核爆炸时核辐射损伤和放射反应发生情况的探讨

防原医学教研室 程天民

核武器爆炸所产生的早期核辐射和放射性沾染是特殊的杀伤因素，作用于人体，超过一定剂量（一般为100拉德以上）即可引起核辐射损伤，或称放射损伤；低于此剂量即为小剂量照射，可引起放射反应。这些核辐射伤害是防原医学研究的重点和难点，对卫生保障以至军事、民防等方面带来许多新的问题，在敌方大力发展小当量战术性核武器、其中包括中子弹的时候，加强这方面的研究显得更为重要和迫切。

本文对核战争时核辐射损伤和放射反应的发生情况，包括发生地域、发生率、伤类伤情等问题，进行探讨。分析发生情况的基础，是对不同当量和方式核爆炸时几种杀伤因素的杀伤范围，以及受到核辐射不同剂量照射地域的面积进行估算，由面积推算发生率（即“面积比较法”）。在这些地域内的人员分布、密度和防护屏蔽条件又进一步决定受到核辐射伤害的实际人数和所发生的伤类伤情。这里只讨论由早期核辐射和放射性沾染外照射引起的伤害，对沾染内照射和皮肤β射线损伤不拟涉及。

不同当量核爆炸时早期核辐射损伤在核武器损伤中的发生率

——当量等级越小，发生率越高

千吨级（1千吨以上、1万吨以下，其他类推）核爆炸时，早期核辐射的杀伤范围大于冲击波和光辐射，早期核辐射的杀伤边界就是总杀伤区（不包括放射性沾染的范围，下同）的边界，在总杀伤区内无防护的暴露人员均可发生核辐射损伤（发生率可达100%）。两次千吨级地爆核试验时，地面暴露动物的早期核辐射损伤的实际发生率分别为100%和98.4%。万吨以上核爆炸，随当量增大，光辐射杀伤范围（由其确定总杀伤区范围）越来越大于早期核辐射，这时发生早期核辐射损伤的地域面积有所扩大，但占总杀伤区面积的比例却愈益减少。如同是空爆（比高120），1万吨当量核爆炸时早期核辐射损伤的地域面积为5.39平方公里，占总杀伤区面积的98%，当量增至10万吨时，面积扩大为11.1平方公里，而比例却缩小为11.3%。还由于随当量增大，受早期核辐射损伤者越来越多地复合严重冲击伤和烧伤而可发生现场死亡，早期核辐射损伤伤员的实际发生率更会相应减少。据日本广岛（受1.25万吨原子弹袭击）和长崎（2.2万吨）资料，13503名爆后20天生存伤员中，两地放射损伤的比例均为31.7%，至于在所有核武器损伤中的发生率，未获确切数据。总之，当量等级越小，早期核辐射损伤的发生率越高，小当量核爆炸时，核辐射损伤是救治中最突出的问题。

?1994-2015 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

不同爆炸方式对早期核辐射损伤发生率的影响

——万吨以上，地爆时发生率比空爆时高一倍左右

千吨级核爆炸，在比高（$\frac{\text{爆炸高度（米）}}{\sqrt[3]{\text{当量（千吨）}}}$）为0～200的情况下，早期核辐射损伤的发生率均可达100%，不同爆炸方式对其发生率无大影响。万吨以上、特别是2万吨以上，地爆时的发生率约为空爆时的一倍左左（表1）。这并不是由于地爆和空爆时的早期核辐射杀伤面积有多大差异，而主要是由于地爆时的总杀伤区面积比空爆时明显缩小的缘故。万吨以上核爆炸的总杀伤区范围由光辐射所确定，而地爆时由于火球接触地面，光辐射一部分能量消耗于溶化地面岩土等物体，并被迅速掀起的大量尘土所遮掩，因而受到明显削弱，其杀伤范围就比空爆时明显缩小，遂使早期核辐射杀伤面积占总杀伤面积的比例（反映损伤发生率）相对增加。

表1　　地爆和空爆时早期核辐射杀伤面积所占比例的比较

当量（吨）	比　高	总杀伤区面积(KM^2)	早期核辐射杀伤面积(KM^2)	比例（%）
20	0	13.2	6.70	50.0
	120	28.3	6.61	23.4
50	0	28.3	8.97	31.7
	120	55.4	8.55	15.2
100	0	47.8	11.6	24.1
	120	98.5	11.1	11.3
500	0	153	18.4	12.0
	120	327	16.9	5.13

早期核辐射损伤的发生地域

——杀伤半径至多不超过3、4公里，暴露人员的早期核辐射损伤主要发生于现场死亡区以外的环形区内

早期核辐射杀伤半径的概数为：千吨级核爆炸1～1.3公里；万吨级1.3～2公里；十万吨级2～2.5公里；百万吨级2.5～3.5公里，千万吨级3.5～5.5公里（苏军资料亿吨当量核爆炸时100伦边界可达5.45公里）。就装备的核武器而言，早期核辐射的杀伤半径至多不超过3、4公里，在这距离以外，可不考虑早期核辐射损伤的问题。早期核辐射在辐射过程中容易削弱，一般地说，经过100米左右空气层即削弱一半，经若干个半削弱层就使剂量减到100伦以下，这就限制了它的杀伤范围。

?1994-2015 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

由于暴露人员在爆心周围一定范围内均发生现场死亡，因此暴露人员发生早期核辐射损伤的地域实际上就是现场死亡区以外的环形区（图）。这个环形区的宽度均不超过 1 公里，面积不超过 8 平方公里（表 2）。如现场死亡区大于早期核辐射杀伤区，则在暴露人员中就

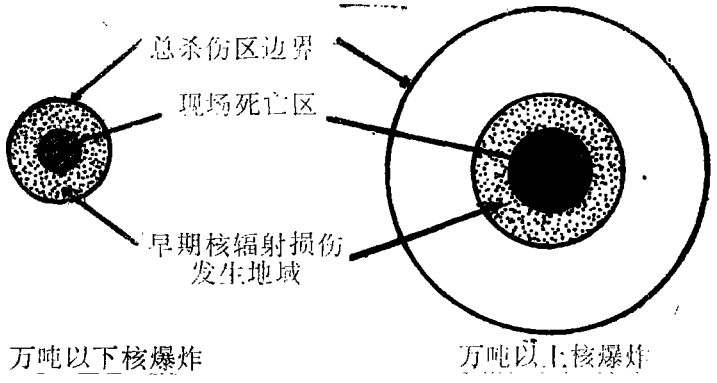


表2　　暴露人员发生早期核辐射损伤的环形区宽度和面积

当量（千吨）	比高 0		比高120	
	宽度（KM）	面积（KM²）	宽度（KM）	面积（KM²）
1	0.77	2.88	0.80	2.92
2	0.78	3.28	0.81	3.27
5	0.81	3.99	0.74	4.01
10	0.83	4.72	0.86	4.75
50	0.78	6.37	0.79	6.23
100	0.74	7.21	0.73	6.94
500	0.25	3.61	0.10	1.70

没有早期核辐射损伤伤员了。至于有防护的人员，虽处于“现场死亡区”以内，如有效地屏蔽光辐射和冲击波但未能完全屏除核辐射的作用，当然仍会发生早期核辐射损伤（或小剂量照射）。

放射性沾染外照射所致核辐射损伤的发生地域

——大于早期核辐射损伤的发生地域

地面和低空爆时，在爆区和下风向地区可形成不同程度的放射性沾染区。处在沾染区内的人员可受到放射性烟云和/或已沉降地面的落下灰所释出的γ射线外照射而发生核辐射损伤（或小剂量照射）。在沾染区所受累积照射量大于 300伦的地域为危险伤害区，100～300伦为中度伤害区，25～100 伦为轻度伤害区，25 伦以下为“安全区”。沾染区（伤害区）的大小还受合成风速和风向切变角的影响。按落下灰沉降开始至爆后 6 小时内的累积剂量计，可受到100伦以上照射的地域长度（即中等伤害区长边界）与早期核辐射杀伤区以及总杀伤区的直径比较如表 3。可见沾染外照射所致核辐射损伤的发生地域要比早期核辐射损伤范围为大，也比三种瞬时杀伤因素综合杀伤的范围为大。

?1994-2015 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

表3　地爆时落下灰所致中等伤害区长度与早期核辐射及综合杀伤区直径的比较

当量（千吨）	落下灰中等伤害区长度（KM）				早期核辐射杀伤区直径（KM）	综合杀伤区直径（KM）
	V = 25KM/H		V = 50KM/H			
	θ<30°	θ>30°	θ<30°	θ>30°		
1	6.4	4.9	5.5	4.0	1.96	1.96
2	8.4	6.4	7.6	5.4	2.12	2.12
5	11.4	9.0	11.5	8.2	2.38	2.38
10	15.0	11.8	15.5	11.2	2.64	2.64
50	26.2	21.2	30.0	23.1	3.38	6.0
100	33.0	27.0	39.2	30.9	3.84	7.8

V风速　　θ风向切变角

核辐射损伤的伤类

——包括单纯急性放射病和放射复合伤

如前所述，万吨以上核爆炸时由于早期核辐射杀伤范围小于冲击波和光辐射，因此暴露人员发生放射损伤者均同时复合有冲击伤和烧伤，成为放射复合伤。而万吨以下，则可发生单纯急性放射病和放射复合伤，两者发生比例列于表4。可见当量偏小时单纯急性放射病的发生比例大，1万吨时由于三种瞬时杀伤因素的杀伤范围差异缩小，因此放射复合伤的比例增大。

表4　千吨级核爆炸时单纯急性放射病和放射复合伤的发生比例（%）

当量（千吨）	地爆（比高0）		空爆（比高120）	
	单纯放射病	放射复合伤	单纯放射病	放射复合伤
1	76	24	76	24
2	66	34	59	41
5	44	56	43	57
10	21	79	2	98

核爆炸时单纯急性放射病发生于：（1）万吨以下核爆炸时的暴露和屏蔽人员；（2）万吨以上的屏蔽人员；（3）在严重沾染区通过或停留过久的人员。

核辐射损伤的伤情（分型分度）

——分为脑型、肠型和骨髓型放射损伤；重度以上多于中度以下伤情

由于所受剂量不同而可发生脑型、肠型和骨髓型放射损伤（包括单纯急性放射病和放射

?1994-2015 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

复合伤）。在早期核辐射杀伤范围内，三型放射损伤的发生率列于表5。一般当量越小，三型发生率和脑型、肠型相对发生率越高。

表5　　地爆时早期核辐射杀伤范围内暴露人员各型放射损伤发生率

当量（千吨）	早期核辐射杀伤半径（KM）	现场死亡 区间（KM）	现场死亡 发生率（%）	脑型 区间（KM）	脑型 发生率（%）	肠型 间区（KM）	肠型 发生率（%）	骨髓型 区间（KM）	骨髓型 发生率（%）
1	0.98	0.21	21.4	0.22	22.5	0.20	20.4	0.35	35.7
2	1.06	0.28	26.4	0.21	19.8	0.21	19.8	0.36	34.0
5	1.19	0.38	31.9	0.21	17.7	0.23	19.3	0.37	31.1
10	1.32	0.49	37.1	0.20	15.2	0.23	17.4	0.40	30.3
50	1.69	0.91	53.8	0.05	3.0	0.28	16.6	0.45	26.6
100	1.92	1.18	61.5	—	—	0.26	13.5	0.48	25.0
500	2.42	2.17	89.7	—	—	—	—	0.25	10.3

骨髓型放射损伤按不同剂量又可分为极重、重、中和轻度四度。广义而言，可将脑型和肠型包括在极重度以内。这样，极重度伤情将约占50～70%；重度7～10%；中度10～15%；轻度15～20%。重度以上与中度以下伤情比例为65～75：25～35，即约2～3：1，前者为后者的2～3倍。目前医疗水平对中度以下伤情一般较易治疗，重度、特别是极重度伤情治疗困难，对肠型的治疗尚在摸索中，脑型的治疗尚未列入研究日程。这突出地说明核爆炸后发生的早期核辐射损伤，伤情严重者占大多数，这就对救治工作增加了困难，提出了更高的要求。

放射反应的发生情况

——比放射损伤的发生地域大，人数多

在战时和平时均可发生小剂量照射所致的放射反应，受多大剂量范围照射就算小剂量照射，尚缺乏统一的标准和明确的含义。如日本环境辐射安全研究专业会议指出："给小剂量下一个明确的定义很难．可将一次照射后不引起急性损伤的剂量作为小剂量的上限值。"国际辐射防护委员会认为"一次急性照射不超过50拉德，或一年内多次受到小于10拉德的照射为小剂量照射。"我国目前将一次受照100拉德以下或经常受超允许剂量的慢性照射划为小剂量照射。

核战争时以下情况可发生小剂量照射：

（一）在早期核辐射杀伤边界（100拉德）以外的人员可受小剂量照射，其发生地域大于早期核辐射损伤地域。

按早期核辐射剂量分布，将受小剂量（3～100拉德）照射地域与100～600拉德（目前一般较有把握的可治剂量范围）及>100拉德地域相比较（表6），可见小剂量照射地域均大于核辐射损伤地域（1千吨地爆时后者稍大）。3～100拉德地域为100～600拉德地域的2～4倍。五次核试验的实测结果为2.7～4.1倍。

?1994-2015 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

表6　　地爆时早期核辐射小剂量照射地域与核辐射损伤地域的比较

当　量	地域面积（KM²）			3～100拉德：100～600拉德
（千吨）	3～100拉德	100～600德拉	100拉德	
1	2.78	1.42	2.96	1.95:1
2	5.74	1.59	3.45	3.64:1
5	6.93	1.88	4.37	3.69:1
10	7.99	2.20	5.47	3.62:1
50	11.5	3.24	8.76	3.56:1
100	13.0	4.32	11.6	3.04:1

（二）在放射性沾染外照射中度伤害区以外的人员可受小剂量照射，其发生地域也大于可致外照射放射损伤的地域。

按合成风速25～100公里，风向切变角15～40°的条件，20万吨以下地爆时，至爆后6小时内累积剂量引起不同等级伤害区的外边界距爆心距离为：危险伤害区20～40公里以内；中度伤害区30～60公里以内；轻度伤害区60～120公里以内。轻度伤害区（受小剂量照射）不仅距离远，且处于外圈，其地域面积比内圈引起放射损伤的地域要大得多。不言而喻，处于中度，危险伤害区的人员如停留时间较短，当然也可只受到小剂量照射。

（三）在早期核辐射杀伤区和严重沾染区因受屏蔽而削减了受照剂量，仍可受到小剂量照射。

（四）较长时间受感生放射性的作用。

一些金属元素（如兵器材料）在早期核辐射中子的作用下可产生感生放射性，这种感生剂量对当时当地引起急性放射损伤来说是微不足道的，但在爆后一定时间内进入爆区长时间接近或在这些有感生放射性的兵器内作业的人员，就可能受到小剂量照射。

受小剂量照射后，虽不会发生急性放射损伤，不需要特殊的医疗处理，但涉及面广，人数多，对机体仍有一定的影响，特别是随机性损害（损害机率并不完全随所受剂量增大而增加或减小而减少）尤为重要，因此必须予以足够的重视。

综上所述，一旦发生核战争，尤其是使用小当量核武器时，将发生大批核辐射损伤伤员和放射反应人员，必须加强这方面的研究，不断提高防治水平，以适应防原战备的需要。

?1994-2015 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net