

电离辐射的生物效应及健康影响

曹毅, 谢文

苏州大学医学部公共卫生学院, 苏州 215123

摘要 人们在日常生活中经常接触辐射,却又因为辐射的不易感知等特性对医疗辐射等低剂量电离辐射产生恐惧心理。介绍了电离辐射的来源、生物效应对健康的影响,讨论了低剂量电离辐射诱导的兴奋效应和适应性反应。通过引导人们正视电离辐射,并采取适当的防护措施,使电离辐射在人类生活中产生的危害作用降低到人体可接受的水平,可让辐射在医学、工业和科研等领域造福人类。

关键词 电离辐射;辐射恐惧症;兴奋效应;适应性反应

自1895年伦琴发现X射线以来,电离辐射研究不断深入,应用领域不断拓展。近年来电离辐射事故频发,对人类健康和环境产生了危害,引起了公众的辐射恐惧,但也促进了电离辐射的生物效应及健康影响的研究。最初的研究主要集中于电离辐射对人体产生的有害效应^[1-3],随着技术的进步和防护水平的提高,大剂量辐射损伤越来越少,人们在工作过程中和环境中受到的辐射主要为低剂量辐射。低剂量电离辐射与中、高剂量电离辐射产生的效应有本质区别。近年研究发现低剂量电离辐射能够诱导机体产生有益的健康效应^[4-6]。通过介绍电离辐射的来源、生物效应和健康影响,分析低剂量电离辐射诱导的兴奋效应和适应性反应,以引导人们正视电离辐射,消除辐射恐惧。

1 辐射的历史背景

1.1 辐射的定义

辐射是能量以粒子或者电磁波的形式在空间传播的过程,例如太阳将光能辐射到地球,火焰将热能辐射

到周围等都是辐射。所谓粒子辐射,包括放射性核素发射的 α 粒子、 β 粒子、正电子等。而 γ 核素发射的 γ 射线和X线管发出的X射线则属于高频电磁波,具有波粒二象性,又称为光子。当粒子或者光子的能量大于12 eV时,能够引起原子的电离,称为电离辐射,能量低于12 eV的辐射不能够引起原子的电离,称为非电离辐射^[7],也就是狭义的电磁辐射,例如移动通讯相关的微波辐射。以下主要介绍电离辐射的生物效应对健康的影响。

1.2 电离辐射的应用及损伤简史

1895年伦琴发现X射线^[8],不久人们就意识到了电离辐射会危害健康。1896年1月末,美国的格鲁柏在制造X射线管并进行X射线实验时,手上发生了皮炎,以至晚年做了手和手指的部分切除手术。1896年3月,美国的埃迪森在改进X射线管和制造X射线荧光透视装置时,数小时后感到眼痛,继而发生了结膜炎。1896年4月,美国的丹尼尔在用X射线确定头颅中异物位置时,发现了X射线对头发有脱毛作用。1896年7月,德国的马修斯记述了X射线透视后引起脱毛和皮炎。20

收稿日期:2018-03-20;修回日期:2018-07-20

基金项目:国家自然科学基金项目(K113931113)

作者简介:曹毅,教授,研究方向为辐射毒理学,电子邮箱:yicao@suda.edu.cn;谢文(共同第一作者),硕士研究生,研究方向为辐射毒理学,电子信箱:cheers0725@163.com

引用格式:曹毅,谢文. 电离辐射的生物效应及健康影响[J]. 科技导报, 2018, 36(15): 48-53; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2018.15.006

世纪初,由于没有认识到X射线的辐射危害,人们曾经通过照射大剂量X射线为女性去除身体上的毛发,后来这些女性皮肤出现了皱纹、色斑、感染、溃疡,甚至皮肤癌。

1898年,居里夫妇发现了镭^[9],1899年4月,法国物理学家贝可勒尔从居里夫妇那里借来少量镭盐,将装有镭盐的小瓶装在衬衣口袋里走了几个小时回到自己的实验室,几天后在口袋后面的皮肤上出现了烧伤,事后他说:“我爱镭,但也恨它”。居里夫人由于长期从事镭及其他放射性物质的研究工作,身体受到过量的照射,造血组织受到严重的辐射损伤,1934年7月死于白血病。她的女儿伊伦娜·居里,人工放射性同位素的发现者,也死于白血病。20世纪早期夜光表盘涂镭女工用舌头舔沾有镭粉的笔尖,摄入镭粉发射的 α 粒子和 γ 射线,照射使很多工人患上了严重的贫血。

1930—1960年,医学界把辐射看作是时髦的诊断和治疗手段,却缺乏对辐射远期效应的认识,病人由于接受高累积剂量而诱发过多的白血病、骨肿瘤、肝癌等恶性肿瘤。20世纪60年代以后,人们对辐射危害健康的认识逐渐深入,加强防护,辐射危害越来越少。

科学家研究发现,辐射对人体的危害是与照射剂量相关的,事故情况下大剂量照射会引起死亡、癌症和急性放射病等健康危害,而多数人群受到的天然辐射和人工照射剂量一般不超过100 mGy^[10],属于低剂量照射,危害很小甚至还会出现有益的健康效应。

1.3 电离辐射的来源

根据辐射的来源可将电离辐射分为天然辐射和人工辐射。天然辐射包括宇宙射线、宇生放射性核素和原生放射性核素。宇宙射线的强度随海拔高度的增加而增大,因此高原地区的人群受到的宇宙射线照射剂量比平原地区的人群高。在海平面上,宇宙射线对人体的年平均照射当量剂量约为0.3 mSv^[5],然而居住在高海拔地方(例如中国拉萨)居民接受的年剂量是居住在近海平面高度的人的数倍。在飞机飞行的高度,宇宙射线的强度比地面高得多,在洲际航线的巡航高度上,剂量率可以达到地面值的100倍。陆地上的土壤、岩石、水和自然界中的铀-238、铀-235、钍-232、镭-226、氡-228、钾-40等可放出射线,这些天然射线的照射就是天然本底辐射。世界上有些地区,由于地表层含有高浓度的铀、钍,使地表 γ 射线剂量高于一般地区,称为高本底地区,例如,印度的克拉拉邦、巴西的大西洋沿

岸以及中国广东省阳江市的部分地区。天然辐射源对成年人造成的平均年有效剂量约为2.4 mSv^[11]。

人工辐射的主要来源有核设施、核技术应用以及核爆炸产生的辐射,其中医学检查和诊断的辐射是最大的人工辐射来源。医疗照射来源于X射线诊断检查、体内引入放射性核素的核医学诊断以及放射治疗过程。美国接受医疗照射剂量约为3.0 mSv/y,已经超过了天然辐射照射的2.4 mSv/y。目前中国的人均医疗照射剂量约为0.6 mSv/y,尽管这一数字并不算高,但是近年增高的趋势明显^[12]。

2 电离辐射的生物效应和健康影响

2.1 电离辐射在机体内的作用机制

电离辐射对生物大分子的作用分为直接作用和间接作用。直接作用是指射线的能量直接作用于生物分子,引起生物分子的电离和激发,破坏蛋白质、核酸、酶等生物大分子的结构和功能。在照射大剂量时,处于分裂间期的细胞可因细胞遭到破坏而立即死亡。间接作用是指射线首先作用于水,引起水分子的活化和自由基的生成,自由基再作用于生物分子,造成损伤。电离辐射对人体产生的作用主要是通过诱导生物体发生电离反应生成自由基,生成的自由基会引起人体内分子、代谢、基因等多方面发生变化。这一过程会根据电离辐射受照时间长短的不同,而导致机体出现微损伤、细胞死亡、辐射诱发疾病等现象。

2.2 电离辐射在机体内的生物效应

电离辐射可以诱发基因突变,如果突变发生在体细胞,就可能诱发白血病、皮肤癌、肺癌等各种癌症;如果性腺受到照射,突变发生在生殖细胞,就会引起后代智力低下和先天性畸形等遗传效应。电离辐射诱发的癌症和遗传效应不存在阈值,发生的概率和照射剂量成正比,称为随机效应。事故情况下,大剂量照射引起较多的细胞死亡或受伤,细胞数目减少或功能受损,影响了受照射组织器官的功能,表现为确定性效应,如急性放射病,造血功能障碍。辐射在分子、细胞、组织器官和机体水平的生物效应如图1所示。

2.3 电离辐射对机体产生的健康影响

生物效应是对环境中的刺激物或者改变做出的可以检测到的反应。这些改变并不一定对你的身体健康

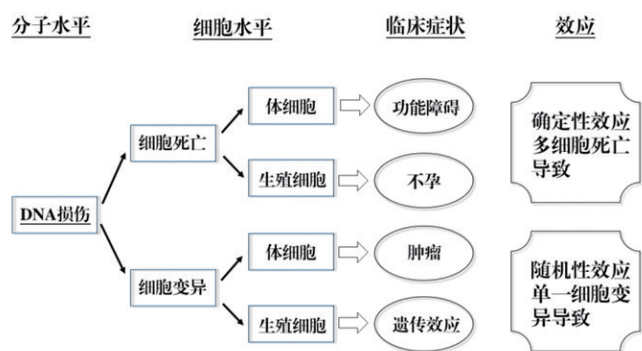


图1 辐射生物效应示意

Fig. 1 Schematic diagram of radiation biological effect

有害。比如听音乐,读一本书,吃一个苹果都会产生一系列的生物效应。但是这些活动中没有一个会被怀疑具有健康风险。那么,人们日常接触到的电离辐射是否对人体产生健康影响呢?电离辐射因其在历史上曾发生的惨痛事故和本身的不易感知性使人们惧怕。其实,电离辐射对人体产生的危害,通常是在中高剂量的情况下发生的。中高剂量的电离辐射主要包括核辐射、 γ 射线、强紫外线等。当人体接触到这些高剂量电离辐射时,如防护措施不当,受照射剂量超过一定的限度时,辐射就会对人体发生有害作用,主要表现为引起一系列的放射病,严重时可使机体的器官、系统发生病理性改变,其中神经系统、消化系统以及造血器官的改变最为明显。电离辐射对机体的损伤可分为急性放射损伤和慢性放射性损伤。急性放射性损伤由一次或短时间内接受大剂量照射所致,常发生于事故性照射;慢性放射性损伤是由长期接触小剂量照射所引起的,常见于长期接触医疗放射的工作人员。

电离辐射虽然不像电磁辐射那样与人们息息相关,却也算得上无处不在。人们晒太阳会接触到紫外线带来的辐射,飞行机组人员、宇航员会接触到宇宙辐射,就医的病人和放射科医师会接触到医学辐射等。而这些辐射因其辐射量有限,只要防护得当,都不会对人体健康造成严重的危害。

在2010年美国一份对人体吸收辐射量的来源统计中,人体通过医疗、自然环境、宇宙射线及电子产品吸收的辐射量还不足辐射总吸收量的1/2。当下最令人们避之不及的医疗辐射和日常生活中常接触的安检扫描、阴极射线显像管等均属于低剂量的电离辐射,那么,究竟如何界定低剂量与高剂量电离辐射呢?

3 低剂量电离辐射的生物效应和健康影响

3.1 低剂量电离辐射致癌风险和线性无阈模型

低剂量电离辐射在学术界没有严格的定义。国际辐射防护委员会1991年60号出版物建议,剂量低于0.2 Gy,或剂量高于0.2 Gy但剂量率低于0.1 Gy/h的辐射为低剂量电离辐射。在低剂量辐射风险评估中,2006年美国等国家将当量剂量低于100 mSv^[13],剂量率低于0.1 mSv/min的辐射定为低剂量辐射。

多数人群受到的天然辐射和人工照射剂量一般不超过100 mGy,属于低剂量电离辐射,例如,中国阳江高本底辐射地区居民人均辐射剂量仅为每年1.96 mSv^[14],切尔诺贝利事故后的清理工人的人均辐射剂量为年均50 mGy等。低剂量电离辐射是一种微弱的环境刺激因子,一般不会引起明显的组织损伤和严重的器官残疾,人们主要关注的是低剂量辐射的遗传效应和辐射致癌风险。有关低剂量(率)辐射的遗传效应,只是在离体细胞和动物实验中发现遗传效应的显著增加,但在人群流行病学调查研究中,并没有发现遗传效应的显著增加,因此公众和科学界主要关心的是低剂量辐射的致癌风险。

目前低剂量辐射致癌风险分析采用线性无阈模型(linear non-threshold, LNT)^[15],即辐射致癌不存在剂量阈值,辐射诱发癌症的概率与照射剂量成正比。但是,近年研究发现的低剂量辐射诱导的兴奋效应和适应性反应使人们对LNT模型提出了质疑。2005年法国科学院和医学科学院联合报告指出^[13]:线性无阈模型不适用于<100 mGy的低LET辐射致癌风险评估,制定辐射防护政策时要考虑低剂量辐射诱导的适应性反应和兴奋效应等有益的健康影响。澳大利亚辐射防护协会也持有与法国相同的观点。

3.2 低剂量辐射的兴奋效应

兴奋效应(hormesis)是指细胞或者机体对环境因子刺激的一种双相反应,即低剂量环境因子刺激细胞或机体,会产生一种与大剂量刺激相反的效应^[16]。兴奋效应最早是指低剂量化学毒物的刺激作用。19世纪,微生物学家Schulz观察到重金属和有机溶剂对酵母生长的促进作用后,认为这种现象可能普遍存在于各种化学物和生命体,进而提出了Arndt-Schulz定律,即弱刺激加速生命力,中等强度刺激促进生命力,强刺激抑制生命活力,但过强刺激却能致死。

低剂量辐射能激活细胞广谱防御性表观遗传信号,上调适应性相关基因表达,诱导应激蛋白产生,清除自由基,增强DNA损伤修复能力,诱导细胞通过凋亡或者自噬清除癌前细胞和突变细胞,这些作用都有利于细胞抵抗辐射损伤,降低辐射诱导的癌症和非癌疾病的发病率和死亡率,延缓神经退行性疾病的发生,延长个体寿命。

许多辐射流行病学调查研究也支持低剂量诱导兴奋性效应有益于健康的观点。中国高本底辐射研究发现^[7],高本底地区居民平均照射剂量为2.31 mSv/y,显著高于对照地区居民平均0.96 mSv/y的受照剂量,然而40~70岁的高本底地区居民的癌症死亡率和发病率显著低于对照地区。巴西、埃及、伊朗和印度高本底地区居民天然照射剂量是美国居民平均天然照射剂量的20倍,但研究发现,这些地区居民的癌症发病率和死亡率与对照地区相比没有显著增加,甚至有所降低。

法国科学院2005年发表的报告,系统总结了低剂量照射有益的健康效应^[18]:1) 苏联Mayak核设施21500名放射性铯作业工人实体癌发病率降低;2) 切尔诺贝利核事故发生后,8600名清理现场的工人受到的平均照射剂量高达500 mGy,但这个人全癌死亡率比前苏联一般人群低12%;3) 3个国家96000名核设施作业工人受到的总的照射剂量超过400 mSv,然而白血病死亡率只有预期值的一半;4) 20年内受到的照射剂量超过200 mGy的放射科医师和技师的癌症发病率没有明显增加;5) 46740名飞行机组人员(大部分来自欧洲)受到照射剂量超过1.5 mGy/y,然而癌症发病率没有增加;6) 重复接受低于100 mGy放射诊断的病人白血病发病率没有增加;7) 切尔诺贝利事故后200万受照儿童中没有出现超额甲状腺癌风险。

英国某机构对1897—1997年在医院接受放射治疗的肺结核和乳腺癌患者的癌症死亡风险进行分析^[9],结果表明医学照射剂量为0.75~2.00 Gy的患者癌症死亡风险明显下降,呈现出了明显的兴奋效应曲线。

各种医学诊断致患者和受检者的吸收剂量如表1所示^[11]。从表1中可以看出,绝大多数辐射放射诊断导致的吸收量都在100 mGy以下,属于低剂量电离辐射,会引起兴奋效应,因此人们没有必要过度担心放射诊断的辐射致癌风险。

比较美国山区和美国东南部每10⁵人中每年因癌症死亡的人数表明,居住在高海拔山区的美国人接受

的氡辐射量比生活在东南部州的人高5倍,但其癌症的死亡人数和肺癌的死亡人数都相对较低(表2)^[20],其原因可能是山区居民受到的高于正常水平的氡暴露诱导了兴奋效应,增强的DNA损伤修复能力降低了细胞的自发突变率,通过凋亡清除了自发转化的癌前细胞,降低了癌症发生率和死亡率。

表1 医疗辐射剂量及其兴奋效应

Table 1 Doses from typical diagnostic radiation sources in the United States and possibility for hormesis inductiona

辐射源	辐射量/mGy	是否引起兴奋效应
全口腔X射线检查	0.17	是
胸部X射线检查	0.25	是
乳房C射线检查	4	是
头部CT扫描	20	是
全身CT扫描	60	是
甲状腺扫描	10~100	是

表2 美国山区和东南部癌症死亡人数比较

Table 2 Comparison of annual cancer mortality in the southeastern and mountain U.S. states

地区	所有癌症 死亡人数	肺癌 死亡人数	氡气辐射水平/ (pCi·L ⁻¹)
山区	147	47	2.6
东南部	185	68	0.5
比率	0.79	0.69	5.2

3.3 低剂量辐射诱导的适应性反应

适应性反应(adaptive response, AR)是指预先给予生物体以低剂量遗传毒性的刺激因子后,生物体对之后受到的相同或类似刺激因子的高剂量暴露产生一定的保护作用,明显降低高剂量暴露所带来的损伤。低剂量电离辐射引起的适应性反应是指预先给予生物体低剂量辐射,可以使生物体对随后的大剂量辐射产生抗性,减轻大剂量照射产生的损害作用。

1984年Olivieri等^[21]报道了低剂量辐射诱导的适应性反应。他们在实验中发现,人外周血淋巴细胞在含有3.7 kBq/ml 3H-TdR的放射性培养基培养后,再用150 cGy X射线照射,结果150 cGy X射线诱导的染色体畸变率比预期值减少70%。随后,科学家用不同的实验模式对低剂量辐射诱导的适应性及其机制进行了研究。

低剂量辐射诱导的适应性反应和兴奋效应机制相似。从辐射生物效应产生的过程来看,低剂量辐射和大剂量辐射对生物体作用的本质是一样的,即辐射粒子(光子)通过引起生物大分子的电离,引起生物大分子结构和功能的改变,这种单位辐射剂量对细胞的“微损伤”或内稳态的“微扰动”,激发了细胞的防御机能,即活性氧清除能力的增加,DNA损伤修复能力的增强,细胞周期和凋亡的改变等。这种防御机制可以持续几个小时到数周,在此期间生物体暴露于大剂量辐射或受到其他有害因素时,持续存在的防御机制就会减轻大剂量有害因素产生的损伤,比如通过DNA损伤修复降低突变的发生,通过增强机体免疫,增强凋亡清除其他因素诱导的癌前细胞或者转化细胞,降低癌症发生率。可以说低剂量辐射诱发的兴奋性效应和适应性反应是低剂量电离辐射损伤的“过度修复”和“延长修复”

人们都知道吸烟可以引起肺癌,低剂量放射引起机体的“微损伤”激发人体的保护机能和损伤修复机能,可以降低吸烟引起的肺癌危险。调查发现^[22],暴露于<100 mSv低LET照射的核设施工人、放射医师和接受放射诊断的病人肺癌发病危险度降低40%。氦及其子体发射的 α 辐射也可以降低吸烟引起的肺癌发病率和死亡率。在美国洛基山区各州生活的人比在美国东南部生活的人年均接受的氦辐射量高5倍以上,但是在洛基山区各州的居民癌症死亡率却要低很多,这一结果主要是由于氦辐射诱导的适应性反应对吸烟致癌作用的拮抗。

4 结论

人们生活在辐射环境中,天然照射和医学照射不可避免。在某些事故发生的情况下,大剂量照射确实能够损伤人体。但是,只要采用适当的防护措施,就可以在利用辐射的同时把辐射的危害降低到人体可接受的水平。大多数普通人受到的环境天然照射和医疗照射均属于低剂量照射,对人体健康危害极小,甚至没有危害。研究表明,低剂量辐射诱导的兴奋效应和适应性反应对人体还存在着有益的健康效应。因此,人们要正确认识辐射,消除恐惧心理,让辐射在医学、工业和科研等领域造福人类。

参考文献(References)

- [1] 鲁周. 电离辐射危害种种[J]. 现代职业安全, 2007, (2): 89.
Lu Zhou. Ionizing radiation hazards[J]. Modern Occupational Safety, 2007(2): 89.
- [2] Kumar V, Vats R P, Pathak P P. Harmful effects of 41 and 202 MHz radiations on some body parts and tissues[J]. Indian Journal of Biochemistry & Biophysics, 2008, 45(4): 269-274.
- [3] Meredith W J. Harmful effects of ionising radiation[J]. International Journal of Radiation Biology & Related Studies in Physics Chemistry & Medicine, 2009, 2(3):336.
- [4] 张梦凡. 低剂量 γ 射线诱导的淋巴细胞核质桥适应性反应及AKT的作用机制研究[D]. 北京: 中国疾病预防控制中心, 2016.
Zhang Mengfan. Study on the adaptive response of the lymphocyte nucleus and the mechanism of AKT induced by low-dose gamma-induced lymphocytes[D]. Beijing: Chinese Center For Disease Control, 2016.
- [5] Toossi M T B, Dehkordi S A, Sankian M, et al. Effects of adaptive response induced by low-dose ionizing radiation on immune system in spleen lymphocytes of BALB/C mice[J]. Physica Medica, 2016, 32(3): 244.
- [6] Jiang X, Hong Y, Zhao D, et al. Low dose radiation prevents doxorubicin-induced cardiotoxicity[J]. Oncotarget, 2018, 9(1): 332-345.
- [7] Stern R G. Medical radiation safety: rational policy, irrational science[J]. American Journal of Medicine, 2012, 125(8): 730-731.
- [8] 王春燕, 王福合. X射线的发现及其早期研究[J]. 现代物理知识, 2017(1): 30-34.
Wang Chunyan, Wang Fuhe. Discovery of X-rays and its early research[J]. Modern Physics Knowledge, 2017(1): 30-34.
- [9] 宋文周, 刘光贤. 浅析放射治疗的发展[J]. 昆明医科大学学报, 2012, (s1):131-133.
Song Wenzhou, Liu Guangxian. Analysis of the development of radiation therapy[J]. Journal of Kunming Medical University, 2012, (s1): 131-133.
- [10] Seymour C, Mothersill C. Low dose radiation effects in the environment: Is the fear or the science irrational?[M]// Radiation Risk Estimates in Normal and Emergency Situations. Springer Netherlands, 2006: 169-174.
- [11] Scott B R, Di P J. Sparsely ionizing diagnostic and natural background radiations are likely preventing cancer and other genomic-instability-associated diseases[J]. Dose Response, 2007, 5(3): 230-255.
- [12] Bernal A J, Dolinoy D C, Huang D, et al. Adaptive radiation-

- induced epigenetic alterations mitigated by antioxidants.[J]. *Faseb Journal*, 2013, 27(2): 665–671.
- [13] Tubiana M, Aurengo A. Dose–effect relationship and estimation of the carcinogenic effects of low doses of ionizing radiation[J]. *International Journal of Radiation Oncology Biology Physics*, 2013, 63(2): 317–319.
- [14] Wei L, Sugahara T. An introductory overview of the epidemiological study on the population at the high background radiation areas in Yangjiang, China[J]. *Journal of Radiation Research*, 2000, 41(s1): 1–7.
- [15] Jr B J. The linear–non threshold (LNT) model as used in radiation protection: An ncrp update[J]. *International Journal of Radiation Biology*, 2017, 93(10): 1–14.
- [16] Sies H, Feinendegen L E. Radiation hormesis: The link to nanomolar hydrogen peroxide[J]. *Antioxid Redox Signal*, 2017, 27(9): 596–598.
- [17] Nambi K S, Soman S D. Environmental radiation and cancer in India[J]. *Health Physics*, 1987, 52(5): 653–657.
- [18] Tubiana M. Dose–effect relationship and estimation of the carcinogenic effects of low doses of ionizing radiation: The joint report of the Académie des Sciences (Paris) and of the Académie Nationale de Médecine[J]. *International Journal of Radiation Oncology Biology Physics*, 2005, 63(2): 317–319.
- [19] Ivanov V, Ilyin L, Gorski A, et al. Radiation and epidemiological analysis for solid cancer incidence among nuclear workers who participated in recovery operations following the accident at the Chernobyl NPP[J]. *Journal of Radiation Research*, 2004, 45(1): 41–44.
- [20] Jagger J. Natural background radiation and cancer death in Rocky Mountain states and Gulf Coast states[J]. *Health Physics*, 1998, 75(4): 428–430.
- [21] Higson D J, Boreham D R, Brooks A L, et al. Effects of low doses of radiation: joint statement from the following participants at the 15th Pacific Basin Nuclear Conference, sessions held in Sydney, Australia, Wednesday 18 October 2006[J]. *Dose–Response*, 2007, 5(4): 259–262.
- [22] Olivieri G, Bodycote J, Wolff S. Adaptive response of human lymphocytes to low concentrations of radioactive thymidine[J]. *Science*, 1984, 223(4636): 594–597.

The biological effects and health impacts of ionizing radiation

CAO Yi, XIE Wen

School of Public Health, Medical College of Soochow University, Suzhou 215123, China

Abstract People are often exposed to radiation in their daily life, but they are also unaware of the low doses of ionizing radiation such as medical radiation because radiation is hard to perceive. In this paper, the source, biological effects and health impacts of ionizing radiation are briefed, and the hormesis and adaptive response of low–dose radiation are discussed. This paper intends to help people to correctly understand ionizing radiation and proposes appropriate protective measures that may reduce the harmful effects of ionizing radiation in human life to some acceptable level for humans, so that radiation can benefit human beings in the fields of medicine, industry and scientific research.

Keywords ionizing radiation; radiophobia; hormesis; adaptive response ●



(责任编辑 田恬)