

金鱼藻对 $^{14}\text{CO}_2$ 的吸收和积累动态

史建君

(浙江理工大学理学院, 杭州 310018)

摘要:为了探明 $^{14}\text{CO}_2$ (^{14}C) 在环境中的行为, 采用同位素示踪技术研究了金鱼藻对 $^{14}\text{CO}_2$ 的吸收和积累动态, 并探讨了金鱼藻作为监测大气 $^{14}\text{CO}_2$ 污染指示植物的可能性. 结果表明, 生长在水中的金鱼藻会通过某些途径吸收空气中 $^{14}\text{CO}_2$ 并形成积累趋势, 吸收途径主要是金鱼藻通过光合作用从水体中吸收游离 $^{14}\text{CO}_2$ 和 $\text{H}^{14}\text{CO}_3^-$. 金鱼藻(干样) ^{14}C 比活度的增长速率介于 $91.9 \sim 95.6 \text{ Bq}/(\text{g} \cdot \text{d})$ 范围内, 鲜样介于 $6.1 \sim 6.3 \text{ Bq}/(\text{g} \cdot \text{d})$ 范围内, 与小麦的增长速率基本相当, 表明金鱼藻通过水体间接吸收利用空气中 $^{14}\text{CO}_2$ 的能力较强. 金鱼藻对 $^{14}\text{CO}_2$ 具有一定的富集作用, 富集系数随 $^{14}\text{CO}_2$ 引入而上升, 达到峰值后呈缓慢下降, 积累效应明显. 金鱼藻对空气中 $^{14}\text{CO}_2$ 的富集特性使其可用来作为监测大气 $^{14}\text{CO}_2$ 污染的指示作物.

关键词: 金鱼藻; $^{14}\text{CO}_2$; 吸收; 积累; 指示作物

中图分类号: X591 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2011)02-0479-04

Uptake $^{14}\text{CO}_2$ from Air and Accumulation of ^{14}C in Hornwort

SHI Jian-jun

(Institute of Science, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: Uptake $^{14}\text{CO}_2$ from air and accumulation of ^{14}C in the hornwort were studied by using the isotope-tracer techniques in order to get a better understanding of the environmental behavior of $^{14}\text{CO}_2$. And the possibility of hornwort used as the indicator plant in the supervisor of $^{14}\text{CO}_2$ air pollution was discussed. The results show that the hornwort could uptake $^{14}\text{CO}_2$ from the air by some way and formed an accumulating trend. The main way was that the hornwort absorbed free $^{14}\text{CO}_2$ and $\text{H}^{14}\text{CO}_3^-$ from the water through photosynthesis. During the introducing $^{14}\text{CO}_2$, the increasing rate of ^{14}C specific activity in dry hornwort and fresh hornwort were between $91.9 \sim 95.6 \text{ Bq}/(\text{g} \cdot \text{d})$ and $6.1 \sim 6.3 \text{ Bq}/(\text{g} \cdot \text{d})$, respectively, which was roughly equal to the increasing rate in the wheat. The results indicate that the hornwort had strong ability of absorbing $^{14}\text{CO}_2$ indirectly through water. The hornwort has an certain concentration of $^{14}\text{CO}_2$. And the concentration factor (CF) values rise with the introduction of $^{14}\text{CO}_2$ and decline slowly after it reached the maximum value. Owing to its accumulation of $^{14}\text{CO}_2$, hornwort can be used as the indicator plant in the supervisor of $^{14}\text{CO}_2$ air pollution.

Key words: hornwort; $^{14}\text{CO}_2$; uptake; accumulation; indicator plant

^{14}C 是核电站的主要放射性气态流出物, 是最受关注的核素之一, 核电站运行中释放的 ^{14}C 主要以气载排放物进入环境. 据南京大学戴开美等^[1]的研究报道: 距秦山核电站 4 km 范围内 1995 年生长的树叶中 ^{14}C 含量比距秦山 5.3 km 处高 0.9%, 比南京浦口地区高 3.5%, 比美国 Tuscon 地区高 1.1%, 核电站的运行可能会引起地域性 ^{14}C 的增加. 与核电站排放的其它放射性核素相比, ^{14}C 与环境的相互作用很特殊, 它的稳态形式在人体、食物和饮水中构成了其核素非常大的份额(植物干物质中的 C 含量约占 45%), 且半衰期很长(5730a), 以 $^{14}\text{CO}_2$ 形态存在的 ^{14}C 将和空气中的非放射性 CO_2 混合, 参与植物的光合作用; 部分以气溶胶形式存在的 ^{14}C 将因沉降作用进入地表和水体, 通过陆生植物和水生植物的摄取和吸收而进入食物链, 危害环境和人类健康^[2].

有关核电站排放的其它放射性核素 ^{137}Cs 、 ^{90}Sr 、 ^{95}Zr 、 ^3H 等在生态系统中的消长行为和特性研究报道较多^[3~9]. 但有关 ^{14}C 在生态系统中的行为特性研究鲜见报道^[10~12], 关于金鱼藻对 ^{14}C 的吸收积累研究也鲜见报道^[10]. 为了探明生态环境中 $^{14}\text{CO}_2$ 的行为特性, 本实验应用核素示踪技术研究了金鱼藻对 $^{14}\text{CO}_2$ 的吸收和积累动态, 并探讨了金鱼藻作为监测大气 $^{14}\text{CO}_2$ 污染指示植物的可能性, 以期科学评定水生植物对 $^{14}\text{CO}_2$ 的吸收、积累状况提供基础数据, 为制定适合我国国情的标准、法规提供依据, 同时也为监测大气 $^{14}\text{CO}_2$ 污染提供新的可能的方法和途径.

收稿日期: 2010-02-26; 修订日期: 2010-07-02

基金项目: 国家自然科学基金项目(20477040); 浙江省自然科学基金项目(Y505076)

作者简介: 史建君(1961~), 男, 教授, 主要研究方向环境科学和同位素示踪, E-mail: jishi61@sohu.com

1 材料与方法

1.1 同位素、玻璃鱼缸、污染实验箱罩和金鱼藻

$\text{NaH}^{14}\text{CO}_3$ 购自中国原子能研究院同位素研究所, 放化纯度 $> 95\%$, ^{14}C 比活度为 3.7×10^6 Bq/mL, 使用前按比例 (质量比 $1:1.05 \times 10^5$) 配成浓度为 0.84 mol/L 的 $\text{NaH}^{14}\text{CO}_3 + \text{NaHCO}_3$ 混合液备用, 混合液的 ^{14}C 比活度为 1.85×10^7 Bq/L. 玻璃鱼缸由 5 mm 玻璃制成, 尺寸为 $50 \text{ cm} \times 40 \text{ cm} \times 40 \text{ cm}$. 污染实验箱罩 ($80 \text{ cm} \times 85 \text{ cm} \times 70 \text{ cm}$) 由透明有机玻璃制成, 内置微型风扇和二氧化碳发生器, 顶部设置 4 个 $10 \text{ cm} \times 10 \text{ cm}$ 的采样口. 金鱼藻由浙江大学华家池校区实验农场提供.

1.2 实验方法

将 4 只 $50 \text{ cm} \times 40 \text{ cm} \times 40 \text{ cm}$ 的玻璃鱼缸分 2 组放在 2 只水泥池上, 每池 2 只, 每只玻璃鱼缸各加水 50 L (水的 pH 值约为 6.5), 每缸放养金鱼藻 140 g, 将 2 只污染实验箱罩分别罩在 2 只水泥池上, 用土壤填充密封箱体与水泥池的接口部位, 并命名为 A、B 箱. 实验分一次引入和两次引入 2 种情况, A 箱引入一次 $^{14}\text{CO}_2$ B 箱于第 7 d 采样后再引入 1 次, B 箱共引入 2 次. $^{14}\text{CO}_2$ 引入方法为: 取 $\text{NaH}^{14}\text{CO}_3 + \text{NaHCO}_3$ 混合液 4.00 mL 与浓度为 0.37 mol/L 的 HClO_4 溶液 10 mL (适度过量) 在箱体内置二氧化碳发生器中反应产生 $^{14}\text{CO}_2 + \text{CO}_2$ 混合气体, 同时开启微型风扇使之均匀扩散. 初次引入后污染实验箱内的 CO_2 浓度约为 0.06% , ^{14}C 比活度约为 155.4 Bq/L .

1.3 采样与氧化燃烧法制样

一次引入的污染实验箱于 $^{14}\text{CO}_2$ 引入后第 1、3、7、14、21、28 和 35 d 取样, 两次引入的实验箱

于初次引入 $^{14}\text{CO}_2$ 后第 14、21、28、35、42、49 和 56 d 取样, 每一玻璃鱼缸随机采取金鱼藻约 20 g, 用清水冲洗干净并用吸水纸吸干表面水, 称重后置于干燥箱中于 60°C 下烘干.

将烘干后的金鱼藻样品磨碎, 混合均匀后各称取 100 mg 放入生物氧化燃烧仪 (OX-600 型) 上燃烧 3 min (燃烧温度 850°C), 用含乙醇胺的闪烁液 (配方: PPO 5 g + POPOP 0.5 g + 乙二醇乙醚 150 mL + 乙醇胺 150 mL + 甲醇 100 mL + 二甲苯 600 mL) 收集生成的 $^{14}\text{CO}_2$, 以提取金鱼藻样品中的 ^{14}C , 氧气通量和清洗氮气通量均为 350 mL/min . 样品燃烧前接收管内装 8 mL 闪烁液, 燃烧后将其倒入测样瓶中, 并用闪烁液 2 mL 冲洗 1 次, 冲洗后的闪烁液一并加入测样瓶中.

1.4 放射性活度测量测定

用 Wallac 1400 DSA 液闪仪测定上述液闪样品的放射性活度, 测量误差控制在 5% 以内. 测量结果经相应的燃烧回收效率校正和扣除本底后, 换算成样品的干样 (或鲜样) 比活度.

2 结果与讨论

2.1 金鱼藻对 $^{14}\text{CO}_2$ 吸收和积累动态

表 1 数据显示, 在金鱼藻中检测到了 ^{14}C 的存在, 表明生长在水中的金鱼藻会通过某些途径吸收空气中 $^{14}\text{CO}_2$ 并形成积累趋势. 根据有关研究, 影响光合作用所需的无机碳源 (水体中), 除游离 CO_2 外, 还以 HCO_3^- 、 CO_3^{2-} 等形式存在, 金鱼藻的光合作用主要利用游离 CO_2 作为碳源, 也能低效利用 HCO_3^- , 而水体中无机碳源的存在形式主要受水体 pH 的影响, 在偏酸性或中性的水中, CO_2 主要以游离 CO_2 或 HCO_3^- 形式存在^[13,14]. 本实验的水体 pH

表 1 ^{14}C 在金鱼藻中的积累动态
Table 1 Accumulation of ^{14}C in hornwort

取样时间/d	一次引入 $^{14}\text{CO}_2$ 时		二次引入 $^{14}\text{CO}_2$ 时	
	干样/Bq·g ⁻¹	鲜样/Bq·g ⁻¹	干样/Bq·g ⁻¹	鲜样/Bq·g ⁻¹
0	0	0	0	0
1	149.6 ± 7.3	10.2 ± 0.5	149.6 ± 7.3	10.2 ± 0.5
3	370.8 ± 36.8	23.7 ± 2.3	370.8 ± 36.8	23.7 ± 2.3
7	625.9 ± 30.0	41.7 ± 2.0	625.9 ± 30.0	41.7 ± 2.0
14	605.5 ± 26.5	38.9 ± 1.7	1 271.5 ± 47.7	85.3 ± 3.2
21	466.0 ± 45.3	32.9 ± 3.2	1 091.4 ± 56.6	73.2 ± 3.8
28	389.4 ± 25.8	27.2 ± 1.8	821.8 ± 38.6	57.5 ± 2.7
35	355.8 ± 39.2	24.5 ± 2.7	641.2 ± 25.6	44.2 ± 1.8
42	—	—	435.3 ± 21.0	30.2 ± 1.5
49	—	—	398.4 ± 18.3	27.3 ± 1.3
56	—	—	385.3 ± 20.2	25.7 ± 1.3

= 6.5,属偏酸性水体.空气中的¹⁴CO₂进入水体形成游离¹⁴CO₂和H¹⁴CO₃⁻,金鱼藻通过光合作用从水体中吸收游离¹⁴CO₂和H¹⁴CO₃⁻并在组织中积累.检测到的¹⁴C比活度数值较大,表明空气中的¹⁴CO₂易于通过水体进入金鱼藻组织中.

一次引入¹⁴CO₂时,金鱼藻(干样)中¹⁴C比活度随时间呈逐渐上升,于第7 d达最大值(625.9 Bq/g)后随时间而缓慢下降,于28 d后处于动态平衡.其原因是,在初始阶段空气中的¹⁴CO₂浓度较高使得进入水体形成游离¹⁴CO₂和H¹⁴CO₃⁻的量较多,金鱼藻吸收利用游离¹⁴CO₂和H¹⁴CO₃⁻产生的含¹⁴C同化产物较多,致使金鱼藻组织中的¹⁴C比活度较快上升;而后随着光合作用的进行,空气中的¹⁴CO₂浓度逐渐降低,进入水体形成游离¹⁴CO₂和H¹⁴CO₃⁻的量减少,通过光合作用进入组织的¹⁴C减少,造成其上升速率趋缓,与此同时金鱼藻在不断生长,形成生物稀释,当生物稀释速度大于金鱼藻吸收利用游离¹⁴CO₂和H¹⁴CO₃⁻的速度时,金鱼藻中¹⁴C比活度就会随时间而下降,当2个速度均衡时,金鱼藻中¹⁴C比活度则处于动态平衡.在本实验进行期间,0~7 d生物稀释速度小于金鱼藻吸收利用游离¹⁴CO₂和H¹⁴CO₃⁻的速度,因此表现出金鱼藻中的¹⁴C比活度随时间而逐渐上升,7~14 d生物稀释速度与金鱼藻吸收利用游离¹⁴CO₂和H¹⁴CO₃⁻的速度相当,表现出¹⁴C比活度平缓变化,14~28 d生物稀释速度大于金鱼藻吸收利用游离¹⁴CO₂和H¹⁴CO₃⁻的速度,表现出¹⁴C比活度随时间而下降,28 d以后2个速度趋于相当,因此¹⁴C比活度处于动态平衡.金鱼藻(鲜样)的¹⁴C比活度的吸收和积累动态与的干样的动态变化基本一致.

二次引入¹⁴CO₂时,金鱼藻(干样)中¹⁴C比活度变化趋势与一次引入时相似,所不同的是达最大值(1 071.5 Bq/g)的时间为14 d,较一次引入时长,其原因是:第一次引入的¹⁴CO₂经7 d吸收利用,空气中的¹⁴CO₂浓度已经较低,金鱼藻吸收利用游离¹⁴CO₂和H¹⁴CO₃⁻的速度将趋向小于生物稀释速度,二次引入增加了空气中¹⁴CO₂的浓度,致使金鱼藻吸收利用游离¹⁴CO₂和H¹⁴CO₃⁻的速度又大于生物稀释速度,因而延长了上升期,二次引入的积累效应十分明显.14~21 d为平缓变化期,21~42 d为下降期,42 d后处于动态平衡.鲜样的¹⁴C比活度变化动态与的干样基本一致.

采用分段拟合方法^[12],对实验数据进行线性回

归分析表明:一次引入(0~7 d)、二次引入(0~14 d)金鱼藻中¹⁴C比活度(*C*)与时间(*t*)间呈线性正相关,拟合如下:

一次引入(干样): $C = 95.6t \quad r^2 = 0.9469$;增长速率为95.6 Bq/(g·d).

一次引入(鲜样): $C = 6.3t \quad r^2 = 0.9549$;增长速率为6.3 Bq/(g·d).

二次引入(干样): $C = 91.9t \quad r^2 = 0.9871$;增长速率为91.9 Bq/(g·d).

二次引入(鲜样): $C = 6.1t \quad r^2 = 0.9897$;增长速率为6.1 Bq/(g·d).

金鱼藻(干样)¹⁴C比活度的增长速率介于91.9~95.6 Bq/(g·d)范围内,鲜样介于6.1~6.3 Bq/(g·d)范围内.根据有关报道,小麦根、茎、叶组织¹⁴C比活度的增长速率介于50.3~84.6 Bq/(g·d)范围内,鲜样介于6.9~14.3 Bq/(g·d)范围内^[12],与小麦相比,金鱼藻(干样)¹⁴C比活度的增长速率大于小麦,而鲜样的增长速率又小于小麦,造成这一现象的原因是小麦单位鲜重的干物质含量(根为15.4%;茎为17.8%;叶为13.7%;穗为21.3%)较金鱼藻(约7%)大,综合分析比较,二者的增长速率基本相当,表明金鱼藻通过水体间接吸收利用空气中¹⁴CO₂的能力较强(与小麦相当).

2.2 金鱼藻对¹⁴CO₂的富集系数(CF值)

¹⁴C的生物学特性与普通碳类似,被生物体吸收后与普通碳一样参与了生物的新陈代谢过程,引入¹⁴CO₂3 d后金鱼藻对来源于空气中¹⁴CO₂的¹⁴C的富集系数(concentration factor, CF)^[12]均大于1(表2),表明金鱼藻对¹⁴CO₂(¹⁴C)具有一定的富集

表2 金鱼藻对 ¹⁴ CO ₂ 的富集系数(CF值) ¹⁾		
Table 2 Concentration factor values of ¹⁴ C in hornwort		
时间/d	一次引入 ¹⁴ CO ₂ 时	二次引入 ¹⁴ CO ₂ 时
3	2.39	2.39
7	4.03	4.03
14	3.90	8.18
21	3.00	7.02
28	2.51	5.29
35	2.29	4.13
42	—	2.80
49	—	2.56
56	—	2.48

1)富集系数(CF值)=生物体中的¹⁴C比活度(Bq/g)/空气中¹⁴CO₂比活度(Bq/L)

作用,金鱼藻的富集系数随 $^{14}\text{CO}_2$ 引入而上升,达到峰值后呈缓慢下降,积累效应明显. 金鱼藻对空气中 $^{14}\text{CO}_2$ 的富集特性使其可用来作为监测大气 $^{14}\text{CO}_2$ 污染的指示作物. 与金鱼藻对 $^{14}\text{CO}_2$ 沉降态 $^{14}\text{CO}_3^{2-}$ 离子的富集系数相比^[10],金鱼藻对 $^{14}\text{CO}_2$ 的富集系数小于对 $^{14}\text{CO}_3^{2-}$ 离子的富集系数,其原因是二者的吸收富集机制不同.

3 结论

(1)生长在水中的金鱼藻会通过某些途径吸收空气中 $^{14}\text{CO}_2$ 并形成积累趋势,吸收途径主要是金鱼藻通过光合作用从水体中吸收游离 $^{14}\text{CO}_2$ 和 $\text{H}^{14}\text{CO}_3^-$. 金鱼藻(干样) ^{14}C 比活度的增长速率介于 $91.9 \sim 95.6 \text{ Bq}/(\text{g}\cdot\text{d})$ 范围内,鲜样介于 $6.1 \sim 6.3 \text{ Bq}/(\text{g}\cdot\text{d})$ 范围内,与小麦的增长速率基本相当,表明金鱼藻通过水体间接吸收利用空气中 $^{14}\text{CO}_2$ 的能力较强.

(2)金鱼藻对 $^{14}\text{CO}_2$ (^{14}C) 具有一定的富集作用,富集系数随 $^{14}\text{CO}_2$ 引入而上升,达到峰值后呈缓慢下降,积累效应明显. 金鱼藻对空气中 $^{14}\text{CO}_2$ 的富集特性使其可用来作为监测大气 $^{14}\text{CO}_2$ 污染的指示作物.

参考文献:

- [1] 戴开美, Christopher J E, Austin L, 等. 核电站附近大气中过量的放射性碳[J]. 中国学术期刊文摘, 1998, **9**:1103-1104.
- [2] 邹剑明, 杨浩贤, 梁绵英. 大亚湾核电站周围居民恶性肿瘤死亡分析(1993 ~ 1997 年) [J]. 中国职业医学, 2004, **31** (2): 6-9.
- [3] Topcuoglu S. Bioaccumulation of cesium-137 by biota in different aquatic environments [J]. Chemosphere, 2001, **44** (4): 691-695.
- [4] Bystrzejewska-Piotrowska G, Urban P L. Accumulation and translocation of cesium-137 in onion plants (*Allium cepa*) [J]. Environmental and Experimental Botany, 2004, **51** (1): 3-7.
- [5] Golikov V, Logacheva I, Bruk G, et al. Modelling of long-term behaviour of cesium and strontium radionuclides in the Arctic environment and human exposure [J]. Journal of Environmental Radioactivity, 2004, **74** (1-3): 159-169.
- [6] Liu L L, Shi J J, Zhao X Y, et al. Dynamics of transfer and distribution of ^{95}Zr in the broadbean-soil ecosystem [J]. Journal of Environmental Radioactivity, 2005, **80**: 217-233.
- [7] Shi J J, Guo J F. Uptake from soil and distribution of ^{95}Zr in *Chinese cabbage* [J]. Journal of Agricultural Science, 2002, **139**: 431-435.
- [8] McCubbin D, Leonard K S, Bailey T A, et al. Incorporation of organic tritium (^3H) by marine organisms and sediment in the Severn Estuary/Bristol Channel (UK) [J]. Marine Pollution Bulletin, 2001, **42** (10): 852-863.
- [9] Choi Y H, Lim K M, Lee W Y, et al. Tissue free water and organically bound tritium in the rice plant acutely exposed to atmospheric HTO vapor under semi-outdoor conditions [J]. Journal of Environmental Radioactivity, 2002, **58** (1): 67-85.
- [10] 孙桂莲, 史建君. ^{14}C 在水-金鱼藻系统中的消长动态 [J]. 中国环境科学, 2006, **26** (2): 219-223.
- [11] Kumblad L, Gilek M, Kautsky U, et al. An ecosystem model of the environmental transport and fate of carbon-14 in a bay of the Baltic Sea, Sweden [J]. Ecological Modelling, 2003, **166** (3): 193-210.
- [12] 林明明, 史建君, 陈晖. 小麦对 $^{14}\text{CO}_3$ 的吸收和积累动态 [J]. 中国环境科学, 2007, **27** (6): 841-844.
- [13] 刘建康. 高级水生生物学 [M]. 北京: 科学出版社, 2002. 23-24.
- [14] 陈刚, 谢田, 莫非. 光照、 NaHCO_3 和 pH 值对金鱼藻光合作用的影响 [J]. 贵州环保科技, 2004, **4**: 16-19.