

# 小麦 - 土壤系统中 $^{95}\text{Zr}$ 的消长动态

赵希岳, 史建君, 王寿祥, 陈传群

(浙江大学原子核农业科学研究所, 农业部核农学重点开放实验室, 浙江 杭州 310029)

**摘要:** 采用模拟污染物的同位素示踪技术研究了  $^{95}\text{Zr}$  在小麦 - 土壤系统中的迁移、消长和分配动态, 并建立了其行为规律的数学模型。结果表明: (1)  $^{95}\text{Zr}$  由表土进入系统后即在该系统中发生迁移, 小麦主要经根吸收  $^{95}\text{Zr}$ , 然后向其它各部位转移和分配。小麦植株中  $^{95}\text{Zr}$  比活度起初随时间迅速增高, 在达到某一最大值后开始下降。根中  $^{95}\text{Zr}$  比活度显著高于植株其它部位, 小麦各部位中  $^{95}\text{Zr}$  比活度的大小顺序为: 麦根 > 麦秸 > 麦壳 > 麦粒。(2) 土壤中  $^{95}\text{Zr}$  主要滞留于表层 6 cm 内, 其比活度与距土表深度呈单项指数负相关。(3)  $^{95}\text{Zr}$  在小麦 - 土壤系统中比活度的动态变化规律由多项指数描述。(4) 小麦对土壤中的  $^{95}\text{Zr}$  具有一定的富集能力。

**关键词:**  $^{95}\text{Zr}$ ; 小麦; 迁移; 分室模型

中图分类号: X591 文献标识码: A 文章编号: 1000 - 0267(2002)06 - 0493 - 03

## Dynamics of Accumulation and Disappearance of Zirconium - 95 in Wheat - Soil System

ZHAO Xi-yue, SHI Jian-jun, WANG Shou-xiang, CHEN Chuan-qun

(Institute of Nuclear Agricultural Sciences, Zhejiang University, Key Laboratory of Nuclear Agricultural Science, the Ministry of Agricultural, Hangzhou 310029, China)

**Abstract:** The dynamics of transportation, accumulation, disappearance and distribution of  $^{95}\text{Zr}$  in the wheat - soil system is studied by using isotope - tracer techniques for simulated pollutants, and the mathematical model of the behavior law is built. It was shown that (1)  $^{95}\text{Zr}$  was transported rapidly in the system after it was put into the surface layer of soil. The uptake of  $^{95}\text{Zr}$  by wheat was mainly via root, and redistribution in all parts of wheat occurred consequently. The concentration in root was much higher than that of other parts of wheat plant. The specific activity of  $^{95}\text{Zr}$  in wheat plant rapidly increased to a maximum value, then decreased. The specific activity of  $^{95}\text{Zr}$  in each part of wheat plant was found to be arranged in order of root > straw > husk > seed. (2)  $^{95}\text{Zr}$  is mainly detained in 6cm of soil surface, and specific activity of  $^{95}\text{Zr}$  in soil present an individual exponential declining with depth of soil. (3) The dynamic law can be described as multinomial exponential function of concentration in the wheat - soil system. (4) The wheat plant has some ability to accumulate  $^{95}\text{Zr}$  in soil.

**Keywords:**  $^{95}\text{Zr}$ ; wheat; transference; compartment model

为了实现核电的持续发展和保持高质量环境的完美统一, 研究核电站放射性排放物在生态环境中的行为特性是一个相当活跃的学科领域。 $^{95}\text{Zr}$  是核电站反应堆的主要裂变产物之一, 是压水堆核电站的主要放射性液态流出物。有关  $^{95}\text{Zr}$  的研究报道主要集中在核事故后的环境监测和评价上, 而关于  $^{95}\text{Zr}$  在生态系统中如何吸附、分配和积累的研究尚未见报道<sup>[1-4]</sup>。本文研究了  $^{95}\text{Zr}$  进入土壤后, 在小麦 - 土壤系统中的迁移和消长的动态变化规律, 小麦对土壤中的  $^{95}\text{Zr}$  的富集性, 旨在评价放射性锆可能对环境产生的影响。

## 1 材料与方 法

### 1.1 供试核素

$^{95}\text{ZrO}_2$  由中国原子能研究院同位素所提供, 为粉末状固体, 放射性比活度为  $1.142 \times 10^8 \text{ Bq} \cdot \text{g}^{-1}$  (2001 - 03 - 19, 下同), 放化纯度大于 95%, 使用前用氢氟酸<sup>[5]</sup> 将其转化为  $6.165 \times 10^6 \text{ Bq} \cdot \text{mL}^{-1}$  的  $^{95}\text{ZrF}_4$  溶液。实验时再稀释到合适的比活度。

### 1.2 供试土壤

采自本校华家池农场的土壤, 系小粉土。其理化性质参见文献[6]。

### 1.3 实验方法

在  $\Phi 20 \text{ cm} \times 20 \text{ cm}$  的塑料花盆中盛土 5.0 kg, 装

收稿日期: 2002 - 01 - 28

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(39970147)

作者简介: 赵希岳(1965—), 男, 博士研究生。

土前,每盆土均匀拌入2 g(NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>、3 g KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>作基肥。然后于2000年11月23日播种,每盆播种20粒小麦(扬麦5号),出苗后,保留分布较为均匀的15株麦苗。在小麦的生长过程中适时施肥。试验花盆置于露天网室中。

<sup>95</sup>ZrF<sub>4</sub>溶液分别于2001年3月22日、4月1日、4月11日、4月21日、4月30日、5月9日、5月14日、5月17日、5月20日引入试验花盆。方法是:将前述<sup>95</sup>ZrF<sub>4</sub>水溶液1.00 mL(比活度为6.165 × 10<sup>4</sup> Bq · mL<sup>-1</sup>)用水稀释成100 mL后均匀浇灌于盆土表面,再各用100 mL水清洗容器4次,也浇灌于盆土表面,每次3盆(重复数)。故盆土中<sup>95</sup>Zr的初始比活度为58.87 Bq · g<sup>-1</sup>。于小麦成熟时(5月23日)一次性收获。

#### 1.4 采样

收获时,首先用半筒式不锈钢取土器沿花盆径向取分布均匀的3个土柱,随即将土柱约每2 cm横向均等分割成7段,分别将各段层土壤粉碎、充分拌匀后称20 g(3个重复)分别装入测样杯中待测量。然后收割小麦地上部分,将其分为茎叶、颖壳和籽粒,再拔出麦根,用清水冲洗后再用吸水纸吸去表面水。分别称重、剪碎后取20 g(3个重复,样品量少的部位减量)装入Φ75 mm × 110 mm的一次性塑料测样杯中。

#### 1.5 实验仪器及测量方法

<sup>95</sup>Zr发射β和γ射线,放射性测量采用BH1224型微机-多道一体化能谱仪(北京核仪器厂生产)测其γ射线。该谱仪配置倒置的Φ70 mm NaI闪烁探头,安装在铅屏蔽室中。测样器皿采用自备的Φ75 mm × 110 mm的一次性塑料测样杯,将其置于倒置的闪烁探头上,并用自制的定位装置固定测量位置,以保证所有样品测量几何位置的一致性。探头工作电压623V,阈值0.28。选取一个谱峰(240—300道)(由测量方法学试验确定)进行计数测量,测量结果经探测效率、死时间、衰变等校正后换算成样品的放射性比活度,测量误差控制在5%以内。

## 2 结果与讨论

### 2.1 <sup>95</sup>Zr在小麦-土壤系统中的迁移和分配动态

土壤及小麦各组分中<sup>95</sup>Zr比活度测定结果示于表1。整株小麦中的比活度按其各部位中的比活度加权平均而得<sup>[7]</sup>;土壤的比活度指全土平均,时间指距收获的时间间隔(下同)。

由表1可见,土壤中的比活度随时间单调地降

表1 <sup>95</sup>Zr在小麦-土壤系统各组分中比活度的动态变化

Table 1 The dynamic change of <sup>95</sup>Zr specific activity in wheat-soil system

t/d	土壤	小麦				
		根	茎叶	颖壳	籽粒	整株
3	58.24	29.86	4.16	0.07	0.01	14.63
6	55.36	38.32	5.95	0.55	0.05	25.64
9	52.84	57.74	7.73	0.72	0.10	29.12
14	49.39	87.06	8.53	0.86	0.12	35.35
23	47.93	94.49	10.62	1.24	0.15	59.18
32	46.56	84.38	9.78	1.39	0.15	56.51
42	43.80	76.20	7.28	1.78	0.15	51.58
52	41.00	47.32	7.17	1.93	0.16	44.33
62	38.78	47.60	6.09	2.18	0.17	36.85

低,这与小麦不断地从土壤中吸收<sup>95</sup>Zr有关,但浇灌和雨水的不断淋溶使部分<sup>95</sup>Zr损失也是重要原因。小麦植株中的比活度起先较快地增大,至距收获23 d时达最大,然后缓慢地降低。

我们已有的研究表明,进入土壤的<sup>95</sup>Zr较迅速地地为土壤所吸附<sup>[6]</sup>;但由于供试土壤呈酸性(pH6.0),浇水和降雨能促进锆化合物的溶解,使得含亲水性基团的水分子腐殖质不易凝聚,与锆形成可溶性有机螯合物,加重了<sup>95</sup>Zr淋溶迁移,致使小麦植株不断地通过其根部从土壤中摄取<sup>95</sup>Zr,也就形成了<sup>95</sup>Zr在小麦植株中的积累。小麦各部位的比活度是根系>茎叶>颖壳>籽粒。这符合放射性锆在植株中分布的一般规律<sup>[8-11]</sup>。

### 2.2 小麦对放射性锆的富集

表1数据表明,小麦植株对土壤中的<sup>95</sup>Zr具有一定的富集作用。通常用浓集因子K表征,定义为小麦植株中<sup>95</sup>Zr比活度与同一时刻土壤中<sup>95</sup>Zr比活度之比。由此算得K值:距收获3 d为0.25,至6 d为0.46,至终止试验时62 d为0.95,其中在23 d时最大为1.23;按类比的概念,麦粒的K值皆大于3 d时的0.000 2,62 d最大约为0.004 4(表2)。

表2 浓集因子值与时间的关系

Table 2 Relationship between CF value and time

t/d	3	6	9	14	23	32	42	52	62
浓集因子	0.25	0.46	0.55	0.72	1.23	1.21	1.18	1.08	0.95

### 2.3 <sup>95</sup>Zr在小麦-土壤系统中的迁移模型

根据分室模型原理,小麦-土壤系统可视为由土壤和小麦组成的2个分室系统。由于试验在露天进行,浇灌和雨水使系统内的<sup>95</sup>Zr造成一定的损失,故应为开放二分室系统<sup>[11-14]</sup>(图1):

通常认为,示踪剂(<sup>95</sup>Zr)的迁移服从一级速率过

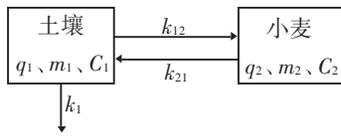


图 1 开放二分室模型

Figure 1 An open two - compartment model

程, 令  $^{95}\text{Zr}$  由土壤向小麦的迁移速率为  $k_{12}$ , 因雨水淋溶而致  $^{95}\text{Zr}$  损失的速率为  $k_1$ ,  $^{95}\text{Zr}$  由小麦向土壤的迁移速率为  $k_{21}$ , 通常将它们视为常数;  $q_i$ 、 $C_i$  和  $m_i$  分别表示第  $i$  分室中  $^{95}\text{Zr}$  的量 (Bq)、比活度 ( $\text{Bq} \cdot \text{g}^{-1}$ ) 和质量 (g), 则各分室中  $^{95}\text{Zr}$  量对时间变化率的微分方程为:

$$\frac{dq_1}{dt} = k_{21}q_2 - (k_{12} + k_1)q_1$$

$$\frac{dq_2}{dt} = k_{12}q_1 - k_{21}q_2$$

解得

$$q_1 = \frac{q_{1,0}(a - k_{21}) + k_{21}q_{2,0}}{a - b} e^{-at} + \frac{q_{1,0}(k_{21} - b) + k_{21}q_{2,0}}{a - b} e^{-bt}$$

$$q_2 = \frac{q_{1,0}k_{21} + q_{2,0}(k_{12} + k_1 - a)}{b - a} e^{-at} + \frac{q_{1,0}(k_{12} + k_1 - b)}{b - a} e^{-bt}$$

式中:  $ab = k_1 k_{21}$ ,  $a + b = k_{12} + k_{21} + k_1$ ;  $q_{1,0}$ 、 $q_{2,0}$  分别表示  $t = 0$  时相应分室中  $^{95}\text{Zr}$  的量, 但是  $q_{2,0} = 0$ 。于是在注意到  $q_i = m_i c_i$  之后, 便得到相应分室中  $^{95}\text{Zr}$  随时间变化的表达式:

$$C_1 = \frac{C_{1,0}}{b - a} [(k_{21} - a)e^{-at} + (b - k_{21})e^{-bt}]$$

$$C_2 = \frac{m_1 C_{1,0} k_{12}}{m_2 (b - a)} (e^{-at} - e^{-bt})$$

根据初始条件  $t = 0$ 、 $C_{1,0} = 58.87 \text{Bq} \cdot \text{g}^{-1}$ 、 $C_{2,0} = 0$ , 质量数据  $m_1 = 5.0 \text{kg}$ 、 $m_2 = 70\text{—}90 \text{g}$ , 以及表 1 的数据, 经计算机拟合得 ( $\text{d}^{-1}$ ):  $a = 0.0143$ ,  $b = 0.1478$ ,  $k_{12} = 0.0067$ ,  $k_{21} = 0.1403$ ,  $k_1 = 0.0151$ , 由此得到  $^{95}\text{Zr}$  在小麦 - 土壤系统各分室中的迁移模式为:

$$C_1 = 55.5627 e^{-0.0143t} + 3.3073 e^{-0.1478t}$$

$$C_2 = \frac{6.6587 m_1}{m_2} (e^{-0.0143t} - e^{-0.1478t})$$

#### 2.4 $^{95}\text{Zr}$ 在土壤中的垂直分布

$^{95}\text{Zr}$  在土壤中的比活度随土壤深度及时间的动态变化如表 3 所示。表 3 表明:

(1) 虽然  $^{95}\text{Zr}$  系由土壤表面引入, 且土壤对其吸附较强, 但由于土壤溶液的淋溶等作用, 表层土壤中的  $^{95}\text{Zr}$  仍然有少量向下层迁移。时间长, 迁移得多, 同时由于盆底部的阻留, 致使最底层段  $^{95}\text{Zr}$  的比活度往往高于上一层段。

表 3  $^{95}\text{Zr}$  在土壤中的垂直分布Table 3 The vertical distribution of  $^{95}\text{Zr}$  in the soil

$t/\text{d}$	$d/\text{cm}$						
	0—2	2—4	4—6	6—8	8—10	10—12	12—14
3	229.7	70.0	10.9	2.7	1.4	0.5	0.4
6	218.7	56.5	11.9	2.8	1.2	0.6	0.7
9	202.5	69.4	12.9	2.3	1.3	0.8	0.7
14	179.1	64.1	10.8	4.2	1.4	0.8	1.0
23	161.8	75.1	12.6	5.7	1.7	0.9	1.1
32	150.6	74.4	12.7	5.3	1.1	1.0	0.8
42	137.2	67.5	11.8	3.1	1.6	0.7	0.9
52	119.1	64.7	15.8	2.5	1.1	0.6	0.8
62	109.6	58.9	12.6	2.8	1.7	1.0	0.9

(2) 对同一处理 (即同一时间), 距表层深度的增加,  $^{95}\text{Zr}$  比活度急速地下降, 有 90% 以上的  $^{95}\text{Zr}$  集中于表层 6 cm。回归分析表明, 土壤中  $^{95}\text{Zr}$  比活度  $A$  ( $\text{Bq} \cdot \text{g}^{-1}$ ) 与距表层深度  $x$  (cm) 呈极显著的单项指数负相关。对不同的处理, 土壤中的  $^{95}\text{Zr}$  比活度与土壤深度的关系如表 4 所示。

表 4  $^{95}\text{Zr}$  在土壤中垂直分布的回归方程Table 4 The regressive equation for vertical distribution of  $^{95}\text{Zr}$  in the soil

$t/\text{d}$	回归方程	$R^2$
3	$y = 451.6 e^{-1.1070x}$	0.9567
6	$y = 342.8 e^{-1.0221x}$	0.9284
9	$y = 342.1 e^{-1.0080x}$	0.9208
14	$y = 288.4 e^{-0.9419x}$	0.9225
23	$y = 304.2 e^{-0.9223x}$	0.9352
32	$y = 311.3 e^{-0.9564x}$	0.9366
42	$y = 261.2 e^{-0.9363x}$	0.9262
52	$y = 263.7 e^{-0.9655x}$	0.9164
62	$y = 206.8 e^{-0.8772x}$	0.9294

### 3 结论

(1) 小麦根部能吸收土壤中的  $^{95}\text{Zr}$ , 通过茎输送到叶和麦粒。 $^{95}\text{Zr}$  在小麦中的比活度, 以根中为最高, 麦秸次之, 然后是麦壳, 麦粒中最低。

(2) 小麦对土壤中的  $^{95}\text{Zr}$  具有一定的富集能力, 其  $k$  值最大为 1.23, 麦粒中的  $k$  值皆大于 0.0002。

(3)  $^{95}\text{Zr}$  由表土进入系统后即在中系统中发生迁移, 土壤中  $^{95}\text{Zr}$  主要滞留于表层 6 cm 内, 其比活度与距土表深度呈单项指数负相关。

(4)  $^{95}\text{Zr}$  在小麦 - 土壤系统中比活度的动态变化规律由开放二分室模型描述。