

# 利用水生植物清除水体中放射性物质的研究

## (III) 水生植物对 $\text{Sr}^{90}$ 、 $\text{Y}^{91}$ 、 $\text{Cs}^{137}$ 、 $\text{Ce}^{144}$ 的积累、释放及 Ca 对 $\text{Sr}^{90}$ 吸收的影响\*

朱 蕙 梁绍昌 周永欣 冉宗植 陈敏容

(中国科学院水生生物研究所)

### 提 要

5种水生植物对所用4种放射性同位素都有一定的清除能力，其清除能力的大小不仅取决于生物的种类，而且还取决于生物本身代谢率的高低。试验结果：去污率高的可达80%，积累系数最高可达1,500；水体中含Ca量的多少对生物吸收积累放射性物质的多少有一定的影响；生物在积累放射性物质之后，转移到无放射性物质的水体中将释放出原积累的一部分放射性物质。

随着和平利用原子能事业的日益发展，将有可能给天然水体造成放射性物质的污染。根据水生植物对水体中矿物元素具有一定的吸收积累能力的这一特性，有可能利用水生植物对含有放射性物质的废水进行净化处理。我们曾用8种水生植物在实验室条件下对含  $\text{Sr}^{90}$  废水的清除能力作了研究<sup>[1]</sup>。在上述试验的基础上，又用5种水生植物对  $\text{Sr}^{90}$ 、 $\text{Y}^{91}$ 、 $\text{Cs}^{137}$ 、 $\text{Ce}^{144}$  的清除能力进行了试验。同时还对水中Ca含量对水生植物清除  $\text{Sr}^{90}$  的影响及积累了  $\text{Sr}^{90}$  的水生植物在无放射性物质的水体中释放  $\text{Sr}^{90}$  的情况进行了观察。

### 材 料 和 方 法

用于本试验的水生植物共5种：水绵 (*Spirogyra* sp.)，水网藻 [*Hydrodictyon reticulatum* (L.) Lager]；紫背浮萍 [*Spirodelta poryrhiza* (L.) Schleid.]，金鱼藻 (*Ceratophyllum demersum*)，凤眼莲 (*Eichhornia crassipes* Solms.)。

这些材料都采自武昌东湖及其附近的池塘中，采回后用自来水洗净，在室内暂养一段时间，待其生长正常后用于正式试验。试验用的培养液（以下简称试液）的配制是按朱树

\* 本文的结果曾在1966年3月由中央卫生部委托湖南省劳动卫生研究所在长沙市召开的有关座谈会上报告过；本研究曾蒙黎尚豪教授亲切指导。插图由狄克同志复墨，特此一并致谢。

屏 10 号(以下简称朱氏 10 号)培养液<sup>1)</sup>分别加入所用的 4 种放射性物质而成。试液的放射性比度<sup>2)</sup>分别为: Sr<sup>90</sup> 2.2— $2.7 \times 10^{-6}$  居里/升; Y<sup>91</sup> 0.7— $1.0 \times 10^{-6}$  居里/升; Ce<sup>141</sup> 2.4— $3.0 \times 10^{-6}$  居里/升; Cs<sup>137</sup> 2.1— $2.7 \times 10^{-6}$  居里/升。放射性物质的载体均为硝酸盐。

试验时取一定量的植物体, 分别置于含有不同放射性物质的试液中, 试液的体积在 200—2,000 毫升之间(依植物体大小而定)。试验周期为 8 昼夜, 每昼夜光照 12 小时(照度为 1,000 勒克司)。温度未加控制, 随季节而变动。在试验开始后 1、2、4、8 天分别取样测定。

测定的植物体都经 0.5% EDTA-Na 液和自来水洗涤 2—3 次, 然后放在滤纸上吸去其体表剩余的水分, 接着再分别置于经过称恒重的坩埚中烤干, 称恒重, 求得植物的干物质重。凤眼莲在吸除其体表的剩余水分后, 将其根与茎叶部分分开, 以便在烤干后, 分别称其干物质恒重。最后, 将所有干物质分别进行灰化, 从所得的灰样中分别称取 10 毫克的灰, 放在直径为 2 厘米的锡纸盘中, 制成测量的样品。在采植物样的同时, 用移液管从相应的培养缸中各吸取水样 1 毫升, 放在锡纸盘中, 在红外线灯光下蒸干, 以待测量。

金鱼藻、紫背浮萍、水绵 3 种水生植物在含有 Sr<sup>90</sup> 的试液中培养到第 4 天时(部分培养到第 8 天)取出, 其中一部分经洗涤后做样(方法同前), 测定其积累情况, 余下部分经洗涤后再放入无放射性的朱氏 10 号培养液中继续培养, 此时即为释放试验的开始。在试验开始后的半天和 1、2、4 天分别取水样 1 毫升测定其放射性比度, 并在第 2、4 天取水样的同时从相应的缸中取植物材料测量体内放射性物质及其释放情况(方法同前)。

在积累和释放的同时, 还研究了水的不同硬度(含 Ca 量)对 Sr<sup>90</sup> 吸收积累的影响。不同硬度的培养液的配方如下: (1)极软水; 朱氏 10 号培养液(含 1.3 毫克当量 Ca); (2)软水; 朱氏 10 号培养液 + 3 毫克当量 Ca; (3)适度硬水; 朱氏 10 号培养液 + 6 毫克当量 Ca; (4)硬水; 朱氏 10 号培养液 + 9 毫克当量 Ca。试液的 pH 在 6.6—6.9 之间, 试验时水温为 9—12°C。

在试验开始后 1、2、4、6 天分别取样测定(方法同前)。在取生物样品的同时从相应的容器中各取 1 毫升水样制样测量。

所有制成的样品, 都在带有铅室的钟罩形计数管下用 64 进位的定标器进行测定。测定所需延续的时间按相对标准误差小于 5% 而定, 计数效率用 Sr<sup>90</sup> 标准源加以校正。结果中所列的数据都是重复 3 次, 每次 3 个并行试验的平均数。

## 试 验 结 果

1. 水生植物对放射性物质的积累系数和去污百分率的结果表明: 5 种水生植物对 4 种放射性物质都有一定的吸收积累能力, 其积累量与单位体积中生物量<sup>3)</sup>的多少、试液中放射性比度的大小、试验延续时间的长短、生物生长的季节等有关。

1) 朱氏 10 号培养液成分: Ca(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> 0.004%; K<sub>2</sub>HPO<sub>4</sub> 0.001—0.0005%; MgSO<sub>4</sub> · 7H<sub>2</sub>O 0.0025%; Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> 0.002%; NaSiO<sub>3</sub> 0.0025%; FeCl<sub>3</sub> 0.0008%; H<sub>2</sub>O 1000 毫升。

2) 放射性比度: 1 克干物质或 1 毫升水在每分钟内的脉冲数。

3) 生物量: 本文所提到的生物量, 都以单位体积中干物质计算。

凤眼莲、金鱼藻、紫背浮萍对  $\text{Y}^{91}$  的积累系数和去污百分率在试验结束时(8天)都未达到平衡,此时,凤眼莲(指根+茎叶,下同)对  $\text{Y}^{91}$  的积累系数比另外两种材料几乎高一倍(图1)。

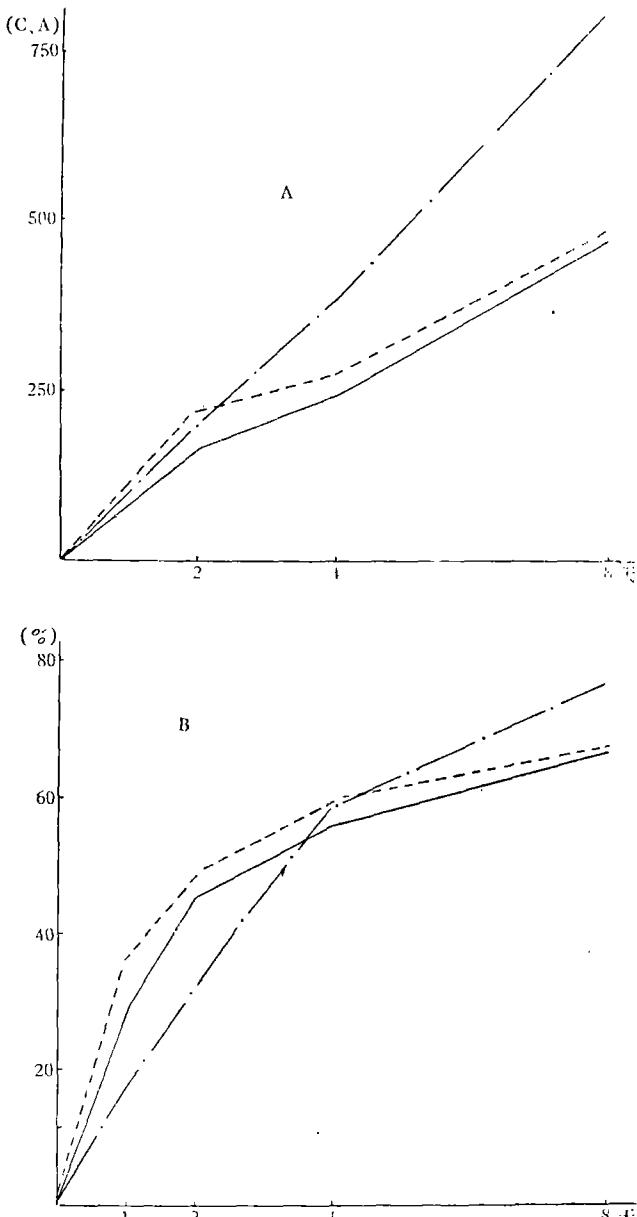


图1 三种水生植物对  $\text{Y}^{91}$  吸收积累  
A. 积累系数 (C/A); B. 去污率(%)。  
— 凤眼莲 ——— 金鱼藻 —— 紫背浮萍

金鱼藻、紫背浮萍、水绵对  $\text{Ce}^{144}$  的清除情况基本上是相似的。试验开始后的第一天,去污率为 50% 左右,第二天为 70% 左右,第四天已达到动态平衡,其去污率达 80%

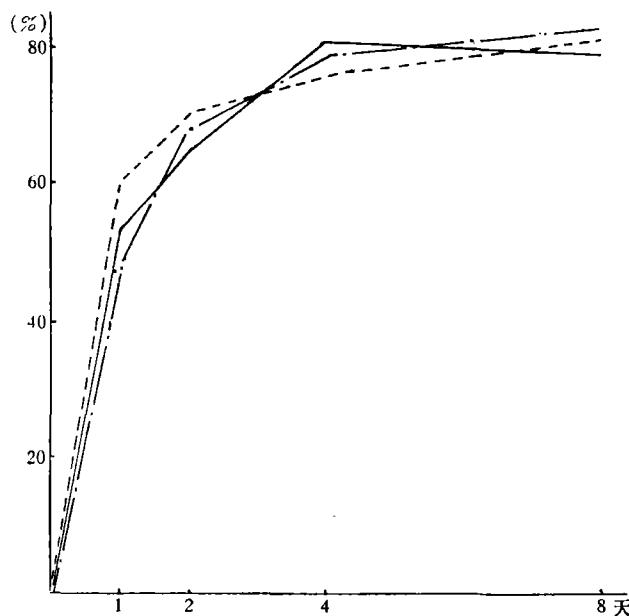


图 2 三种水生植物对  $Cs^{137}$  去污率(%)  
 ——·— 凤眼莲 —··— 金鱼藻 ——— 紫背浮萍

(图 2)。

金鱼藻、凤眼莲对  $Cs^{137}$  的去污率在头两天内，吸收的速度较快，积累的量也较大，随后近于动态平衡，去污率稳定在 50% 左右，金鱼藻在第八天时虽有所增加，但幅度不大

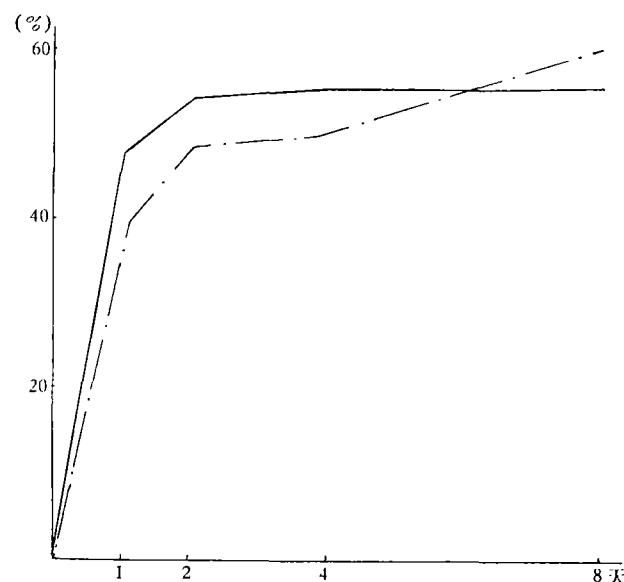


图 3 两种水生植物对  $Cs^{137}$  去污率(%)  
 ——·— 金鱼藻 —··— 凤眼莲

(图3)。

金鱼藻对试验中所用的4种放射性物质都有一定的吸收积累能力,但积累的量不等。以试验开始后的第八天为例,其积累系数大小的顺序为:  $\text{Ce}^{144}$ (1,500)> $\text{Sr}^{90}$ (1,220)> $\text{Y}^{91}$ (480)> $\text{Cs}^{137}$ (160)。去污率的高低与其积累系数的大小呈现出相应的关系(图4)。

5种水生植物对 $\text{Sr}^{90}$ 的吸收积累结果表明:水生植物的种类不同对 $\text{Sr}^{90}$ 吸收积累的能力也不同,试验到第八天时积累系数的大小顺序为:紫背浮萍(1,380)>金鱼藻(1,220)>水绵(820)>水网藻(460)>凤眼莲(380)。其去污率的大小基本上与积累系数的大小顺序相同(图5)。

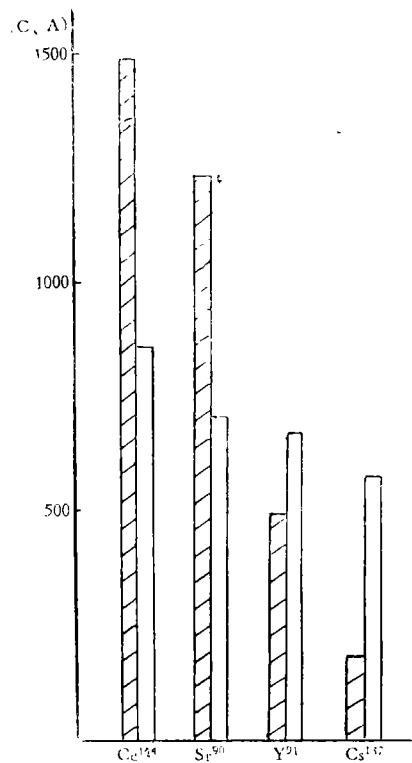
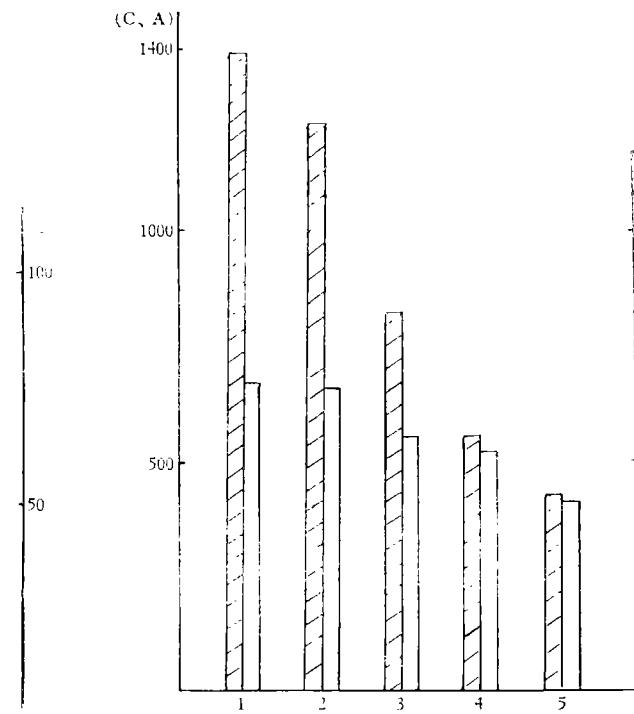


图4 金鱼藻对 $\text{Ce}^{144}$ 、 $\text{Sr}^{90}$ 、 $\text{Y}^{91}$ 、 $\text{Cs}^{137}$ 的积累系数(C,A)和去污率(%)比较

■ 积累系数  
□ 去污率



1.紫背浮萍; 2.金鱼藻; 3.水绵; 4.水网藻; 5.凤眼莲。

■ 积累系数  
□ 去污率

在试验中还观察到:同一种水生植物的不同器官对同一种放射性物质的积累能力亦不一样,如 $\text{Y}^{91}$ 、 $\text{Cs}^{137}$ 在凤眼莲的根和茎叶中的积累量就有很大差别:根内比茎叶内所积累的量约高14—17倍。这可能与其须根有较大的吸附表面有关。

在试验中我们还观察到,同一种水生植物生长季节不同,对同一种放射性物质的积累能力不同,如夏季的金鱼藻对 $\text{Sr}^{90}$ 的积累系数比冬季的金鱼藻约高0.7倍。

当试液的放射性比度相同时,由于单位体积中加入的生物量不等,其去污率亦不等。我们观察到生物去污率的高低与所加入的生物量的多少成正相关,如水网藻对 $\text{Sr}^{90}$ 的去污率与所加入的生物量的关系即是如此(表1)。

表 1 水网藻对 Sr<sup>90</sup> 去污率与生物量之间的关系

放射性比度	$1.6 \times 10^{-6}$ 居里 / 升							
	0.5	2	4	8	0.5	2	4	8
天 数	130	139	153	181	151	164	200	235
生物量(毫克)	13.9	22.4	31.3	45.2	22.4	28.3	38.1	51.8
去污率								

当向各组试液中加入的生物量相近时,生物的去污率则与该试液中放射性比度有关。我们发现,放射性比度较高的试液,其生物的去污率相应地也较高,反之亦然。如水绵对 Sr<sup>90</sup> 的去污率即是如此(表 2)。

表 2 水绵对 Sr<sup>90</sup> 的去污率与 Sr<sup>90</sup> 放射性比度的关系

放射性比度	$0.9 \times 10^{-6}$ 居里/升				$1.9 \times 10^{-6}$ 居里/升			
	0.5	2	4	8	0.5	2	4	8
天 数	257	216	242	248	259	242	247	256
生物量(毫克)	19.5	23.7	27.4	30.5	39.2	48.3	61.4	68.2
去污率								

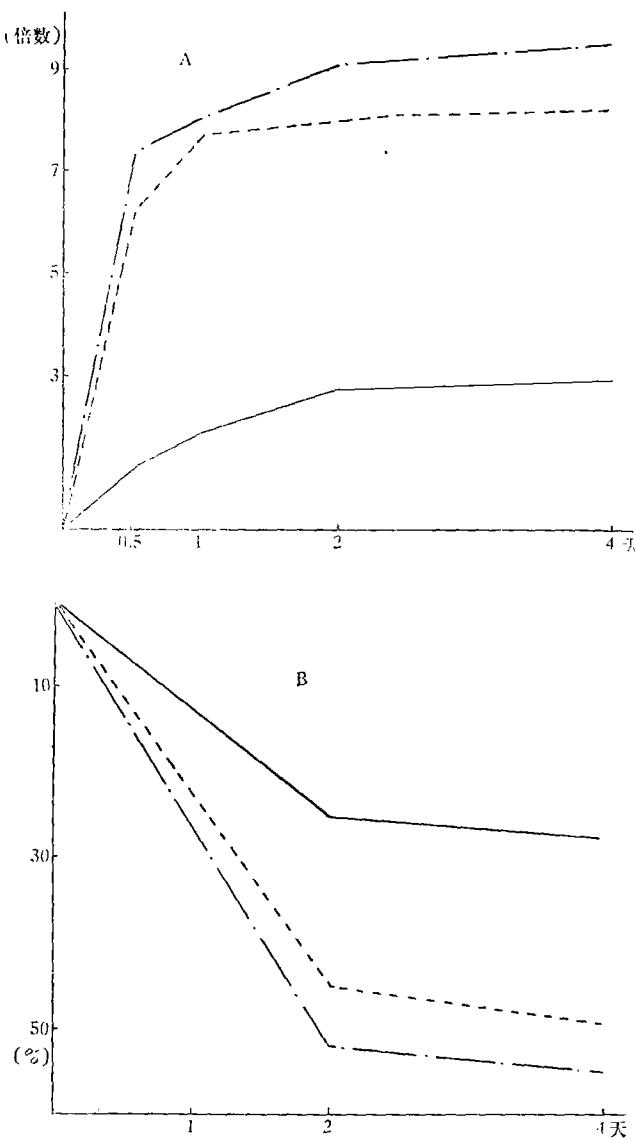
2. 水生植物对 Sr<sup>90</sup> 吸收积累后的释放试验表明: 水生植物不仅具有从其环境中吸收放射性物质的能力, 同时还能向环境中释放原积累的放射性物质, 释放的量和释放的速度随生物种类而异。金鱼藻、紫背浮萍在释放试验开始后的第二天即释放出体内原积累量的 50% 左右, 第四天已接近动态平衡; 水绵第二天约释放出原体内积累量的 20% 左右, 随后也就稳定在这一水平上。相应地, 从其试液中放射性比度增加的情况看, 金鱼藻的试液在 0.5 天时放射性比度为平衡时(第四天)试液放射性比度的 81.7%; 紫背浮萍在 0.5 天时试液的放射性比度为平衡时(第四天)试液放射性比度的 83.3%; 水绵在 0.5 天时试液放射性比度则为平衡时(第二天)试液放射性比度的 42.5%。由此可见, 水绵释放 Sr<sup>90</sup> 的量比另外两种材料约低 1 倍(图 6)。

3. 硬度对金鱼藻吸收积累 Sr<sup>90</sup> 的影响表明: 试液中含 Ca 量的不同, 对金鱼藻吸收积累 Sr<sup>90</sup> 的影响也不同。在极软水、软水、适度硬水三组中, 金鱼藻吸收积累 Sr<sup>90</sup> 的量与试液中含 Ca 量成负相关, 硬水组则与适度硬水组的结果比较接近。各组的去污率分别为: 极软水为 48%; 软水为 29%; 适度硬水为 22%; 硬水为 17%(图 7)。

## 讨 论

1. 用金鱼藻在夏季做试验比在冬季做试验积累系数约高 0.7 倍, 看来, 积累的能力与环境温度的高低有直接关系。温度的高低影响到植物体代谢率的高低, 而代谢率的高低又影响到植物体对其环境中矿物质的吸收与积累。因此, 金鱼藻在夏季对 Sr<sup>90</sup> 的积累系数较高, 是因为金鱼藻在夏季的代谢率较高的关系。

2. 金鱼藻、紫背浮萍、水绵对所吸收的 Sr<sup>90</sup> 都有一定的释放能力, 但释放的量不等。如金鱼藻、紫背浮萍在释放试验开始后的第二天释放出原积累量的 50% 左右, 而水绵第二天只释放出 20% 左右。由此可见, 水绵释放的量比另外两种材料约低 1 倍, 这可能与水绵体表有一层胶质有关。由于胶质对 Sr<sup>90</sup> 有较大的吸附力, 故其解吸附的量也就较小。金鱼藻、

图 6 三种水生植物对 Sr<sup>90</sup> 的积累和释放

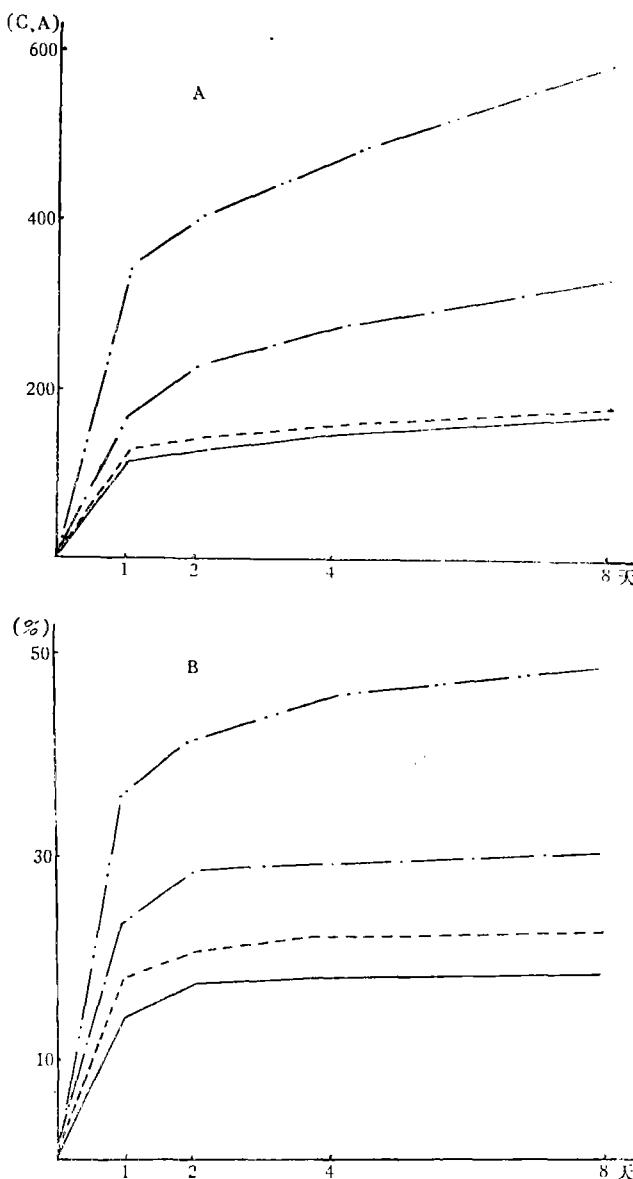
A. 释放时水中放射性比强增加的倍数;

B. 释放时材料中放射性比强下降百分率。

—, —金鱼藻; - - -, 紫背浮萍; - · - , 水绵。

紫背浮萍对 Sr<sup>90</sup> 释放速度如此之快, 释放的量又这样大, 这用植物本身正常的生理作用——矿物质代谢的周期是无法解释的, 只能用它们对 Sr<sup>90</sup> 有较大的解吸附作用来说明。

3. 由于 Ca 和 Sr<sup>90</sup> 是同族元素, 生物对其吸收无选择性, 因此, Ca 含量高的水体, 势必影响生物对 Sr<sup>90</sup> 的吸收积累。用金鱼藻做试验的结果表明: 金鱼藻在含有 6 毫克当量 Ca 以下的试液中, 对 Sr<sup>90</sup> 的积累量与试液中含 Ca 量成负相关, 超过 6 毫克当量时, 对金鱼藻吸收积累 Sr<sup>90</sup> 无明显影响。这就是说, 当水体中含有 6 毫克当量 Ca 时, 已达到吸收积累 Ca 或 Sr<sup>90</sup> 的饱和值。此时再增加 Ca 或 Sr<sup>90</sup> 的量, 则对生物的矿物质代谢没有什么影响。

图 7 不同硬度对金鱼藻吸收积累 Sr<sup>90</sup> 的影响

A. 积累系数； B. 去污率。

———极软水； ———软水； - - - 适度软水； ——硬水。

4.  $\text{Y}^{91}$  在凤眼莲、金鱼藻和紫背浮萍的试验中，经过 8 天都未达到动态平衡。 $\text{Ce}^{144}$  在金鱼藻、紫背浮萍，水绵的试验中，第 4 天即达到动态平衡。国外的某些报道<sup>[2,3]</sup>也有类似的情况。如  $\text{Y}^{91}$  在囊叶藻 (*Cystoseira warbata*) 中，在试验的第 6 天达到动态平衡， $\text{Ce}^{144}$ 、 $\text{Cs}^{137}$  在第 4 天达到动态平衡。可是， $\text{Y}^{91}$ 、 $\text{Ce}^{144}$ 、 $\text{Cs}^{137}$  在带草蕨 (*Zostera marina L.*) 中则在试验开始后的第 2 天就达到动态平衡。由此可见，动态平衡的因素不仅取决于放射性物质的种类，而且也取决于生物的种类。也就是说，不同种类的水生植物对不同种类的放射性物质有着不同的吸收积累能力<sup>[4-10]</sup>。

5. 从我们的试验中还可以看出，水生植物对放射性物质的去污率一般比物理、化学因子的去污率低<sup>1)</sup>，但是，从对自然界大面积水体中低活性的放射物质清除来说，利用某些生长快、产量高、易于捞取的水生植物作清除材料是有一定的实际意义的。

6. 由图4看出， $\text{Y}^{91}$ 、 $\text{Cs}^{137}$ 的积累系数较 $\text{Ce}^{144}$ 、 $\text{Sr}^{90}$ 低得多，而去污率则与它们差别不大。这种现象与这两组的培养器中残渣较多因而吸附了试液中一部分 $\text{Y}^{91}$ 、 $\text{Cs}^{137}$ 有关。

## 小 结

1. 本试验所用的几种水生植物对放射性物质都有一定的吸收积累作用，但同一种水生植物对不同种类的放射性物质吸收积累的量不等，如金鱼藻对 $\text{Ce}^{144}$ 的积累系数为1,500；对 $\text{Sr}^{90}$ 的积累系数为1,220；对 $\text{Y}^{91}$ 的积累系数为480；对 $\text{Cs}^{137}$ 的积累系数为160。它们到达动态平衡的时间也不完全相同。

2. 不同种类的水生植物对不同的放射性物质有不同的去污率，如金鱼藻、紫背浮萍、水绵对 $\text{Ce}^{144}$ 的去污率高达80%；而金鱼藻、凤眼莲对 $\text{Cs}^{137}$ 的去污率则稳定在50%左右。

3. 水生植物有积累环境中放射性物质的能力，也有向其环境中释放出原积累的一部分放射性物质的特性。如金鱼藻、紫背浮萍在释放试验开始后的第2天即放出50%，水绵则放出20%。

4. 试液中含Ca量在6毫克当量以上时，对水生植物吸收 $\text{Sr}^{90}$ 没有明显的影响，在6毫克当量以下时，则随着试液中含Ca量的增加而减少。如以去污率计：在极软水中为48%；在软水中为29%；在适度软水中为22%；在硬水中为17%。

5. 水生植物的积累系数和去污率与单位体积中所含生物量的多少及其试液中放射性比度的大小成正相关。

6. 同一种水生植物的不同器官，对同一种放射性物质的吸收积累能力不同；同一种水生植物生长在不同季节，对同一种放射性物质吸收积累的量也不同。

## 参 考 文 献

- [1] 朱蕙等，1964。利用水生植物清除水体中放射性物质的研究(Ⅰ)水生植物对 $\text{Sr}^{90}$ 的吸收积累和清除能力。原子能科学技术，(8):954—959。
- [2] Поликарпов, Г. Г., 1961. О накоплении осколочных радиоизотопов морскими организмами. II. Аккумуляция водорослями, актиниями и мидиями германия-71 и цезия-137 и цветковыми растениями германия-71, стронций-90, цезия-137 и церия-144. Биолог. Наука, (4): 92.
- [3] Поликарпов, Г. Г., 1961. О стабильности коэффициентов накопления стронция-90, иттрия-91, в морских водорослях. ДАН СССР, 140 (5): 1192—1194.
- [4] Глева, Э. А., 1960. О коэффициентах накопления радиоизотопов пресноводными водорослями. ДАН СССР, 132 (4): 948—949.
- [5] Куликова, Г. М., 1960. О возможности использования нитчатых водорослей для очистки радиоактивно загрязненных вод. ДАН СССР, 135 (4): 978—980.
- [6] Поликарпов, Г. Г., 1961. Роль дегритообразования в миграции стронция-90, цезия-137, и церия-144. ДАН СССР, 136 (4): 921.

1) 湖北省水生生物研究所，1971。裂变产物及几种放射性同位素污染水的简易净化研究。科学实验报告（内部资料）。

- [7] Поликарпов, Г. Г., 1960. О накоплении осколочных радиоизотопов морскими организмами. I. Аккумуляция бентосными растениями и животными с军团ия-90, иттрия-91, и церия-144. *Биолог. Наука*, (3): 97.
- [8] Гилева, Э. А., 1961. О специфических накопителях отдельных радиоизотопов среди пресноводных организмов. *ДАН СССР*, **140** (6): 1437—1440.
- [9] Тимофеева-Ресовская, Е. А., Тимофеев-Ресовский, Н. В., Гепова, А. Б., 1960. О коэффициентах накопления радиоизотопов стронция, рутения, цезия, церия, пресноводными организмами. *Зоол. Журн.*, **39**(10): 1449.
- [10] Тимофеев-Ресовский, Н. В., Тимофеева-Ресовская, Е. А., Милютинна, Т. А., 1960. Коэффициенты накопления пресноводными организмами радиоактивных изотопов 16 различных элементов и влияние комплекса ЭДТА на некоторые из них. *ДАН СССР*, **132** (5): 1191.

## STUDIES ON THE UTILIZATION OF AQUATIC PLANTS FOR REMOVING RADIOACTIVE MATERIALS FROM WATER BODY (III) THE ACCUMULATION AND RELEASE OF $\text{Sr}^{90}$ , $\text{Y}^{91}$ , $\text{Cs}^{137}$ AND $\text{Ce}^{144}$ BY AQUATIC PLANTS AND THE EFFECT OF Ca ON THE ACCUMULATION OF $\text{Sr}^{90}$

Zhu Huai, Liang Shaochang, Zou Yongxing, Lan Zongzhi and Chen Minyong

(*Institute of Hydrobiology, Academia Sinica*)

### Abstract

*Spirogyra* sp., *Hydrodictyon reticulatum* (L.) Lager, *Spirodela polyrhiza* (L.) Schleid., *Ceratophyllum demersum* L., and *Eichhornia crassipes* Sohms, all have certain ability of absorbing and accumulating  $\text{Sr}^{90}$ ,  $\text{Y}^{91}$ ,  $\text{Cs}^{137}$  and  $\text{Ce}^{144}$ .

The coefficient of accumulation and percentage of clearance are negatively related with the concentration of the stable calcium in the water, but positively with the duration of the experiment.

The same species of aquatic plant have different coefficients of accumulation for different kinds of radioactive materials. For instance, on the eighth days, the coefficient of accumulation by *Ceratophyllum demersum* was:  $\text{Ce}^{144}$ —1500,  $\text{Sr}^{90}$ —1220,  $\text{Y}^{91}$ —480,  $\text{Cs}^{137}$ —160. Different species of aquatic plants have different ability to absorb and accumulate the same kind of radioactive material. Thus, the coefficient of accumulation of  $\text{Sr}^{90}$  on the eighth days was: *Spirodela polyrhiza*—1380, *Ceratophyllum demersum*—1220, *Spirogyra* sp.—820, *Hydrodictyon reticulatum*—460, *Eichhornia crassipes*—380.

Inasmuch as aquatic plants can accumulate radioactive materials, the use of aquatic plants to purify the water polluted by  $\text{Sr}^{90}$ ,  $\text{Y}^{91}$ ,  $\text{Cs}^{137}$ ,  $\text{Ce}^{144}$ , etc. has its significance not only in theory but also in practice.