

310-315

第12卷 第4期
1992年12月生态学报
ACTA ECOLOGICA SINICAVol.12, No.4
Dec., 1992

铯-89在模拟水稻田中的动力学行为*

王寿祥 张永熙

(浙江农业大学原子核农业科学研究所, 杭州, 310029)

胡秉民 黄丹

(浙江农业大学基础课部, 杭州)

155.42

X591.032.3

摘 要

采用模拟污染物的同位素示踪技术探索了 ^{89}Sr 在水稻-田水-土壤系统中的消长与分配,并建立了其行为规律的数学模型。结果表明,田表水中 $^{89}\text{Sr-Sr}$ 含量迅速地降低,1d后由原始量的 $8.5\mu\text{g/g}$ 降为 $4.0\mu\text{g/g}$,以后逐渐降低,至试验结束(28d)时为 $0.7\mu\text{g/g}$;表土中 $^{89}\text{Sr-Sr}$ 含量迅速地增大,1d后即由 0 达 $12.4\mu\text{g/g}$,试验结束时为 $20.9\mu\text{g/g}$;水稻地上部,1d后由 0 达 $8.8\mu\text{g/g}$,以后也呈增加趋势,结束时达 $21.7\mu\text{g/g}$;水稻根由1d的 $9.6\mu\text{g/g}$ 达试验结束时的 $39.6\mu\text{g/g}$,田表水、表土及水稻植株中 $^{89}\text{Sr-Sr}$ 含量随时间变化的规律相应为: $\hat{C}_w = 0.865e^{-0.478t} + 7.035e^{-0.478t}$, $\hat{C}_s = 35.142(e^{-0.028t} - e^{-0.478t})$, $\hat{C}_r = 35.182 - 23.481e^{-0.028t} - 11.701e^{-0.478t}$ 。

其次,在收获期,糙米中 $^{89}\text{Sr-Sr}$ 含量为 $1.0\mu\text{g/g}$,稻壳为 $9.4\mu\text{g/g}$,稻草为 $39.7\mu\text{g/g}$,稻根为 $41.9\mu\text{g/g}$ 。还测定了 $^{89}\text{Sr-Sr}$ 在收获期土壤中的铅垂分布,表明,58.2%的 $^{89}\text{Sr-Sr}$ 滞留于表层2cm,并且其滞留量随土壤深度按指数规律衰减, $\hat{C} = 20.358e^{-0.467z}$ ($r = -0.9433$)。

关键词: 放射生态学, 放射性铯, 同位素示踪, 数学模型, 水稻田。

^{89}Sr 是核污染的关键核素之一。本文运用盆栽研究了 ^{89}Sr 在水稻田中的动态行为及其最终在糙米、稻壳、稻草及稻根中的滞留和在土壤中的铅垂分布。通过研究,为其进入水稻田后的安全性评价提供依据。

一、材料与方 法

盆钵尺寸为 $\phi 20\text{cm} \times 20\text{cm}$,每盆装入 5.00kg 风干的杭州华家池砂壤土。其理化参数如下:有机质1.90%,pH值,6.0(水浸)、5.5(盐浸),交换性总酸 $0.05\text{meq}/100\text{g}$ 土,交换性钙 $11.8\text{meq}/100\text{g}$ 土,交换性镁 $1.5\text{meq}/100\text{g}$ 土,粘粒($<0.001\text{mm}$)12.5%。

所用同位素为中国原子能研究院提供的 $^{85+89}\text{SrCo}_3$ 粉末,出厂时(1989 03 15)比活度为 $9.25 \times 10^7\text{Bq/g}$,或 $1.55 \times 10^8\text{Bq/g Sr}$;使用前用 5mol/L HCl 转化成 $^{85+89}\text{SrCl}_2$ 水液。

每只盆钵栽插水稻广陆矮4号6,丛每丛4株,计21盆。待水稻始穗后,灌入 $^{85+89}\text{SrCl}_2$ 水液 $2.59 \times 10^8\text{Bq}$ (1989 03 15),盆钵土表面水量约1965ml,相当于田表水 $^{85+89}\text{Sr-Sr}$ 初始含量 $8.5\mu\text{g/g}$ 。整个试验期间保持水面高度基本不变。

* 本文在撰写过程中,陈传群教授提出了指导性意见,特此致谢。

本文于1991年5月19日收到,修改稿于1992年1月24日收到。

分动态和一次性(收获期)进行采样。采样分别在标记后 1、3、8、13、18、23、28d 进行。每次取 3 盆, 每盆取水稻 2 丛(连根掘起后用水冲洗干净, 然后把地上部与根分开)、田表水约 10ml、表土(深约 2cm)适量。各样品经烘干、磨碎等预处理后称取 200.0mg (3 只重复)于 G-M 计数器上测定。根据 ^{86}Sr 和 ^{89}Sr 的放射性质^[1], 所得计数值应为 ^{89}Sr β 粒子所贡献。所以下面一般表述为 $^{89}\text{Sr-Sr}$ 。

于收获期, 将水稻分糙米、稻壳、稻草和稻根分别制样测定; 土壤, 由盆钵小心完整地倒出后, 沿其中心对称地切下 2cm 厚土块, 然后每 2cm 横向均等分割、烘干, 研碎后称取 200.0 mg 在 G-M 计数器上测定 ^{89}Sr 的活度。

所有测定的相对标准差在 5% 以内, 运用 $^{85+87}\text{SrCl}_2$ 母液活度作比对, 并经衰变及死时间校正, 便求得各测样中 ^{89}Sr 的活度 (Bq) 及 $^{89}\text{Sr-Sr}$ 含量 ($\mu\text{g/g}$)。

二、结果与讨论

1. $^{89}\text{Sr-Sr}$ 在水稻-田水-表土系统中的消长

结果如表 1 所示。

(1) 测定表明, $^{89}\text{Sr-Sr}$ 进入田表水后, 将迅速地发生迁移。在田表水 $^{89}\text{Sr-Sr}$ 原始引入量 $8.5\mu\text{g/g}$ 情况下, 1d 后便降至 $4.0\mu\text{g/g}$, 然后逐渐下降至第 13 天的 $0.6\mu\text{g/g}$, 且以后几乎不变。这是因为田表水中 Sr^{2+} 迅速地为土壤吸附, 使得其含量急剧降低, 但由于存在着解吸, 因此, 经历一定时间, 吸附和解吸达到平衡, 田表水中 $^{89}\text{Sr-Sr}$ 的量就趋于恒值。

表土中 $^{89}\text{Sr-Sr}$ 滞留量 1d 后即由 0 达 $12.4\mu\text{g/g}$, 接着逐渐增大, 至第 13d 达 $32.0\mu\text{g/g}$, 以后又缓慢下降, 最后为 $20.9\mu\text{g/g}$; 而水稻(干样), 其地上部 1d 后由 0 达 $8.8\mu\text{g/g}$, 随后缓慢增长, 至试验结束时达 $21.7\mu\text{g/g}$; 稻根(干样) 1d 后达 $9.5\mu\text{g/g}$, 接着也是逐渐增大, 最后为 $39.6\mu\text{g/g}$, 由于被试系统中土壤量最多, 它蓄积了大部分的 $^{89}\text{Sr-Sr}$, 同时由于水稻扎根于土壤, $^{89}\text{Sr-Sr}$ 便通过根膜被载体携带而转移至水稻各部分, 且在试验期间呈增加趋势, 所以降低了土壤中 $^{89}\text{Sr-Sr}$ 的含量, 以致在土壤中 $^{89}\text{Sr-Sr}$ 量达某一最大值后便有下降的趋势。

(2) 水稻田中 $^{89}\text{Sr-Sr}$ 以 Sr^{2+} 状态存在, 因此, 它在系统中便有较大的迁移性, $^{89}\text{Sr-Sr}$ 进入作物的途径可以通过根膜吸收或粘附于根系表面或粘附于浸入田表水中的作物茎秆的表面, 然后转移至其它部位。Карачаева E. H. 等的研究指出^[2,3], 作物中的放射性铯大部分 (82%—94%) 滞留于地上部。本试验中 $^{89}\text{Sr-Sr}$ 在水稻地上部的滞留浓度虽低于稻根, 但由于地上部的质量差不多为根的 10 倍, 因此, 地上部中 $^{89}\text{Sr-Sr}$ 的蓄积总量差不多为根的 6 倍, 即约占水稻中滞留量的 85%。放射性铯的这一特性是颇值得注意的。

(3) 由于 $^{89}\text{Sr-Sr}$ 不易挥发, 在盆栽模拟情况下也不会散失, 同时 $^{89}\text{Sr-Sr}$ 的引入是在抽穗期, 水稻的生长稀释也不明显, 于是 $^{89}\text{Sr-Sr}$ 在水稻田中的消长规律可用田表水-水稻-表土的封闭 3 分室动力学模型寻求, $^{89}\text{Sr-Sr}$ 的消长服从一级速率过程。若以 q_w 、 q_s 、 q_r 分别表示某一时刻田表水、表土和水稻中 $^{89}\text{Sr-Sr}$ 的滞留量, K_{ij} 表示 $^{89}\text{Sr-Sr}$ 由 i 室向 j 室转移的速率常数, 并略去水稻中 $^{89}\text{Sr-Sr}$ 向表土和表水的转移, 则各分室中 $^{89}\text{Sr-Sr}$ 的滞留量对时间的变化率为:

表 1 ^{89}Sr - ^{87}Sr 在水稻田中的消长与分配
Table 1 Accumulation-disappearance and distribution of ^{89}Sr - ^{87}Sr in the paddy

| a) | 类别 Classification | 田表水 Paddy water | | | | | | 表土 Topsoil | | | | | | 水稻* Rice | | | | | | | | | | | |
|-------------------------|-----------------------------------|--------------------|--------|--------|--------|--------|------------------|---------------|-------|--------|--------|--------|--------|-------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | | 0 | 1 | 3 | 8 | 13 | 18 | 23 | 28 | 0 | 1 | 3 | 8 | 13 | 18 | 23 | 28 | 0 | 1 | 3 | 8 | 13 | 18 | 23 | 28 |
| b) | 时间(d) time | 0 | 1 | 3 | 8 | 13 | 18 | 23 | 28 | 0 | 1 | 3 | 8 | 13 | 18 | 23 | 28 | 0 | 1 | 3 | 8 | 13 | 18 | 23 | 28 |
| | 比活度(Bq/g) | 8.50 | 4.01 | 1.27 | 1.57 | 0.82 | 0.61 | 0.74 | 0.71 | 0.00 | 12.99 | 20.42 | 27.32 | 31.99 | 27.14 | 22.23 | 20.88 | 0.00 | 8.86 | 13.52 | 15.85 | 18.24 | 19.10 | 21.14 | 23.33 |
| | Specific activity | 1318.1 | 923.9 | 198.7 | 245.0 | 96.7 | 94.3 | 115.8 | 110.2 | 0.00 | 1933.3 | 3168.7 | 4250.0 | 4983.3 | 4216.7 | 3466.7 | 3250.0 | 0.00 | 1317.2 | 2107.9 | 2472.5 | 2838.0 | 2973.4 | 3286.4 | 3633.0 |
| | 滞留浓度($\mu\text{g/g}$) | 1318.1 | 923.9 | 198.7 | 245.0 | 96.7 | 94.3 | 115.8 | 110.2 | 0.00 | 1933.3 | 3168.7 | 4250.0 | 4983.3 | 4216.7 | 3466.7 | 3250.0 | 0.00 | 1317.2 | 2107.9 | 2472.5 | 2838.0 | 2973.4 | 3286.4 | 3633.0 |
| Residue concentration | 1318.1 | 923.9 | 198.7 | 245.0 | 96.7 | 94.3 | 115.8 | 110.2 | 0.00 | 1933.3 | 3168.7 | 4250.0 | 4983.3 | 4216.7 | 3466.7 | 3250.0 | 0.00 | 1317.2 | 2107.9 | 2472.5 | 2838.0 | 2973.4 | 3286.4 | 3633.0 | |
| 类别 Classification | 水稻地上部 Rice part of aboveground | | | | | | 水稻根 Rice root | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 时间(d) time | 0 | 1 | 3 | 8 | 13 | 18 | 23 | 28 | 0 | 1 | 3 | 8 | 13 | 18 | 23 | 28 | | | | | | | | | |
| 比活度(Bq/g) | 0.0 | 1363.3 | 1866.7 | 2450.0 | 2700.0 | 2733.3 | 2988.7 | 3366.7 | 0.0 | 1476.7 | 2306.7 | 2588.3 | 4566.7 | 5100.0 | 5433.3 | 6166.7 | | | | | | | | | |
| Specific activity | 0.00 | 1363.3 | 1866.7 | 2450.0 | 2700.0 | 2733.3 | 2988.7 | 3366.7 | 0.00 | 1476.7 | 2306.7 | 2588.3 | 4566.7 | 5100.0 | 5433.3 | 6166.7 | | | | | | | | | |
| 滞留浓度($\mu\text{g/g}$) | 0.00 | 8.77 | 11.95 | 15.73 | 17.34 | 17.55 | 19.13 | 21.67 | 0.50 | 9.50 | 15.18 | 16.56 | 29.35 | 32.76 | 34.95 | 39.60 | | | | | | | | | |
| Residue concentration | 0.00 | 8.77 | 11.95 | 15.73 | 17.34 | 17.55 | 19.13 | 21.67 | 0.50 | 9.50 | 15.18 | 16.56 | 29.35 | 32.76 | 34.95 | 39.60 | | | | | | | | | |

* 此值由水稻地上部和根折算而成: $C_i = \frac{\sum m_i C_i}{\sum m_i}$, 式中 m_i , C_i 相应的水稻地上部和根的质量和 ^{89}Sr - ^{87}Sr 的滞留浓度。

* This value is come from formula $C_i = \frac{\sum m_i C_i}{\sum m_i}$, and C_i correspondingly is mass aboveground of rice and rice root, and remainder quantity of ^{89}Sr - ^{87}Sr in the formula.

$$\frac{dq_w}{dt} = K_{s,w}q_s - (K_{w,r} + K_{w,s})q_w$$

$$\frac{dq_s}{dt} = K_{w,s}q_w - (K_{s,w} + K_{s,r})q_s$$

$$\frac{dq_r}{dt} = K_{w,r}q_w + K_{s,r}q_s$$

解上述微分方程组, 并考虑到任何时刻系统中的 $^{89}\text{Sr-Sr}$ 的量就等于开始引入表水的量, 且为常数, 即: $q_w + q_s + q_r = q_{w0}$, 式中 q_w 、 q_s 、 q_r 分别为表水、表土和水稻中的 $^{89}\text{Sr-Sr}$ 的含量, q_{w0} 为起始时表水中 $^{89}\text{Sr-Sr}$ 的含量, 即引入量; 或以滞留浓度 C_i 表示, $m_w C_w + m_s C_s + m_r C_r = m_w C_{w0}$ 便得 (m_i 表示 i 分室的质量):

$$C_w = \frac{C_{w0}}{B-A} [(C-A)e^{-At} - (C-B)e^{-Bt}]$$

$$C_s = \frac{K_{w,s} C_{w0}}{P(B-A)} (e^{-At} - e^{-Bt})$$

$$C_r = \frac{C_{w0}}{Q} \left(1 - \frac{K_{w,r} - B}{A-B} e^{-At} + \frac{K_{w,r} - A}{A-B} e^{-Bt} \right)$$

式中 $A = (C + K_{w,r} + K_{w,s} - \sqrt{(K_{w,r} + K_{w,s} - C)^2 + 4K_{w,r}K_{w,s}})/2$, $B = (C + K_{w,r} + K_{w,s} + \sqrt{(K_{w,r} + K_{w,s} - C)^2 + 4K_{w,r}K_{w,s}})/2$, $C = K_{s,r} + K_{s,w}$, 在计算机上求解得: $A = 0.028d^{-1}$, $B = 0.470d^{-1}$, $C = 0.073d^{-1}$ 。于是 $K_{w,r} = 0.250d^{-1}$, $K_{w,s} = 0.175d^{-1}$, $K_{s,r} = 0.00149d^{-1}$, $K_{s,w} = 0.0715d^{-1}$ 。由此便得 $^{89}\text{Sr-Sr}$ 在田表水、表土及水稻植株中滞留浓度与时间关系的数学模式:

$$\widehat{C}_w = 0.865e^{-0.028t} + 7.635e^{-0.470t}$$

$$\widehat{C}_s = 35.142(e^{-0.028t} - e^{-0.470t})$$

$$\widehat{C}_r = 35.182 - 23.481e^{-0.028t} - 11.701e^{-0.470t}$$

图 1 为其图示。

2. $^{89}\text{Sr-Sr}$ 在收获期水稻中的滞留

表 2 清楚地表明, 糙米中 $^{89}\text{Sr-Sr}$ 的滞留浓度远低于水稻的其它部分, 各部分 $^{89}\text{Sr-Sr}$ 滞留浓度的大小顺序是: 稻根 > 稻草 > 稻壳 > 糙米。但是, 稻根的重量比稻草小得多, 因此, 就 $^{89}\text{Sr-Sr}$ 的蓄积总量来说, 大小顺序应该是: 稻草 > 稻根 > 稻壳 > 糙米。水稻各部分中 $^{89}\text{Sr-Sr}$ 滞留量的差异固然与核素本身性质有关, 比如就下面几种关键核素来说, 放射性铯主要蓄积在作物的地上部, 而放射性钡几乎均匀分布, 放射性铈则主要蓄积在地下部^[3]; 但是, 由于锶的化学性质与钙相似, 故相对于含钙量少的糙米, 其 $^{89}\text{Sr-Sr}$ 的含量也就最低。

3. $^{89}\text{Sr-Sr}$ 在水稻土中的分布

所得结果如表 3 所示。

由表 3 可见, 土壤中 $^{89}\text{Sr-Sr}$ 的含量随土壤深度急剧减少, 并且 58.2% 滞留于表层 2cm 内, 97.6% 滞留于表层 6cm 内。 $^{89}\text{Sr-Sr}$ 如此迅速地衰减, 显然是土壤对它强烈吸附的结

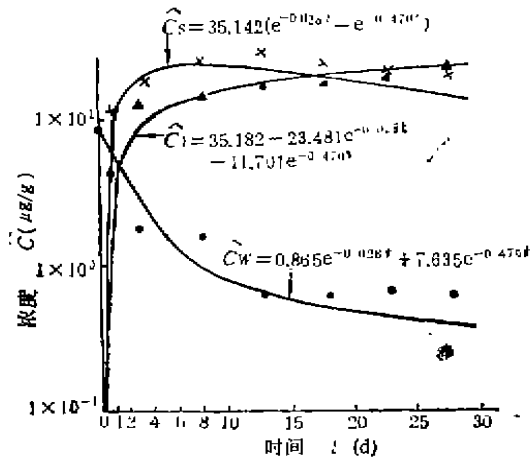


图1 ⁸⁹Sr-Sr在水稻田中分配动态
Fig.1 The dynamic of distribution for ⁸⁹Sr-Sr in the paddy

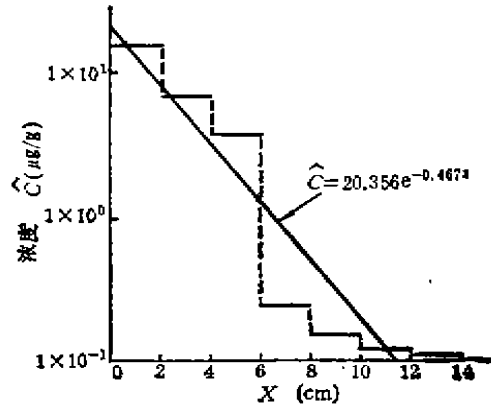


图2 ⁸⁹Sr-Sr在水稻土中的铅垂分布
Fig.2 The vertical distribution of ⁸⁹Sr-Sr in the paddy soil

表2 ⁸⁹Sr-Sr在水稻各部分中的滞留量
Table 2 The residue of ⁸⁹Sr-Sr in the rice parties

| 类别 Classification | 糙米 Brown rice | 稻壳 Rice husk | 稻草 Rice straw | 稻根 Rice root |
|---|------------------|-----------------|------------------|-----------------|
| 比活度 Bq/g Specific activity | 191.7 | 1468.3 | 6166.7 | 6500.0 |
| 滞留浓度 Residue concentration micrograms/g | 1.61 | 9.44 | 39.67 | 41.78 |

表3 ⁸⁹Sr-Sr在水稻土中的分布
Table 3 The distribution of ⁸⁹Sr-Sr in the paddy soil

| 深度, cm Depth | 0-2 | 2-4 | 4-6 | 6-8 | 8-10 | 10-12 | 12-14 |
|---|--------|--------|-------|------|------|-------|-------|
| 比活度 Specific activity Bq/g | 2366.7 | 1040.0 | 565.0 | 73.3 | 23.5 | 18.3 | 16.7 |
| 滞留浓度 Residue concentration micrograms/g | 15.25 | 6.69 | 3.63 | 0.24 | 0.15 | 0.12 | 0.11 |
| 比率 Ratio % | 58.23 | 25.55 | 13.86 | 0.92 | 0.58 | 0.45 | 0.41 |

果^[1]。回归分析表明, 土壤中⁸⁹Sr-Sr滞留量与深度关系可以回归方程表示: $\hat{C} = 20.356 e^{-0.467x}$, $r = -0.9433$ ($\alpha < 0.01$), 其半残留深度 $X_{1/2} = 1.52$ cm。图2为其图示。

参 考 文 献

[1] 核素图表编制组, 《核素常用数据表》, 原子能出版社, 北京, 1977, 116-117。
[2] Караваева Е. Н., Радиозкологические исследования почвы и растений (Вып. 95 Труды инст-группа экологии растений и животных), УНЦ АН СССР, Свердловск, 1975, 46-47.

- [3] Шувалов Ю. Н., 1981, Распределение инкорпорированного семенами ^{89}Sr в растении чая, *Агрохимия*, 1981, (7), 124.
- [4] 张永熙等, ^{89}Sr 在土壤中吸附的研究, 浙江农业大学学报, 1990, 16(4), 412—416.

THE KINETIC BEHAVIOUR OF STRONTIUM-89 IN THE SIMULATION PADDY

Wang Shou-Xiang Zhang Yong-Xi

(Institute of Nuclear Agricultural Science, Zhejiang Agricultural University, Hangzhou, 310029)

Hu Bing-Min Huang Dan

(Division of Basic Courses, Zhejiang Agricultural University, Hangzhou, 310029)

The isotope tracer techniques for simulated pollutants are applied to explore the accumulation-disappearance and distribution of strontium-89 in the rice-paddy water-soil system, and the mathematical model of the behaviour law was built. The results showed that the content of ^{89}Sr -Sr in paddy water was reduced quickly, after the first day reduced from initial 8.5 $\mu\text{g/g}$ to 4.0 $\mu\text{g/g}$ and afterwards reduced gradually. When the test ended (28 days), it was 0.7 $\mu\text{g/g}$. The content of ^{89}Sr -Sr was increased quickly in topsoil, after the first day, increased from 0 to 12.4 $\mu\text{g/g}$ and when the test ended it was 20.9 $\mu\text{g/g}$. The content in rice aboveground, after the first day, was increased from 0 to 8.7 $\mu\text{g/g}$ then showed an increasing tendency, and when the test ended was 21.6 $\mu\text{g/g}$. The content in rice root was increased from initial 9.4 $\mu\text{g/g}$ to 39.6 $\mu\text{g/g}$ at the end of test. The contents of ^{89}Sr -Sr in the paddy water, topsoil and rice as function of time are correspondingly:

$$\hat{C}_w = 0.865e^{-0.028t} + 7.635e^{-0.470t}, \quad \hat{C}_t = 35.142(e^{-0.028t} - e^{-0.470t})$$

$$\hat{C}_r = 35.182 - 23.481e^{-0.028t} - 11.701e^{-0.470t}$$

It was also found after harvest that the content of ^{89}Sr -Sr was 1.6 $\mu\text{g/g}$ in brown rice, 9.4 $\mu\text{g/g}$ in rice husk, 39.7 $\mu\text{g/g}$ in rice straw, and 41.8 $\mu\text{g/g}$ in rice root. The vertical distribution of ^{89}Sr -Sr was measured in the soil after harvest. The result showed that 58.2% of ^{89}Sr -Sr in soil was residued in 2 cm of soil surface, and the remaining ^{89}Sr -Sr in soil was reduced as an exponential function of soil depth: $\hat{C} = 20.356e^{-0.407x}$ ($r = -0.9433$).

Key words: radioecology, active strontium, isotope tracer, mathematical model, paddy.