植物营养与肥料学报 2012,18(5):1204-1212
Plant Nutrition and Fertilizer Science

控释碘肥对生菜富碘及若干生理特性的影响

陈海宁,张 民*,孙 瑶
(土肥资源高效利用国家工程实验室,国家缓控释肥工程技术研究中心,作物生物学国家重点实验室,
山东农业大学资源与环境学院,山东泰安 271018)

摘要: 通过温室盆栽试验,以普通碘肥为对照,研究了包膜控释碘肥对生菜富碘及某些生理特性的影响。结果表明,施碘处理与不施碘相比显著提高生菜叶片的碘含量。在两种施碘水平下(I 10 和 20 mg/kg,土),与普通碘肥相比,控释碘酸钾和控释碘化钾均显著提高生菜叶片的碘含量,分别提高了 46.60%～61.16%、46.59%～58.53%;同时提高了生菜生物量、叶片叶绿素含量、维生素 C 含量及抗氧化酶活性[超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化物酶(POD)和过氧化氢酶(CAT)],降低了生菜叶片硝态氮和丙二醛(MDA)含量;碘酸根离子处理的土壤碘的淋失率高于碘离子处理;施用控释碘酸钾和控释碘化钾后,土壤淋溶液中碘淋失量峰值出现时间延后,碘淋失率较普通碘肥分别降低了 45.99%～50.97%、39.18%～46.29%,差异显著。碘肥用量试验的结果表明,与施碘 10 mg/kg 相比,施碘 20 mg/kg 时显著提高了生菜叶片的碘含量,但对生菜品质及生理指标无显著影响。与普通碘肥相比,控释碘肥不仅显著提高了生菜叶片对碘的富集,还减少了碘素从土壤中的流失量,提高了碘肥的利用率。施用控释碘肥是培育富碘蔬菜的有效途径之一。

关键词: 控释碘酸钾;控释碘化钾;生菜;碘含量;品质;生理特性
中图分类号: S143.7;S636.2.061　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 1008-505X(2012)05-1204-09

Effects of controlled-release iodine fertilizers on iodine accumulation and some physiological characteristics of lettuce

CHEN Hai-ning, ZHANG Min*, SUN Yao
(*National Engineering Laboratory for Efficient Utilization of Soil and Fertilizer Resources/ National Engineering and Technology Research Center for Slow and Controlled Release Fertilizers/State Key Laboratory of Crop Biology/ College of Resources and Environment, Shandong Agricultural University, Taian, Shandong 271018, China*)

Abstract: A greenhouse pot experiment was conducted to assess the effects of controlled-release iodine fertilizers on the iodine accumulation and physiological response of lettuce in comparison with traditional iodine fertilizers. The plants were subjected to different iodine fertilizers containing two levels of iodine as iodate or iodide, 10 and 20 mg/kg soil. The results show that all the treatments with iodine applied significantly increase the iodine contents in leaves of lettuce. The leaf iodine contents developed from the controlled-release potassium iodate and the controlled-release potassium iodide are significantly enhanced by 46.60% -61.16% and 46.59% -58.53% in comparison with the corresponding traditional iodine fertilizers, respectively. The biomass amounts (fresh mass and dry mass of shoot and root) and leaf chlorophyll contents of lettuce grown with the controlled-release iodine fertilizers are higher than those of the traditional iodine fertilizers. The growth-promoting function is also associated with the increases of vitamin C and activities of superoxide dismutase (SOD), peroxidase (POD) and catalase (CAT) in lettuce leaves. Application of the controlled-release iodine fertilizers results in the reduced NO_3^--N content and diminished lipid peroxidation (MDA) content of lettuce leaves. Amount of iodine in leachate peaked with controlled-release iodine fertilizers are higher than those of the traditional iodine fertilizers. The controlled-release potassium iodate and the

收稿日期: 2012-02-18　　**接受日期:** 2012-05-08
基金项目: "十二五"国家科技支撑计划(2011BAD11B01, 2011BAD11B02);国家"948"重点项目(2011-G30)资助。
作者简介: 陈海宁(1981—),女,山东潍坊人,博士研究生,主要从事植物营养与新型肥料研究。E-mail: heninchen@gmail.com
*通讯作者 Tel: 0538-8241531, E-mail: minzhang-2002@163.com

controlled-release potassium iodide also significantly reduce the iodine leached rates by 45.99%-50.97% and 39.18%-46.29% compared to the traditional fertilizers, respectively. When iodine applied rate is 20 mg/kg soil, the leaf iodine content is significantly higher than that of the 10 mg/kg soil, while no significant differences are found in other indexes. Overall, the controlled-release iodine fertilizers increase iodine accumulation in lettuce leaves, prevent iodine leaching and improve iodine use efficiency, and are proven to be the optimum for cultivating iodine-enriched vegetables.

Key words: controlled-release potassium iodate; controlled-release potassium iodide; lettuce; iodine content; quality; physiological characteristic

碘是人体必需的微量元素之一,在甲状腺激素的合成中起着重要的作用[1]。人体缺碘将会引发一些疾病,如甲状腺肿大,孩童生长发育不良、智力低下,胎儿畸形、死亡,孕妇流产等[2]。由碘缺乏引起的疾病统称为碘缺乏病(iodine deficiency disorders, IDD)[3]。据国际碘缺乏病防治委员会(ICCIDD)报道,目前全球有 22 亿人生活在缺碘地区,约占全球总人口的 38%。我国的碘缺乏病比较严重,约有 4.25 亿人生活在碘缺乏病区,因碘缺乏所导致的智残者达 1000 万人,而智商偏低者则难以估计。

食盐加碘是目前国内外认可的防治碘缺乏病的最简便和经济实用的方法。我国实行全民食盐加碘消除碘缺乏病的工作取得了肯定的成绩,但食盐加碘在控制 IDD 的同时也存在明显的缺陷。近年来,全国普遍出现的碘过量问题已引起甲状腺学界和地方病学界的高度关注[4],国家有关部门及时调整了"一刀切"的加碘盐政策,但由于食盐中添加的是无机碘,还存在易经升华损失、生物利用率低[5]等问题。资料显示,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%[6],且从植物性食品中自然摄取有机碘更有利于维持人体碘的平衡[7]。因此,如何通过食物链安全有效地补碘对人类健康十分重要。由于籽粒对碘的富集程度较低,作物籽粒不能作为有效碘源[8],碘在可食部分的富集主要通过木质部运输,蔬菜富集碘可满足人们的日常需碘量[9]。鉴于蔬菜在人们生活中的重要地位及在人体食物构成中占据的重大比例,近年来,研究者开始逐步探索蔬菜对碘的吸收和积累特性[8,10-15]。部分叶菜对碘的富集虽然较多,但含碘叶菜经烹饪后,可供人体吸收利用的碘大量减少,而生菜属鲜食蔬菜,且深受大众喜爱,是今后开发功能性蔬菜食品的主要研究方向之一。此外,土壤中的碘在化学和微生物的作用下,向大气释放元素碘、碘化氢和甲基碘,从而造成土壤碘的挥发损失。Whitehead[16]发现土壤(0—15 cm)施碘 30 d 后的碘挥发率最高可达 57%,而在 pH 为 5.7 的沙土中,碘的挥发达 100%。碘还易随着降雨或者灌溉水渗入到深层土壤和地下水,并通过沟渠排入河流湖泊,导致碘淋溶损失。

农业领域中有关碘肥研究的报道主要侧重于农产品中碘的富化,而对碘肥的研制还基本处于空白阶段;此外,碘对农作物品质及生理方面的影响也鲜有报道。控释肥因具有提高肥料利用率、减少环境污染等优点已成为当今的研究热点[17]。当前,控释肥的研究主要针对农业生产中的大量元素,而在微量元素及其它有益元素方面涉及较少。本研究采用聚合物包膜控释技术,结合生菜的生长需肥规律制成专用控释碘肥,并进行控释碘肥的肥效试验,为提高碘的生物有效性和培育含碘蔬菜提供理论依据。

1　材料与方法

1.1　试验材料

供试土壤采自山东农业大学南校区试验基地,土壤类型为棕壤(普通简育湿润淋溶土, Typic-Hapli-Udic Argosols),质地为粉砂壤土,其基本理化性状为: pH 值 7.41,有机质含量 9.45 g/kg,全氮 0.97 g/kg,有效磷 68.92 mg/kg,速效钾 117.16 mg/kg,电导率 138.83 μs/cm,总碘 0.92 mg/kg,砂粒 55.14%,粉粒 31.19%,粘粒 13.67%。供试作物为香港玻璃生菜(*Lactuca sativa* L.)。供试控释碘肥由"国家缓控释肥工程技术研究中心"试验基地制作提供,是以粉末状尿素为载体、碘化钾或碘酸钾为碘源造粒后包膜而成,包括含碘量为 4% 和 8% 的四种含氮控释碘肥(约 0.25 g/粒,含氮 42%),其在 25℃水中碘素累积释放量大于 80% 时的养分释放期约为 60 d;普通碘肥为粉末状碘酸钾(含碘 59.3%)和碘化钾(含碘 76.5%)。其他肥料分别为大颗粒控释尿素(约 0.25 g/粒,含氮 42%,释放期

约为60 d)、粉末状过磷酸钙(P_2O_5 16%)和硫酸钾(K_2O 50%)。

1.2 试验方法

试验于2011年4月～7月在山东农业大学南校区"土肥资源高效利用国家工程实验室"和"国家缓控释肥工程技术研究中心"中试试验基地温室内进行,白天温度约为16～28℃,夜间温度约为14～25℃,相对湿度约为65%～70%。

试验设置纯碘的浓度为10和20 mg/kg土两个水平,包括9个处理,分别为:1)CK,不施碘对照;2)TI-10,普通碘化钾用量为I 10 mg/kg;3)TI-20,普通碘化钾用量为I 20 mg/kg;4)TIO-10,普通碘酸钾用量为I 10 mg/kg;5)TIO-20,普通碘酸钾用量为I 20 mg/kg;6)CRI-10,控释碘化钾用量为I 10 mg/kg;7)CRI-20,控释碘化钾用量为I 20 mg/kg;8)CRIO-10,控释碘酸钾用量为I 10 mg/kg;9)CRIO-20,控释碘酸钾用量为I 20 mg/kg。各处理氮、磷、钾用量相同,N-P_2O_5-K_2O施用量按0.11-0.08-0.10 g/kg土折算,由于含氮42%的控释碘肥与控释尿素折合等量纯氮,因此控释碘肥处理不再施用控释尿素;过磷酸钙用量均为0.50 g/pot,硫酸钾用量均为0.20 g/pot,其余施肥量列于表1中。每个处理4次重复,随机区组排列。将土样过2 mm筛,称取1.0 kg与肥料粉末混匀,装入盆内(材质为PE,规格17 cm×11 cm×15 cm),大颗粒控释碘肥、控释尿素均置于盆内土壤中部。生菜种子用5%双氧水浸泡30 min后,用自来水反复冲洗干净,冰箱冷藏24 h后,放到25℃条件下催芽2～3 d,出芽种子播撒于盆内,出苗10 d后每盆留健壮幼苗1株,定期定量浇水,各盆浇水量保持一致。

表1 盆栽生菜施肥方案

Table 1 Experimental design of the potted lettuce

处理 Treatment	碘肥类型 Iodine fertilizer type	施肥实物量 Fertilizer applied rate(g/pot)		施肥折纯量(g/pot) Nutrient applied rate I-N-P_2O_5-K_2O
		碘肥 Iodine fertilizer	控释尿素 Controlled-release urea	
CK		0	0.25	0-0.105-0.08-0.10
TI-10	普通碘化钾 Traditional KI	0.013	0.25	0.01-0.105-0.08-0.10
TI-20	普通碘化钾 Traditional KI	0.026	0.25	0.02-0.105-0.08-0.10
TIO-10	普通碘酸钾 Traditional KIO_3	0.017	0.25	0.01-0.105-0.08-0.10
TIO-20	普通碘酸钾 Traditional KIO_3	0.034	0.25	0.02-0.105-0.08-0.10
CRI-10	4%控释碘化钾4% Contr.-release KI	0.25	0	0.01-0.105-0.08-0.10
CRI-20	8%控释碘化钾8% Contr.-release KI	0.25	0	0.02-0.105-0.08-0.10
CRIO-10	4%控释碘酸钾4% Contr.-release KIO_3	0.25	0	0.01-0.105-0.08-0.10
CRIO-20	8%控释碘酸钾8% Contr.-release KIO_3	0.25	0	0.02-0.105-0.08-0.10

1.3 采样与分析测定

生菜播种后第5、10、28、56、70 d进行土壤淋溶液的收集,最后一次收集完毕后收获。生菜收获后分为根部和地上部,用去离子水洗净,吸水纸擦干后,立即称鲜重。然后取适量叶片用于测定叶绿素、维生素C、硝态氮和酶活性。其余部分在50℃烘干至恒重,用于测定植株的总碘含量。土壤基本理化性质采用常规方法测定[18];土壤碘含量和淋溶液碘含量的测定采用放大反应比色法[19]。植株体内碘含量的测定采用硫氰酸铁-亚硝酸催化动力学法[20];植株维生素C含量、叶绿素含量、硝态氮含量、超氧化物歧化酶(SOD)活性、过氧化物酶(POD)活性、过氧化氢酶(CAT)活性、丙二醛(MDA)含量的测定采用王学奎的方法[21]。

1.4 计算公式及数据处理与分析

植株碘积累量=植株碘含量×单株生物量,其中植株碘含量与生物量均以干基计算。

碘素淋失率(%)=(淋溶液碘累积量-对照淋溶液碘累积量)/肥料总碘量×100

试验数据均采用Microsoft Excel 2003软件处理和绘图,采用SAS 8.1软件进行差异显著性检验($P<0.05$)。

2 结果与分析

2.1 不同处理对生菜地上部和根部碘含量的影响

施用碘肥显著提高了生菜植株中碘的含量(图1)。在相同的碘水平下,施用控释碘肥后生菜地上部、根部的碘含量均高于其对应的普通碘肥处理。在 10 mg/kg 碘处理下,以 CRIO-10 处理的碘含量最高,分别为 8.09 mg/kg 和 18.63 mg/kg。TIO-10 处理生菜地上部和根部的碘含量与 TI-10 相比无显著差异。CRIO-10 处理地上部的碘含量是 CRI-10 的 1.21 倍,差异显著；二者根部碘含量无显著差异。在 20 mg/kg 碘处理下,生菜地上部、根部碘含量以 CRIO-20 处理最大,分别为 12.77 mg/kg 和 24.38 mg/kg。CRIO-20 处理地上部、根部碘含量显著高于 CRI-20,分别增加了 30.57% 和 23.38%。此外,同种碘肥的不同碘水平之间也存在差异,20 mg/kg 碘处理下,生菜地上部的碘含量均显著高于 10 mg/kg 的碘处理。上述结果说明：生菜生长过程中通过其根系吸收的碘绝大部分保留在根部,只有一小部分由根部通过木质部运输到地上部；且生菜地上部和根部对碘酸根离子的吸收富集量远高于碘离子；碘在控释条件下,生菜各器官对碘离子和碘酸根离子的吸收富集量远高于普通碘肥处理；适当增加施碘量可提高生菜地上部、根部的碘含量。

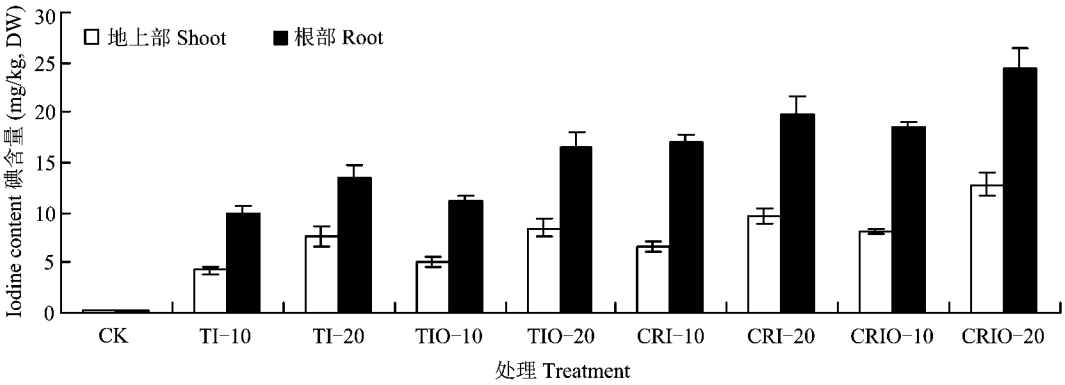

图 1　不同处理对生菜地上部和根部碘含量的影响

Fig. 1　Effects of different treatments on iodine contents in lettuce shoots and roots

2.2 不同处理对生菜植株生物量及碘积累的影响

由表 2 可知,施用碘肥可提高生菜地上部和根部的鲜重和干重。在 10 mg/kg 碘处理下,各处理生菜地上部和根部鲜重、干重大小顺序均为 CRIO-10 > CRI-10 > TIO-10 > TI-10 > CK。CRIO-10 处理生菜的地上部鲜重显著高于 TIO-10,增加了 19.70%,其地上部干重、根部鲜重及干重较 TIO-10 分别提高了 3.42%、12.59% 和 17.95%,但差异不显著。CRI-10 处理生菜地上部鲜重、干重均显著高于 TI-10,而其根部鲜重和干重与 TI-10 相比无显著差异。在 20 mg/kg 碘处理下,以 CRIO-20 处理生菜地上部和根部的鲜重、干重最高。TI-20 处理地上部和根部的鲜重、干重略高于 TIO-20。控释碘处理 CRIO-20 和 CRI-20 各器官的鲜重和干重与相应的普通碘肥处理 TIO-20 和 TI-20 对比无显著差异。此外,在同一施肥条件下,增加施碘量对生菜的生物量无显著影响。以上结果表明,适量外源碘可以促进生菜的营养生长；碘的不同形态对生菜各器官发育的影响存在差异,碘酸根离子优于碘离子。此外,与常规施肥方式相比,控释碘肥更能有效地刺激生菜各器官生物量的积累。

由表 2 可知, CRIO-20 和 CRIO-10 处理生菜地上部对碘的富集量均显著高于其相应普通碘肥处理,而 CRI-20 和 CRI-10 处理仅略高于其相应普通碘肥。就生菜根部的富碘量而言,施用控释碘肥的生菜其根部碘积累量均显著高于相应普通碘肥。

2.3 不同处理对土壤淋溶液中碘淋失量的影响

碘在土壤溶液中以阴离子形态存在,不易被土壤胶体吸附而易于随水淋失,因此可以用土壤淋溶液中碘淋失量来进一步探讨控释碘肥的生物有效性。由表 3 可以看出,在不同的碘形态和施肥方式下,土壤淋溶液中碘淋失量存在差异。生菜生育期内,不同处理淋溶液中碘淋失量变化趋势基本一致,即先上升后下降。碘酸根离子处理条件下淋溶液中碘淋失量一般高于碘离子处理条件下淋溶液中碘淋失量。普通碘肥施入土壤后养分释放迅速,生菜播

表2 不同处理生菜的生物量及碘积累量

Table 2 Biomass and iodine accumulation of lettuce grown under different treatments

处理 Treatment	地上部 Shoot			根部 Root		
	鲜重 Fresh mass (g/plant)	干重 Dry mass (g/plant)	碘积累量 Iodine accumulation (μg/plant)	鲜重 Fresh mass (g/plant)	干重 Dry mass (g/plant)	碘积累量 Iodine accumulation (μg/plant)
CK	49.23 ± 2.49 c	5.91 ± 0.06 c	1.10 ± 0.10 e	2.84 ± 0.11 c	0.27 ± 0.01 c	0.06 ± 0.00 e
TI-10	51.81 ± 1.04 bc	6.09 ± 0.12 bc	33.48 ± 2.58 cd	3.68 ± 0.24 bc	0.35 ± 0.03 bc	4.37 ± 0.58 cd
TI-20	55.29 ± 3.50 ab	6.14 ± 0.22 bc	46.01 ± 5.46 bc	4.05 ± 0.24 ab	0.37 ± 0.03 ab	4.97 ± 0.44 cd
TIO-10	52.80 ± 2.53 b	6.73 ± 0.31ab	25.62 ± 1.52 d	4.13 ± 0.46 ab	0.39 ± 0.03 ab	3.51 ± 0.61 d
TIO-20	52.55 ± 1.57 b	6.05 ± 0.19 bc	51.43 ± 5.06 b	3.92 ± 0.36 ab	0.37 ± 0.02 ab	6.07 ± 0.21 c
CRI-10	59.45 ± 0.90 ab	6.93 ± 0.21 a	46.73 ± 4.61 bc	4.44 ± 0.18 ab	0.43 ± 0.02 ab	7.91 ± 0.91 b
CRI-20	59.28 ± 4.05 ab	6.06 ± 0.27 bc	59.02 ± 3.81 b	4.47 ± 0.12 ab	0.41 ± 0.02 ab	8.14 ± 0.75 b
CRIO-10	63.20 ± 1.94 a	6.96 ± 0.19 a	55.92 ± 1.36 b	4.65 ± 0.26 a	0.46 ± 0.04 a	8.02 ± 0.57 b
CRIO-20	61.90 ± 2.71 a	6.74 ± 0.09 ab	85.94 ± 7.40 a	4.68 ± 0.29 a	0.47 ± 0.04 a	11.33 ± 0.24 a

注(Note):同列数值后不同字母表示差异达5%显著水平 Values followed by different letters in the same column are significant at the 5% level.

表3 不同处理土壤淋溶液中碘淋失量

Table 3 Amount of iodine leached in leachate fractions under different treatments

处理 Treatment	淋滤液中碘淋失量 Amount of iodine leached (μg)					淋失率(%) Leached rate
	1～5 d	6～10 d	11～28 d	29～56 d	57～70 d	
CK	20.0 ±3.01 g	42.1 ±6.97 f	17.9 ±2.74 f	15.9 ±2.88 c	3.9 ±1.05 e	
TI-10	172.8 ±4.35 cd	254.8 ±9.30 de	1420.7 ±132.07 c	239.7 ±20.51 b	161.0 ±29.72 c	21.49 b
TI-20	207.3 ±26.85 c	766.2 ±26.85 b	2264.3 ±171.31 b	821.6 ±75.62 a	439.1 ±32.16 b	21.99 b
TIO-10	476.5 ±19.35 b	834.5 ±61.15 b	1501.5 ±95.69 c	121.1 ±8.50 bc	94.8 ±11.05 d	29.29 a
TIO-20	589.9 ±41.22 a	1358.2 ±120.74 a	3398.0 ±333.75 a	270.1 ±31.28 b	120.4 ±8.63 cd	28.18 a
CRI-10	49.3 ±2.40 g	86.7 ±4.93 f	356.8 ±38.40 ef	818.1 ±43.69 a	96.2 ±13.15 d	13.07 c
CRI-20	101.0 ±2.20 ef	291.2 ±6.62 d	806.3 ±37.92 de	852.5 ±32.63 a	410.3 ±27.87 b	11.81 c
CRIO-10	56.0 ±3.82 fg	120.1 ±7.22 ef	420.7 ±42.28 ef	808.7 ±85.83 a	130.7 ±23.32 cd	14.36 c
CRIO-20	140.9 ±7.83 de	438.5 ±26.82 c	1040.8 ±51.04 cd	933.0 ±44.64 a	590.2 ±10.27 a	15.22 c

注(Note):同列数值后不同字母表示差异达5%显著水平 Values followed by different letters in the same column are significant at the 5% level.

种后第11～28 d,碘淋失量达到最大值,而后逐渐降低。而土壤施入控释碘肥后,其淋溶液中碘淋失量变化平缓,在播种后第29～56 d碘淋失量达到峰后开始下降,这与控释碘肥的静水释放规律基本一致。以上结果表明,控释碘肥的释放高峰期比普通碘肥推迟了近1个月,施用控释碘肥增加了土壤持续供碘的能力。由碘的累积淋失率可以看出,在施用普通碘肥条件下,碘酸根离子条件下碘的淋失率显著高于等水平的碘离子处理;在施用控释碘肥条件下,碘酸根离子条件下碘的淋失率略高于碘离子处理,但差异不显著;控释碘肥处理条件下淋溶液中碘的淋失率显著低于普通碘肥,碘淋溶损失较小,大部分碘留在土壤中。

2.4 不同处理对生菜叶片叶绿素、维生素C和硝态氮含量的影响

由表4可知,在10 mg/kg碘处理下,生菜叶片中叶绿素含量以CRIO-10处理最高,较对照和TIO-10分别增加了33.33%、22.58%,差异达显著水

平；CRI-10 处理叶片叶绿素含量也显著高于对照，但与 TI-10 相比无显著差异；TI-10 和 TIO-10 处理叶片中叶绿素含量较对照略有提高。在 20 mg/kg碘处理下，CRIO-20 和 CRI-20 处理叶片叶绿素含量显著高于对照，分别增加了 25.73% 和 32.75%；TI-20 和 TIO-20 处理的叶绿素含量与对照相比无显著差异。此外，20 mg/kg 碘处理下生菜叶片的叶绿素含量与 10 mg/kg 碘处理相比无显著差异。以上表明，与普通碘肥相比，控释碘肥有效地提高生菜叶片中的叶绿素含量。

生菜叶片中维生素 C 含量以 CRIO-10 处理最高，CRIO-20 次之，分别较对照增加 39.39% 和 31.68%，差异显著（表 4）。CRI-10 与 CRI-20 处理生菜叶片维生素 C 含量分别较对照增加 16.51% 和 19.62%，但差异不显著。10 mg/kg 碘处理下，各处理生菜叶片维生素 C 含量的大小顺序为 CRIO-10 > CRI-10 > TIO-10 > TI-10 > CK；20 mg/kg碘处理下，叶片维生素 C 含量的大小顺序为 CRIO-20 > CRI-20 > TIO-20 > CK > TI-20。因此，提高施碘量对生菜叶片中维生素 C 含量无显著影响。

人体摄入的硝态氮有 70%～80% 来自蔬菜，硝态氮含量已成为蔬菜及各种绿色食品品质的一项重要品质指标。由表 4 可知，生菜叶片中硝态氮含量以 CRIO-20 处理最低，与对照相比，降低了 23.12%。10 mg/kg 碘处理下，生菜叶片中硝态氮含量表现为 TIO-10 > CK > TI-10 > CRIO-10 > CRI-10，TI-10 和 TIO-10 处理叶片硝态氮含量分别是 CRI 和 CRIO 处理的 1.06 倍和 1.64 倍。TI-20 和 TIO-20 处理叶片中硝态氮含量也均高于对照，CRI-20 处理的叶片硝态氮含量与 TI-20 相比降低了 36.15%，二者差异显著。

以上结果表明，生菜施肥后其叶片的维生素 C 含量有所提高，但以施用控释碘肥的生菜维生素 C 含量较高；且碘在控释条件下，叶片硝态氮的含量均减少，但与对照相比无差异；碘酸根离子处理条件下生菜叶片硝态氮含量略高于碘离子条件下的叶片硝态氮含量。

表 4　不同处理生菜叶片叶绿素、维生素 C 和硝态氮含量

Table 4　Contents of chlorophyll, vitamin C and NO_3^--N of lettuce leaves under different treatments

处理 Treatment	叶绿素含量 Chlorophyll content (mg/g, FW)	维生素 C 含量 Vitamin C content (mg/kg, FW)	硝态氮含量 NO_3^--N content (mg/g, FW)
CK	1.71 ±0.07 d	205.99 ±23.29 cd	1.86 ±0.60 ab
TI-10	1.94 ±0.14 abcd	212.87 ±13.29 cd	1.63 ±0.07 b
TI-20	1.67 ±0.18 d	196.21 ±12.14 d	2.60 ±0.19 a
TIO-10	1.86 ±0.10 cd	226.23 ±15.46 bcd	2.59 ±0.24 a
TIO-20	1.92 ±0.10 bcd	219.00 ±13.11 cd	2.01 ±0.10 ab
CRI-10	2.20 ±0.04 abc	239.99 ±17.11 bcd	1.54 ±0.15 b
CRI-20	2.27 ±0.10 ab	246.40 ±20.30 abc	1.66 ±0.10 b
CRIO-10	2.28 ±0.04 a	287.12 ±19.59 a	1.58 ± 0.22 b
CRIO-20	2.15 ±0.16 abc	271.25 ±14.10 ab	1.43 ±0.09 b

注(Note)：同列数值后不同字母表示差异达 5% 显著水平 Values followed by different letters in the same column are significant at the 5% level.

2.5　不同处理对生菜叶片抗氧化酶活性和丙二醛含量的影响

人类饮食中所摄入食物的抗氧化性对人类健康至关重要，人体自身的抗氧化系统与新鲜蔬菜所含的抗氧化物相配合可增强机体免疫力[11]。由表 5 可知，控释碘肥可显著提高生菜叶片的超氧化物歧化酶(SOD)和过氧化物酶(POD)活性。当施碘量为 10 mg/kg 时，生菜叶片 SOD 和过氧化氢酶(CAT)活性的大小顺序均为 CRIO-10 > CRI-10 > TIO-10 > TI-10 > CK。CRIO-10 处理生菜叶片 SOD 活性较对照和 TIO-10 分别增加了 40.02% 和 30.10%。CRIO-10 处理生菜叶片的 CAT 活性显著高于对照，提高了 29.16%；其余施碘处理的生菜叶片 CAT 活性虽高于对照，但差异不显著。除

TIO-10 外,各施碘处理均可显著提高生菜叶片的 POD 活性; CRI-10 和 CRIO-10 处理的 POD 活性分别是 TI-10 和 TIO-10 处理的 1.35 倍和 1.52 倍,差异达显著水平。当施碘量为 20 mg/kg 时,生菜叶片 SOD 活性的大小顺序为 CRIO-20 > CRI-20 > TI-20 > TIO-20 > CK, CRIO-20 处理叶片 SOD 活性较对照提高了 44.72%; 生菜叶片 CAT 活性表现为 CRI-20 > TI-20 > TIO-20 > CRIO-20 > CK。生菜叶片中丙二醛(MDA)含量与酶活性相比基本呈相反趋势,施碘可显著降低叶片中的 MDA 含量,以 CRIO-20 处理最低,CRIO-10 次之。碘酸根离子条件下,控释碘肥处理的生菜叶片 MDA 含量均显著低于普通碘肥处理。从表 5 还可以看出,提高施碘量对生菜叶片的抗氧化酶活性及 MDA 含量基本无影响。综上可知,外源碘肥尤其是控释碘肥可大幅度提高生菜叶片的抗氧化酶活性,降低 MDA 含量。

表 5 不同处理生菜叶片超氧化物歧化酶、过氧化物酶和过氧化氢酶活性及丙二醛含量

Table 5 SOD, POD and CAT activities and MDA content of lettuce leaves under different treatments

处理 Treatment	超氧化物歧化酶活性 SOD activity (U/g, FW)	过氧化物酶活性 POD activity [U/(g·min), FW]	过氧化氢酶活性 CAT activity [U/(g·min), FW]	丙二醛含量 MDA content (nmol/g, FW)
CK	144.03 ±7.19 d	1.95 ±0.12 e	3.36 ±0.23 b	4.55 ±0.06 a
TI-10	145.26 ±8.79 d	2.84 ±0.34 cd	3.55 ±0.11 b	3.87 ±0.05 bc
TI-20	168.50 ±10.27 cd	2.68 ±0.20 cd	3.70 ±0.09 b	3.96 ±0.19 bc
TIO-10	155.01 ±14.01 cd	2.45 ±0.22 de	3.59 ±0.19 b	4.04 ±0.19 b
TIO-20	151.25 ±9.11 cd	3.14 ±0.16 bc	3.60 ±0.15 b	3.83 ±0.10 bc
CRI-10	177.86 ±6.61 bc	3.83 ±0.32 a	3.90 ±0.32 ab	3.61 ±0.03 cd
CRI-20	177.07 ±6.06 bc	3.92 ±0.25 a	3.91 ±0.07 ab	4.05 ±0.11 b
CRIO-10	201.67 ±6.21 ab	3.72 ±0.33 ab	4.34 ±0.21 a	3.57 ±0.01 cd
CRIO-20	208.44 ±8.15 a	3.66 ±0.19 ab	3.59 ±0.09 b	3.40 ±0.15 d

注(Note): 同列数值后不同字母表示差异达5%显著水平 Values followed by different letters in the same column are significant at the 5% level.

3 讨论与结论

已有大量研究[8,10-12,14]表明,适量的碘酸根和碘离子均能有效地提高植株的碘含量和鲜重。本研究表明,生菜施入控释碘肥可显著增加生菜可食部分的碘含量和鲜物质量,这是因为控释碘肥由于包膜作用控制了碘的释放速度,减少了碘的淋失,碘的释放特征与生菜营养需求较为一致,且施用控释碘肥后生菜总体长势较好,吸收较多的养分,从而也实现对碘的高效利用,而速效碘肥施入不久即造成土壤中碘浓度高,淋失严重,导致产生的效益不高。本研究表明生菜体内的碘含量随外源碘浓度的提高而增加,这与之前的研究结果一致[10-15],但就生菜生物量而言,高碘条件下各器官的生物量与低碘条件相比无显著差异,这体现了生菜对碘存在奢侈吸收现象。与此同时,碘离子处理条件下土壤淋溶液中碘的淋失量一般低于碘酸根离子处理条件下土壤淋溶液中碘的淋失量,而 Dai 等[22]通过研究碘在土壤中的吸附解析特性,发现土壤对碘的吸附能力远低于对碘酸根离子的吸附能力。Blasco 等[11]和 Voogt 等[12]通过水培试验得出碘酸根离子条件下生菜对碘的吸收富集低于碘离子条件下生菜对碘的吸收富集,Zhu 等[8]和谢伶俐等[15]通过蔬菜水培试验也获得相似的结论。而在本研究中,无论碘控释与否,碘酸根离子处理条件下,生菜对碘的吸收富集高于碘离子处理条件下生菜对碘的吸收富集,Dai 等[10]通过菠菜的土培试验也证实碘酸根离子具有更高的生物有效性。而这与之前的研究结果[8,11-12,15]不一致,可能是由于碘离子施入土壤后的生物有效性降低或碘离子比碘酸根离子更易挥发。此外,生菜吸收富集的碘主要集中在根部,且根部碘含量越高,相应地上部碘含量也随之增加,这是因为根部细胞中可溶性的碘的含量越高,增加了碘由根部向地上部移动的可能性,所以地上部的碘含量也就越多。这

与洪春来等[14]的研究结果一致。

叶绿素是植物光合作用最重要的色素，在光合过程中担负着光能吸收、传递和转化的重要作用[23]。本研究中，生菜施用控释碘肥后，叶片叶绿素含量显著提高。叶绿素含量的增加有利于降低光能热耗散，使叶片吸收的光能较充分地用于光合作用[24]。有文献报道，适宜浓度的碘能提高黑麦草的叶绿素含量[25]。夏石头等[26]、于文进等[27]则认为适宜浓度的碘离子可显著提高可食部分的维生素 C 含量，这可能是因为碘能促使碳水化合物向多糖转化，促进纤维素合成，提高植物体内维生素 C 含量。此外，维生素 C 含量的差异可能与生菜对不同形态碘的吸收机理不同有关，需要进一步探讨；生菜叶片中硝酸盐含量的变化也大致如此，施用控释碘肥后，生菜叶片中硝态氮含量减少，但无显著影响，这与章衡等[28]的结果不一致。

此外，有研究发现生菜叶片的抗氧化活性与其生长状况呈正相关，生菜水培加碘能显著提高生菜叶片的脂肪氧化酶（LOX）活性，减少膜脂过氧化产物 MDA 的产生[11]。本研究发现，施用控释碘酸钾（10 mg/kg 土）条件下，生菜叶片的细胞膜抗氧化酶类（SOD、POD 和 CAT）活性最高。抗氧化酶活性的增加和膜脂过氧化产物的减少，使膜结构及其功能相对稳定，植物的抗逆性得到提高[23]。

综上，控释碘肥不仅增加了生菜可食部分碘含量，改善生菜品质，还可提高生菜叶片的抗氧化活性。当控释碘酸钾用量为 10 mg/kg 土时，生菜中碘的浓度就达 8.09 mg/kg。根据成年人每日 150 μg/d的需碘量，缺碘人群可以通过控制食用生菜量的多少来控制每日碘摄入量。当土壤施碘为 20 mg/kg土时，生菜可食部分富集的碘就可能导致碘的过量摄入以及碘的浪费。此外，由于本试验是控释碘肥应用效果的初步探索，因此，在控释条件下碘肥的用量及碘的挥发损失研究方面仍存在较大的探索空间。

参 考 文 献：

[1] Underwood E J. Trace elements in human and animal nutrition [M]. London, UK: Academic Press, 1977.

[2] 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[J]. 生态环境，2003，12(2)：228-231.
Huang Y Z, Zhu Y G, Hu Y *et al*. Iodine in soil-plant systems and prevention of iodine deficiency disorders [J]. Ecol. & Environ., 2003, 2(2): 228-231.

[3] Hetzel B S. Iodine deficiency disorders (IDD) and their eradication[J]. Lancet, 1983, 2: 1126-1129.

[4] 腾卫平. 防治碘缺乏病与碘过量[J]. 中华内分泌代谢杂志，2002，18(3)：239-242.
Teng W P. Controlling iodine deficiency disorders and iodine excess[J]. Chin. J. Endocrinol. Metab., 2002, 18(3): 239-242.

[5] 姚艳，龙明华，唐小付，于文进. 蔬菜对外源碘的吸收和积累特性及其机理研究进展[J]. 长江蔬菜，2009，2：39-42.
Yao Y, Long M H, Tang X F, Yu W J. Progress of characteristics and mechanisms of iodine absorption and accumulation in vegetables[J]. J. Changjiang Veget., 2009, 2: 39-42.

[6] 严爱兰，翁焕新，洪春来，谢伶莉. 青菜（*Brassica chinesis* L.）对碘动态吸收的同位素示踪[J]. 生态学报，2006，26(12)：4120-4126.
Yan A L, Weng H X, Hong C L, Xie L L. Dynamic absorption of iodine-125 in Chinese cabbage (*Brassica chinesis* L.)[J]. Acta Ecol. Sin., 2006, 26(12): 4120-4126.

[7] Welch R M, Graham R D. Agriculture: the real nexus for enhancing bioavailable micronutrients in food crops[J]. J. Trace Elem. Med. Biol., 2005, 18: 299-307.

[8] Zhu Y G, Huang Y Z, Hu Y, Liu Y X. Iodine uptake by spinach (*Spinacia oleracea* L.) plants grown in solution culture: effects of iodine species and solution concentrations [J]. Environ. Int., 2003, 29(1): 33-37.

[9] Shinonaga T, Gerzabek M H, Strebl F, Muramatsu Y. Transfer of iodine from soil to cereal grains in agricultural areas of Austria [J]. Sci. Tot. Environ., 2001, 267(1-3): 33-40.

[10] Dai J L, Zhu Y G, Huang Y Z *et al*. Availability of iodide and iodate to spinach (*Spinacia oleracea* L.) in relation to total iodine in soil solution[J]. Plant Soil, 2006, 289: 301-308.

[11] Blasco B, Rios J J, Cervilla L M *et al*. Iodine biofortification and antioxidant capacity of lettuce: potential benefits for cultivation and human health[J]. Ann. Appl. Biol., 2008, 152(3): 289-299.

[12] Voogt W, Holwerda H T, Khodabaks R. Biofortification of lettuce (*Lactuca sativa* L.) with iodine: the effect of iodine form and concentration in the nutrient solution on growth, development and iodine uptake of lettuce grown in water culture[J]. J. Sci. Food Agric., 2010, 90(5): 906-913.

[13] 孙向武，翁焕新，雍文彬，顾爱军. 菠菜对外源碘的生物地球化学吸收[J]. 植物营养与肥料学报，2004，10(2)：192-197.
Sun X W, Weng H X, Yong W B, Gu A J. The biogeochemical absorption by spinach fertilizing outer source iodine[J]. Plant Nutr. Fert. Sci., 2004, 10(2): 192-197.

[14] 洪春来，翁焕新，严爱兰，谢伶莉. 几种蔬菜对外源碘的吸收与积累特性[J]. 应用生态学报，2007，18(10)：2313-2318.
Hong C L, Weng H X, Yan A L, Xie L L. Characteristics of iodine uptake and accumulation by vegetables[J]. Chin. J. Appl. Ecol., 2007, 18(10): 2313-2318.

[15] 谢伶莉，翁焕新，洪春来，严爱兰. 小白菜和空心菜对不同

形态碘的吸收[J]. 植物营养与肥料学报, 2007, 13(1): 123-128.
Xie L L, Weng H X, Hong C L, Yan A L. Uptake of bok-choy and *Ipomoea aquatica* Forsk to iodine species[J]. Plant Nutr. Fert. Sci., 2007, 13(1): 123-128.

[16] Whitehead D C. The volatilization, from soils and mixtures of soil components, of iodine added as potassium iodide[J]. Eur. J. Soil Sci., 1981, 32(1): 97-102.

[17] 赵秉强, 张福锁, 廖宗文, 等. 我国新型肥料发展战略研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2004, 10(5): 536-545.
Zhao B Q, Zhang F S, Liao Z W *et al*. Research on development strategies of fertilizer in China[J]. Plant Nutr. Fert. Sci., 2004, 10(5): 536-545.

[18] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2001.
Lu R K. The analytical methods for soil and agro-chemistry[M]. Beijing: Agricultural Science and Technology Press, 2001.

[19] 汪建飞, 段立珍, 刘乃会. 放大反应比色法测定土壤中微量碘[J]. 分析试验室, 1999, 18(6): 71-74.
Wang J F, Duan L Z, Liu N H. Determination of micro amounts of iodine in soil by amplified reaction colorimetric method[J]. Anal. Lab., 1999, 18(6): 71-74.

[20] GB/T 13882-2002. 饲料中碘的测定(硫氰酸铁-亚硝酸催化动力学法)[S].
GB/T 13882-2002. Determination of iodine in feeds (ferric thiocyanate-nitric acid catalytic kinetic method) [S].

[21] 王学奎. 植物生理生化实验原理和技术(第2版)[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.
Wang X K. Principles and techniques of plant physiological biochemical experiment (2nd edn.)[M]. Beijing: Higher Education Press, 2006.

[22] Dai J L, Zhang M, Hu Q H *et al*. Adsorption and desorption of iodine by various Chinese soils: Ⅱ. Iodide and iodate[J]. Geoderma, 2009, 153(1-2): 130-135.

[23] 高雁, 李春, 娄恺. 干旱胁迫条件下加工番茄对喷施甜菜碱的生理响应[J]. 植物营养与肥料学报, 2012, 18(2): 426-432.
Gao Y, Li C, Lou K. Effect of spraying glycine betaine on physiological responses of processing tomato under drought stress [J]. Plant Nutr. Fert. Sci., 2012, 18(2): 426-432.

[24] 宋旭旭, 郑成淑, 孙霞, 马海燕. 控释肥对菊花叶片叶绿素荧光特性及观赏品质的影响[J]. 应用生态学报, 2011, 22(7): 1737-1742.
Song X X, Zheng C S, Sun X, Ma H Y. Effects of controlled release fertilizer on chrysanthemum leaf chlorophyll fluorescence characteristics and ornamental quality[J]. Chin. J. Appl. Ecol., 2011, 22(7): 1737-1742.

[25] 冯自松. 稳定态碘对黑麦草生理生化特性的影响[D]. 杭州: 浙江大学硕士学位论文, 2008.
Feng Z S. Effects of stable iodine stress on physiological and biochemical properties of ryegrass[D]. Hangzhou: MS thesis, Zhejiang University, 2008.

[26] 夏石头, 彭克勤, 萧浪涛, 刘志敏. 施碘对萝卜芽生长及其营养品质的影响[J]. 园艺学报, 2003, 30(2): 218-220.
Xia S T, Peng K Q, Xiao L T, Liu Z M. Effects of iodine application on growth and content of iodine, amino acid, vitamin C and fibre in radish sprouts[J]. Acta Hortic. Sin., 2003, 30(2): 218-220.

[27] 于文进, 姚艳, 李正为, 等. 营养液栽培中添加碘对樱桃番茄果实品质的影响[J]. 中国蔬菜, 2011, (2): 67-72.
Yu W J, Yao Y, Li Z W *et al*. Effects of iodine on fruit quality of cherry tomato in nutrient solution culture[J]. China Veget., 2011, (2): 67-72.

[28] 章衡, 李恋卿, 李志宏. 喷施锌、碘对大白菜锌、碘累积量、产量及品质的影响[J]. 农业工程学报, 1997, 13(1): 140-143.
Zhang H, Li L Q, Li Z H. The effect of spraying zinc and iodine on the accumulation of zinc and iodine, yield and the quality of Chinese cabbage[J]. Trans. Chin. Soc. Agric. Eng., 1997, 13(1): 140-143.