

中国原子能科学研究院地区 地表水环境辐射容量

岳维宏 谢健伦

(中国原子能科学研究院安防环保处, 北京, 102413)

论述了环境辐射容量的含义及确定环境辐射容量的方法学。在收集有关中国原子能科学研究院地区气象、水文以及居民对环境的使用因子等基础资料, 开发有关计算机程序等的基础上, 计算了该地区地表水体的环境辐射容量(即容许的年排放量)。同时, 对转移参数进行了灵敏度分析。

关键词 环境辐射容量 地表水 灵敏度分析

中国原子能科学研究院位于北京市房山区紫草坞乡北坊村西北, 距北京市中心约 40 km, 其地理坐标为东经 116°23', 北纬 39°48', 是一个综合性的核科学研究中心, 主要从事核物理、放射化学、放射性同位素生产与研究、反应堆工程、加速器物理、核电子学与核探测技术、辐射防护与环境保护等方面的应用研究与基础研究。根据中国原子能科学研究院的发展规划, 计划在 2000 年前后建成 1 座可发电的快中子增殖实验堆(热功率为 65 MW), 1 座多功能先进研究堆(热功率为 60 MW)以替代 2000 年前将退役的重水反应堆和游泳池式轻水反应堆, 同时将扩大放射性同位素生产规模。为了配合这些工作的立项和选址, 需要对本地区的环境辐射容量进行研究, 以便对制定长远发展规划、新建核设施的合理布局提供科学依据。本工作主要涉及地表水环境辐射容量的研究。

1 环境辐射容量的概念及其确定方法

综合环境容量的研究成果, 环境容量有 2 种不同的含义, 即环境安全容纳量和环境容许(可接受)容纳量。对于环境辐射容量, 仅存在后者。对某一特定环境确定其环境辐射容量一般有 2 种方法: 1) 按公众个人的剂量控制限值来推算, 常用的方法是关键途径法和全途径分析法; 2) 用辐射防护最优化方法来确定, 按群体效应计算最优环境辐射容量。从方法论上看, 应是后者优于前者。但是, 由于辐射危害的代价 $Y = \alpha S + \beta \sum NH$ (S 是集体剂量, α 是降低单位集体剂量的费用, N 是受到剂量为 H 的人数, β 是单位剂量的其它危害成本, 例如公众的恐惧或担心造成的经济损失) 表达式中 α 值范围宽, β 值主观随意性大, 因而 Y 值变化亦大, 影响了优化值的确定。因此, 本文采用全途径法确定本区地表水环境辐射容量。全途径法的基本

要点是选定某一区域进行环境调查,确定污染物对人的照射途径;由输运模式计算单位排放量在环境介质中的平均浓度(浓度因子);由食物链等转移模式和环境利用资料计算单位排放量对关键居民组所致的剂量(称剂量贡献因子);确定剂量控制值 H_0 。取全院核设施对公众年剂量管理目标值 0.25 mSv 作为剂量控制值,考虑到放射性液态流出物排放流经区域的公众将同时受到气态和液态放射性流出物的辐射影响,取 0.05 mSv 为液态放射性流出物的年剂量控制值。

2 水文地理概况

2.1 流域概况

流经本地区的河流大石河距中国原子能科学研究院西围墙 2 km ,属大清河水系,发源于房山区霞云岭乡堂上村,在琉璃河办事处的祖村出房山区境,出境后在河北省涿州市的柳村与北拒马河、小清河汇流,汇合后称白沟河(图1)。

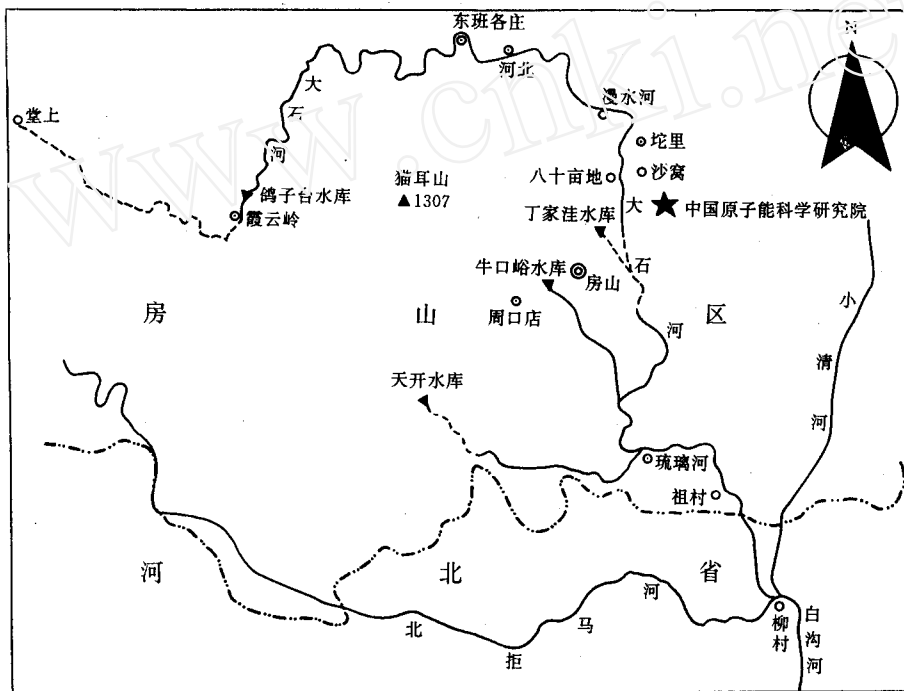


图1 大石河水系图(比例尺 1:30 万)

Fig.1 Map of Da Shihe river system

○——区政府驻地;◎——乡政府驻地; ○——村;····· 省界;····· 河流

大石河属于三级河流,总流域面积 1243.4 km^2 ,其中山区流域面积 856.3 km^2 。总长度 108 km ,属于季节性河流,全年河流有水期基本上集中在7、8、9三个月。表1列出了大石河历年平均的水文参数(漫水河水文站提供)。

表1 大石河历年平均的水文参数

Table 1 The average hydrological parameters of Da Shihe river

水文参数	月 份			平均值
	7	8	9	
流量/ $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	5.84	17.80	5.77	9.80
河深/m	0.31	0.60	0.31	0.43
河宽/m	17.00	23.60	16.80	17.63
流速/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	1.13	1.26	1.11	1.17
水力坡度/%				0.32

2.2 降雨特征

由于中国原子能科学研究所处的特定地理位置(平原与山区交界地带),气候特征表现为:立体气候明显,温差较大,水热同季,降水分配很不均匀,年降水有2个特点:1)山区属迎风坡地带,多年平均降水量山区明显高于平原区,山区降水量达700 mm,丰水年($p=25\%$)年降水量达950 mm,平水年($p=50\%$)年降水量为475 mm;2)年际和年内雨量变化大,最多与最少年降水量相差6—8倍,年内分配也极不均匀,全年降水量基本集中在汛期,即7、8、9三个月。

3 放射性废液源项

中国原子能科学研究院放射性废水主要来源于反应堆、热轴处理实验室、同位素生产、三废处理实验室、放化实验室等。全院每年约产生中放废水10 t,弱放废水400 t。

低放废水在1965年前均贮存在108工号废液贮罐中,1965年处理低放废水的106工号投入运行,处理后的净化废水经管道排入大石河渗井排放。1974年后停止渗井排放,而改为在汛期向大石河排放。净化废水中的主要核素为 ^3H (现有的废水处理工艺对 ^3H 无净化能力),其它核素有 ^{90}Sr 、 ^{137}Cs 、 ^{106}Ru 和 ^{60}Co 等。净化废水中主要核素的平均浓度列于表2。

表2 净化废水中核素的平均浓度

Table 2 The average concentration of the purified waste

核 素	^3H	^{90}Sr	^{137}Cs	^{106}Ru	^{60}Co
浓度 ¹⁾ / $\text{Bq} \cdot \text{m}^{-3}$	3.9×10^7	1.8×10^3	1.1×10^3	1.9×10^1	2.8×10^1
浓度份额 /%	99.99	4.6×10^{-3}	2.8×10^{-3}	4.9×10^{-5}	7.2×10^{-5}

注:1)此浓度值是根据本院化学所提供的各低放废水贮罐各核素的放射性浓度和各处理段的去污系数计算出的平均值

4 地表水环境辐射容量的计算方法

地表水环境辐射容量 Q_H (容许的年排放量, $\text{Bq} \cdot \text{a}^{-1}$)由下式计算

$$Q_H \leq H_c / f_d \quad (1)$$

式中: H_c 为年剂量控制值, $Sv \cdot a^{-1}$; f_d 为剂量贡献因子, $Sv \cdot Bq$, $f_d = f(f_c)$, f_d 为 f_c 的函数^[3], f_c 为浓度因子, $a \cdot m^{-3}$, 即年单位排放量在环境介质中的平均浓度。

假定河流流场为定常流场, 废水均匀排放且沿铅直向迅速混合均匀, 则在横向均匀混合前的浓度因子 f_c 为^[3]:

$$f_c = \frac{c(x, y)}{Q} = \frac{7.71 \times 10^{-7}}{F + F_0} \left[1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \exp\left(1 - \frac{n^2 \pi^2 x k_y}{u B^2}\right) \cos \frac{n \pi y_s}{B} \cos \frac{n \pi y}{B} \right] \cdot \exp\left(-\frac{\lambda x}{u}\right)$$

其中, $k_y = 0.6 u^* d$, $u^* = \sqrt{g I d}$

式中: $c(x, y)$, 为核素的平均浓度, $Bq \cdot m^{-3}$; x 为距排放点的纵向距离, m ; y 为距排放点的横向距离, m ; Q 为核素的排放率, $Bq \cdot a^{-1}$; F 为河水平均流量, $m^3 \cdot s^{-1}$; F_0 为废水排放流量, $m^3 \cdot s^{-1}$; u 为河水流速, $m \cdot s^{-1}$; B 为河宽, m ; y_s 为排放点距岸边的垂直距离, m ; λ 为核素衰变常数; s^{-1} ; k_y 为横向弥散系数, $m^2 \cdot s^{-1}$; u^* 为河流剪切流速, $m \cdot s^{-1}$; d 为河深, m ; g 为重力加速度, $m \cdot s^{-2}$; I 为水力坡度。

当离排放点距离 $\geq 40B$ 时, 则近似认为横向均匀混合, 此时的浓度分布为

$$f_c = \frac{c(x, y)}{Q} = \frac{7.71 \times 10^{-7}}{F + F_0} \exp\left(-\frac{\lambda x}{u}\right) \quad (4)$$

计算过程中假定每年汛期大石河有水期连续排放废水 15 d, 河水流量取这几个月的平均值 $9.8 m^3 \cdot s^{-1}$, 废水流量为 $15 m^3 \cdot h^{-1}$ 。

由于废水排放往往不是单个核素向单个环境要素排放, 而是多核素向多个环境要素排放, 因此本地区地表水环境辐射容量的确定同时应满足不等式(1)和下列不等式:

$$\sum_i A_i Q_i \leq H_c \quad (5)$$

式中: A_i 为 i 核素通过地表水途径对北坊村居民的剂量贡献因子, $Sv \cdot Bq^{-1}$; Q_i 为 i 核素的实际年排放量, $Bq \cdot a^{-1}$; H_c 为年剂量控制值, $Sv \cdot a^{-1}$ 。

5 计算程序 WASTER 的设计及计算结果

5.1 程序结构

本程序用于计算向非潮汐河流排放放射性废水后河水中核素的浓度分布和剂量分布。核素在河水中的迁移只考虑了平流输运和弥散机制。根据不同的排放特点, 在程序设计中考虑了正常排放、瞬时排放和不均匀短期持续排放 3 种方式。剂量计算考虑了游泳、划船、岸边沉积物外照射、饮水、食鱼、农产品食入、动物产品食入内照射 7 种途径。程序结构示于图 2。

本程序用 FORTRAN 语言编写, 可在一般 PC 机上运行。

5.2 地表水环境辐射容量

根据上述计算方法及假定条件, 用 WASTER 程序计算出本区地表水中污染物的浓度因子和剂量贡献因子(表 3), 剂量贡献因子的计算考虑的照射途径有水浸没照射、岸边沉积物外照射, 食入污水灌溉的作物和动物产品的内照射。

根据公式(1)和(5)计算的本地区地表水的环境辐射容量(容许的年排放)列于表 4。

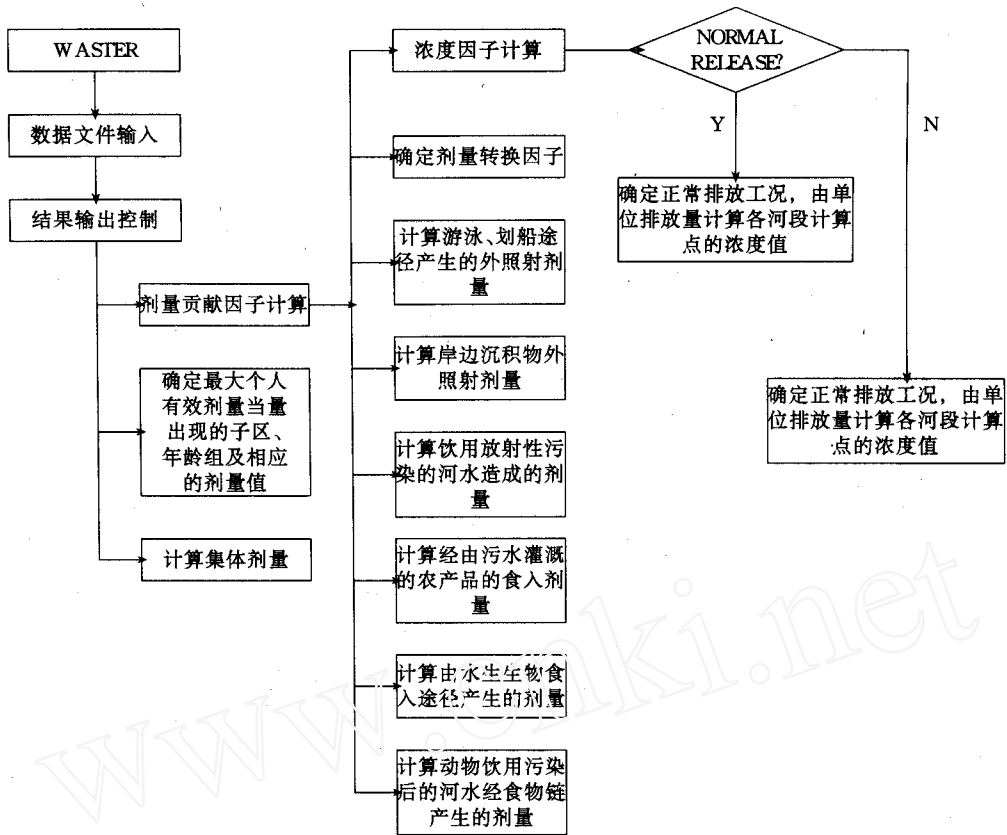


图2 WASTER 程序结构图

Fig.2 The structure diagram of WASTER program

表3 北坊村地表水中各核素的浓度因子和剂量贡献因子

Table 3 The concentration factors and the dose contribution factors of the nuclides at Beifang

核素	浓度因子/a·m ⁻³	剂量贡献因子/Sv·Bq ⁻¹
³ H	7.86 × 10 ⁻⁸	1.06 × 10 ⁻¹⁸
⁹⁰ Sr	7.86 × 10 ⁻⁸	4.12 × 10 ⁻¹⁶
¹³⁷ Cs	7.86 × 10 ⁻¹³	4.86 × 10 ⁻¹⁴
¹⁰⁶ Ru	7.86 × 10 ⁻⁸	1.44 × 10 ⁻¹⁴
⁶⁰ Co	7.86 × 10 ⁻⁸	1.78 × 10 ⁻¹³

表4 中国原子能科学研究院地区地表水体的环境辐射容量(Bq·a⁻¹)

Table 4 The environmental radiation capacities of the surface water within the area of China Institute of Atomic Energy (CIAE) (Bq·a⁻¹)

核素	³ H	⁹⁰ Sr	¹³⁷ Cs	¹⁰⁶ Ru	⁶⁰ Co
容许的年排放量	1.9 × 10 ¹³	8.9 × 10 ⁸	5.5 × 10 ⁸	9.4 × 10 ⁶	1.4 × 10 ⁷

6 转移参数的灵敏度分析

转移参数 Γ_{ij} 的灵敏度定义^[5]如下:

$$S(\Gamma_{ij}) = \left[\frac{\Gamma_{ij}}{D} \cdot \frac{\partial D}{\partial \Gamma_{ij}} \right]_{t=T} \quad (6)$$

式中: $S(\Gamma_{ij})$ 为时间 $t = T$ 时转移参数 Γ_{ij} 的灵敏度; Γ_{ij} 为隔室 i 到隔室 j 的转移速率, s^{-1} ; D 为剂量预报值。

上式定义的灵敏度的含义是指当从隔室 i 到隔室 j 的转移参数发生 1% 的变化时, 剂量预报值 D 发生变化的百分比。

对于稳态, 参数 Γ_{ij} 化为 F_{ij} , 则

$$S(F_{ij}) = \frac{F_{ij}}{D} \cdot \frac{\partial D}{\partial F_{ij}} \quad (7)$$

显然, 灵敏度大的参数对模式预报值的影响大, 应该优先和重点编评和测定这些参数。

污染物向地表水排放的隔室化概念示于图 3。图中: F_{01} 、 F_{02} 、 F_{03} 、 F_{34} 和 F_{35} 分别为隔室 0 到隔室 1、隔室 0 到隔室 2、隔室 0 到隔室 3、隔室 3 到隔室 4、隔室 3 到隔室 5 的转移系数; V 、 P 、 W 、 B 和 M 分别为居民对蔬菜、粮食、饮水、肉和奶的消费量; x_0 为地表水中核素的浓度, x_1 、 x_2 、 x_3 、 x_4 和 x_5 分别为转移到蔬菜、粮食、饮水、肉和奶中核素的浓度; F_c 为胃肠道吸收份额。

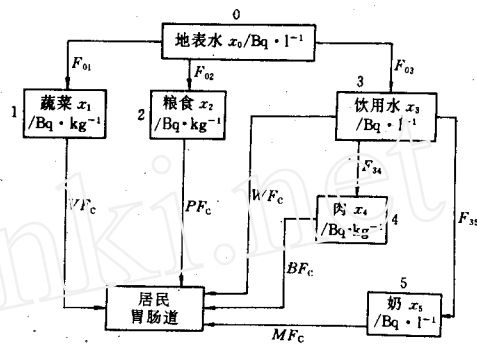


图 3 废液向地表水排放的隔室化概念图
Fig. 3 The compartment diagram of liquid waste discharge into the surface water

灵敏度计算中, 以幼儿的剂量预报值分析各转移参数的灵敏度。经程序 WASTER 计算, 预报剂量对水系中 3H 和 ^{90}Sr 的转移参数变化的灵敏度列于表 5。

表 5 预报剂量对转移参数变化的灵敏度
Table 5 The sensitivities of the transfer parameters by the doses

参 数	灵 敏 度					
	3H			^{90}Sr		
	幼儿	儿童	成人	幼儿	儿童	成人
F_{01}	0.11	0.09	0.10	≈0	≈0	≈0
F_{02}	0.20	0.15	0.19	0.001	0.0005	0.0008
F_{03}	0.56	0.41	0.35	0.012	0.0054	0.005
F_{34}	≈0	≈0	≈0	0.0001	0.00008	0.0002
F_{35}	≈0	≈0	≈0	≈0	≈0	≈0
V	0.11	0.09	0.10	≈0	≈0	≈0
p	0.20	0.15	0.19	0.001	0.0005	0.0008
W	0.56	0.41	0.35	0.012	0.0054	0.005
B	≈0	≈0	≈0	≈0	≈0	≈0
M	≈0	≈0	≈0	≈0	≈0	≈0

通过灵敏度分析可以看出,最灵敏的参数是转移到饮用水中的系数和饮水量,其次,对 ^3H ,通过地表水灌溉途径转移到粮食和蔬菜中的系数和其消费量也比较灵敏。因此,在本次工作中对上述几个灵敏参数进行了重点和详细的调查和编评,使计算结果更趋合理。

7 讨论

1) 环境辐射容量应是在单个环境要素的环境辐射容量的基础上统一归划出某一自然环境的总体环境辐射容量。因此,本工作只是本地区环境辐射容量研究的1个分支。

2) 给出年排放总量的上限值,决不意味着污染物的排放总量应该或者允许按该上限值排放,而是应遵守辐射防护三原则,使公众所受的照射应当保持在可以合理达到的尽可能低的水平。

3) 表4给出的计算结果是在平均浓度水平下给出的。从历年接收的低放废水的监测结果看, ^3H 的浓度范围为 $3.7 \times 10^7 - 7.4 \times 10^8 \text{ Bq} \cdot \text{m}^{-3}$,如果 ^3H 的排放浓度偏离均值过大,要根据式(5)对结果进行调整,但由于净化废水中主要核素为 ^3H ,其结果的变化不大。

参 考 文 献

- 1 Etlonhuber E, The Fish/Water Accumulation Factor as an Important Parameter for Determining the Environmental Capacity of Surface Water: IAEA-SM-199/15. Vienna: IAEA, 1975.
- 2 张永兴, 谢建伦. 环境辐射容量研究. 能源与环境, 1992, 37:1.
- 3 潘自强, 王志波, 陈竹舟. 中国核工业三十年辐射环境质量评价文集. 北京: 原子能出版社, 1989. 456.
- 4 ICRP publication 55. Optimization and Decision-Making in radiological protection. 1989. 10.
- 5 张永兴. 环境辐射影响评价方法学. 辐射防护, 1988, 8(4-5):294.

THE STUDY ON ENVIRONMENTAL RADIATION CAPACITIES OF THE SURFACE WATER WITHIN THE AREA OF CHINA INSTITUTE OF ATOMIC ENERGY (CIAE)

Yue Weihong Xie Jianlun

(China Institute of Atomic Energy, P. O. Box 275-24, Beijing, 102413)

ABSTRACT

The paper mainly presents the concept of the environmental radiation capacity and the methodology concerned. Further, by collecting the meteorological, hydrological materials and the using factors of the residents for the environment, and developing a computer program, the environmental radiation capacities(i. e. the allowed annual discharges) of the surface water within the area of CIAE are calculated. Meantime, the sensitivities of the transfer parameters are analysed.

Key words Environmental radiation capacity Surface water Sensitivity