

青菜(*Brassica chinesis* L.) 对碘动态吸收的同位素示踪

严爱兰,翁焕新*,洪春来,谢伶俐

(浙江大学环境与生物地球化学研究所,浙江杭州 310027)

摘要:碘是合成甲状腺激素不可缺少的元素,食物中严重缺碘可以导致人体中甲状腺功能的失调。利用同位素示踪技术研究了青菜在水培条件下对碘(^{125}I)的吸收和富集特征,并在此基础上讨论了植物对碘吸收的生物学机制。研究表明,青菜根部能迅速吸收 ^{125}I 并向地上部分输送,青菜各部位 ^{125}I 的比活度大小顺序是根>茎>叶;青菜茎对碘的吸收量白天大于夜晚,青菜叶对碘的吸收夜晚大于白天;青菜植株不同部位叶片碘含量存在差异,上部嫩叶中 ^{125}I 高于下部叶片,说明青菜中 ^{125}I 的富集特征是植物对碘主动吸收和被动吸收共同作用的结果。青菜培养时间经过 120h 后, ^{125}I 的消耗途径主要是作物的吸收和自然挥发, ^{125}I 的放射性衰变丢失的量相对较少。研究为培育含碘作物提供了科学依据。

关键词: ^{125}I ; 青菜; 同位素示踪; 吸收; IDD

文章编号:1000-0933(2006)12-4120-07 中图分类号:Q149,X171.3 文献标识码:A

Dynamic absorption of iodine-125 in Chinese cabbage (*Brassica chinesis* L.)

YAN Ai-Lan, WENG Huan-Xin*, HONG Chun-Lai, XIE Ling-Li (Institution of Environment and Biogeochemistry, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China). Acta Ecologica Sinica, 2006, 26(12): 4120~4126.

Abstract: Iodine has been long known as an indispensable element in the synthesis of thyroid hormones. Severe iodine deficiency in diet leads to iodine deficiency disorders in humans. Here we propose a new method of iodine supply by cultivating iodized crops. We studied the dynamic absorption pattern of ^{125}I by Chinese cabbage (*Brassica chinesis* L.) from liquid media, using the isotope tracer method. The results showed that ^{125}I is absorbed quickly by roots and generally transported to shoots. The iodine accumulation capacity in different tissue types ranks as root > stem > leaf. More ^{125}I was absorbed during the day than during the night in stems, but opposite in the leaves. Analysis on leaves from different nodes reveals a differential absorption pattern that ^{125}I accumulates more in the upper leaves than in the lower leaves. These results suggest that active and passive ^{125}I absorption mechanisms may coexist in liquid cultivated Chinese cabbage. After 120 hours, most of ^{125}I in the liquid media was absorbed by Chinese cabbage and some was lost through volatilization. This study provides initial scientific basis for cultivating organic iodized crops as an alternative to iodized salt to reduce iodine deficiency.

Key words: ^{125}I ; *Brassica chinesis* L.; isotope tracer; absorption; IDD

碘有“智力元素”之称,它是合成甲状腺激素不可缺少的元素,在人和动物体的新陈代谢作用过程中起着极为重要的作用^[1]。缺碘可引起地方性甲状腺肿和地方性克汀病,由于碘缺乏而对人体发育造成的全部影响被称为“碘缺乏病”(IDD, Iodine Deficiency Disease)^[2]。

根据国内外的大量调查已研究证实,目前除冰岛之外全世界所有国家都有 IDD 流行,据统计全球大约有 16 亿人受到碘缺乏的威胁^[3],我国所有省、市均有 IDD,病区人口达到 4.25 亿人,严重影响了人民生活和健康

基金项目:国家自然科学基金资助项目(40373043)

收稿日期:2005-10-23;修订日期:2006-03-24

作者简介:严爱兰(1977~),女,浙江人,博士生,主要从事环境与生物地球化学研究。E-mail:yal200@126.com

*通讯作者 Corresponding author. E-mail: gswenghx@zju.edu.cn

Foundation item: The project was financially supported by National Natural Science Foundation of China (No. 40373043)

Received date: 2005-10-23; Accepted date: 2006-03-24

Biography: YAN Ai-Lan, Ph. D. candidate, mainly engaged in environment and biogeochemistry.

以及社会的发展^[4]。

食盐加碘技术被认为是一种防治碘缺乏病较为有效的措施,但在我国缺碘地域分布广,人口多,经济还不发达的现实情况下,实行全民食盐加碘的措施存在一些不足,如食盐中添加的无机碘具有易挥发的特点,因此在生产、储藏、运输和烹饪过程中都会造成碘的丢失,有人估计大约有 90 %的碘都会无效地浪费掉^[2]。

调查结果表明,在我国膳食碘的主要来源为谷类和蔬菜,占总碘摄入量的 52 %~70 %^[5],在发达国家占 92.4 % (UK 国家饮食与营养调查,1997~1998)。因此食物是人体摄入碘的主要来源,通过植物经食物链补充人体微量元素的措施是一种经济有效的方法^[6,7]。对于蔬菜,碘在可食部分的富集主要通过木质部运输^[8],因此蔬菜可有效富集碘以满足人们的日常需碘量^[9]。

目前国内研究主要集中在对环境中碘与碘缺乏病之间客观存在的现象进行综合分析,进而探讨环境的致病因素等方面^[10~12],这对于人们认识碘缺乏病的发病机理和制定防治碘缺乏病的战略具有重要的意义,但对环境中碘的生物地球化学行为如碘在土壤、植物、人体之间的迁移和转化富集规律等的研究不多^[9]。有研究表明^[13~20],碘在植物体内的各个器官均有分布,为了深入了解植物对碘吸收的生物学机制,本文以青菜为研究对象,通过水培试验,利用同位素示踪剂(¹²⁵I)观测青菜对碘的吸收过程,以及碘在青菜体内的转移和分布,从而为探索培育含碘蔬菜,实现人体自然补碘的有效新途径提供科学依据。

1 材料和方法

用于本文研究的青菜 (Chinese cabbage) 的品种为苏州青,拉丁名为 *Brassica chinensis* L.。青菜的育苗过程:首先将种子放入 55 °C 左右的温水中浸种 15min,然后再用 1 %高锰酸钾溶液浸泡 15min,浸泡后的种子用自来水反复冲洗干净后,把种子均匀平铺在干净纱布上,置于 30 °C 的恒温箱中催芽。当大于 80 %的种子发芽以后,转入石英砂中继续生长,3~4d 以后定期供应适量的 1/2 Hogland 均衡营养液 (表 1)。待青菜苗长出 2 片真叶时,选取长势一致的幼苗,小心地将其移出苗床,用海绵固定,根系自然悬垂在溶液中,保持 24h 连续通气。先用自来水培养 3d,再分别用 1/2 和完全 Hogland 营养液^[21] 各培养 3d 后,开始用于碘同位素 (¹²⁵I) 示踪试验。

同位素示踪剂 (Na ¹²⁵ I) 由中国原子能科学研究所提供,放射性比活度为:80 ×37MBq/ml (2005-06-21),放化纯度大于 99.9 %。

青菜碘吸收的同位素示踪试验在体积为 50cm ×80cm ×20cm 的长方形塑料盆中进行。在供试盆中加入 5L Hogland 营养液,随即添加 35μl Na ¹²⁵ I,谨慎搅拌,使之均匀分布,此时,水培液中 ¹²⁵ I 的比活度为 537Bq/ml。然后移栽长势一致的青菜 50 株,并用塑料泡膜固定。试验期间的室内温度为 (30 ±3) °C。

青菜栽入加入 Na ¹²⁵ I 的水培液后,分别在 5、10、20、30、60min 和 2、3、4、6、12、24、36、48、60、72、96、120h 间隔取样,其中 12、36、60h 采样时为夜晚,24、48、72h 采样时为白昼。每次随机取青菜 1 株 (2 次重复),根部用去离子水冲洗干净后用吸水纸吸去表面水,并用吹风机吹干,然后分根、茎、叶 3 个部位 (3 次重复),分别装入 12cm ×12cm 塑料样品袋中,称取 100mg (鲜重,数据处理时把 mg 转化成 g),测量其放射性活度。同时每次同步取水培液 10ml,吸取 1ml 置塑料小试管中进行同位素活度测量 (3 次重复)。

放射性活度测量采用 BH1224 型微机一多道一体化能谱仪。该谱仪配置倒置的 Φ70mmNaI 闪烁探头,安装在铅屏蔽室中。测样器皿采用自备的 Φ75mm ×110mm 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 631V,闭值 0.28。选取一个谱峰 (0~30 道) 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

表 1 Hogland 均衡营养液的组分和浓度

Table 1 Uniform ingredient and concentration of Hogland nutritious liquid			
宏量组分 Macronutrient		微量组分 Micronutrient	
组成 Combination	浓度 Concentration (mmol/L)	组成 Combination	浓度 Concentration (mmol/L)
KNO ₃	6.00	H ₃ BO ₃	10.00
Ca (NO ₃) ₂	3.50	MnSO ₄ ·H ₂ O	0.50
KH ₂ PO ₄	1.33	ZnSO ₄ ·7H ₂ O	0.50
MgSO ₄ ·7H ₂ O	0.50	CuSO ₄ ·5H ₂ O	0.20
NaCl	0.48	(NH ₄) ₆ Mo ₇ O ₂₄	0.01
		Fe-EDTA	200

射性比活度,测量误差控制在 5 %以内。所有样品在采样当天完成测量,以减少样品由于水分挥发而造成的误差。

2 结果与分析

图 1 显示了青菜对¹²⁵I 吸收的动态变化。从图 1 (图 1 中经方差分析和 *t* 值检验,青菜根、茎、叶中的含¹²⁵I 量在 *p* < 0. 05 水平上达到显著性差异) 中可看到青菜不仅能够从水培液中吸收¹²⁵I,而且能够在较短的时间内将¹²⁵I 通过根部转移到茎、叶各个部位。检测结果表明,青菜在水培液中生长 5min 后,就能在青菜根部检测出¹²⁵I,10min 后,在青菜的茎、叶中也能检测到微量的¹²⁵I 了。随着生长时间的延长,青菜根、茎、叶中¹²⁵I 的活度逐渐增强,其中根部吸收的¹²⁵I 明显大于茎和叶,当青菜生长到 720min (12h) 时,根部¹²⁵I 的累积量已达 4056. 3Bq/1000mg,是生长时间 120min (2h) 的 16. 8 倍;茎和叶中¹²⁵I 的含量也分别达到 332. 4 Bq/1000mg 和 50. 8 Bq/1000mg。

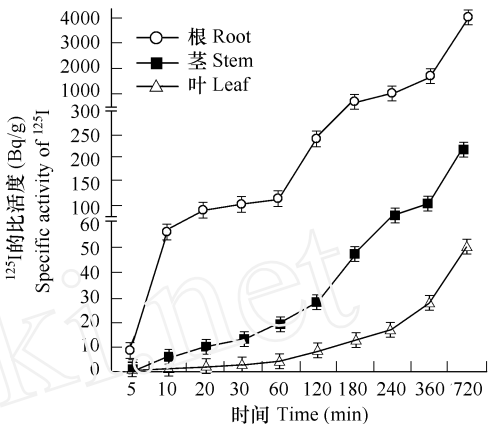


图 1 青菜对¹²⁵I 的动态吸收和累积图

Fig.1 Graph of dynamic absorption and accumulation of ¹²⁵I by *Brassica chinensis* L.

青菜根部从水培液中吸收的¹²⁵I 除了将大部分滞留 在根部外,同时将一部分¹²⁵I 向茎、叶输送。为了定量地评价根部碘向茎、叶的输送,本文定义:地上部分(即茎和叶)中¹²⁵I 活度占全株(即根、茎和叶)中¹²⁵I 总活度的比例,为运输指数(*t*),即:

$$t = \frac{\text{地上部分}^{125}\text{I 活度}}{\text{全株}^{125}\text{I 活度}} \times 100$$

根据运输指数(表 2),可以看到,青菜培养时间从 24h 到 120h,运输指数 *t* 从 18. 8 上升到 27. 0,反映出青菜根部吸收的碘向地上部分输送随培养时间增加而增加的趋势,这与青菜根部¹²⁵I 的吸收量是随时间增加变化的趋势相一致。从表 2 中可以看到,青菜培养在 24~72h 期间,每 24h 根部对¹²⁵I 吸收量的增加幅度在 3000 ~4000Bq,而在 72~120h,每 24h 根部对¹²⁵I 吸收量的增加幅度降低为 1000~2000Bq,相对应的根部中¹²⁵I 活度占全株的百分含量也随青菜培养时间的增加而减少,而同时茎、叶中¹²⁵I 活度占全株的百分含量相对增加,这说明了根部的碘向茎、叶部分输送的动力主要是浓度梯度,根部¹²⁵I 的浓度越大,向上运输的量也越大。这些

表 2 不同时期青菜对¹²⁵I 的吸收、运输和分配

Table 2 Absorption, transportation and distribution of iodine in different time							
时间 Time (h)	部位 Parts	鲜重 Fresh weight (g)	比活度 Specific activity (Bq/g)	活度 Activity (Bq)	占全株 (%) Of the plant	占地上部 (%) Of the above ground plant	运输指数(t) Transportation index
24	根 Root	0. 6	7321. 7	4393. 0	81. 2	—	18. 8
	茎 Stem	4. 4	176. 8	777. 9	14. 4	76. 4	
	叶 Leaf	3. 4	70. 6	240. 0	4. 4	23. 6	
48	根 Root	0. 6	14348. 7	8609. 2	79. 8	—	20. 2
	茎 Stem	4. 5	379. 2	1706. 4	15. 8	78. 2	
	叶 Leaf	3. 3	144. 2	475. 7	4. 4	21. 8	
72	根 Root	0. 6	20342. 3	12205. 4	78. 8	—	21. 2
	茎 Stem	4. 4	582. 2	2561. 7	16. 5	77. 9	
	叶 Leaf	3. 6	201. 7	726. 1	4. 7	22. 1	
49	根 Root	0. 6	23738. 1	14242. 9	76. 3	—	23. 7
	茎 Stem	4. 2	762. 3	3201. 7	17. 2	72. 4	
	叶 Leaf	3. 8	321. 6	1222. 1	6. 5	27. 6	
120	根 Root	0. 6	25447. 8	15268. 7	73. 0	—	27
	茎 Stem	4. 8	872. 6	4188. 5	20. 1	74. 3	
	叶 Leaf	3. 5	413. 5	1447. 3	6. 9	25. 7	

研究结果表明了当有外源碘存在时,青菜能够迅速地吸收碘,并富集在根部,同时将其中的一部分转移到地上部分,当根部富集的碘含量越高,向地上部分输送的碘越多,运输系数(t)随培养时间的增加而增大,以及根部中碘含量占全株碘含量百分比随培养时间的增加而减少证明这点。

由表 2 还可以看出,青菜地上部分的 ^{125}I 主要积累在茎部,茎中积累的碘占地上部分碘含量的 75 %左右,占全株总碘的 14.4 %~20.1 %;而叶中的碘积累量占地上部分碘含量的 25 %左右,只占全株总碘的 4.4 %~6.9 %,说明转移到叶片上的 ^{125}I 是很少的。有研究表明^[22,23],碘在很多植物植株里的含量分配为根>叶>茎,而青菜中碘的含量为根>茎>叶,这可能与青菜的结构组织有关。作为非必需元素的碘主要贮存在液泡、胞间隙这些部位,对于青菜来说,茎中输导组织相对自由空间较多,因而单位重量的碘分布也较多。

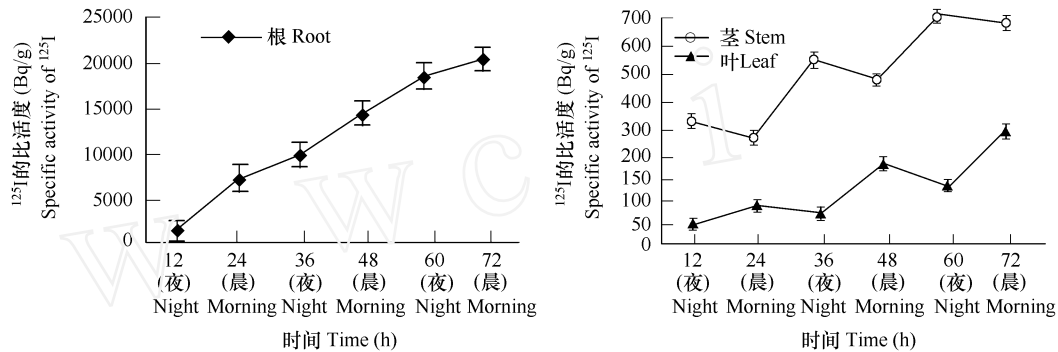


图 2 青菜根、茎、叶对 ^{125}I 的比活度变化

Fig. 2 Graph of specific activity of ^{125}I in *Brassica chinensis* L. root, stem and leaf

青菜的茎和叶在白昼和夜晚对 ^{125}I 的累积量是不一样的。从图 2(图 2 中经方差分析和 t 值检验,青菜根、茎、叶中的含 ^{125}I 量在 $p < 0.05$ 水平上达到显著性差异)可以看出,青菜根、茎和叶中的含碘量总的呈现出随着时间增加而增加的趋势,但是在经历白昼和黑夜时,茎和叶中碘的累积量却表现出各自不同的浓度特征。在培养时间为 24、48h 和 72h 时,正值白昼,青菜叶中碘的累积量有所升高,在叶片 ^{125}I 累积量随培养时间变化的曲线中呈现出峰值,而同时青菜茎中碘的累积量明显降低,在茎 ^{125}I 累积量随培养时间变化的曲线中呈现出谷值;培养时间为 12、36h 和 60h 时,正值夜晚,青菜叶中碘的累积量有所降低,在叶片 ^{125}I 累积量随培养时间变化的曲线中呈现出谷值,而青菜茎中碘的累积量明显升高,在茎 ^{125}I 累积量随培养时间变化的曲线中呈现出峰值。这表明了青菜叶中碘的累积量在夜晚降低,在白昼增加;而青菜茎中碘的累积量却是在夜晚增加,在白昼减少,造成这一现象的原因可能与植物的光合作用和蒸腾作用有关。白昼由于青菜的光合作用和蒸腾作用强烈,为了满足植物的这一生物过程的需要,从根部将会输送更多的水分与营养通过茎供应给叶片,这时会有更多碘被转移至青菜叶片中,而茎中累积的碘也相应减少,结果造成叶中碘含量在白昼升高和茎中碘含量减少的现象;在夜晚,青菜的光合作用停止,蒸腾作用也大大减弱,转移到青菜叶片中的碘也随着通过茎输送给叶片的水分与营养的供应量的明显减少而减少,这时从根部向上输送的碘主要积累在青菜茎中,结果造成茎中碘含量在夜晚升高和叶中碘含量减少的现象。因此,青菜茎和叶中碘累积量在白昼与夜晚增减变化呈相反的趋势,说明了青菜对碘的累积除了通过被动吸收途径随吸水过程而进入植株体内,青菜叶同时还存在着有选择性的主动吸收碘的过程。

青菜叶面上 ^{125}I 的含量分配也表明了青菜对碘的主动吸收行为。根据对培养 48h 和 96h 的青菜叶中 ^{125}I 含量的测定表明,位于青菜不同部位的叶片中碘含量是不同的(图 3、图 4), (注:图 4 中经方差分析和 t 值检验,青菜叶中的含 ^{125}I 量在 $p < 0.05$ 水平上达到显著性差异) ^{125}I 分布量从小至大依次为老叶<叶 1<叶 2<叶 3<叶 4<叶 5<嫩叶,即上部叶高于下部叶,愈接近顶部的嫩叶积累的 ^{125}I 愈多,这与硒在番茄叶上的含量分配是一致的^[24],呈现出碘在青菜叶上主要集中在生命活动旺盛部分的分别特征。为了维持青菜生长的需要,根部从水培液中吸取青菜生长所需的水分和营养物质,并将它们不断地输送至新生的嫩叶上,在这生物转移过程中,

^{125}I 也随之被分配在这些嫩叶之中,老叶开始枯黄,表明它们在青菜生长过程中已不起作用,根部也就逐渐减少,直至最后停止对它们提供水分和营养,输送到这些老叶上的 ^{125}I 也随之相应减少。因此, ^{125}I 在青菜植株不同部位叶片上的分布差异,与青菜生长过程中的生理作用有关。

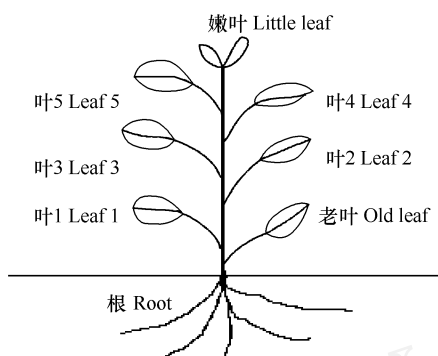


图3 青菜叶序

Fig. 3 The order of *Brassica chinensis* L. leaf

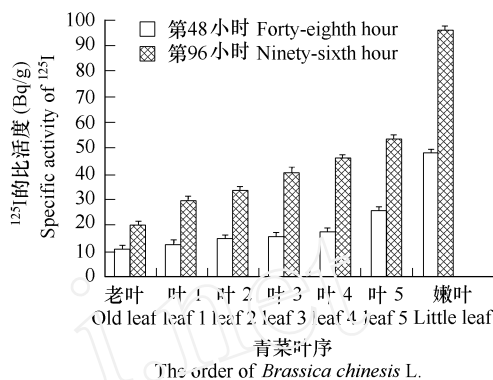


图4 不同的时间 ^{125}I 在青菜叶上的含量分配

Fig. 4 Specific activity of ^{125}I in *Brassica chinensis* L. leaf in different time

水培液中 ^{125}I 含量的下降与时间之间存在显著性相关(图5),相关系数 $R = -0.9917$ ($p < 0.01$)。从图5中可以看到,随着青菜培养时间的增加,水培液中 ^{125}I 的含量呈线性减少,到第5天时, ^{125}I 含量已经下降至引入量的47.49%。

图6显示了水培液中 ^{125}I 的减少量与青菜对碘的吸收量随时间的变化,阴影部分为水培液中丢失的碘随时间的变化关系。从图6中可以看到水培液中丢失的 ^{125}I 量和青菜对 ^{125}I 的吸收累积量随青菜培养时间的延长而增加。但随着培养时间的延长,被青菜吸收的 ^{125}I 量占水培液中 ^{125}I 减少量的比例越来越小(图7),在第12小时,青菜吸收的 ^{125}I 量占水培液中减少的 ^{125}I 量的53.06%,到120h只占36.44%,仅占原始 ^{125}I 引入量的19.1%。图6中显示,越到培养期的后期,青菜植株中的 ^{125}I 上升的量越不明显,这和培养液中 ^{125}I 的量越来越少有关系。根据 ^{125}I 的质量平衡计算,可以得到 ^{125}I 的消耗量(L), L 包括3部分,即被青菜所吸收的量,自然蒸发量和放射性衰变量,因此:

$$L = \text{青菜吸收量}(a) + \text{自然挥发量}(v) + \text{放射性衰变量}(d)$$

式中, a 根据实际测定; d 根据放射性衰变公式 $A = A_0 e^{-0.693t/T_{1/2}}$ 求得, A_0 为初始活度, $T_{1/2}$ 为半衰期, t 为经过的时间, A_0 减去 A 得到的值,即为由于 ^{125}I 核的自身衰变引起的 ^{125}I 丢失量; $v = L - a - d$ 。

根据测定,青菜培养时间6~120h, ^{125}I 的消耗量从56971.72Bq增至 $L = 513766.5\text{Bq}$,图7显示了有53%~36%的 ^{125}I 被青菜所吸收;50%~40%的 ^{125}I 自然蒸发;6.4%~11%的 ^{125}I 通过放射性衰变丢失。这一结果表明,在试验时间内引起水培液中 ^{125}I 消耗的主要途径除了被青菜吸收外,就是自然挥发,随着水分的蒸发而导致 ^{125}I 挥发的过程,在温度较高的白昼挥发掉的 ^{125}I 多于夜晚,这已被试验证实。由放射性衰变丢失的 ^{125}I 较少在青菜培养时间从6h至120h时,放射性衰变丢失的 ^{125}I 占总消耗量从6.4%增加至11%,相当于原始引入 ^{125}I 总量的0.2%~5.6%。另外,在取样时带出的附在青菜根部表面的 ^{125}I ,也可能会造成一部分 ^{125}I 的损失。

图7还显示出,随着培养时间的增加,青菜吸收的 ^{125}I 占 ^{125}I 总消耗量的比例逐渐降低,而自然挥发和放射性衰变的 ^{125}I 占 ^{125}I 总消耗量的比例逐渐升高的趋势。青菜吸收的 ^{125}I 占 ^{125}I 总消耗量的比例逐渐降低,是因为随

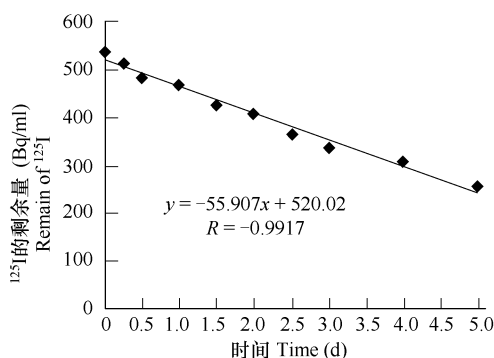


图5 水培液中 ^{125}I 动态变化图

Fig. 5 Graph of dynamic change of ^{125}I in the water

着取样次数的增加,培养器皿中的青菜棵数越来越少,则青菜对碘的总吸收量也就越来越少,对于单棵青菜来说,由图 1 也可以看出,对碘的吸收量是越来越多的。自然挥发的 ^{125}I 总消耗量的比例逐渐升高,是因为水培液中碘的挥发是持续进行的,加上培养器皿的敞开,随着时间的增加,消耗的碘也就越来越多。放射性 ^{125}I 的衰变量是时间的函数,时间越长,衰变掉的量也就越多。

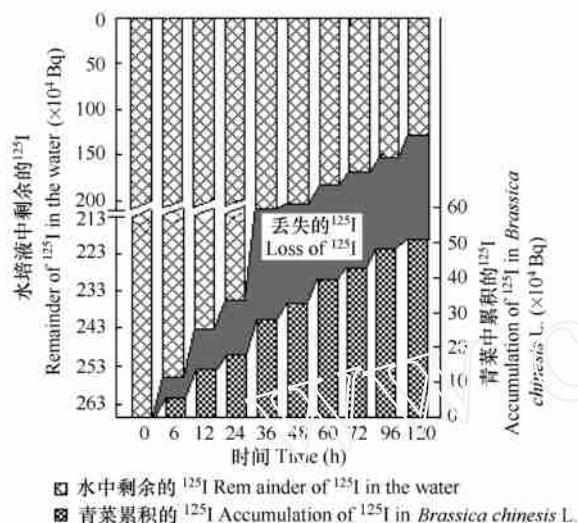


图 6 不同时间水培液中剩余的 ^{125}I 与青菜累积的 ^{125}I 的动态变化

Fig. 6 Vanity of rem ainder of ^{125}I in the water and accumulation of ^{125}I in *Brassica chinensis* L. the different time

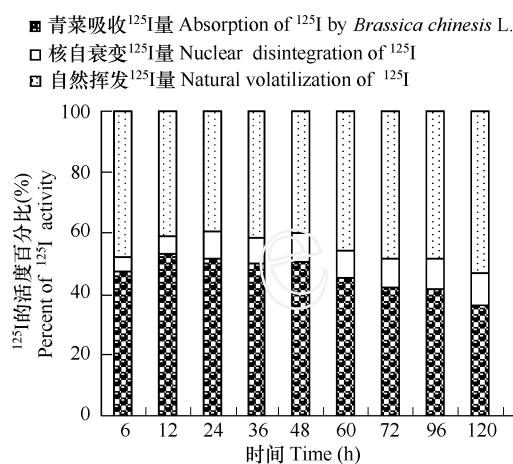


图 7 不同时间青菜吸收 ^{125}I 量、 ^{125}I 核自衰变量和 ^{125}I 自然挥发量占水培液中 ^{125}I 减少量的百分比

Fig. 7 Absorption of ^{125}I by the *Brassica chinensis* L., nuclear disintegration of ^{125}I and natural volatilization of ^{125}I accounted for the percent of the total loss of ^{125}I in the water in the different time

3 结论

根据青菜对 ^{125}I 吸收的动态检测结果表明,5min 后在青菜根部可能检测到 ^{125}I 放射性活度,10min 后在叶子上检测到 ^{125}I 的放射性活度, ^{125}I 在青菜体内的含量分布顺序为根>茎>叶,其中青菜根、茎和叶中的 ^{125}I 累积量分别占全株的 73.0%~81.2%,14.4%~20.1%和 4.4%~6.9%,这说明当有外源碘存在时,青菜能迅速吸收,并从根部,通过茎向叶片运输。

青菜茎和叶对 ^{125}I 的吸收量随着培养时间的延长而增加,茎在夜晚累积的 ^{125}I 多于白昼,而叶在白昼累积的 ^{125}I 多于夜晚。 ^{125}I 在青菜叶片上的含量分布特征为,在植株上部的叶片高于下部叶片,越近顶部的嫩叶积累的 ^{125}I 越多,这是青菜对碘的被动吸收和主动吸收共同作用的结果。

引起水培液中 ^{125}I 消耗的主要途径除了被青菜吸收外,还有自然挥发,其中由青菜对 ^{125}I 的吸收占 ^{125}I 总消耗量的 36%~53%;自然挥发的 ^{125}I 占 ^{125}I 总消耗量的 50%~40%;由放射性衰变丢失的 ^{125}I 较少,约占 ^{125}I 总消耗量的 6.4%~11%。

上述研究表明,青菜和菠菜^[25]一样具有对碘较强的吸收和富集特性。根据每日推荐的摄入碘量:10 岁以下儿童为 40~120 μg ,成人为 150 μg ,孕妇为 175 μg ,乳母为 200 μg ^[26],可以通过控制食用蔬菜的多少来控制每日碘摄入量,也可以通过食用一定含量的含碘蔬菜来补充。青菜的生长周期短,鲜嫩的青菜不仅营养丰富,而且美味可口,是人们十分喜爱的日常蔬菜,因此可以将青菜作为一种富碘的经济作物来培育,是实现对人体自然补碘较为理想的载体。

References:

- [1] Hans Cerber, Hans-Jakob Peter, Erich B ügi, et al. Colloidal aggregates of insoluble inclusions in human gitters. *Biochimie*, 1999, 81:441~445.
- [2] Chi X Z. trace element and body health. Beijing: Chemical Industry Press, 1993. 205~206.
- [3] Shohei Harada, Naoshi Ichihara, Junri Arai, et al. Influence of iodine excess due to iodine-containing antiseptics on neonatal screening for congenital

- hypothyroidism in Hokkaido prefecture, Japan. *Journal of the International Society of Neonatal Screening*, 1994, 3: 115~123.
- [4] Zheng B S, Wang B B, *et al.* Environmental Geochemistry Of Iodine In Atmosphere And Plant Review And A Hypothesis. *Earth Science Frontiers*, 2001, 8(2): 359~365.
- [5] Hou X L, Chai C F, Qian Q F, *et al.* The study of iodine in Chinese total diets. *The Science of the Total Environment*, 1997, 193: 161~167.
- [6] Delange F J T. Iodine deficiency in Europe, A continuing concern. In: Dunn and Ginoer D eds. *NATO AST Series A*, 1993, 241: 5~93, 171~219.
- [7] Jopke P, Bahadir M, Fleckenstein J, *et al.* Iodine determination in plant materials. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 1996, 27: 741~75.
- [8] Herret R A, Hatfield Jr. H H, Crosby D G, *et al.* Leaf abscission induced by the iodine ion. *Plant Physiol*, 1962, 37: 358~363.
- [9] Dai J L, Zhu Y G, Zhang M, *et al.* Selecting iodine-enriched vegetables and the residual effect of iodate application to soil. *Biological Trace Element Research*, 2004, 101(3): 265~275.
- [10] George T F Wong, Xian-Hao Cheng. The formation of iodide in inshore waters from the photochemical decomposition of dissolved organic iodine. *Marine Chemistry*, 2001, (74): 53~64.
- [11] Horvatic G, *et al.* Echographic thyroid changes in iodine deficiency and excess. Clinical department of nuclear medicine and radiation protection. *European Journal of Ultrasound*, 1998, (7): S26.
- [12] Noel R Rose, Raphael Bonita, Lynne Burek. Iodine: an environmental trigger of thyroiditis. *Autoimmunity Reviews*, 2002, (1): 97~103.
- [13] Shi J J, Guo J F. Behavior of HTO in simulated rice-water-soil ecosystem. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2003, 14(2): 269~272.
- [14] Shi J J, Chen H. The migration and distribution of tritium water in Chinese cabbage-soil ecosystem. *Acta Ecologica Sinica*, 2002, 22(8): 1260~1265.
- [15] Lui X H, Liu Q G, Kuang Y H. Absorption of ^{125}I and ^3H in aquatic plants. *Acta Agric Nucl Sin.*, 1998, 12(6): 359~364.
- [16] Sheppard S C, Evenden W G. Response of some vegetable crops to soil-applied halides. *Can. J. Soil Sci.*, 1992, 72: 555~556.
- [17] Lui X H, Liu Q Y, Kuang Y H, *et al.* The behaviour of iodine-125 in simulated paddy soil. *Acta Agric Nucl Sin*, 1998, 12(1): 41~46.
- [18] Whitehead D C. Iodine in the UK environment with particular reference to agriculture. *J Appl Ecol*, 1979, 16: 269~279.
- [19] Barakat M Z, Bassiouni M, El-Wakil M. Evaluation of iodine content of certain vegetables. *Bull. Acad. Pol. Sci., Ser. Sci. Biol.*, 1972, 8: 531~533.
- [20] Yuita K. Dynamics of iodine, bromine, and chlorine in soil II. Chemical forms of iodine in soil solutions. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 1992, 38(2): 281~287.
- [21] Zhang S W, Zheng G S, Meng L. Effect of calcium on senescence of cultivated tree peony. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2002, 8(4): 483~487.
- [22] Liao Z J. Environmental chemistry of trace element and biologic effect. Beijing: China Environ Science Publishing House, 1992. 41~60.
- [23] Yang X R. *Plant Physiology*. Beijing: People's Educational Publishing House, 1981. 183~187.
- [24] Wen X F. *China Nuclear Agricultural Sciences*. Zhengzhou: Henan Scientific and Technological Publishing House, 1999. 342.
- [25] Sun X W, Weng H X, Yong W B, *et al.* The biogeochemical absorption by spinach fertilizing outer source iodine. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2004, 10(2): 192~197.
- [26] Ziegler E E, Filer L J Jr. *Modern nutrition*. Beijing: People's Healthy Publishing House, 1998. 361~365, 369.

参考文献:

- [2] 迟锡增主编. 微量元素与身体健康. 北京: 化学工业出版社, 1993. 205~206.
- [4] 郑宝山, 王滨滨, 等. 大气与植物中碘的环境地球化学——综述与新的假说. *地学前缘*, 2001, 8(2): 359~365.
- [13] 史建军, 郭江峰. 氚水在模拟水稻-水-土壤生态系统中的行为. *应用生态学报*, 2003, 14(2): 269~272.
- [14] 史建军, 陈晖. 青菜-土壤生态系统中氚水的迁移与分布动态. *生态学报*, 2002, 22(8): 1260~1265.
- [15] 刘晓红, 刘琼英, 邴炎华, 等. 水生植物对 ^{25}I 和 ^3H 的吸收、分配及消长. *核农学报*, 12(6): 359~364.
- [17] 刘晓红, 刘琼英, 邴炎华, 等. 碘-125在盆栽水稻田中的去向. *核农学报*, 1998, 12(1): 41~46.
- [21] 张圣旺, 郑国生, 孟丽. 钙素对栽培牡丹花衰老的影响. *植物营养与肥料学报*, 2002, 8(4): 483~487.
- [22] 廖自基编著. 微量元素的环境化学及生物效应. 北京: 中国环境科学出版社, 1992. 41~60.
- [23] 杨学荣主编. *植物生理学*. 北京: 人民教育出版社, 1981. 183~187.
- [24] 温贤芳主编. *中国核农学*. 郑州: 河南科学技术出版社, 1999. 342.
- [25] 孙向武, 翁焕新, 雍文彬, 等. 菠菜对外源碘的生物地球化学吸收. *植物营养与肥料学报*, 2004, 10(2): 192~197.
- [26] Ziegler E E, Filer L J Jr. *现代营养学(第7版)*. 北京: 人民卫生出版社, 1998. 361~365, 369.