

电离辐射对饮用水的消毒效应*

(清华大学核能技术研究所)

(北京市自来水公司)

近年来的研究表明,传统氯法消毒过的水中生成有可能诱发癌症的三卤甲烷,而且加氯消毒不能有效地杀灭污水中的芽孢、病毒和某些致病菌;消毒效果良好的臭氧又有不能持续保持杀菌作用和受成本较高的限制,因而人们正在大力探索新的饮用水消毒技术。

利用电离辐射消毒水是一种新方法。所谓电离辐射系指电磁性与微粒性辐射。放射性同位素、X-射线、核反应辐射、加速电子及其它粒子均属电离辐射。在工业和半工业规模消毒应用中,放射性同位素钴-60发射能量为1.33和1.17兆电子伏的 γ -射线和加速器产生的加速电子比较实用,其中 γ -射线应用最广^[1]。

电离辐射消毒就是细菌分子在射线的直接或间接作用下,细胞的各种靶分子遭受损伤,产生致死效应,通常称之为细菌(或病毒)的钝化作用。各种病原微生物只要吸收足够的辐射剂量均可使之钝化^[2]。吸收剂量的单位以拉德表示,即1克物质吸收100尔格的能量为1拉德。

与常规消毒法相比较,辐射消毒具有如下特点:不改变水的天然物理、化学与感官性状;在适当剂量下灭菌非常快;能有效杀灭颗粒物质内部的各种致病菌;水经辐射消毒后可立即饮用,无有害残留物及消毒效果稳定可靠。因此,电离辐射法消毒饮用水日益受到国际上的重视。

一、国外利用电离辐射法消毒水的研究与工程应用实践

用辐射法消毒水,国外已开展了大量研究工作。如法国针对巴黎河水上游取水点水质不断恶化的现状,开展了用高能电子束辐射杀灭城市供水中病原微生物的研究。结果表明,当辐照剂量在 $1 \times 10^5 - 2 \times 10^5$ 拉德时,在20°C下繁殖的细菌全部被杀灭,而当总吸收剂量为 $2 \times 10^5 - 5 \times 10^5$ 拉德时,在37°C下繁殖的细菌则全部被杀灭。

美国对距Huron河污水排放口上下游0.2英里处所取水样用钴-60进行 γ -辐照。检验结果表明,只要 2.5×10^4 伦琴当量的辐照剂量就足以使河水中植物群混合细菌的总数大大降低,而且水的pH值不影响对细菌的致死效应。结果见表1^[3]。

经过大量研究获取的水中不同类型的病毒和病菌的辐照致伤剂量列于表2。数据表明,各种病毒的致死剂量介于 $5 \times 10^4 - 5 \times 10^5$ 拉德之间。

为降低辐照剂量,有些国家进一步开展了协同消毒效应的研究。如苏联Г.Н.斯多连科(Сидоренко)等人利用 γ -射线和氯的协同作用获得了十分满意的消毒效果^[4]。当投氯量为水中需氯量的三分之一时,只用所需 γ -辐照剂量的十分之一就可达到100%的消毒效果。

* 本文由云桂春同志执笔。

γ-辐照对污染河水中细菌的致死效应

表 1

辐照剂量 (伦琴当量)	污水厂排放口上游			污水厂排放口下游		
	菌落总数/毫升	杆菌总指标/ 100毫升	链球菌总指标/ 100毫升	菌落总数/毫升	杆菌指标/ 100毫升	链球菌指标/ 100毫升
0	4000	540	79	7700	35000	540
2.5×10^4	90	6.8	130	95	49	70
5.0×10^4	44	<1.8	11	50	2	33
1.0×10^5	10	<1.8	13	17	<1.8	28
1.5×10^5	3	<1.8	11	11	<1.8	<1.8

不同类型病毒和病菌的致死剂量

表 2

微 生 物	致 死 剂 量 (拉德)	微 生 物	致 死 剂 量 (拉德)
多瘤T型病毒	4.1×10^5	鼠伤寒杆菌	2.7×10^4
脊髓灰质炎病毒	3.4×10^5	大肠埃希氏杆菌	5.7×10^3
牛痘病毒	8.8×10^4	枯草杆菌	3.3×10^3
腺病毒5型	7.0×10^4	灵 杆 菌	1.3×10^3
新卡洛洛病毒	4.7×10^4	绿浓杆菌	1.1×10^3
流行性感冒病毒B型	3.7×10^4	荧光假单胞菌	1.1×10^3

希腊原子能委员会还论证了氯化锌与γ-辐照的协同效应^[5]。在 2.4×10^4 拉德的辐照剂量下，当水中有12ppm的氯化锌时，细菌存活率只有15~0.5%。此外，热处理同辐照相配合消毒，加热温度超过49℃时，辐射钝化细菌的敏感性明显增加，达到同样的灭菌效果，辐射剂量可降低两个量级。

上述成果为利用γ-辐照法消毒水提供了工程实践的可能性。美国Aqueunics公司设计了可供数百至数千人使用的γ-辐射消毒水的装置，现已商品化销售，供边远偏僻地区给水消毒用。南非温得和克市水源奇缺，不得不将部分生活水做深度处理后供做饮用水源，目前正在积极进行γ-辐射法现场消毒实验^[6]。1970年3月美国佛罗里达州污染研究中心建成第一座商用污水辐射处理厂。该厂利用γ-辐射消毒装置（称为ESI）每天可处理 1×10^4 加仑生活污水，出水中大肠杆菌杀灭99.99%，细菌杀灭100%，表面活性物质浓度也显著降低。处理费用每1000加仑水大约需4美元。ESI现已做专利商品供应市场^[7]。

二、γ-辐射法消毒水的实验研究

我们利用2000克镭当量的钴-60辐射源对地面水、湖水和纯菌种配制的水样进行了电离辐射灭菌研究。

1. 实验方法

（1）水样制备：γ-辐射对杀灭腐生性细菌的效应实验，采用了北京东郊地面水，杀灭大肠杆菌群的效应实验分别采用了北海公园湖水和纯菌种配制的水样。在无菌室将待照水样分装在20毫升经灭菌的磨口试管内，每管装20毫升样品，盖紧试管塞并置于5℃冰箱内（夏季）或置于37℃的保温瓶（冬季）内，以备辐照用。

（2）辐照实验：将样品分别置于距钴-60辐射源的60和120厘米处，于不同剂量率下进行辐照，待辐照剂量达预定值后，停止照射，取出样品做细菌学检验。

(3) 水质的细菌学检验*

饮用水消毒合格的主要指标为1升水中大肠菌数小于3个,每毫升水中的腐生性细菌总数不得超过100个。国外实验表明,病原菌对 γ -射线的敏感性依次排列为痢疾、伤寒、付伤寒和大肠杆菌,后者同病原菌相比最耐受 γ -辐照。因此,采用 γ -辐照法消毒也和加氯、紫外线消毒一样,大肠杆菌保持其自身的卫生指标意义,并能作为杀灭痢疾、伤寒和付伤寒的间接指标。

2. 实验结果

现将各种研究水样辐射消毒的实验数据分列于表3~表6及图1中。其值为算术平均值。

此外,尚初步探索了 γ -辐照消毒的后效应。将灭菌(大肠杆菌)后的水样瓶立即开盖,放置在室内,分别历经4、8和18小时,细菌检验结果仍为零,在20毫升水样中检不出一个大肠杆菌。

γ -辐照对污染河水中细菌群落

的致死效应

表 3

辐照剂量 (拉德)	剂量率 (拉德/分)	每毫升细菌群落总数 (个)	灭菌效果 (%)
0	0	3432.6	0.0
1×10^3	126.6	1785.5	48.0
1×10^4	1080.6	747.8	78.2
1×10^5	1080.6	8.2	99.8

注:灭菌百分数按公式 $\frac{P_0 - P_x}{P_0} \cdot 100\%$ 计

式中: P_0 ——原始菌落数

P_x ——辐照后存活菌落数

γ -辐照对污染河水中大肠菌群

的致死效应

表 4

辐照剂量 (拉德)	剂量率 (拉德/分)	每20毫升大肠菌群数 (个)
0	0	无法计数
1×10^3	126.6	无法计数
1×10^4	1080.6	33.3
1×10^5	1080.6	0.0

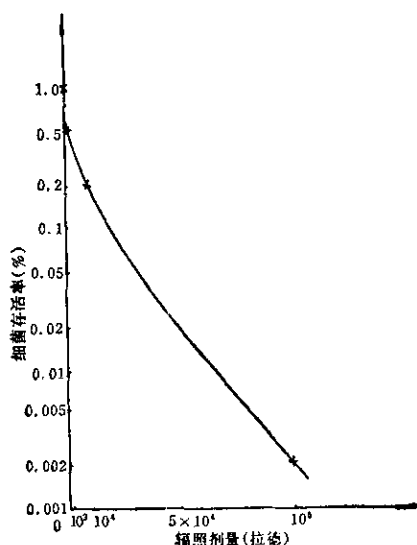


图 1 辐射剂量与灭菌效率的关系

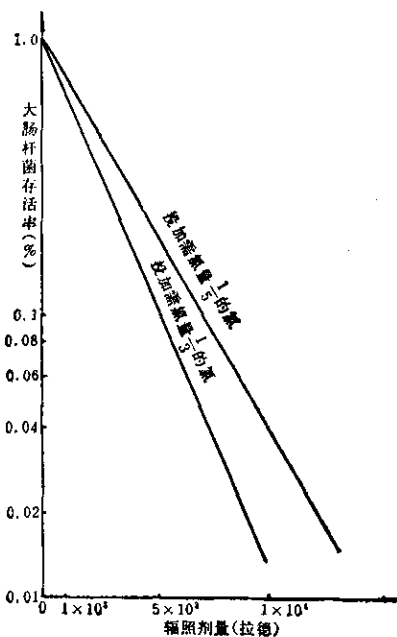


图 2 投氯与 γ -辐照的协同灭菌效应

* 本实验研究中,供细菌学检验的水样的采样、保存及其细菌总数和大肠菌群的测定均参照“生活饮用水水质检验方法”一书执行^[1]。

γ-辐照对纯菌种配制水样的致死效应

表 5

辐照剂量 (拉德)	剂量率 (拉德/分)	每20毫升大肠菌群数(个)		
		产气 杆 菌	大肠杆菌	枸橼酸菌
0	0	无法计数	无法计数	无法计数
1×10^3	125.6	无法计数	无法计数	无法计数
1×10^4	1080.6	100.5	133.3	无法计数
1×10^5	1080.6	0.0	0.0	0.0

投氯与γ-辐照对大肠杆菌的致死效应

表 6

辐照剂量 (拉德)	剂量率 (拉德/分)	投氯量(占所需氯量的分数)			
		0	1/3	1/5	1/10
0	0	无法计数	176	462	无法计数
1×10^3	126.6	无法计数	55.5	155.3	217.5
1×10^4	1080.6	无法计数	9.2	10.0	42.0
1×10^5	1080.6	0.0	0.0	0.0	0.0

三、几 点 看 法

1. 污染严重的水源用γ-辐照法消毒时，当辐照剂量达 1×10^5 拉德时，大肠菌群全部被杀灭。按世界卫生组织的水质分类标准，此种水属极好的水。

2. 腐生性细菌对电离辐射相当敏感，辐照剂量为 1×10^3 拉德时，就可使河水中菌落值有明显降低。

3. 水样中投加少量氯再进行γ-辐照，其协同灭菌效果比较明显，与单纯γ-辐照相比，达到同等程度的灭菌效果，辐照剂量大体可降低一个量级，这一结果展示出工程实践的可能性。

4. γ-辐照在微生物灵敏区内所引起的电离，大肠杆菌存活数的对数随剂量呈线性减少，腐生性细菌则呈非线性减少。

5. γ-辐照消毒水具有一定的持续保持杀菌的能力。

6. 氯的消毒作用是通过它所产生的次氯酸HOCl产生的。HOCl系中性分子，可扩散到带负电的细菌表面，并穿过细胞膜进入细菌内部。此后由于Cl原子的氧化作用破坏了细菌的某种酶系统，导致细菌死亡。消毒效果受水的pH值影响很大，pH值愈低，消毒时间可以缩短，说明消毒效果越好^[9]。射线灭菌一般认为是通过射线的直接和间接作用。所谓直接作用即细胞内的靶（细胞核、特别是脱氧核糖核酸）受核辐射的一定数量的“弹”打击后起到致死效应；而射线对活细胞的间接作用，则通过核辐射与水分子的直接作用产生 e^- 、H、OH和 H_2O_2 等活性物质，它们与细菌有很高的反应性。射线直接和间接作用的综合效果，使细胞在分裂过程中死亡，因而其消毒效果不受水温和pH所限。此外，根据法国的实验结果，水样辐射消毒后的pH没有明显改变，水中 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 F^- 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Na^+ 、 K^+ 、Fe、 SiO_2 等元素辐照前后均无影响。说明电离辐射消毒可避免化学法消毒所致的化学累积效应。

7. 按照国外的运行经验，建造一座辐照装置，其辐照容量和建造费用的关系（不包括购买辐射源），可以下式表示：

$$C = 0.75 \times 10^6 D^{0.88}$$

式中：C：建设费（美元）；D：钴-60源容量（兆居里）

从式中可见，装置容量越大，其平均单价就急剧下降。建设费中照射室约占16%，辐射源贮存池占3%，建筑物占53%，其它费用为28%。建造20~100万居里的装置，一次投资约需3~4亿日元。所以，尽管γ-辐射消毒水有其独特的优点，通过协同效应实验也提供了工

程实践的可能性, 但目前在经济上还缺乏竞争力, 仍需深化研究工作。

参 考 文 献

- [1] Fraser, J.S., *IEEE Transaction on Nuclear Science*, NS-26(1), 1455-1458, (1979).
- [2] A.J.斯华罗著, 盛怀禹等译, 有机化合物辐射化学, 250~251, 上海科学技术出版社, 上海, 1963.
- [3] Ridenour, G.M, E.A, Armbruster, *Journal AWWA*, 48(6), 671(1956).
- [4] Доценты Г.И.Сидоренко и М.А.Пинигин, *Тигиена и Санитария*, 28(9), 97-98(1963)•
- [5] Джатацпанян, Р.В., *Технология Радиационной Обиетки Стонных Вод*, 4-5, Москва, 1981.
- [6] Cillie, G.G.*Radiation for a Clean Environment*, 29~43, Vienna, (1975).
- [7] Woodbridge, D. D, Mann, L. A, Garrett, W.R., *Nuclear News*, 13(9), 60-64(1970).
- [8] 中国医学科学研究院卫生研究所, 生活饮用水水质检验方法, 人民卫生出版社, 北京, 1977.