

蔬菜吸收不同形态外源碘的动力学特性

洪春来^{1,2,3}, 翁焕新^{1,*}, 严爱兰¹, 谢伶俐¹

(1. 浙江大学环境与生物地球化学研究所, 杭州 310027; 2. 浙江省嘉兴市农业科学研究院, 嘉兴 314016;

3. 浙江林学院环境科技学院, 临安 311300)

摘要:采用水培法,研究了两种蔬菜(小白菜和芹菜)对两种不同形态碘源(I^- , IO_3^-)的吸收和积累特性。结果表明:供试蔬菜吸收碘的速率表现为在短时间(< 60 min)内迅速增加,随着时间的延长蔬菜对碘的吸收速率逐渐下降;在低浓度范围内($0.01 \sim 0.50$ mg/L)蔬菜对 IO_3^- 的吸收速率与碘浓度变化曲线符合饱和吸收动力学特征(表现为遵循酶学方程),进一步研究表明,解偶联剂 2,4-二硝基苯酚(DNP)对低浓度(< 0.50 mg/L)下蔬菜 IO_3^- 吸收速率具有明显的抑制作用,说明两种蔬菜对低浓度的 IO_3^- 可能存在主动吸收,而在高浓度范围内($0.50 \sim 10.0$ mg/L),蔬菜对碘的吸收速率随着碘浓度的提高呈现直线上升的趋势。两种蔬菜相比,在同样条件下芹菜对碘的吸收速率明显大于小白菜。蔬菜可食部分中碘的含量随着碘浓度的提高而增加,在一次加碘条件下表现为先增加后降低的趋势,而在持续加碘条件下蔬菜中碘的含量在整个处理期间表现为不断增加; Cl^- 的添加对低浓度下蔬菜碘的吸收具有明显的抑制作用,而随着碘浓度的提高 Cl^- 的抑制作用逐渐减弱。供试蔬菜对碘的富集系数随碘浓度的提高而降低,碘在蔬菜不同器官的分配次序表现为根 $>$ 叶 $>$ 茎。

关键词:蔬菜;碘;吸收动力学;富集系数

文章编号:1000-0933(2009)03-1438-10 中图分类号:Q945,S274 文献标识码:A

Dynamic characterization of iodine uptake in vegetable plants

HONG Chun-Lai^{1,2,3}, WENG Huan-Xin^{1,*}, YAN Ai-Lan¹, XIE Ling-Li¹

1 Institute of Environment & Biogeochemistry, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China

2 Institute of Jiaxing Agricultural Science, Jiaxing 314016, China

3 School of Environmental Sciences and Technology, Zhejiang Forestry University, Lin'an 311300, China

Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(3): 1438 ~ 1447.

Abstract: Hydroponics experiment was carried out to investigate iodine (iodide or iodate) uptake in celery and Chinese cabbage. Iodine uptake in both plants increased rapidly within a short time treatment (< 60 min) and then decreased gradually. With low iodine concentration ($0 - 0.50$ mg/L) treatments, characteristics reminiscent of Michaelis-Menten kinetics was observed via relationship of concentration of iodate or iodide and the iodine uptake rate. Iodate uptake was inhibited by oxidative phosphorylation inhibitor 2,4-dinitrophenol when the plants were treated with less than 0.50 mg/L iodate, whereas no significant inhibit was observed and the iodine uptake rate was linearly correlated to the iodine concentration when iodate concentration was above 0.50 mg/L, which suggested that plant can actively uptake iodate when under low concentration. As compared to Chinese cabbage, celery showed a greater iodine uptake. The iodine content in the vegetable edible parts increased in the first week then decreased as the iodine was added only once at the beginning, whereas the iodine content of edible parts of vegetable increased constantly when continuously supplied with iodine. When treated with low iodine concentration (< 0.50 mg/L), iodine uptake in both plants were reduced by chlorine, but no significant effect of chlorine on iodine uptake in the plants treated with high iodine concentration. The iodine accumulation coefficient in both plant was decreased when the iodine concentration in the media increased. The iodine distribution in both

基金项目:国家自然科学基金资助项目(40373043,40873058)

收稿日期:2007-06-12; 修订日期:2008-12-03

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

plants was root > leaf > stem.

Key Words: vegetable; iodine; uptake dynamics; accumulation coefficient; IDD

碘是合成甲状腺的必需元素,在人和动物体的新陈代谢过程中起着极为重要的作用^[1]。缺碘会引起甲状腺肿大,婴儿缺碘会严重影响大脑发育造成智力残疾^[2,3]。由于碘缺乏引起的疾病统被称为碘缺乏病(Iodine Deficiency Disorders,IDD)^[4],国内外的大量研究已经证明,目前除冰岛外,全世界所有国家都有 IDD 流行,大约有 16 亿人受到碘缺乏的威胁^[5]。我国所有省、市均有 IDD,病区人口达到 4.25 亿,严重影响了人民健康和社会发展^[6,7]。

20 世纪 80 年开始,我国政府采取了全民食用加碘盐的措施,取得了良好成效^[8,9]。但是在多年的实践中也暴露出这种措施存在的缺陷,如食盐中添加的无机碘在运输和烹调等过程中易挥发损失,特别是由于碘具有双侧阈值的特点,从而使高碘病症发生率有所提高^[10~15]。因此,除了食盐加碘外,有必要探寻更为科学健康的补碘方式,其中采用农业生物强化方法通过食物链途径补充碘逐步受到环境与营养学家的关注。

实践已证明,在自然条件下,人体中碘的 80% 以上来自植物性食品,且通过从植物性食品中自然摄取有机碘的方式更有利于维持人体碘的平衡^[11,16]。前人的研究发现,除了海带等海洋性富碘植物性食品外,部分陆生植物也具有一定的吸收和积累碘的能力,特别是通过人为添加外源碘,使作物生长环境中碘含量提高后,一些作物中碘的含量明显增加,这为开辟农业生物强化法补碘新途径提供了可能^[17,18]。然而,迄今为止,有关农作物吸收碘的特性还缺乏系统的研究,特别是有关蔬菜对不同形态外源碘吸收和积累的动力学特征等方面的研究几乎还是空白。本文以小白菜和芹菜为研究对象,通过水培试验系统研究了这两种蔬菜对两种不同形态碘(I^- 和 IO_3^-) 的吸收和积累的动力学特性,并通过观测解偶联剂及 Cl^- 对蔬菜吸收碘的影响,初步探讨了蔬菜吸收碘的机制(主动吸收或是被动吸收及蔬菜吸收碘是否存在植物对氯吸收的相似的机制?),从而为筛选和培育富碘蔬菜提供理论和技术依据。蔬菜是日常生活中不可缺少的食物,人们每天对蔬菜的摄取量很大,因此,深入研究蔬菜对不同外源碘的吸收机理和富集规律,这对人体自然补碘和开辟生产化防治 IDD 的新途径具有重要的理论和实践意义。

1 材料与方法

试验用小白菜品种为苏州青(*Brassica chinensis* Linn.);芹菜品种为黄心脆芹(*Apium graveolens* Linn.)。两种形态的碘源(I^- 和 IO_3^-) 分别通过培养液中加入 NaI 和 $NaIO_3$ 获得。

将小白菜种子放入 55℃ 左右的温水中 15 min,再用 1% 高锰酸钾浸泡 15 min,然后用自来水反复冲洗干净,均匀平铺在干净纱布上,置于 30℃ 的恒温培养箱中。将芹菜种子经 1% 高锰酸钾消毒后,用去离子水浸泡过夜,放入 20℃ 的培养箱中催芽。当 80% 的小白菜和芹菜种子发芽后,转入石英砂中继续生长,3~4 d 以后定期供应适量的 1/2 Hoagland 营养液。营养液组成见表 1。待长出 2 片真叶时即开始移栽。选取长势一致的幼苗用海绵固定,根系自然悬垂在溶液中,保持 24h 连续通气,先用自来水培养 3 d,再分别用 1/4 和 1/2

表 1 营养液的组分和浓度

Table 1 Components and concentrations of nutrient solution

宏量组分 Macro-components		微量组分 Micro-components	
组成 Components	浓度 Concentrations (mmol/L)	组成 Components	浓度 Concentrations (μmol/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
KCl	0.48	(NH ₄) ₆ Mo ₇ O ₂₄	0.01
		Fe-EDTA	200

Hoagland 营养液各培养 3 d 后,用完全营养液连续培养,当幼苗长到即将达到上市标准时,从培养液中移出蔬菜,在去离子水中饥饿培养 5 d 后,进行以下试验内容和处理。

1.1 碘浓度对碘吸收速率的影响

营养液碘浓度设置为 0、0.05、0.1、0.2、0.3、0.5、1.0、2.5、5.0、10.0 mg/L 共 10 个处理,3 次重复,在 3 L 营养吸收液中移入 3 株小白菜和芹菜苗,置于人工气候箱中(25 ± 0.5) $^{\circ}\text{C}$,光照 7100lx 培养 4 h 后,补充去离子水至 3 L(用称重法),测定碘浓度,计算碘吸收速率。

1.2 蔬菜对碘的吸收量与培养时间的关系

将小白菜和芹菜苗定植于容积为 3 L 的塑料桶中,每盆定植 3 株,然后用含有 I^{-} 和 IO_3^{-} 的不同浓度的溶液进行培养。试验的碘培养液设置低碘浓度 0.1 mg/L 和高碘浓度 5.0 mg/L,每个处理 3 次重复。每天更换一次营养液,调节营养液的 pH 为 5.5 ± 0.1 ,分别于 1,2,3,5,7,9,11,13,15 d 取样,并收集根、茎、叶,烘干,称干重,粉碎过 0.59mm 筛孔,测定植株各部分碘含量,计算蔬菜对碘的吸收量。同时以 1 次加碘连续培养 15 d 作为对比(只添加营养液保持培养液总体积恒定),比较外源碘持续供应与非持续供应情况下蔬菜可食部位对碘吸收和积累的差异。

1.3 培养时间对蔬菜吸收碘速率的影响

于 400 ml 培养液中移入蔬菜苗 1 株,分设低碘(0.2 mg/L)和高碘(2.5 mg/L)两个处理浓度,每处理 3 次重复,并分别于每 10 min 和每小时更换营养液,重新添加外源碘使培养液碘含量保持相对的恒定,同时在每次营养液更换前取样测定营养液中碘含量,计算 0~60 min 和 1~12 h 内的碘吸收速率的变化。以 1 次加碘连续培养(只保持营养液总体积而不更换含碘溶液)为对比同时测定其在 10~60 min 和 1~12 h 内培养液中碘浓度的变化,计算出蔬菜碘吸收速率。

1.4 代谢抑制剂和 Cl^{-} 对碘吸收的影响

培养液碘处理浓度为 0、0.01、0.05、0.1、0.2、0.3、0.5、1.0、2.5、5.0、10.0 mg/L,分别添加代谢抑制剂(2,4-DNP 1 mmol/L)和 Cl^{-} (正常营养液供应)并与不添加代谢抑制和 Cl^{-} (营养液中用 K_2SO_4 代替 KCl)进行对比,每个处理 3 次重复。碘吸收试验 4 h 后,测定培养液中碘的浓度变化,计算蔬菜对碘的吸收速率。

1.5 分析测定方法

小白菜和芹菜中碘含量的测定参照硫氰酸铁-亚硝酸催化动力法^[19]。培养液中总碘含量的测定采用溴水氧化法^[20]。

2 结果与讨论

2.1 供试蔬菜对碘吸收速率的动态变化

水培试验结果表明,供试蔬菜对碘的吸收速率在短时间内迅速上升,当达到最大值后随时间延长而逐渐降低(图 1),从图 1 上可以看出,在低浓度下(0.2 mg/L),小白菜和芹菜吸收 I^{-} 的速率分别在 40 min 和 60 min 达到最大值,此后缓慢下降,而吸收 IO_3^{-} 的速率均在 60 min 达到最大值后逐渐降低。在较高浓度下(2.5 mg/L),小白菜和芹菜吸收 I^{-} 的速率分别在 1 h 和 2 h 以后才达到最大值,吸收 IO_3^{-} 的量在 1 h 达到最大值后开始下降。这说明蔬菜对碘的积累是有一定限度的,蔬菜对碘吸收速率的变化可能与蔬菜中碘的含量有关,当蔬菜中碘含量增加,就减小了与外界碘的浓度差,致使蔬菜吸收和运输碘的速率下降。蔬菜对外源碘的吸收速率也受控于外界碘的浓度,在低浓度(0.2 mg/L)下蔬菜对碘的吸收速度比较高浓度(2.5 mg/L)下要小得多证实了这一点。蔬菜对不同形态外源碘的吸收速率也有着明显的差异,在低浓度下表现为 $\text{IO}_3^{-} > \text{I}^{-}$,而在较高浓度下则表现为蔬菜对 I^{-} 吸收速率明显大于 IO_3^{-} 。

图 2 则显示了供碘浓度恒定条件下蔬菜吸收碘速率随时间的动态变化。从图中可以看出,在持续供碘的条件下,蔬菜对碘的吸收速率动态变化趋势与 1 次加碘连续培养条件下碘吸收速率的变化基本一致。但持续供碘条件下蔬菜吸收碘的速率有所增加,而且蔬菜对不同形态外源碘的吸收速率达到最大值的时间有推迟的趋势,这说明在连续培养条件下持续供碘更有利于蔬菜对碘的吸收和积累,小白菜和芹菜可食部分碘含量的

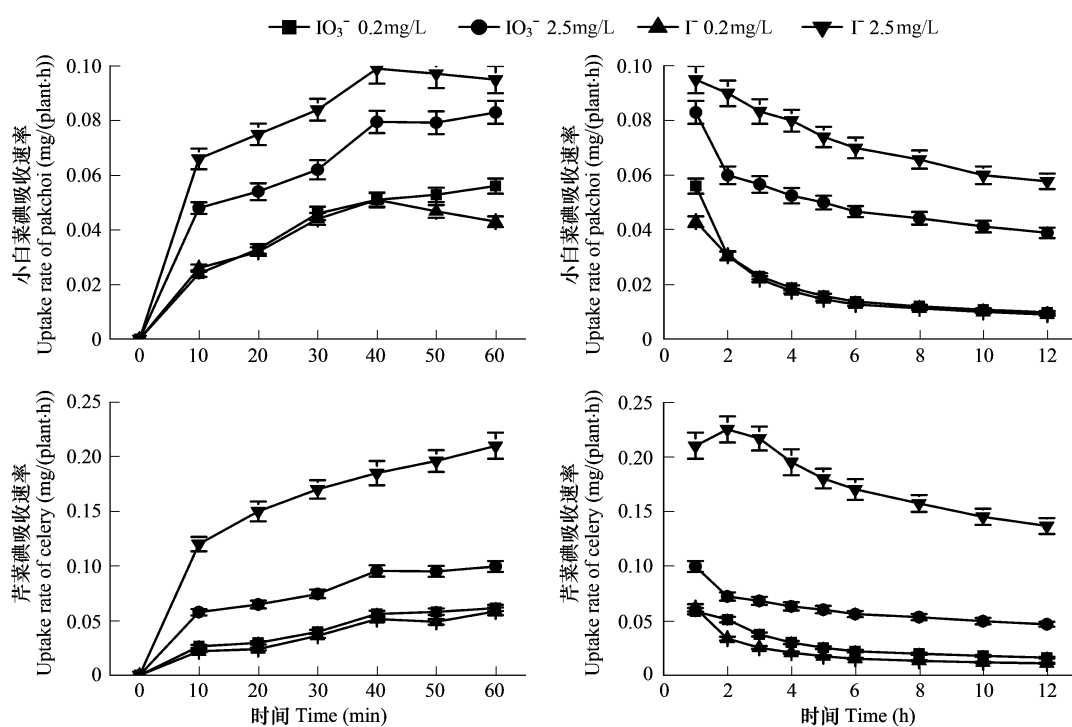


图1 一次供碘条件下蔬菜碘吸收速率的动态变化

Fig.1 Dynamic variations of the uptake rate of iodine by vegetables after once exogenous iodine addition

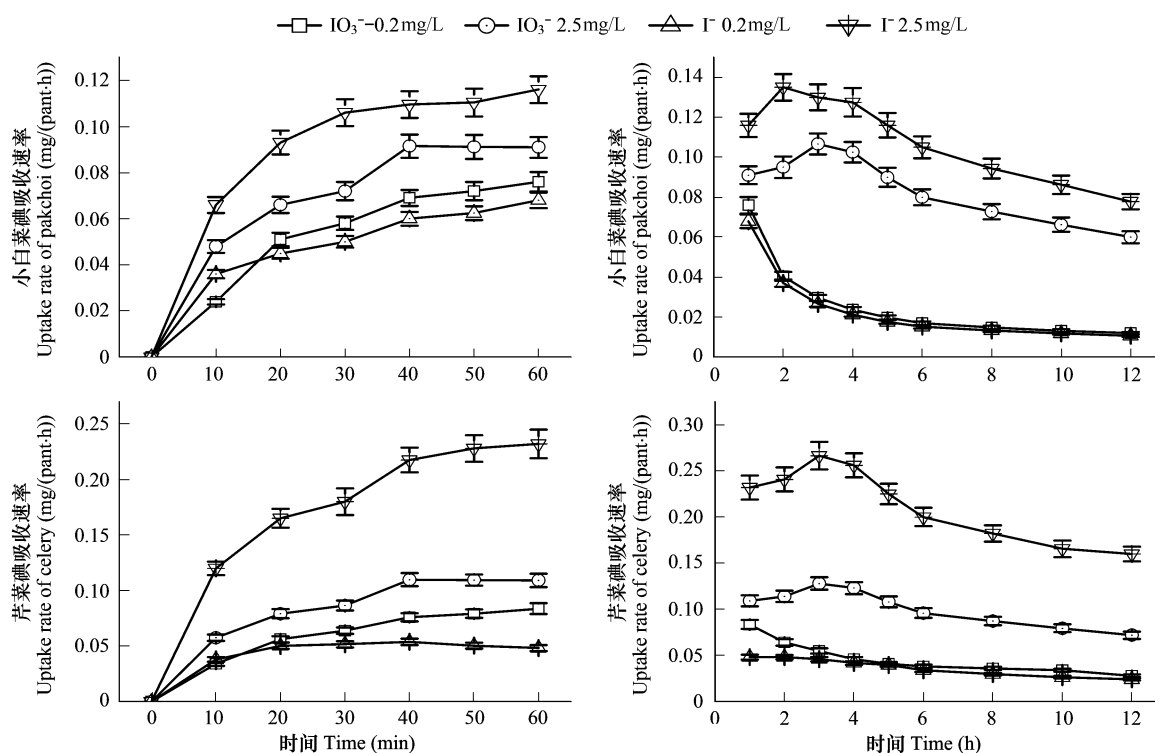


图2 供碘浓度恒定条件下蔬菜碘吸收速率的动态变化

Fig.2 Dynamic variations of the uptake rate of iodine by vegetables at constant iodine concentration

动态变化也证实了这点。

2.2 供试蔬菜对碘吸收的浓度动力学特征

图3显示了供试蔬菜碘吸收速率与外源碘浓度之间的关系,从图中可以看出,小白菜和芹菜对碘的吸收速率随外源碘浓度的提高而增加,但是对于不同形态的碘源,它们的碘吸收速率存在明显的差异,在低碘浓度下($<0.5 \text{ mg/L}$),供试蔬菜对 IO_3^- 的吸收速率明显高于对 I^- 的吸收速率,而在较高浓度下($\geq 0.5 \text{ mg/L}$),供试蔬菜对 I^- 的吸收速率明显高于 IO_3^- 。在低碘浓度下,引起供试蔬菜对不同形态碘吸收速率的差异,与它们对 I^- 和 IO_3^- 吸收的特异性有关。植物通过根系摄取元素的方式可分为被动吸收和主动吸收两种,在正常的环境下,植物对元素的吸收这两种方式兼而有之,当根系周围的环境中某些元素的含量明显高于正常值时,往往被动吸收占主导地位,这样势必造成这些元素在植物体内的非正常积累^[21]。本试验结果表明,在供碘浓度 $0.01 \sim 0.5 \text{ mg/L}$ 范围内,小白菜和芹菜对 IO_3^- 的吸收速率与 IO_3^- 浓度之间的关系符合 Michaelis-Menten 酶动力学模型,而它们对 I^- 的吸收速率变化不符合这一动力学模型。在较高浓度下($\geq 0.5 \text{ mg/L}$)小白菜和芹菜对 I^- 和 IO_3^- 的吸收速率与浓度之间呈现显著的直线正相关性($r \geq 0.99^{**}$),表现出了它们对碘的被动吸收特征(图3)。

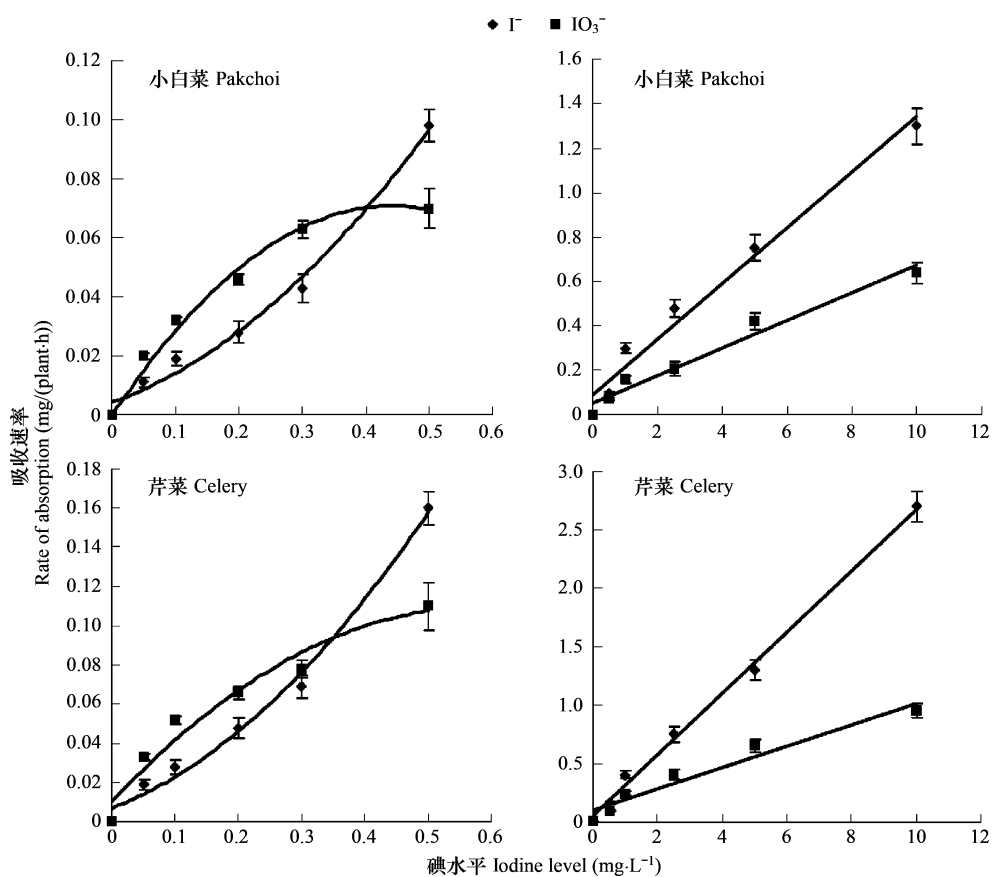


图3 不同浓度碘处理下两种蔬菜吸收碘速率的动态变化

Fig.3 Change of uptake rate with the different concentration of iodine

根据 Michaelis 和 Menten 提出的酶促反应动力学的基本原理,如果把整个植物细胞看作为一个统一的酶体系,则植物主动吸收元素的动力学方程可用以下数学公式表达^[22]: $V = V_{\max} [S] / (K_m + [S])$, 其中 V 为反应速率(植物细胞吸收离子速率); $V_{\max}$ 为最大反应速率(植物细胞吸附速率最大值); K_m 是表征植物细胞和元素吸收关系的特征常数,即当酶反应速率达到最大反应速率一半时的底物浓度; $[S]$ 为底物浓度(植物细胞外可溶的离子的浓度)。米氏方程表明了底物浓度与酶反应速度间的定量关系。由图3可知,当底物(IO_3^-)浓度较低时,反应速率与底物浓度呈正比关系,表现为一级反应。随着底物浓度的增高,反应速率不再按照正比例

升高,反应表现为混合级反应;底物浓度继续加大,曲线为零级反应,这时酶已经被底物饱和,可见,蔬菜碘(IO_3^-)吸收速率与浓度之间的变化关系符合元素主动吸收时酶促反应动力学的基本特征。因此根据本试验结果可以认为,当介质 IO_3^- 浓度低于 0.5 mg/L 时,蔬菜对 IO_3^- 吸收主要受代谢控制;当介质碘浓度大于 0.5 mg/L,则主要受非代谢因素如蒸腾速率等的影响。根据表 2,芹菜吸收 IO_3^- 的最大吸收速率($V_{\max}$)大于小白菜, $1/K_m$ 值表示植物对元素吸收的难易,在相同外源碘条件下,芹菜的 K_m 值明显低于小白菜,表明芹菜在低碘条件下对碘元素的亲和力更高,也就是说比小白菜更容易吸收碘元素。

表 2 低浓度 IO_3^- (<0.5 mg/L) 下蔬菜碘吸收动力学主要参数

Table 2 Main dynamical parameters during iodine uptake at low iodate concentration (< 0.5 mg/L)

蔬菜 Vegetable	$V_{\max}$ mg/(plant·h)	K_m	$1/K_m$	R^2
小白菜 Pakchoi	0.095	0.189	5.29	0.995
芹菜 Celery	0.118	0.131	7.63	0.983

图 4 显示了代谢抑制剂 2,4-二硝基苯酚(2,4-DNP)对供试蔬菜碘吸收速率的影响。2,4-DNP 是氧化磷酸化解偶联剂,它能破坏跨线粒体内膜的质子梯度从而抑制 ATP 生成,解偶联剂还引起线粒体中 ATP 大量水解,破坏主动吸收所需要的 ATP 能量,从而抑制主动吸收^[23]。而植物对元素的被动吸收由于不需要能量的参与,因此不受代谢抑制剂的影响。由图 4 可知,在低碘浓度下,2,4-DNP 对小白菜和芹菜吸收 IO_3^- 产生了抑制作用,抑制程度随培养液中碘浓度的提高而下降,而代谢抑制剂对小白菜和芹菜吸收 I^- 的速率没有明显的影响。在较高碘浓度下,2,4-DNP 对供试蔬菜吸收 IO_3^- 和 I^- 的抑制作用均不显著,这也表明了蔬菜对低浓度 IO_3^- 的吸收与能量代谢活动密切相关,进一步证明了蔬菜对低浓度 IO_3^- 可能存在主动吸收的机制。

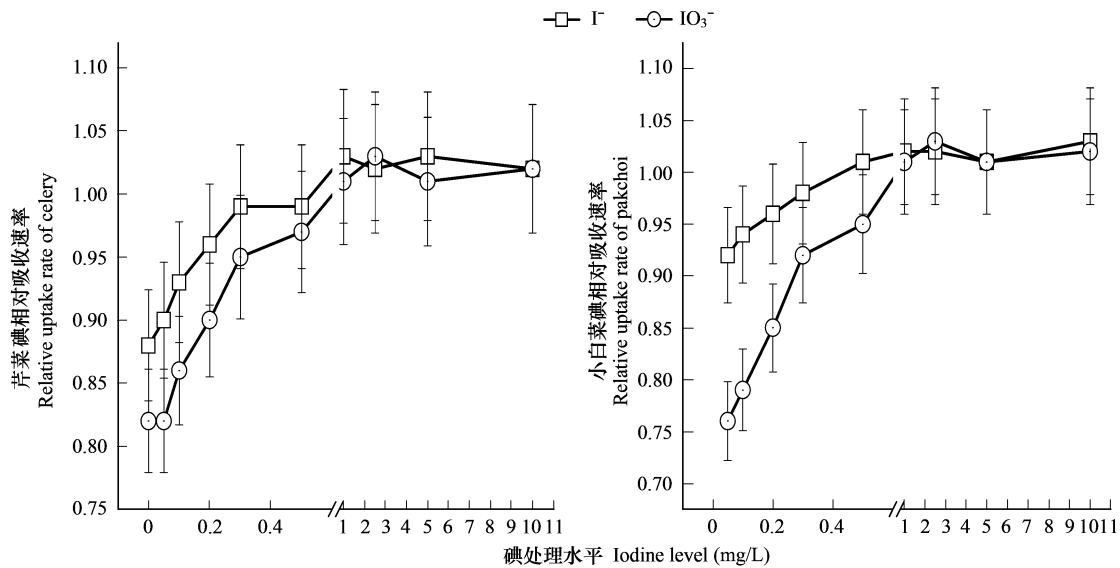


图 4 添加代谢抑制剂(2,4-DNP)对两种蔬菜碘吸收速率的影响

Fig. 4 The effect on uptake rate with the addition of 2,4-DNP

相对吸收速率 = 添加 DNP 蔬菜碘吸收速率/未加 DNP 蔬菜碘吸收速率

Relative uptake rate = the uptake rate with addition of 2,4-DNP/the uptake rate without 2,4-DNP

2.3 蔬菜可食部位对碘吸收量的动态变化

从图 5,图 6 可以看出,在低浓度(0.1 mg/L)和高浓度(5.0 mg/L)一次供碘条件下,小白菜和芹菜可食部分中碘含量在持续增长 7 d 后开始呈现下降趋势。而持续供碘低浓度条件下,碘含量随着时间不断增加。持续供碘条件下供试蔬菜可食用部位碘的最大吸收量明显高于一次供碘条件下供试蔬菜中碘的含量,在 I^- 和

IO_3^- 的供应量在高浓度时(5 mg/L)时,供试蔬菜中碘的含量相差达到 1.4 ~ 3.3 倍。这是由于一次供碘条件下,培养液中加入碘的量随着蔬菜的快速吸收而迅速降低,使得可供蔬菜吸收的碘越来越少,而随着培养时间的延长,生物量增加而产生的稀释效应也使得蔬菜可食用部位碘的含量降低。在持续供碘条件下,由于蔬菜根部能持续不断的得到外源碘的供应,因此能始终保持蔬菜对碘相对较高的吸收速率,从而使蔬菜中碘含量增加。从图 5,图 6 上也可以看到,蔬菜在较高的供碘浓度下碘的吸收量远高于同期在低供碘浓度下碘的吸收量;另外,供试蔬菜对 I^- 的吸收量均明显高于对 IO_3^- 吸收的量;芹菜对碘的吸收能力大于小白菜。

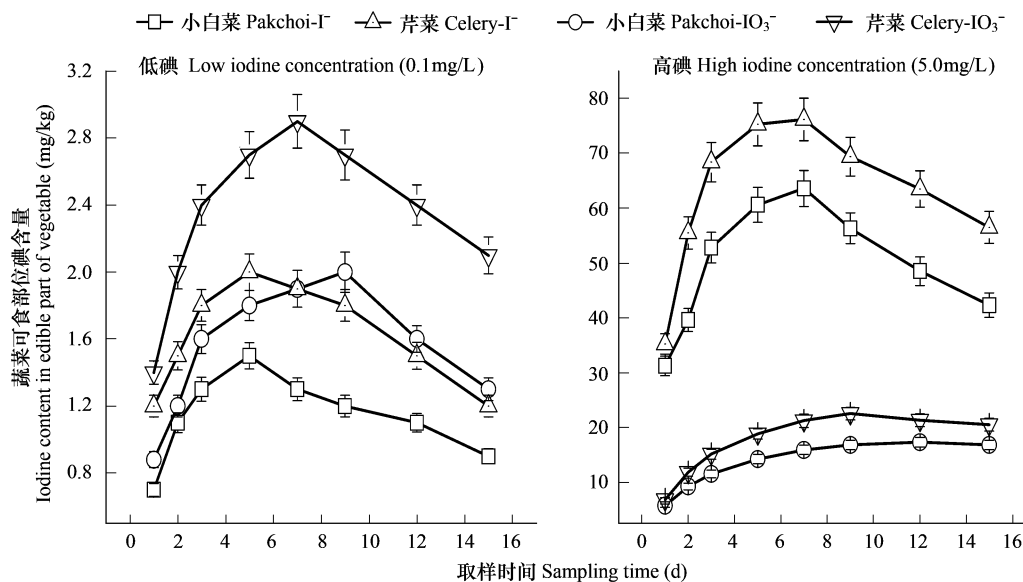


图 5 一次供碘连续培养条件下蔬菜可食用部位碘吸收量的动态变化

Fig. 5 Dynamic variations of iodine content in edible part of vegetable after once exogenous iodine addition

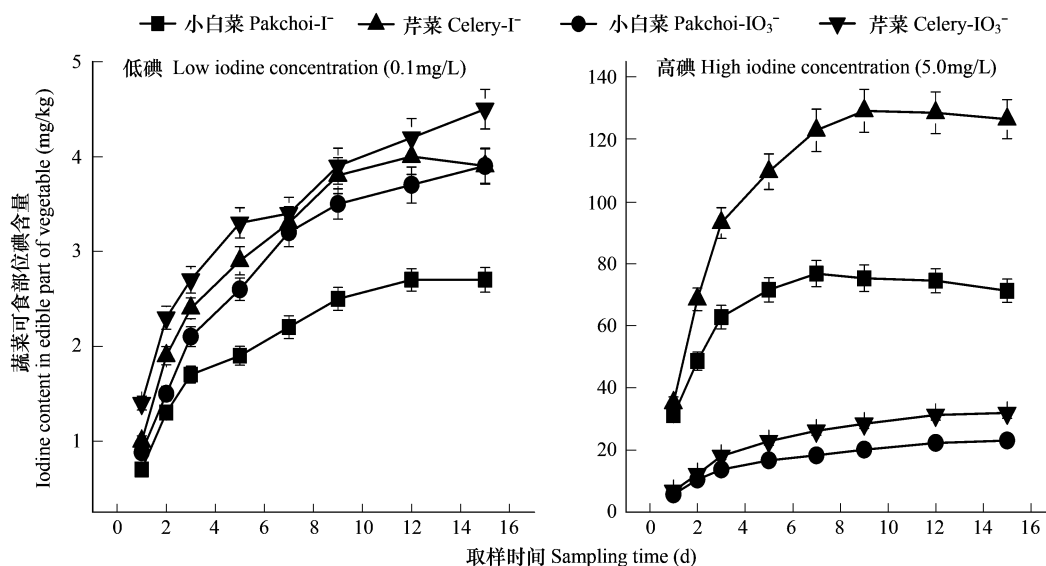


图 6 持续碘添加条件下蔬菜可食用部位碘吸收量的动态变化

Fig. 6 Dynamic variations of iodine content in edible part of vegetable at constant iodine concentration

通过蔬菜各器官碘含量和积累量的分析表明,小白菜和芹菜根部碘含量分别是茎和叶的 1.79 ~ 3.08 倍和 1.67 ~ 2.42 倍,且随介质碘浓度的提高根中的碘含量大幅度增加,根吸收的碘转移到地上部的比例随介质碘浓度的提高而增加。碘在蔬菜中的这种分配特征可能是植株自我保护机制的反应。因为通过根系的富集

作用可以阻止过量的碘进入地上部分的组织和细胞,避免造成更大的毒害。尽管蔬菜随培养液中碘浓度的增高其吸收碘的量也增大,但富集系数却随着营养液中碘浓度的增大而降低,相应的观察发现随着碘处理浓度的增大,供试蔬菜的根由长变短,由白变褐,直至变黑,因此,富集系数的降低与蔬菜根系受到过量碘毒害后而吸收能力下降有关。从 IO_3^- 和 I^- 两种不同碘源看,在低浓度下(0.1 mg/L)显示出 IO_3^- 更有利于被供试蔬菜所吸收和积累;而在高浓度(5.0 mg/L)下,显示出 I^- 是蔬菜更容易吸收的碘形态(表 3),添加 I^- 的蔬菜体内碘的积累量和富集系数均显著高于 IO_3^- 。这表明了在低浓度下蔬菜对 IO_3^- 的主动吸收能力更强,在高浓度下蔬菜对碘以被动吸收为主,由于 I^- 的离子半径比 IO_3^- 小,因而更有利于通过植物质膜而进入植物体内。

表 3 持续加碘条件下连续培养 15d 后蔬菜吸收碘的分布(富集系数)
Table 3 The distribution of iodine in different part of vegetable after 15 days cultivation(AC)

蔬菜各器官 Different parts of vegetable		IO_3^-		I^-	
		低浓度	高浓度	低浓度	高浓度
		Low concentration (0.1 mg/L)	High concentration (5 mg/L)	Low concentration (0.1 mg/L)	High concentration (5 mg/L)
小白菜 Pakchoi	根 Root	101.2 ± 8.3	9.8 ± 0.6	72.5 ± 4.4	32.1 ± 1.8
	菜梗 Stem	34.3 ± 2.1	4.02 ± 0.3	23.5 ± 1.5	13.3 ± 0.8
	菜叶 Leaf	47.2 ± 2.8	5.6 ± 0.4	36.2 ± 1.9	16.9 ± 1.0
芹菜 Celery	根 Root	132.6 ± 10.4	15.3 ± 0.8	83.1 ± 5.1	45.3 ± 2.3
	茎 Stem	45.4 ± 2.8	6.4 ± 0.4	39.1 ± 2.1	25.3 ± 1.7
	叶 Leaf	54.6 ± 3.1	7.2 ± 0.4	45.2 ± 2.3	27.2 ± 1.5

富集系数 = 蔬菜碘含量/培养介质中碘浓度 Accumulation Coficient(AC) = iodine content in vegetable/iodine content in solution

2.6 氯对蔬菜吸收碘的影响

氯是植物的必需营养元素,许多研究结果已经表明植物吸收和积累氯是由氯离子通道进行的^[24,25]。通过向培养液中添加一定浓度氯的试验结果表明,在低碘浓度下,氯会降低蔬菜对碘的吸收速率,而在高碘浓度下,氯对蔬菜吸收碘的影响逐渐减弱(图 7),如图 7 所示,碘浓度 0.1 mg/L 处理下,小白菜对 I^- 和 IO_3^- 的吸速率分别降低了 26.1% 和 11.2%,对应芹菜对这两种不同形态碘的吸收速率降低了 19.2% 和 6.0%。造成这种现象的原因,可能是由于氯和碘同为卤族元素,并且有相似的化学性质,在低浓度吸收过程中因氯的竞

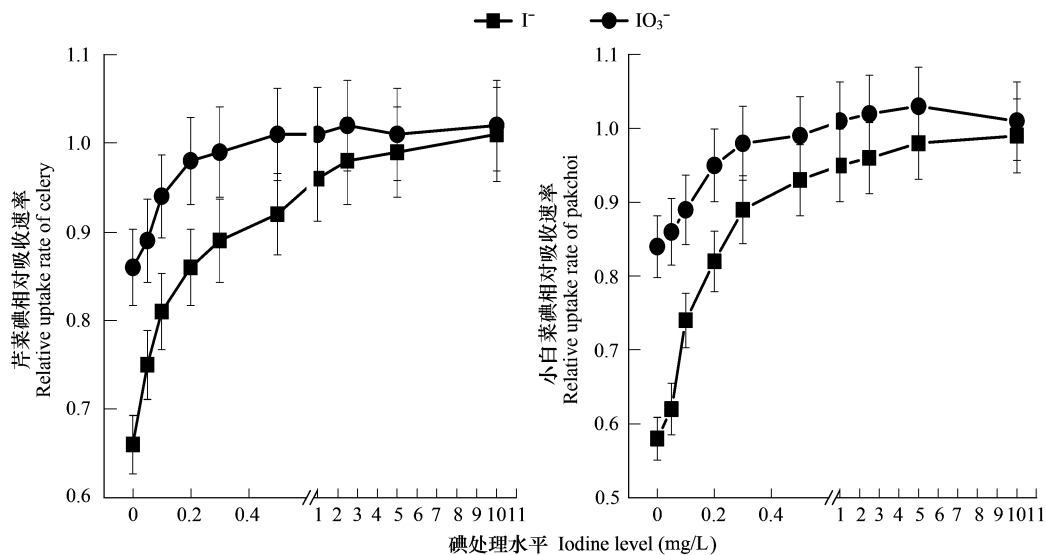


图 7 Cl^- 添加下蔬菜碘吸收速率的变化

Fig. 7 Dynamic variations of uptake rate with the addition of Cl^-

相对吸收速率 = 添加 Cl^- 蔬菜碘吸收速率/未加 Cl^- 蔬菜碘吸收速率 relative uptake rate = the uptake rate with Cl^- added/the uptake rate without Cl^-

竞争性吸收作用影响了蔬菜对碘的吸收,同时这也说明了蔬菜对低浓度碘的吸收具有与植物吸收氯的相类似的机制,但对于蔬菜吸收碘是否也是通过离子通道进行的还有待于进一步的研究。植物生长介质中通常含有较高浓度的氯,在土壤中的背景值通常可达 100 mg/kg^[26],该研究结果表明了土壤中的高氯含量有可能会降低土壤外源碘的施用效果,因而在实际运用中需要加以克服。

3 结论

3.1 蔬菜碘吸收速率与时间的关系表明,蔬菜碘吸收速率在短时间内迅速上升达到最高值后随着时间的延长逐步下降。

3.2 蔬菜吸收碘的速率与浓度关系表明,在低浓度下(<0.5 mg/L)蔬菜 IO_3^- 吸收速率与浓度之间的曲线图符合酶促反应动力学方程,具有元素主动吸收的基本特征。而在碘高浓度范围内(0.5 ~ 10.0 mg/L),蔬菜碘吸收速率随着外源碘浓度的提高呈现直线增加,反映了被动吸收特征。这一结果通过代谢抑制剂(2,4-DNP)对蔬菜碘吸收速率的影响试验得到了进一步证明。

3.3 在一次供碘连续培养条件下蔬菜可食部位吸收碘的量随着处理时间的延长表现出前期上升后下降的趋势,而在连续供碘条件下蔬菜可食部位碘的含量则表现出持续增加的趋势;在低浓度下(0.1 mg/L)蔬菜对 IO_3^- 的吸收能力强于对 I^- 的吸收,而在较高浓度下(5 mg/L),蔬菜对 I^- 的吸收量明显高于 IO_3^- 。蔬菜对碘的吸收不仅与介质浓度有关,而且与植株—介质之间的碘浓度差有关。

3.4 蔬菜在低浓度下对碘的富集系数明显大于高浓度,芹菜对碘的富集系数大于小白菜,蔬菜不同部位富集碘的次序表现为:根 > 叶 > 茎(小白菜为菜梗)。

3.5 蔬菜培养溶液中 Cl^- 的加入降低了低碘浓度下蔬菜碘吸收速率,而随着碘浓度的增加 Cl^- 对蔬菜碘吸收速率的影响逐渐减弱。

References:

- [1] Knap G, Maicin B, Fecher P, *et al.* Iodine determination in biological materials Options for vsample preparation and final determination. *Fresenius J. Abak. Chem.*, 1998, 362: 508—513.
- [2] Wu Q L, Yang Y A, Xie Z M, *et al.* Microelement and biohealth. Guiyang: Guizhou Science and Technology Press, 2000.
- [3] Yu F G. The discussion of condition and new way in iodine supply. *Chinese Journal of Endemiology*, 2004, 19(4): 217—221.
- [4] Hetzel B S. Iodine deficiency disorders (IDD) and their eradication. *Lancet*, 1983, 2: 1126—1129.
- [5] Shohei H, Naoshi I, Junri A, *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.
- [6] Wu S H, Xing G X. The character of iodine and brodine distribution in Chinese soil. *Soil*, 1996, 1: 21—23.
- [7] Zheng B S, Wang B B, Zhu G W, *et al.* Environmental geochemistry of iodine in atmosphere and plant-Review and hypothesis. *Earth Science and Frontiers*, 2001, 8(2): 359—365.
- [8] Chen Z P. The assess of USI and condition of people iodine nutrition. *Chinese Journal of Endemiology*, 2002, 17(4): 251—254.
- [9] De Long R, Leslse P W. Effect on infant mortality of iodination of irrigation water in a serverely iodine-dificent area of China. *The Lancet*, 1997, 350(13): 771—773.
- [10] Liu H Y, Bai H Y. The study of iodine lose in salt. *China Well and Rock Salt*, 2004, 5: 43—45.
- [11] Shi L, Zhou R H, Wang G Y. Effect of iodine lose under different cooking method. *Journal of Hygiene Research*, 1998, 27(6): 412—414.
- [12] Zhou Y L, Jiang Q Y, Wu M Y, *et al.* Influence of salt iodization on hospitalization rate of hyperthyroid ism in mild iodine deficiency areas. *Chinese Journal of Endemiology*, 2003, 22(6): 530—531.
- [13] Wang F J, Xu M, Wu S X, *et al.* The relation between USI and Toxic Nodular Goiter. *Journal of Surgery Concepts and Practice*, 2003, 8(4): 333—334.
- [14] Xu W M, Wang G H, Jin D F, *et al.* Investigation on the incidence of hyperthyroidism among iodine supplied population of low grade iodine deficiency area. *Chinese Journal of Cendemiology*, 1999, 18(6): 453—456.
- [15] Huang Y Z, Zhu Y G, Hu Y, *et al.* Iodine in soil-plant systems and prevention of iodine deficiency disorders. *Ecology and Environment*, 2003, 12(2): 228—231.
- [16] Ross M W. Agriculture: the real nexus for enhancing bioavailable micronutrients in food crops. *Journal of Trace Elements in Medicine*, 2005, 18:

299—307.

- [17] Zhu Y G, Huang Y Z, Hu Y, *et al.* Iodine uptake by spinach plants grown in solution culture: effects of iodine species and solution concentrations. *Environmental International*, 2003, 29: 33—37.
- [18] Weng H X, Weng J K, Yong W B, *et al.* Capacity and degree of iodine absorbed and enriched by vegetable from soil. *Journal of Environmental Sciences*, 2003, 15(1): 107—111.
- [19] GB/T 13882-92. 1992. Colorimetric method with ferric thiocyanate and sodium nitrite (mensuration of iodine in feed). Beijing: Chinese Standard Publishing House, 1992.
- [20] Wang J F, Duan L Z, Liu N H. Determination of micro amounts of iodine in soil by amplified reaction colorimetric method. *Analytical Laboratory*, 1999, 18(6): 71—74.
- [21] Jiang T H, Zheng S J, Shi J Q, *et al.* Several considerations in kinetic research on nutrients uptake by plants. *Plant Nutrition and Fertilizer Sciences*, 1995, 1(2): 11—19.
- [22] Michaelis L, Menten M L. The kinetics of invertin action. *Biochem*, 1913, 49: 333—369.
- [23] Shi J Y, Chen Y X, Tian G M, *et al.* Copper uptake mechanism of *Elsholtzia splendens* and *Commelina communis*. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2004, 10(6): 642—646.
- [24] Hasegawa P M, Bressan R A, Zhu J K, *et al.* Plant cellular and molecular responses to high salinity. *Annu Rev Plant Physiol Mol Biol*, 2000, 51: 463—469.
- [25] White P J, Broadley M R. Chloride in soils and its uptake and movement within the plant: a review. *Ann Bot*, 2001, 88: 967—988.
- [26] Zou C M, Gao J S. Effects of long-term application of chlorine-containing chemical fertilizers on chloride accumulation and nutrient balance in paddy fields. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(11): 2557—2562.

参考文献:

- [2] 吴求亮, 杨玉爱, 谢正苗. 等. 微量元素与生物健康. 贵阳: 贵州科技出版社, 2000.
- [3] 于福贵. 我国补碘状况及补碘新途径的探讨. *中国地方病防治杂志*, 2004, 19(4): 217~221.
- [6] 吴世汉, 邢光熹. 我国主要土壤类型中溴和碘的分布特征. *土壤*, 1996(1): 21~23.
- [7] 郑宝山, 王滨滨, 朱广伟, 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.
- [8] 陈祖培. 全民食盐加碘的意义及当前人群碘营养状况的基本评价. *中国地方病杂志*, 2002, 17(4): 251~254.
- [10] 刘会媛, 白鹤英. 加碘食盐中碘损失的实验研究. *中国井矿盐*, 2004(5): 43~45.
- [11] 石磊, 周瑞华, 王光亚. 食物烹调方法对含碘食盐中碘含量的影响. *卫生研究*, 1998, 27(6): 412~414.
- [12] 周永林, 江庆远, 吴民义, 等. 食盐加碘对轻度缺碘地区甲状腺功能亢进症患者住院率的影响. *中国地方病学杂志*, 2003, 22(6): 530~531.
- [13] 王凤军, 徐曼, 武首先, 等. 普遍食盐加碘与结节性甲状腺肿继发甲亢的相关性. *外科理论与实践*, 2003, 8(4): 333~334.
- [14] 徐卫民, 王国华, 金达丰, 等. 轻度缺碘人群补碘后甲亢发病情况调查. *中国地方病学杂志*, 1999, 18(6): 453~456.
- [15] 黄益宗, 朱永官, 胡莹, 等. 土壤-植物系统中的碘与碘缺乏病防治. *生态环境*, 2003, 12(2): 228~231.
- [19] GB/T 13882-92. 硫氰酸铁-亚硝酸催化动力学法(饲料中碘的测定方法). 北京: 中国标准出版社, 1992.
- [20] 汪建飞, 段立珍, 刘乃会. 放大反应比色法测定土壤中微量碘. *分析实验室*, 1999, 18(6): 71~74.
- [21] 蒋廷惠, 郑绍建, 石锦芹, 等. 植物吸收养分动力学研究中的几个问题. *植物营养与肥料学报*, 1995, 1(2): 11~19.
- [23] 施积炎, 陈英旭, 田光明, 等. 海州香薷和鸭跖草铜吸收机理. *植物营养与肥料学报*, 2004, 10(6): 642~646.
- [26] 邹长明, 高菊生. 长期施用含氯化肥对稻田土壤氯积累及养分平衡的影响. *生态学报*, 2004, 24(11): 2557~2562.