在误差传递公式中所用的分析步骤或在预估倍增链模式中为确定其不肯定性所用的方法来正式分析。本文采用的是Monte-Carlo数学方法。该程序从上述统计分布中求出假性-偶然性参数(Pseudo-random Parameter)而计算剂量。为估算剂量的不精确性, 采用多次重复预估。用标准统计方法确定给出的剂量分布性质, 其缺点是假定所有模式参数在统计学上是独立的。对所得的参数分布本文按自然规律或逻辑极限考虑(如吸收分数不得大于1), 对每个参数予以取舍或删除超出范围的那些最大和最小的数

据。

结果

^{131}I 剂量当量换算因子的分布及相应参数列于表2。食入单位活性 ^{131}I 后,三个不同年龄组的甲状腺剂量负担的频度分布图是根据Monte-Carlo方法得到的。早先的研究表明,这样得到的统计参数(如,平均值;95%及99%累计几率值)没有本质差异,只有分布右端的最大预估值明显随重复次数变动。剂量频

度分布很不对称,类似于对数正态分布,众数明显左移。表2选择地给出与剂量分布有关的统计学指标,还列出NRC用作一年慢性摄入的相应数值以供比较。本文的约定剂量当量估算对上述实际照射情形大多是适用的,这对新生儿尤其重要。由于新生儿甲状腺代谢及生理功能从诞生后的亢进水平于几周内迅速转为较低的正常水平,这里的剂量模式和资料对此未予专门考虑,所以在慢性摄入时使用这些值应该慎重。

表2 食入单位活性 ^{131}I 的甲状腺剂量当量统计参数的估算值

年龄组	单位	甲状腺剂量当量分布						NRC ¹ 值
		众数 X_b	中数 X_m	均值 \bar{X}	标准差 g	95%累计几率值	99%累计几率值	
新生儿	Sv/MBq	3.2	5.3	6.8	5.1	16.4	23.9	3.7 ^c
	rem/ μCi	12.0 (0.27)	19.5 (0.50)	25.3 (0.63)	18.9	60.7	88.5	13.9 (0.32)
0.5~2岁儿童	Sv/MBq	1.9	3.1	3.8	2.8	9.0	13.6	3.7 ^c
	rem/ μCi	7.0 (0.24)	11.5 (0.50)	14.2 (0.64)	10.5	33.5	50.5	13.9 (0.63)
6~16岁青少年	Sv/MBq	1.9	1.9	2.3	1.5	5.0	7.9	0.65 ^d
	rem/ μCi	6.9 (0.48)	7.2 (0.50)	8.5 (0.62)	5.5	18.6	29.1	2.39 (0.03)
大于18岁成人	Sv/MBq	0.3	0.3	0.37	0.24	0.81	1.2	0.53
	rem/ μCi	1.1 (0.44)	1.12 (0.50)	1.37 (0.62)	0.9	3.0	4.4	1.95 (0.83)

a、c、d、f——与表1注同

g.指甲状腺剂量当量分布中的标准偏差

h.由几率图推导出的近似估算

由于人体生理和解剖学参数的变动性,预估剂量会在约1~2个数量级范围内波动。

讨论

对估算人甲状腺 ^{131}I 剂量的重要参数资料的分析揭示了个体间的显著差异,说明估算得的剂量也会有大的不精确性。这里指的是甲状腺正常个体的总波动性。由于所用资料是多年来不同地区所报道的,所以,这种估算反映了不同的空间和时间。在某特定的地点或地区内,估计变动会小些,但可靠地进行这种分析很困难。将NRC目前采用的值与本文估算的剂量分布比较表明,对于0.5~2岁儿童组和成人组剂量分布的平均值(\bar{X})和NRC值符合良好,对于新生儿和6~16岁青少年组则NRC值明显低于估算的平均值,分别相当于32%和4%累计几率值。这一方面是因为列举的年龄-剂量估算中采用不同的年龄分段,另外还由于NRC选用了不同的参数值。对于成人组表2估算值也与美国核医学学会医学内剂量委员会报道值符合良好,他们估算的成人甲状腺 ^{131}I 最大吸收剂量为1.3

rad/ μCi 。

本文对剂量分布估算的准确性主要取决于两个假设:所用的参数分布代表一般人群和各参数间无协变性。为了说明模式参数在统计学上是独立的这一假设进行了相关性分析,在甲状腺吸收分数(f)和生物半滞留期(T_b)之间未见有意义的协变性。根据Cuddihy及另外两篇文献报道的资料,44例成人和7例6~16岁青少年的相关系数 r^2 分别为0.0002和0.17。根据Gaffney和Moore关于70次成人观测资料,甲状腺内放射性碘负荷量和甲状腺质量间的相关系数 r^2 估算为0.0014,未见明显的协变性。但是,因为器官负荷量决定于吸收分数(f)、生物半滞留期(T_b)和核素摄入水平, f 和 T_b 的乘积与甲状腺质量之间隐含的协变性可能被膳食碘摄入速率的波动所掩盖。本文资料不足以对此作更深入评价。Dolphin认为,碘吸收和甲状腺质量均取决于膳食碘摄入量。膳食碘含量、膳食习惯以及营养状况均可以有很大的时间和地区差异。

尽管本文所用资料依据和统计方法存在一定的局限性,但看来对甲状腺剂量的变动性和不确切性进行预估仍是合理的。一般说来,在估算摄入 ^{131}I 造成的正常人甲状腺剂量时的变动性预计是在表2给出的范围内,这是由于解剖学、生理学及代谢波动性所造成的。在其他器官可能也会出现类似的剂量变动性。对于其他辐照途径(如吸入)变动性可能更大。

后 记

在电离辐射剂量-效应关系中,若有阈值时,很容易确定不得超过的辐照水平;当无阈值时,定量确定容许限值需先确定“可接受”的危险度水平,考虑到种种自然变动性,在辐射防护标准中应留以适当安全余地,以保证给定危险水平几率很低。对这种安全余地的量化应按估算的剂量变动性及剂量限度相应的潜在健康危害来确定。当放射性碘对相似的个体辐照时,安全因子至少应等于表2的正常个体变动范围(即剂量平均估计值与99%累计几率估计值之间相差3~4倍)。在个体情况相差很大的人群受照时,这个变动

范围还大些,安全余地也应大些。新近对个体间潜在的剂量变动性的研究表明,FRC建议的3倍安全因子太小,10倍或许才是慎重的。

对变动性的考虑还要与受到管理的对象相适应。如标准制定是根据平均剂量估算,考虑此类安全因子是慎重的。平均剂量离限值越近,某些个体接受超限剂量的几率越大。

除上述为计算甲状腺剂量所需的这些生物学参数变动性外,在确定剂量与健康危害的关系时还有其它的不肯定性(如每个受照器官的辐射敏感性的个体差异等)。由于剂量的确定(即比较预估值和观测值)是不现实的,很少进行过这样严密的分析。对其他放射性核素的剂量预估的不精确性进行类似研究也很有价值,一般说来似乎有用的资料比碘更少。但具有足够有用资料的元素(如Cs, Sr),此类分析可能可行。对体内稳定元素浓度变动性的研究可作为另一条了解人群内波动性大小的途径。

(诸洪达节译 叶常青审校)

放射 性 消 费 品

佐藤 乙丸: Radioisotopes 30(7): 410~419, 1981(日文)

根据联合国原子辐射效应科学委员会(UNSCEAR)1977年的报告,影响人类的辐射源(包括职业性照射和医疗照射)可分为六类:(1)由天然辐射源引起的一般照射;(2)随着科学技术的进步所增加的天然辐射源的照射;(3)放出射线的消费品;(4)核能发电;(5)核爆炸;(6)辐射的医学应用。其中与消费品有关的是第(2)、(3)两类。第(2)类包括乘坐飞机、磷肥、化石燃料、建筑材料所增加的辐照,第(3)类包括电视机等。UNSCEAR报告中对含有放射性物质的消费品列举了放射性自发光产品、静电消除器、火灾报警器、含铀和钍的产品及有关的科学仪器等,这些可以说是放射性消费品的代表。

在美国国家辐射防护与测量委员会(NCRP)56号报告所列举的消费品中,包括UNSCEAR分类第(2)类的化石燃料和建筑材料,不包括磷肥,但包括香烟。香烟在UNSCEAR的分类(1)中论述到。

1977年2月,在美国由NRC(核能管理委员会)、EPA(环境保护局)、FDA(食品药物管理局)主

持召开了关于放射性消费品的卫生问题座谈会。

Minogue在总结这次会议成果而出版的《消费品的放射性》中对放射性消费品作了如下定义,即把人们在市场上可直接得到并在个人及家庭中被广泛使用的含放射性物质的产品、商品及材料作为放射性消费品。

通常根据所含放射性物质来源的不同,把放射性消费品分为三类:(1)有意识加入放射性物质的消费品,包括利用辐射致电离及激发作用的自发光涂料、电离式火灾报警器、静电消除器、辉光起动器和特种电灯等。(2)利用天然放射性物质钍和铀的消费品,包括假牙、陶瓷和玻璃器皿的釉料、透镜、白炽灯纱罩等。(3)随着科学技术的进步,由于利用天然放射性物质较多的原材料而导致人们受照剂量增加的消费品,包括化石燃料、建筑材料和磷肥等。

一、有意识加入放射性物质的消费品

1. 自发光产品

放射性消费品中使用量最多的是自发光涂料,大部分用于夜光钟表。国际标准化组织(ISO)根据1967