

DOI: 10.7524/AJE.1673-5897.20181012002

李小飞, 张谈贵, 张学东, 等. 河流放射性核素水体弥散模型及其应用[J]. 生态毒理学报, 2019, 14(2): 280-287

Li X F, Zhang T G, Zhang X D, et al. Modelling the dispersion of radionuclide in river water and its application [J]. Asian Journal of Ecotoxicology, 2019, 14(2): 280-287 (in Chinese)

## 河流放射性核素水体弥散模型及其应用

李小飞<sup>\*</sup>, 张谈贵, 张学东, 王海山, 高健夫, 王福军

甘肃省核与辐射安全中心, 兰州 730020

收稿日期: 2018-10-12 录用日期: 2018-12-17

**摘要:** 随着我国核能及核技术利用产业的迅速发展, 放射性物质运输对饮用水水源地的潜在放射性污染健康风险越来越大, 阐明事故情况下放射性物质在地表水体中的迁移弥散行为可为居民饮水健康风险防范提供科学依据。针对含钴-60、铯-137、锶-90 货包公路运输在事故工况下放射性物质释放造成黄河兰州段河流型饮用水源放射性污染, 讨论了河流放射性物质弥散模型和居民饮用水的健康风险。结合国内现有放射源活度水平及国内外放射性物质事故资料, 考虑泥沙的影响, 设定铯-137 不同活度水平、不同流量情形, 根据饮用水中铯-137 的死亡风险系数和患病风险系数对距离事故点为 64 km、114 km 的河流下游两个饮用水源地居民饮用受污染自来水存在的健康风险进行评估, 同时选择钴-60、锶-90 两种核素以 30 年间河水平均流量偏小值为例进行对比评估。放射性核素在黄河河流的稀释作用下, 由饮用受钴-60、铯-137、锶-90 污染的水随放射源活度、河水流量及泥沙含量的变化存在不同程度的死亡风险与患病风险。因此, 应当对受到放射性污染的水源及时采取适当措施, 预防放射性核素造成的风险。

**关键词:** 放射性污染; 饮用水源; 健康风险; 事故工况

文章编号: 1673-5897(2019)2-280-08 中图分类号: X171.5 文献标识码: A

## Modelling the Dispersion of Radionuclide in River Water and Its Application

Li Xiaofei<sup>\*</sup>, Zhang Tangui, Zhang Xuedong, Wang Haishan, Gao Jianfu, Wang Fujun

The Center of Gansu Nuclear and Radiation Safety, Lanzhou 730020, China

Received 12 October 2018 accepted 17 December 2018

**Abstract:** The potential health risk caused by transporting of radioactive material is increasing with the fast development of nuclear energy and nuclear technology. In present paper, the contamination of cesium-137, cobalt-60 and strontium-90 to the Yellow River of Lanzhou region was considered and the dispersion of these radionuclides were modeled. Furthermore, the potential health risk brought out by the radionuclide dispersion to drinking water were discussed. Based on the existing domestic activity of the radionuclide sources and the data obtained from the international radioactive accidents, the activity levels and flow rates of cesium-137 was presented with consideration of the effect brought out by the sediment. The potential health risk of cesium-137 at two different drinking water sources, which were 64 km and 114 km from the accident position in the river downstream, were calculated, respectively. The mortality risk and morbid risk coefficients of cesium-137 were obtained and used to evaluate its health risk induced by ingestion of tap water. At the same time, the potential health rick of cobalt-60 and strontium-

基金项目: 甘肃省科技计划资助(17YF1FA115)

作者简介: 李小飞(1982—), 男, 高级工程师, 研究方向为辐射防护与环境保护, E-mail: 491746690@qq.com

90 were also assessed by using the minimum average flow rate of the Yellow River during the nearest past 30 years. All the results showed that the dispersion of cesium-137, cobalt-60 and strontium-90 in the Yellow River varied with the radioactivity of the nuclides, the flow rate of the river and suspended sediment in the river, and ingestion of tap water contaminated by these radionuclides will cause mortality and morbid risk. Hence, it is very important to react promptly to the river drinking water contamination caused by radionuclides so as to reduce their health risk to human beings.

**Keywords:** radioactive contamination; drinking water; health risk; accident

目前,全国各省、自治区、直辖市放射性废物及核电站乏燃料经 G30 连霍高速公路最终运抵嘉峪关中核 404 有限公司甘肃矿区,运输过程存在核与辐射事故安全风险。根据文献[1],1955—1985 年间我国放射性物质运输货包事故率为  $1.18 \times 10^{-5}$  起/件,1988—1998 年间我国放射性物质运输货包事故率为  $1.18 \times 10^{-5}$  起/件,放射性物品公路运输存在放射性物质释放事故的可能性<sup>[2]</sup>,特别是事故地点发生在水源地上游,对人体健康存在辐射环境风险,目前国内很少有文献涉及饮用水中放射性核素对人体健康的风险评价。

G30 连霍高速公路途经兰州东岗黄河公路大桥,在大桥河流下游 64 km、114 km 处分别为白银市动力公司饮用水源地(备用)取水口和靖远吴家湾饮用水源地取水口。公路运输放射性物品活度从豁免水平到乏燃料(PBq)量级,运输车途经东岗黄河公路大桥发生放射性物质泄露事故并造成放射性物质在水中弥散,对白银市居民饮用水及靖远县居民饮用水存在辐射安全隐患,将直接危及到居民饮用水安全及人群健康,铯-137 在核能及核技术利用中广泛存在,活度范围大,应用领域广,具有典型性和代表性,因此河流型饮用水源放射性污染健康风险评估选择铯-137 为主要特征核素,在国内首次以含铯-137 货包途经东岗黄河公路大桥时事故工况放射性物质释放造成黄河水放射性污染为例,考虑黄河泥沙的影响,主要讨论铯-137 在水中的弥散行为及饮用受污染的饮用水存在的健康风险,并以钴-60、锶-90 两种放射性核素进行对比计算,为开展放射性污染防治工作提供基础。

## 1 材料与方法 (Materials and methods)

### 1.1 放射性核素在水中的弥散模型

根据文献[3-4],放射性核素在河流中的弥散是一个复杂的动力学过程,包含地球化学过程、沉积物及悬浮物和核素的相互作用过程以及生物吸附等过程,针对河流的不同水体类型、不同时间空间维度以

及不同放射性核素和物质的相互作用过程,先后发展了 AQUASCOPE、MOIRA-MARTE、RIVTOX、CASTEAUR、RIPARIA、AQUASTAR 等放射性核素在河流中弥散的模型,这些模型有的已经应用在切尔诺贝利核事故、福岛核事故放射性物质释放等核与辐射应急工作后果评价中,大多数预测模型都需要进行复杂的计算机模拟。国内目前还很少见到有关放射性核素在河流中弥散行为模型的相关研究文献。

为在说明放射性核素弥散行为的基础上简化计算过程,本文选用文献[4]中放射性核素水质弥散模型进行预测,忽略核素和水、沉积物之间的吸附/解吸相互作用。本文中用到的河流横断面模型示意图<sup>[5]</sup>见图 1。

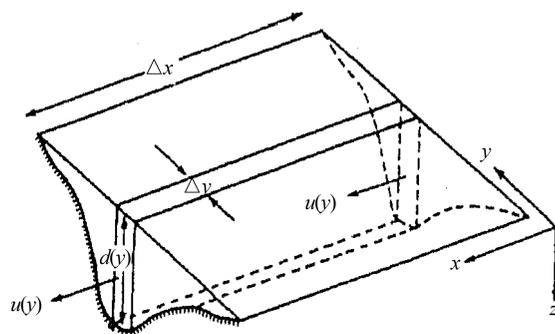


图 1 河流横断面模型

Fig. 1 River cross section model

图 1 表示在某一坐标系中的稳定天然河流的一个断面,坐标系的  $x$  轴是水流方向(指向下游为正),  $y$  轴是横切水流的方向,而  $z$  轴是竖直方向(从水面向下为正)。假定河流方向( $x$  方向)的速度  $u$  只是  $y$  的函数。河流断面可能是不规则的,并仅仅是  $y$  的函数(即断面不随  $x$  变化)。假设在  $z$  方向上完全混合,不考虑沉积作用,放射性核素的输运简化为二维问题。

与时间有关的二维( $x, y$ )弥散方程<sup>[4]</sup>为:

$$\frac{\partial c}{\partial t} + u \frac{\partial c}{\partial x} = \varepsilon_x \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} + \varepsilon_y \frac{\partial^2 c}{\partial y^2} - \lambda c \quad (1)$$

方程(1)中参数具体含义如下:  $x$  为沿河流的坐标(m);  $y$  为横切河流的坐标(m);  $t$  为时间(s);  $u$  为河水纵向流速( $m \cdot s^{-1}$ );  $c$  为放射性核素活度浓度( $Bq \cdot m^{-3}$ );  $\varepsilon_x$  为纵向扩散系数( $m^2 \cdot s^{-1}$ );  $\varepsilon_y$  为横向扩散系数( $m^2 \cdot s^{-1}$ );  $\lambda$  为放射性核素衰变常数( $s^{-1}$ ).

对于  $x=0, y=y_s$  处的点源随时间瞬态释放情形, 假定放射性物质释放量为  $M(Bq)$ , 河流宽度为  $B$ , 方程(1)的解为:

$$c = \frac{M}{\sqrt{4\pi\varepsilon_x\varepsilon_y}td} \exp\left[-\frac{(x-ut)^2}{4\varepsilon_x t} - \lambda t\right] \times \left[\exp\left(-\frac{(y-y_s)^2}{4\varepsilon_y t}\right) + \exp\left(-\frac{(y+y_s)^2}{4\varepsilon_y t}\right)\right] \quad (2)$$

上式中:  $M$  为放射性物质释放量( $Bq$ );  $d$  为河水深度(m).

## 1.2 饮用水源地概况

### 1.2.1 白银市动力公司饮用水源地(备用)

白银市动力公司水源地(备用)取水口位于白银市白银区水川镇张庄村, 1999 年建成, 属黄河干流河型水源, 设计取水量 3 600 万吨/年, 目前是白银市城区居民饮用备用水源。白银市动力公司水源地(备用)距东岗黄河公路大桥距离约为 64 km。

### 1.2.2 靖远县吴家湾饮用水源地

靖远县吴家湾饮用水源地位于靖远县乌兰镇红嘴村吴家湾社, 水源地为在用河型水源, 上游是靖远县北湾镇, 下游是靖远县城区(距离县城约 5 km)。目前总供水能力达到  $3.2 \text{ 万 } m^3 \cdot d^{-1}$ , 受益人口约 12 万人。靖远县城区吴家湾饮用水源地距东岗黄河公路大桥距离约为 114 km。

## 1.3 放射性污染情景

1987 年 9 月, 巴西中部戈亚斯(Goias)州首府哥亚尼亚(Goiania)市一家废弃的医院曾遗失一个旧辐射源<sup>[6]</sup>。该辐射源包含 50 TBq 以氯化铯的形式存在的铯-137。随后, 这一辐射源被数人接触, 产生了严重的放射性污染, 并造成多人死亡。索耶(Sohier)和哈德曼(Hardeman)、蒂森(Thiessen)等学者都曾以此作为蓄意排放情景的源项<sup>[6]</sup>。本次研究以此次事故为背景, 设定 500 TBq、50 TBq、0.5 TBq 三种情形, 并设想放射性物品公路运输经过东岗黄河大桥中心时发生放射性物质泄露进入黄河, 并全部释放溶解, 评价放射性物质污染对黄河下游白银市动力

公司水源地(备用)及靖远县吴家湾饮用水源地受放射性污染情况及存在的辐射环境健康风险。同时以钴-60、铯-90 两种放射性核素进行对比计算。

## 1.4 黄河水文参数的确定

考虑到预测结果在一年内的普遍适用性和参考价值, 本文中黄河水文参数采用国际原子能机构 19 号安全报告<sup>[7]</sup>给出的估算方法对相关水文参数进行估算。

本次计算取黄河兰州段 30 年间河水平均流量数据, 按照河宽( $B$ )、水深( $d$ )和流速( $u$ )是河水平均流量的函数进行估算, 具体估算公式如下:

$$d = 0.163 q_r^{0.447} \quad (3)$$

$$B = 10 q_r^{0.460} \quad (4)$$

$$u = \frac{q_r}{dB} \quad (5)$$

式(3)、(4)、(5)中  $q_r$  为 30 年河水平均流量( $m^3 \cdot s^{-1}$ ), 其余参数含义同前。

## 1.5 扩散系数 $\varepsilon_x$ 和 $\varepsilon_y$

国际原子能机构(International Atomic Energy Agency, IAEA)在 19 号安全报告中给出了河水或狭长水域中的核素扩散系数<sup>[7]</sup>, 分别用以下公式计算:

$$\varepsilon_x = \frac{u^2 d^2}{30 du_*} \quad (6)$$

$$\varepsilon_y = \alpha du_* \quad (7)$$

$$u_* = 0.1 u \quad (8)$$

式(7)中,  $u_*$  为水域底部的剪切流速,  $m \cdot s^{-1}$ ;  $\alpha$  是一个经验系数, 根据文献[8]建议, 在顺直的天然河道  $\alpha$  取 0.1 ~ 0.2, 对于弯曲和各种不规则的天然河道, 如果河道弯曲较缓, 河槽不规则属中等程度的  $\alpha$  取 0.3 ~ 0.9, 当天然河道收缩时取较小值, 扩展时取最大值, 均匀时取 0.6。本文中  $\alpha$  取 0.6。

## 1.6 黄河泥沙的影响

黄河是一条多沙河流, 黄河兰州段位于黄河上游, 泥沙多为粗泥沙, 年均含沙量较黄河中游和下游少<sup>[9]</sup>。为计算河水中放射性核素活度浓度, 采用 IAEA 在 19 号安全报告给出的地表水中溶解的放射性核素活度浓度计算公式<sup>[7]</sup>进行计算。

$$C_{w,s} = \frac{c}{1 + 0.01 K_d S_s} \quad (9)$$

式(9)中  $S_s$  为含沙量( $kg \cdot m^{-3}$  或  $g \cdot L^{-1}$ );  $K_d$  为分配系数( $L \cdot kg^{-1}$ )。

## 1.7 计算方法

考虑到天气状况及实际公路运输情景, 放射性

物品公路运输尽量避开在冬季雨雪天气等不良天气状况运输,一般选择在春、夏及秋季运输,因此本次计算时选取3月份、6月份、7月份、8月份、9月份为典型月份,平均流量 $q_r$ 分别取 $422 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ 、 $1\,268 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ 、 $1\,881 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ 、 $1\,846 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ 、 $2\,076 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ 。本文对钴-60衰变常数取 $4.17 \times 10^{-9} \text{ s}^{-1}$ 、铯-137衰变常数取 $7.33 \times 10^{-10} \text{ s}^{-1}$ 、锶-90衰变常数取 $7.55 \times 10^{-10} \text{ s}^{-1}$ ;对钴-60分配系数取 $5 \times 10^3 \text{ L} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、铯-137分配系数取 $1 \times 10^3 \text{ L} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、锶-90分配系数取 $1 \times 10^3 \text{ L} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。取黄河兰州段3月份、6月份、7月份、8月份、9月份月均含沙量 $0.418 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 、 $2.61 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 、 $5.21 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 、 $8.68 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 、 $3.30 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 进行计算<sup>[9]</sup>。

本文依据放射性物质在河流中的弥散方程(1)的解即方程(2)及受黄河泥沙影响的放射性核素活度浓度计算公式(9),主要针对铯-137不同活度、不同流量情形进行计算,并以3月份流量情形为例,对钴-60、锶-90两种放射性核素进行对比计算。计算通过 Mathematica 软件进行计算。

## 2 结果 (Results)

### 2.1 取水口放射性活度浓度随时间变化情况

本论文采用基于放射性活度浓度随时间和空间变化的函数(2)及公式(9),结合黄河水文参数对白银市动力公司饮用水源地(备用)取水口、靖远县城区吴家湾饮用水源地取水口放射性活度浓度进行计算,50 TBq的铯-137释放(以3月份为例)计算结果分别见图2和图3。结果表明,白银市动力公司水源地(备用)取水口放射性核素铯-137在约0.19 d时到达取水口,约0.24 d时放射性活度浓度达到 $10 \text{ Bq} \cdot \text{L}^{-1}$ ,之后迅速上升,在约0.62 d时达到峰值,约为 $853 \text{ Bq} \cdot \text{L}^{-1}$ ,在约1.6 d时下降到 $10 \text{ Bq} \cdot \text{L}^{-1}$ 后随着河流的稀释作用放射性活度浓度迅速衰减,在约2.2 d后下降到当地饮用水本底水平;靖远县吴家湾饮用水源地取水口放射性核素铯-137在约0.48 d时到达取水口,在约0.59 d时放射性活度浓度达到 $10 \text{ Bq} \cdot \text{L}^{-1}$ ,之后迅速上升,在约1.17 d时达到峰值,约为 $529.7 \text{ Bq} \cdot \text{L}^{-1}$ ,在约1.76 d时下降到 $10 \text{ Bq} \cdot \text{L}^{-1}$ 后随着河流的稀释作用迅速衰减,在约2.43 d后下降到当地饮用水本底水平。

以放射性物品公路运输在途径兰州东岗黄河公路大桥时50 TBq铯-137释放为例,放射性活度浓度在白银市动力公司饮用水源地(备用)取水口、靖远县城区吴家湾饮用水源地取水口随不同流量、不同泥沙含量的计算结果分别见表1和表2。结果表

明取水口放射性活度峰值浓度出现时间受流量影响较大,受泥沙含量影响较小,放射性污染时长受流量和泥沙含量的综合影响。

以30年河水平均流量偏小值为例,选择铯-137核素,白银市动力公司饮用水源地(备用)取水口及靖远县城区吴家湾饮用水源地取水口不同放射性活度计算结果见表3、表4,结果表明取水口放射性活度峰值浓度出现时间不受释放放射性活度大小的影响,放射性污染时长与释放放射性活度大小紧密相关。

以30年河水平均流量偏小值为例,放射源活度取50 TBq,白银市动力公司饮用水源地取水口钴-60、铯-137、锶-90放射性活度浓度计算结果见表5。结果表明取水口放射性活度峰值出现时间不受核素类型的影响,放射性污染时长与放射性核素类型存在一定联系。

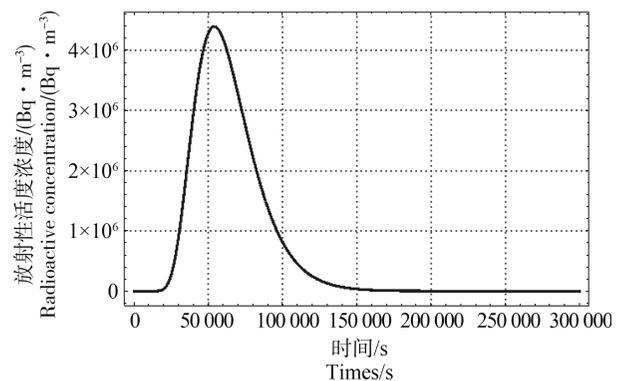


图2 白银市动力公司饮用水源地(备用)取水口放射性活度浓度随时间变化情况

Fig. 2 Variation of radioactive activity concentration of drinking water source (reserve) intake of Baiyin power company

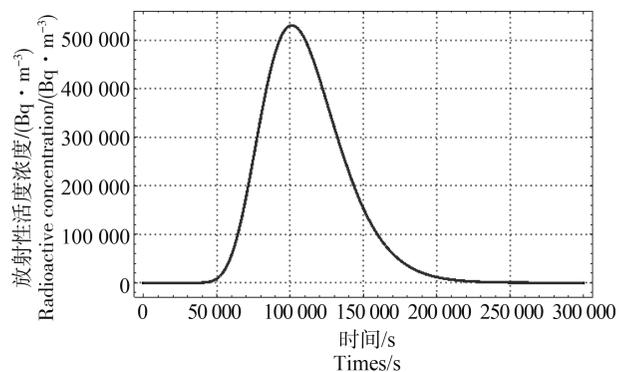


图3 靖远县吴家湾饮用水源地取水口放射性活度浓度随时间变化情况

Fig. 3 Variation of radioactive activity concentration at the intake of Wujiawan drinking water source in Jingyuan County

2.2 饮用水辐射环境健康风险评价

居民饮用受放射性污染的自来水,存在健康风险,本文利用美国环境保护署(EPA)在 FGR13<sup>[10]</sup> 报告中提供的放射性核素环境暴露风险系数来评价饮用水中放射性核素的致癌风险。放射性核素环境暴露风险系数分为死亡风险系数和患病风险系数。死亡风险系数是指对由于摄入放射性核素而死于癌症的人口平均数的估计;患病风险系数是对辐射致癌总数均值的相对估计,不论癌症是否致命。

表1 白银市动力公司饮用水源地(备用)取水口放射性活度浓度随流量及泥沙含量变化情况

Table 1 Variation of radioactive activity concentration of drinking water source (reserve) intake of Baiyin power company along with flow rate and suspended sediment concentration

月份 Month	流量 Flow rate $/(m^3 \cdot s^{-1})$	泥沙含量 Suspended sediment concentration $/(kg \cdot m^{-3})$	峰值浓度 Time of maximum concentration /d	放射性 Duration of radioactive pollution /d
3	422	0.418	0.62	1.92
6	1 268	2.61	0.52	1.77
7	1 881	5.21	0.48	1.53
8	1 846	8.68	0.48	1.43
9	2 076	3.30	0.47	1.71

表2 靖远吴家湾饮用水源地取水口放射性活度浓度随流量及泥沙含量变化情况

Table 2 Variation of radioactive activity concentration of drinking water source intake of Wujiawan drinking water source in Jingyuan County along with flow rate and suspended sediment concentration

月份 Month	流量 Flow rate $/(m^3 \cdot s^{-1})$	泥沙含量 Suspended sediment concentration $/(kg \cdot m^{-3})$	峰值浓度 Time of maximum concentration /d	放射性 Duration of radioactive pollution /d
3	422	0.418	1.17	2.43
6	1 268	2.61	1.01	2.16
7	1 881	5.21	0.96	1.85
8	1 846	8.68	0.95	1.74
9	2 076	3.30	0.47	2.07

为保守评估健康风险,本文假定居民饮用水中放射性物质核素浓度与未处理的黄河河水相同,不考虑水处理过程中对放射性核素的去除。假定每天饮用自来水量为 1.11 L<sup>[10]</sup>。通过饮用水摄入<sup>101</sup>钴-60 的死亡风险系数和患病风险系数分别为  $2.75 \times 10^{-10} Bq^{-1}$  和  $4.25 \times 10^{-10} Bq^{-1}$ , 铯-137 的死亡风险系数和患病风险系数分别为  $5.66 \times 10^{-10} Bq^{-1}$  和  $8.22 \times 10^{-10} Bq^{-1}$ , 铯-90 的死亡风险系数和患病风险系数分别为  $1.34 \times 10^{-10} Bq^{-1}$  和  $1.51 \times 10^{-10} Bq^{-1}$ ; 通过饮用水摄入<sup>71</sup>钴-60、铯-137、铯-90 的剂量转换系数分别为  $3.4 \times 10^{-6} mSv \cdot Bq^{-1}$ 、 $1.3 \times 10^{-5} mSv \cdot Bq^{-1}$ 、 $2.8 \times 10^{-5} mSv \cdot Bq^{-1}$ 。

表3 白银市动力公司饮用水源地(备用)取水口放射性活度浓度随释放活度变化情况

Table 3 Variation of radioactive activity concentration of drinking water source (reserve) intake of Baiyin power company along with radioactivity

月份 Month	核素 Radionuclide	活度/TBq Radioactivity /TBq	峰值浓度 Time of maximum concentration /d	放射性 Duration of radioactive pollution /d
3	铯-137 Cesium-137	500	0.62	2.36
3	铯-137 Cesium-137	50	0.62	1.92
3	铯-137 Cesium-137	0.5	0.62	1.09

表4 靖远吴家湾饮用水源地取水口放射性活度浓度随释放活度变化情况

Table 4 Variation of radioactive activity concentration of drinking water source intake of Wujiawan drinking water source in Jingyuan County along with radioactivity

月份 Month	核素 Radionuclide	活度/TBq Radioactivity /TBq	峰值浓度 Time of maximum concentration /d	放射性 Duration of radioactive pollution /d
3	铯-137 Cesium-137	500	1.17	2.88
3	铯-137 Cesium-137	50	1.17	2.43
3	铯-137 Cesium-137	0.5	1.17	1.32

以 50TBq 铯-137 释放为例,白银市动力公司饮用水源地居民典型月份放射性健康风险评价见表 6,由此摄入的铯-137 总活度为 9.04 ~ 516 Bq,死亡风险为  $5.1 \times 10^{-9}$  ~  $2.9 \times 10^{-7}$ ,患病风险为  $7.4 \times 10^{-9}$  ~  $4.2 \times 10^{-7}$ ,通过饮用水摄入致有效剂量为 0.0001 ~ 0.006 mSv;靖远吴家湾饮用水源地居民典型月份放射性健康风险评价见表 7,由此摄入的铯-137 总活度为 7.07 ~ 439 Bq,死亡风险为  $4.0 \times 10^{-9}$  ~  $2.48 \times 10^{-7}$ ,患病风险为  $5.81 \times 10^{-9}$  ~  $3.61 \times 10^{-7}$ ,通过饮用水摄入致有效剂量为 0.0001 ~ 0.0057 mSv。

表 5 白银市动力公司饮用水源地(备用)取水口放射性活度浓度随释放核素变化情况

Table 5 Variation of radioactive activity concentration of drinking water source (reserve) intake of Baiyin power company along with radionuclides

月份 Month	核素 Radionuclide	活度/TBq Radioactivity /TBq	峰值浓度 时间/d Time of maximum concentration /d	放射性 污染时长/d Duration of radioactive pollution /d
3	钴-60 Cobalt-60	50	0.62	1.71
3	铯-137 Cesium-137	50	0.62	1.92
3	锶-90 Strontium-90	50	0.62	1.92

表 6 白银市动力公司饮用水源地(备用)居民健康风险评价  
Table 6 The human health risk assessment of drinking water source (reserve) intake of Baiyin power company

月份 Month	食入总 活度/Bq Total activity for ingestion /Bq	死亡风险 Mortality risk	患病风险 Morbid risk	食入致有 效剂量/mSv Committed effective dose for ingestion /mSv
3	516	$2.9 \times 10^{-7}$	$4.2 \times 10^{-7}$	0.006
6	40.14	$2.2 \times 10^{-8}$	$3.3 \times 10^{-8}$	0.0005
7	12.23	$6.9 \times 10^{-9}$	$1.0 \times 10^{-8}$	0.0001
8	9.04	$5.1 \times 10^{-9}$	$7.4 \times 10^{-9}$	0.0001
9	21.49	$1.2 \times 10^{-8}$	$1.8 \times 10^{-8}$	0.00027

表 7 靖远吴家湾饮用水源地居民健康风险评价  
Table 7 The human health risk assessment of drinking water source intake of Wujiawan drinking water source in Jingyuan County

月份 Month	食入总 活度/Bq Total activity for ingestion /Bq	死亡风险 Mortality risk	患病风险 Morbid risk	食入致有 效剂量/mSv Committed effective dose for ingestion /mSv
3	439	$2.48 \times 10^{-7}$	$3.61 \times 10^{-7}$	0.0057
6	32.17	$1.82 \times 10^{-8}$	$2.64 \times 10^{-8}$	0.0004
7	9.59	$5.43 \times 10^{-9}$	$7.88 \times 10^{-9}$	0.0001
8	7.07	$4.0 \times 10^{-9}$	$5.81 \times 10^{-9}$	0.00009
9	16.84	$9.53 \times 10^{-9}$	$1.38 \times 10^{-8}$	0.00021

以 30 年河水平均流量偏小值为例,对 500 TBq、50 TBq、0.5 TBq 铯-137 三种释放情形,白银市动力公司饮用水源地(备用)居民由此摄入的铯-137 总活度为 5.05 ~ 5 168 Bq,死亡风险为  $2.9 \times 10^{-9}$  ~  $2.9 \times 10^{-6}$ ,患病风险为  $4.2 \times 10^{-9}$  ~  $4.2 \times 10^{-6}$ ,通过饮用水摄入致有效剂量为 0.00006 mSv ~ 0.067 mSv。

以 30 年河水平均流量偏小值为例,放射性活度取 50 TBq,白银市动力公司饮用水源地居民摄入钴-60、铯-137、锶-90 放射性活度分别为 122 Bq、516 Bq、516 Bq,死亡风险分别为  $3.4 \times 10^{-8}$ 、 $2.9 \times 10^{-7}$ 、 $6.9 \times 10^{-7}$ ,患病风险分别为  $5.2 \times 10^{-8}$ 、 $4.2 \times 10^{-7}$ 、 $7.8 \times 10^{-7}$ ,通过饮用水摄入致有效剂量分别为 0.004 mSv、0.006 mSv、0.0144 mSv。

### 3 讨论 (Discussion)

#### 3.1 食品通用行动水平及相关标准的适用

放射性物质释放事故发生后,食品通用行动水平建议参考《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》<sup>[11]</sup>(GB18871)附录 E 中饮用水通用行动水平启动相应的应急预案(铯-137 通用行动水平为 1 000 Bq·kg<sup>-1</sup>),这一水平的适用仅限于放射性物质泄露事故辐射应急的第一年内,根据此水平,500 TBq 的铯-137 释放致白银市动力公司饮用水源地放射性活度浓度超标时间约为 0.93 d,靖远县吴家湾饮用水源地放射性活度浓度超标时间约为 1.1 d,其他情形未触发食品通用行动水平。

水源地饮用水水质放射性活度浓度标准建议采用世界卫生组织(WHO)《饮用水水质准则第四

版》<sup>[12]</sup>推荐的根据一年内摄入饮用水致 0.1 mSv 的待积有效剂量导出的指导水平进行应急处置。世界卫生组织建议钴-60 指导水平为  $100 \text{ Bq}\cdot\text{L}^{-1}$ 、铯-137 指导水平为  $10 \text{ Bq}\cdot\text{L}^{-1}$ 、锶-90 指导水平为  $10 \text{ Bq}\cdot\text{L}^{-1}$ 。

公众成员放射性核素年摄入量限值建议采用《公众成员的放射性核素年摄入量限值》<sup>[13]</sup>(WS/T 613—2018)中的限值,对铯-137 为  $7.7\times 10^4 \text{ Bq}$ 。本次假定 500 TBq 铯-137 释放事故中白银市动力公司饮用水源地居民摄入的铯-137 总活度约为 5 168 Bq,靖远县吴家湾饮用水源地居民摄入的铯-137 总活度约为 4 395 Bq,均低于相应的标准限值。本文中设定计算情景居民摄入核素致辐射剂量均小于 1 mSv 的年剂量限值<sup>[11]</sup>要求。

### 3.2 河流放射性核素水体弥散模型的适用

计算过程中仅考虑与悬浮颗粒物的相互作用,忽略了放射性物质与底层沉积物的相互作用,结果偏保守。放射性物质在水中扩散时可能被底泥所吸附而沉积到河底,而且一段时间后可能由于水流作用而再次悬浮。本文模型中忽略了底层沉积物的作用,一方面为简化计算,另一方面也为直接用水(如饮水)而产生的剂量估算带来保守性。

本次计算中采用的水文参数基于 30 年间不同月份河水平均流量进行计算,评价结果偏保守,在实际事故后果评价时可根据当时具体的水文条件进行估算。

本文的计算结果与美国核管制委员会<sup>[14]</sup>的 NUREG/CR-7231 报告中河流系统放射性核素衰减趋势及切尔诺贝利 1996 年由于洪水造成的放射性核素<sup>[14]</sup>冲入普里皮亚季河放射性活度浓度衰减趋势具有较好的一致性,本文的模型和计算方法可以应用于放射性物品公路运输放射性物质释放健康风险评价的初步估算。

根据河流放射性核素水体弥散模型,取水口放射性核素浓度与流量、泥沙含量、衰变常数、分配系数、离事故点距离、释放源活度等因素有关,放射性污染健康风险与核素的风险系数、摄入的放射性活度有关;考虑悬浮泥沙与放射性核素的相互作用时,与仅考虑水力作用相比,取水口放射性活度浓度及放射性健康影响变小,放射性污染物持续时间变短。

### 3.3 不确定度的讨论

根据文献[15],分配系数与悬浮颗粒物浓度、河流水的理化特性、季节及降水影响有关,国内现在还没有黄河泥沙体系中核素的分配系数相关数据,计

算过程中核素的分配系数源于 IAEA 的 19 号安全报告,与黄河的实际情况存在偏差,是本次计算过程中不确定度的主要来源。另外,河流的几何形状近似等对计算结果也有一定影响。

**致谢:**感谢环境保护部核与辐射安全中心岳会国教授在本文写作过程中给予的指导,感谢苏州热工研究院上官志洪教授及黄彦君博士在论文修改中给予的帮助。

### 参考文献 (References):

- [1] 李国强,曹芳芳,张建岗,等.放射性物质公路运输事故率初探[J].辐射防护通讯,2015(6):40-43  
Li G Q, Cao F F, Zhang J G, et al. A preliminary study on road transportation accident rate for radionuclide materials [J]. Radiation Protection Bulletin, 2015(6): 40-43 (in Chinese)
- [2] 谢朝阳,罗景润,郭历伦.放射性材料运输事故泄露概率分析[J].安全与环境学报,2011,11(4):242-244  
Xie C Y, Luo J R, Guo L L. Probabilistic analysis of radioactive materials release arising from transportation accident [J]. Journal of Safety and Environment, 2011, 11(4): 242-244 (in Chinese)
- [3] Monte L, Boyer P, Brittain J E, et al. Review and assessment of models for predicting the migration of radionuclides through rivers [J]. Journal of Environmental Radioactivity, 2005, 79(3): 273-296
- [4] Onishi Y, Serne R J, Arnold E M, et al. Critical review: Radionuclide transport, sediment transport, and water quality mathematical modeling; and radionuclide adsorption/desorption mechanisms [R]. Washington DC: US Nuclear Regulatory Commission, 1981
- [5] US Nuclear Regulatory Commission. Estimating aquatic dispersion of effluents from accidental and routine reactor releases for the purpose of implementing appendix I [R]. Washington DC: US Nuclear Regulatory Commission, 1976
- [6] Jeong H J, Hwang W T, Kim E H, et al. Radiological risk assessment for an urban area: Focusing on a drinking water contamination [J]. Annals of Nuclear Energy, 2009, 36(9): 1313-1318
- [7] International Atomic Energy Agency (IAEA). Generic Models for Use in Assessing the Impact of Discharges of Radioactive Substances to the Environment [R]. Vienna: IAEA, 2001
- [8] 雒文生,宋星原.水环境分析及预测[M].武汉:武汉大学出版社,2000:29-30  
Luo W S, Song X Y. Analysis and Prediction of Water

- Environment [M]. Wuhan: Wuhan University Press, 2000: 29-30 (in Chinese)
- [9] 马瑞俊. 兰州地区的水文[J]. 西北师范大学学报: 自然科学版, 1984(1): 40-60
- Ma R J. Hydrology in Lanzhou area [J]. Journal of Northwest Normal University: Natural Science, 1984(1): 40-60 (in Chinese)
- [10] Eckerman K F, Leggett R W, Nelson C B, et al. Cancer risk coefficients for environmental exposure to radionuclides. An uncertainty analysis for risk coefficients reported in Federal Guidance Report No. 13 [R]. Washington DC: US Environmental Protection Agency, 1999
- [11] 中华人民共和国质量监督检验检疫总局. GB18871—2002 电离辐射防护与辐射源安全基本标准[S]. 北京: 中华人民共和国质量监督检验检疫总局, 2002
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. GB1887-2002 Basic Standards for Protection against Ionizing Radiation and for the Safety of Radiation Sources [S]. Beijing: General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, 2002 (in Chinese)
- [12] World Health Organization (WHO). Guidelines for drinking-water quality [R]. Geneva: WHO, 2017
- [13] 中华人民共和国国家卫生健康委员会. WS/T 613—2018 公众成员的放射性核素年摄入量限值[S]. 北京: 中华人民共和国国家卫生健康委员会, 2018
- National Health Commission of the People's Republic of China. WS/T 613-2018 Annual limits on intake of radionuclides for members of the public [S]. Beijing: National Health Commission of the People's Republic of China, 2018 (in Chinese)
- [14] Yabusaki S B, Napier B A, Perkins W A, et al. NUREG/CR-7231 Modeling of Radionuclide Transport in Freshwater Systems Associated with Nuclear Power Plants [R]. Washington DC: US Nuclear Regulatory Commission, 2017
- [15] Yoshimura K, Onda Y, Sakaguchi A, et al. An extensive study of the concentrations of particulate/dissolved radio-caesium derived from the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant accident in various river systems and their relationship with catchment inventory [J]. Journal of Environmental Radioactivity, 2015, 139(4): 370-378 ◆