

# $^{131}\text{I}$ 在淡水鱼中的浓集<sup>\*</sup>

罗达玲 翁森汉 余君岳 张增 杨健明  
(中山大学物理学系, 广州 510275) (香港城市大学)

**摘要** 研究放射性核素在淡水鱼中浓集的动态特性, 给出一个数学模式, 拟合所得实验结果, 确定出  $^{131}\text{I}$  在淡水鱼中浓集的特征参量, 浓集因子, 速率常数和浓集速率, 并研究  $^{131}\text{I}$  在鱼各部分的浓集程度, 以及影响放射性核素迁移特性的各种因素.

**关键词** 动态特性, 淡水鱼, 浓集因子

**分类号** R 145

核电站事故释放在于周围环境的放射性物质, 可能以直接或间接的途径进入环境水系, 放射性物质在其中进行再分配. 水生生态环境对评价核电站事故的污染范围及其后果起着重要的作用<sup>[1~4]</sup>.

事故早期, 放射性污染主要是由于短半衰期的放射性核素, 特别是  $^{131}\text{I}$ . 在欧美国家,  $^{131}\text{I}$  主要是通过牛奶及多叶蔬菜进入人体. 我国广东及香港地区, 鱼也是重要的食物. 因此, 除了研究核素在多叶蔬菜中的迁移特性<sup>[5~7]</sup>, 还有必要研究放射性核素在鱼中的浓集.

本工作以  $^{131}\text{I}$  为示踪剂, 研究其在淡水鱼中的浓集, 观测到  $^{131}\text{I}$  在鱼中浓集的时间动态特性, 提出一个定量描述浓集过程的数学模式, 拟合实验数据, 确定出浓集因子、速率常数、浓集速率等参量. 并研究了核素在鱼中不同部分的浓集程度以及影响核素在鱼中浓集的各种因素.

## 1 实验方法

在广东多种食用鱼中选用罗非鱼作为主要研究对象, 对其它淡水鱼, 如鲤鱼、白鲫鱼等, 也进行了试验. 每次实验挑选大小相近、活力强的鱼饲养于缸内. 缸直径为 80 cm, 高度为 80 cm. 将  $^{131}\text{I}$  溶液加入水中, 实验配制的水中  $^{131}\text{I}$  的初始浓度为  $1\mu\text{Ci/L}$ . 考虑到食用鱼的存活期, 本实验中鱼的最长饲养时间为 9 d. 平均水温  $\sim 25^\circ\text{C}$ .

由于  $^{131}\text{I}$  为  $\text{U}$  射线 (0.61 MeV) 和  $\text{V}$  射线 (0.3645 MeV) 的发射体, 用  $\text{NaI(Tl)}$   $\text{V}$  能谱测定  $^{131}\text{I}$  的特征峰面积确定  $\text{V}$  射线强度, 用  $\text{LB-1000}$  型低本底  $\text{TU}$  计数装置测定  $\text{U}$  活度.

本实验对不同时间采集的鱼样及相应的水样同时进行测量, 经扣除本底及干鲜比校正, 可计算出  $^{131}\text{I}$  放养不同时间的鱼 (或鱼的某一部分) 中的浓度与水中浓度之比. 鱼肉样品的干鲜比为 0.18~0.27.

\* 广东省自然科学基金和香港城市大学研究基金资助项目

收稿日期: 1995-07-07 罗达玲, 女, 58 岁, 教授

## 2 迁移机制及数学模型

污染的河流水库中放射性核素从水至鱼中的浓集,主要经历如下一些迁移过程:①分散在水中的放射性物质被鱼的表面吸附,并部分被吸收渗入鱼组织内;②鱼通过摄食将水中的放射性物质食入体内,经消化、吸收、沉积于体内组织;③鱼组织内的放射性物质通过物理衰变、生物学损失(如排泄、分泌等)以及溶解等化学过程而逐渐减少。

我们选取能反映主要迁移特性的最简单模式,用以拟合实验数据,确定出表征放射性核素迁移特性的最基本参量。

本实验采用单库室累积模式,如图 1 所示。鱼(或鱼的某部分)为所关心的库室,设鱼中的放射性核素量为  $q$ 。将鱼放养于含有放射性核素  $^{131}\text{I}$  的水介质中,由于水中  $^{131}\text{I}$  的物理衰变,单位时间内进入鱼中的放射性核素量为时间的函数

$$R(t) = R(0)e^{-\lambda t}$$

式中  $R(0)$  为  $t=0$  时单位时间进入鱼的放射性核素量,  $\lambda$  为  $^{131}\text{I}$  的衰变常数。

另一方面鱼中放射性核素由于物理衰变及生物学、化学等过程而减少,其有效速率常数  $k' = \lambda + k$ ,  $k$  称为速率常数。鱼中放射性核素量  $q$  随时间的变化,遵从一阶微分方程

$$dq/dt = R(0)e^{-\lambda t} - k'q \quad (1)$$

其解为

$$q(t) = [R(0)/(k' - \lambda)](e^{-\lambda t} - e^{-k't}) + q(0)e^{-k't} \quad (2)$$

当  $t=0$  时,  $q(0)=0$ , 并将  $k' = \lambda + k$  代入, (2) 式则可写为

$$q(t) = (R(0)/k)e^{-\lambda t}(1 - e^{-kt}) \quad (3)$$

设若核素浓集过程中鱼的质量  $m_s$  和水的质量  $m_w$  不变, 鱼中核素浓度  $C_s(t) = q(t)/m_s$ , 则

$$C_s(t) = (R(0)/k \cdot m_s)e^{-\lambda t}(1 - e^{-kt}) \quad (4)$$

水中的核素浓度

$$C_w(t) = C_w(0)e^{-\lambda t} \quad (5)$$

由 (4) 和 (5) 式, 核素在鱼和水中的浓度之比为

$$C_f(t) = C_s(t)/C_w(t) = [R(0)/k \cdot m_s \cdot C_w(0)](1 - e^{-kt}) \quad (6)$$

设  $CF = R(0)/[k \cdot m_s \cdot C_w(0)]$  (7)

则  $C_f(t) = CF(1 - e^{-kt})$  (8)

$CF$  称为浓集因子, 是定量描述水生生态系统中放射性核素迁移特性的最重要的参量。一般被定义为, 平衡状态下, 水生系统某组分中放射性核素的浓度与同一时间、空间点上水中测得的该核素的浓度之比, 其单位为  $\text{Bqkg}^{-1}/\text{BqL}^{-1}$ 。

定义浓集速率  $r(0) = R(0)/m_s$ , 它是指  $t=0$  时, 单位时间进入单位质量水生系统的放射性核素量, 单位为  $\text{Bqkg}^{-1}$ 。根据 (7) 式

$$r(0) = CF \cdot k \cdot C_w(0) \quad (9)$$

图 1 库室模式示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the compartment model

### 3 结 果

#### 3.1 浓集因子、速率常数及浓集速率

图 2 示出  $^{131}\text{I}$  在罗非鱼的鱼肉中和水中浓度之比随核素迁移时间的变化, 迁移时间是指鱼开始放养至采样的时间间隔. 用公式 (8) 拟合  $C_f(t)$  实验数据, 得到浓集因子  $CF$  值为  $3.08 (\text{Bqkg}^{-1} / \text{BqL}^{-1})$  和速率常数  $k$  值为  $0.00573 \text{ h}^{-1}$ . 图 2 中实验点为  $\text{V}$  能谱法的测量值, 虚线为模型计算结果.

图 2 罗非鱼的鱼肉 - 水的  $^{131}\text{I}$  浓度比  $C_f(t)$  随迁移时间 ( $t$ ) 变化

Fig. 2 The muscle to water concentration rates of  $^{131}\text{I}$   $C_f(t)$  varies with migration time ( $t$ ) for tilapias

图 3 淡水鱼的鱼肉 - 水的  $^{131}\text{I}$  浓度比随时间的变化

Fig. 3 The muscle to water concentration rates  $C_f(t)$  of  $^{131}\text{I}$  for freshwater fishes vary with migration time

$^{131}\text{I}$  的半衰期  $T_{1/2} = 8.04 \text{ d}$ , 其物理衰变常数  $\lambda = 0.00359 \text{ h}^{-1}$ , 因而有效速率常数  $k' = k + \lambda = 0.0093 \text{ h}^{-1} = 0.2332 \text{ d}^{-1}$ , 有效半衰期  $T_{\text{eff}} = 2.97 \text{ d}$ .

本实验采用总  $\text{U}$  计数法确定水样的  $\text{U}$  比活度, 对图 2 的实验结果, 水中  $^{131}\text{I}$  的初始浓度  $C_w(0) = 703.7 \text{ Bq/L}$ , 并用所得到的  $CF$  和  $k$  值, 由 (9) 式计算出浓集速率  $r(0)$  为  $12.42 \text{ Bqkg}^{-1} \text{ h}^{-1}$ .

本工作在不同气候条件、水中不同的  $^{131}\text{I}$  浓度进行过多次实验, 图 2 给出的为一组典型数据. 归纳多次  $^{131}\text{I}$  在罗非鱼的鱼肉中浓集实验结果, 得到的浓集因子  $CF$  值范围为  $(2.29 \sim 5.41) \text{ Bqkg}^{-1} / \text{BqL}^{-1}$ . 速率常数  $k$  值的范围为  $(0.0026 \sim 0.0083) \text{ h}^{-1}$ .

#### 3.2 鱼各部分的相对浓集程度

实验还测定了  $^{131}\text{I}$  在罗非鱼各部分 (头、鳃、肉、骨和内脏) 中的浓度和水中的浓度之比. 由不同饲养时间的鱼的测量结果, 观察到浓度比随  $^{131}\text{I}$  迁移时间增加而增加, 表 1 中列出  $^{131}\text{I}$  迁移时间为  $9 \text{ d}$  时, 各部分的浓度比,  $C_f(t=9 \text{ d})$ . 还列出了多次实验的各部分质量 ( $m_{si}$ ) 所占整条鱼质量 ( $m_s$ ) 百分比的平均值 ( $m_{si}/m_s$ ) (%). 并计算出各部分中浓集的放射性核素  $^{131}\text{I}$  量  $q_i$  为整条鱼中浓集的量  $q$  的平均百分比 ( $q_{si}/q$ ) (%).

#### 3.3 $^{131}\text{I}$ 在不同种类鱼中的浓集

本工作对多种淡水鱼进行了试验.  $^{131}\text{I}$  不同种类的鱼中具有不同的迁移特性. 如图 3

所示,鲤鱼的  $C_f(t)$  值比罗非鱼小很多,在本实验的迁移时间范围内  $C_f(t)$  值无明显的上升趋势,图 3 中的实验点为总 U 计数法的测量结果.

表 1 饲养了 9 天的罗非鱼各部分的  $^{131}\text{I}$  相对浓度及累积分布

Tab. 1 The relative concentrations and accumulation distribution of  $^{131}\text{I}$  in the tilapias that have been feed for 9 days

	$C_f$ ( $\text{Bq kg}^{-1} / \text{Bq L}^{-1}$ )	$(\overline{m_{si} / m_s})$ (%)	$(\overline{q_{si} / q_s})$ (%)
头	4.56	17.5	10.8
鳃	30.08	3.80	15.4
肉	3.39	53.0	26.1
骨	2.58	16.5	11.0
内脏	28.22	11.0	42.0

## 4 讨 论

(1) 本实验观测到  $^{131}\text{I}$  浓集于淡水鱼的时间动态特性及鱼各部分相对浓集分布,是核素所经历的各种迁移途径的综合作用. 在加入  $^{131}\text{I}$  的水中饲养了 9d 的鱼的内脏沉积的核素占 42%, 显然主要是鱼通过摄食途径的结果. 而鱼头和鱼鳃沉积的份量也不小,特别是鱼鳃,其质量仅占 3.8%, 而沉积的核素量却占 15.4%, 表明了表面吸附在  $^{131}\text{I}$  迁移中也起着重要的作用.

(2) 表征水生生态系中放射性核素迁移特性的最重要参量是浓集因子  $CF$  值,它与放射性核素,水生生物以及生态系统的特性均有关系. 本实验罗非鱼和鲤鱼(见图 3)的实验结果说明,对同一种放射性核素,在相同生态环境下,不同的生物体的  $CF$  值相差可能很大. 其原因不仅由于两种鱼的代谢活性和生理作用不同,而且还与生物的外部形态有关. 生物体的大小也会影响  $CF$  值. 本实验所用的罗非鱼重量小于 100 g, 一般约为 60~80 g. 而鲤鱼大约为 250 g, 虽然大的生物体摄入和表面吸附较多的放射性物质, 但就单位质量来说,小的生物体比大的生物累积速率大,即  $r(0)$  值大. 在核素从土壤至蔬菜的迁移特性研究中也观察到类似的现象<sup>[6]</sup>. 另一方面,由表(1)给出的结果可以看出,同一核素对同一生物体中不同部分的  $CF$  值可能相差甚远.

(3) 由公式(8)看出,水中放射性核素浓集于鱼中的动态过程达到平衡的快慢由速率常数  $k$  支配. 速率常数  $k$  主要包括鱼生物过程(如排泄、分泌等)的损失率和鱼中核素再溶解于水的速率.  $k$  值与鱼的代谢活力,核素溶解度等因素相关,在本实验条件下测得  $^{131}\text{I}$  对罗非鱼肉  $k$  值在一个量级内变化.

(4) 本实验为研究水中  $^{131}\text{I}$  浓度对  $CF$  值的影响,改变水中  $^{131}\text{I}$  浓度近 20 倍. 实验结果表明,罗非鱼的肉的  $CF$  值变化范围不大,当水中  $^{131}\text{I}$  的浓度在一定的范围内时,可认为  $R(0)$  正比于  $C_w(0)$ , 从公式(7)也可看出,  $CF$  值不随  $C_w(0)$  变化.

## 参 考 文 献

- chernoby, Edited by Warner F E and Harrison R M, Published by John Wiley & Sons Ltd, 1993, 177~ 208
- 2 Conghtrey P J, Jackson A, Betham C J Radionuclide distribution and transport in terrestrial and aquatic ecosystems after the Chernobyl disaster. Commission of the European Communities Luxembourg, 1990, EUR 13436
  - 3 Waber V, Von Gunter H R, Krahenbuhl V. The impact of the chernobyl accident on a river / ground water aquifer, Radiochim. Acta, 1987, 41, 191~ 198
  - 4 Fowler S W, Buat-Menard P, Yokoyama Y, et al. Rapid removal of chernobyl fallout from mediterranean surface waste by biological activity, Nature, 1987, 329, 56~ 58
  - 5 李冕丰, 罗达玲, 翁森汉, 等. ICP光谱法测量核素转移系数的研究. 中山大学学报(自然科学版), 1995, 34 111~ 113
  - 6 罗达玲, 李冕丰, 翁森汉, 等. 碘放射性核素在土壤-植物中的转移系数. 中山大学学报(自然科学版), 1995, 34(4): 109~ 113
  - 7 罗达玲, 李冕丰, 翁森汉, 等. I, Ba, Sr, Y 和 Zr 从土壤至蔬菜的转移系数. 辐射防护, 1996, 16(4): 312~ 315

## Concentrating of Radionuclide $^{131}\text{I}$ in Freshwater Fishes

*Luo Daling* \* *Wong Senhan* *Yu K N* *Cheung T* *Young E C M*

**Abstract** The dynamic characters of concentration of radionuclides in freshwater fishes are studied. The experimental results are fit by a mathematical model to get characteristic parameters, such as concentration factors, elimination rate constant and concentration rate. Meanwhile, the relative concentration degree of radionuclide  $^{131}\text{I}$  of different organisms in a fish is shown. The influence of various factors on migration characteristics of radionuclides in freshwater fishes are discussed. From the results of all the experiments for tilapias, the concentration factor  $CF$  lies in the range (2.29~ 5.41)  $\text{Bq}^\circ \text{kg}^{-1} / \text{Bq}^\circ \text{L}^{-1}$ , and the limination rate constant  $k$  lies in the range (0.0026~ 0.0083)  $\text{h}^{-1}$

**Keywords** dynamic character, freshwater fishes, concentration factor

\* Department of Physics, Zhongshan University, Guangzhou 510275