

刘嘉伟,洪春来,刘会萍,等.大型海藻营养元素的区域性差异及其修复生态环境的潜在模式[J].江苏农业科学,2017,45(8):264-268.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2017.08.071

大型海藻营养元素的区域性差异 及其修复生态环境的潜在模式

刘嘉伟¹,洪春来²,刘会萍¹,包律婷¹,戴之希¹,王国栋¹,翁焕新¹

(1.浙江大学环境与生物地球化学研究所,浙江杭州 3100272; 2.浙江省农业科学院,浙江杭州 310021)

摘要:为了揭示大型海藻中营养成分含量的差异及其修复环境的能力,通过系统测定4个区系的大型海藻——海带的主要营养成分和微量营养成分含量水平,发现海带中氮、磷、碘、铁等元素含量有很大差异,且含碘量随纬度递减呈现出明显的下降趋势,由8 165 $\mu\text{g/g}$ 降低至2 896 $\mu\text{g/g}$ 。利用海带制作海藻碘肥,在此基础上培育含碘蔬菜。结果表明,蔬菜中含碘量有明显的提升,最高可达103 mg/kg ,同时土壤中碘的溶出率控制保持在6.5%以下,这论证了海藻碘肥培育含碘蔬菜及提高土壤碘背景值的可行性。以海带为基础,提出了构建包括规模化海带养殖、海带发酵提取生物质能源、海藻有机碘肥生产、含碘植物性食品培育在内的潜在模式和技术框架。

关键词:海带;海藻碘肥;营养成分;区域性差异;生物地球化学;生态环境;修复;潜在模式;技术框架

中图分类号: X171.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2017)08-0264-05

近年来,随着海水富营养化的问题日趋严重^[1-2],如何修复海水成为人们关注的环境热点^[3-5]。其中,利用海藻净化海水越来越受到国内外学者重视。研究表明,大型海藻可以有效地吸收海水中的N、P等富营养盐^[6-7],在25 $^{\circ}\text{C}$ 下,大部分大型海藻的吸收能力达到最大值,如江蓠对N的吸收速率在15 $^{\circ}\text{C}$ 时达到 $(0.507 \pm 0.136) \mu\text{mol}/(\text{g} \cdot \text{h})$ ^[8]。利用海藻净化海水后,将产生大量的海藻植株,然而目前对海藻二次利用无法消耗如此多的海藻植株,这使得海藻修复海水富营养化的课题一直受到制约^[9-10]。另一方面,由于部分内陆地区

土壤中的碘背景值含量较低,仅为2 mg/kg ^[11-12],结果导致粮食和蔬菜等植物性食品普遍缺碘^[13-15],最终造成地区环境缺碘。传统的食盐补碘方法,因为食盐中 KIO_3 对脑部的安全隐患及烹饪损失率高达60%等缺陷^[16-18],渐渐受到质疑,而海藻中丰富的含碘量,正好提供了一种生物补碘的新思路。

寻找到一种可以充分利用海藻,即一方面可以大量消耗修复海水后的海藻植株,同时也可以保留海藻中的营养物质,尤其是对碘的充分利用,显得尤为重要。因此,海藻碘肥化可能是一个一举两得的措施,值得深入研究。

先前的研究表明,在众多大型海藻中,海带对N、P的吸收速率和效率最高^[19-20],且由于海带含碘量高、适应性强、方便运输和保存^[21],被认为是理想的海藻碘肥化的原料。然而对不同区系海带中各种营养成分含量的差异,及以海带作为海藻碘肥原料时的标准的研究,都相对较少。以扩大海带养殖为基础构建的产业链结构及量化其对环境修复的能力,也尚缺乏一定的研究。因此,本研究选择以海带作为研究对象,

收稿日期:2016-01-31

基金项目:国家自然科学基金(编号:40873058,40373043);浙江省国土资源厅地质勘查项目(省资)(编号:2014002)。

作者简介:刘嘉伟(1991—),男,江西鹰潭人,硕士研究生,从事环境地球化学研究。E-mail:liujiaw0903@163.com。

通信作者:翁焕新,博士,教授,从事环境地球化学研究。E-mail:gswhghx@zju.edu.cn。

参考文献:

- [1] 吕超峰,韦伊强,赵瑞晓,等.农业废弃物秸秆综合利用技术的研究[J].能源与环境科学,2014(3):187-189.
- [2] 张宗兰,刘辉利,朱义年.我国生物质能利用现状与展望[J].中外能源,2009,14(4):27-32.
- [3] 张霞,蔡宗寿,陈丽红,等.生物质成型燃料致密成型机理及品质评价指标[J].可再生能源,2014,32(12):1917-1921.
- [4] 刘延春,张英楠,刘明,等.生物质固化成型技术研究进展[J].世界林业研究,2008,21(4):41-47.
- [5] Demirbas A. Physical properties of briquettes from waste paper and wheat straw mixtures[J]. Energy Conversion and Management,1999,40(4):437-445.
- [6] Phani A, Lope T, Greg S. Compaction characteristics of barley, canola, oat and wheat straw[J]. Biosystems Engineering,2009,104(3):

335-344.

- [7] 夏先飞,武凯,孙宇,等.生物质(秸秆)致密成型技术研究进展[J].中国农机化学报,2013,34(6):36-42.
- [8] 廖娜,韩鲁佳,黄光群,等.含水率和压缩率对秸秆开式压缩能耗的影响[J].农业工程学报,2011,27(1):318-322.
- [9] 任爱玲,闫石.生物质成型技术的研究[J].科学技术与工程,2013,13(16):4765-4768.
- [10] 陈正宇,陆鑫,徐德民.生物质压缩成型工艺参数[J].塑性工程学报,2012,19(3):98-104.
- [11] Gude V G, Nirmalakhandan N. Sustainable desalination using solar energy[J]. Energy Conversion,2010,51(11):2245-2251.
- [12] Mani S, Tabil L G, Sokhansanj S. Specific energy requirement for compacting corn stover[J]. Bioresource Technology,2006,97(12):1420-1426.

测定并讨论其中各种营养元素的含量差异,以海带为原料制取海藻碘肥,培育出含碘蔬菜,并研究了海藻碘在土壤中的保留能力,以表征其对缺碘土壤的影响。

1 材料与方法

1.1 海带样品及来源

本研究选取的海带(*Saccharina japonica*)样品,在自然分类上均属于褐藻门海带目海带科海带属,也称为昆布或江白菜。海带植株生长状态良好,长1~2 m,宽30~40 cm。

4个海带样品分别来自辽宁大连、山东日照、福建连江和广西北海的大型海带规模化养殖区,采样时间为2014年9月。海带采用人工低温育苗、筏式养殖技术,生长过程中施肥量可忽略不计,养殖区离周围污染源较远,排除了过多外源污染对海带生长的影响,海带的生长水域分别地处中国渤海、黄海、东海、南海的沿海海域。每个采样点均随机采集3组成熟可食用的海带作为分析样品。

1.2 样品分析

将海带样品用细毛刷轻轻刷洗,去除表面泥沙、杂藻及其他附着物。在50℃烘箱中烘24 h,水分充分蒸干后,取出磨细过0.25~0.50 mm筛,保证整株海带各部分被均匀粉碎,放入样品袋中保存备用。

试验采用凯氏定氮法测定海带中氮(TN)含量;钼锑抗比色法测定海带中磷(TP)含量;火焰光度计法测定钾(TK)含量;海带中碘(I)含量的测定采用放大反应光度法。其他营养元素Ca、Mg、Fe、Zn、Cu、Mn的测定采用浓H₂SO₄-HNO₃消煮、电感耦合等离子体质谱测定法^[22]。大田试验中,土壤碘的测定采用溴水氧化法^[23]。蔬菜碘的测定采用硫酸铈铁-亚硝酸催化动力法(GB/T 13882—2002《饲料中碘的测定(硫酸铈铁-亚硝酸催化动力学法)》)。每组样品设置3组平行样。所有空白和重复样品测定的分析误差<5%。

1.3 海藻有机碘肥制备与含碘蔬菜培育

海藻有机碘肥制备。选用渤海海带样品,将干海带粉碎后,与硅藻土按质量比1:1混合,制成海藻有机碘肥,并标定海藻有机碘肥的碘含量^[24]。

选择人们日常喜爱食用的菠菜、大白菜、生菜、雪菜、芥

菜、包心菜、香菜、小白菜作为试验菜种,于浙江省农业科学院作物试验基地进行含碘蔬菜的培育。供试土壤为江浙地区常见的青紫泥,初始碘浓度为3.92 mg/kg, *w*(TN)、*w*(TP)、*w*(TK)依次为3.17、0.704、16.8 g/kg,碱解氮、速效磷和速效钾添加后,含量依次为77.6、149.2、54.1 mg/kg,阳离子交换量为19.28 cmol/kg,有机质含量9.2 g/kg, pH值为6.77。

先将蔬菜种籽用55℃温水浸泡15 min消毒,再催芽后撒播于温室苗床上,覆上细土,待幼苗长到4~5张叶后挑选长势一致的幼苗移栽到大田。海藻有机碘肥分别以0(对照组)、12.5、25.0、50.0、100.0、150.0 mg/m²的浓度梯度,作为基肥施入土壤。试验前施足基肥(复合肥,N、P₂O₅、K₂O含量均为15%,300 kg/hm²),在试验期间,每一茬分别用复合肥追施2次。

当各蔬菜可食部位达到上市标准时即开始取样,取样时将蔬菜连根拔起,样品用去离子水冲洗干净后,用吸水纸吸干表面的水分,分别称单株的鲜质量后,在50℃恒温条件下烘干,粉碎过30目筛,测定蔬菜的碘含量。

2 结果与分析

2.1 海带营养元素含量水平区域分布的差异性

表1给出了供试4种海带中主要营养元素和微量营养元素的含量水平(均为质量分数)。从表1中可以看到,氮(TN)的含量范围为1.606%~2.270%,平均含量为1.439%;磷(TP)的含量范围为0.160%~0.358%,平均含量为0.265%;钾(TK)的含量范围为0.858%~2.341%,平均含量为1.292%;其他常见营养元素中,钙(Ca)的含量范围为0.634%~0.924%,平均含量为0.787%;镁(Mg)的含量范围为0.487%~0.677%,平均含量为0.602%。海带中微量营养元素碘(I)的含量范围为2 896~3 406 μg/g,平均含量为3 203 μg/g;铁(Fe)的含量范围为57.3~361.6 μg/g,平均含量为157.1 μg/g;锌(Zn)的含量范围为13.6~26.7 μg/g,平均含量为20.5 μg/g;铜(Cu)的含量范围为0.78~1.79 μg/g,平均含量为1.49 μg/g;锰(Mn)的含量范围为2.5~17.2 μg/g,平均含量为7.4 μg/g。铅、镉、汞的平均值依次为1.41、0.46、0.72 μg/g。

表1 海带中营养元素的含量水平

样品来源	主要营养元素质量分数(%)					微量营养元素质量分数(μg/g)							
	N	P	K	Ca	Mg	I	Fe	Zn	Cu	Mn	Pb	Cd	Hg
渤海	1.967	0.323	2.341	0.852	0.677	3 406	361.6	10.8	1.79	17.2	1.14	0.45	0.64
黄海	1.841	0.218	1.097	0.634	0.487	3 274	57.3	17.0	1.76	2.8	1.47	0.33	0.47
东海	2.270	0.358	0.873	0.736	0.616	3 237	57.3	13.6	0.78	2.5	2.13	0.75	1.34
南海	1.606	0.160	0.858	0.924	0.628	2 896	152.1	26.7	1.62	6.9	0.90	0.31	0.42
平均值	1.921	0.265	1.292	0.787	0.602	3 203	157.1	16.5	1.49	7.4	1.41	0.46	0.72

由表1可以看到,供试的4种海带,其营养元素含量除Ca、Mg外,均存在较大的变化,尤其是P、I、Fe、Mn等元素含量的差异更为明显(图1、图2、图3),含量差值可达2~8倍。这主要是因为海带从海水中吸收营养元素是一个复杂的生物地球化学过程,海带中营养元素含量水平的区域性差异是海藻自身的生理特性、海洋生态环境和物理化学等综合作用的结果。海带中含有大量的N、P、I等元素,忽略在海带育苗过

程中少量初始N、P的添加,可以认为这些元素均来源于海带生长的介质,即海水中。这反映了海带对受氮、磷污染的沿海水体的净化作用和对碘的生物富集作用是非常明显的。此外,上表中还可以看到,海带中的微量元素含量依次为Fe>Zn>Mn>Cu>Pb>Hg>Cd,表现为营养元素较毒性元素更容易被吸收,即海带在解决海水富营养化问题的过程中,可以避免过多摄入可能对环境造成二次污染的元素。这表明将海

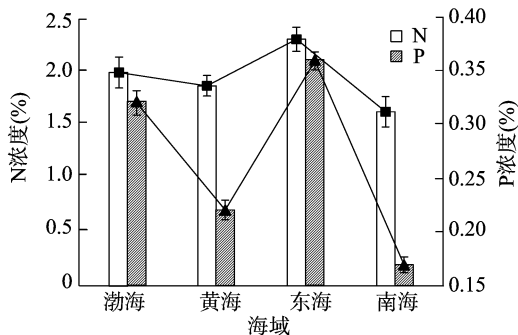


图1 海带中 N、P 含量的区域分布差异

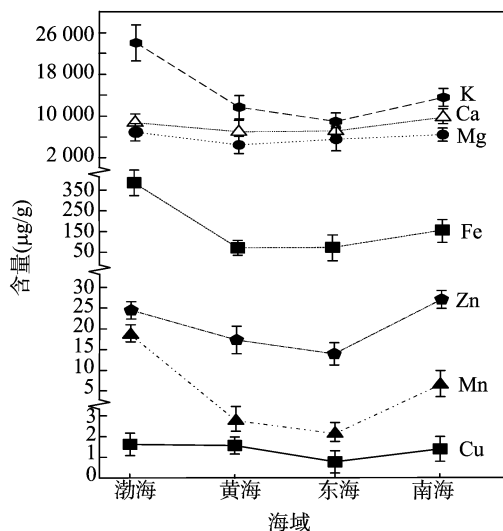
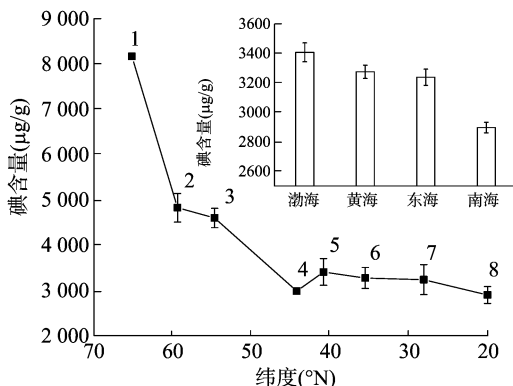


图2 海带中营养成分含量的区域性差异

1、4引自[18]; 2、3引自[19]; 5、6、7、8为本试验数据
图3 海带碘含量随纬度的变化

带制作成海藻碘肥后,可以避免有毒元素对土壤及人畜的危害。

供试的 4 种海带中碘(I)的含量水平呈现出由北至南逐渐递减的趋势,搜集不同学者在同一季度测定的海带样品数据,发现这与世界范围内海带中碘的含量分布特征相一致(图 3)。从图 3 中可以看到,海带碘含量的最高值(8 165 $\mu\text{g/g}$)出现在高纬度海域(64.9°N),随着纬度的降低,海带碘含量也逐渐降低。高纬度海带碘含量高,而低纬度海带碘含量降低,与海带自身的物种属性有关:海带属于冷水性海藻,生长受温度影响较大,以 2~7℃ 为最适温度,高纬度较冷的海水温度更适宜海带的生长。因此,生长在高纬度的

海带,可以从海水中主动吸收更多的碘。Gall 等的研究证明,海带组织中存在一种特殊的酶,这种酶在低温条件下活性更强,有助于海带吸收海水中的碘,而海水中碘的浓度对海带吸收碘的能力影响相对较小^[25]。

在选取海带作为海藻碘肥原料时,应充分考虑到各种元素差异性对整个海藻利用过程的影响。如海带中 N、P 的含量反映了其吸收海水中富营养盐净化海水的能力;I 的含量则是海藻碘肥改善缺碘环境能力的代表。此外,海带中其他元素如 Fe、Mn 的含量较高,将有利于土壤中整体营养元素含量的提高,而 Pb、Hg、Cd 则有可能带来重金属污染问题,应该尽量避免样品中含量过高。综上所述,以 N、P、I、Fe、Mn 含量高,Pb、Hg、Cd 含量低为标准,本研究选取了产地为大连的海带样品作为海藻碘肥原料,作为后续培育含碘蔬菜的理想碘源。

2.2 海藻碘肥改善缺碘生态环境

海水中碘的浓度为 13~75 $\mu\text{g/L}$,海带中碘含量一般在 0.3%~0.5% 之间,最高可达 1%^[26],本研究测定的 4 种海带样品中碘的含量为 2 896~3 406 $\mu\text{g/g}$,表明海带通过生物富集作用,比海水中碘的浓度(以平均值 44 $\mu\text{g/L}$ 计算)浓缩了 $5.8 \times 10^4 \sim 6.8 \times 10^4$ 倍。选择含碘量最高的大连海带样品(碘含量 3 406 $\mu\text{g/g}$),按比例与硅藻土混合制成海藻有机碘肥。以海藻有机碘肥作为土壤外源碘,培育含碘蔬菜。

从图 4 中可以看到,随着土壤外源碘施用量的增加,被试的菠菜、大白菜、生菜、雪菜、包心菜、香菜、小白菜和芥菜 8 种蔬菜中碘的含量随之增加,进一步观察可以发现,当土壤外源碘施用量 $< 50 \text{ mg/m}^2$ 时,被试蔬菜中碘的含量增加较快;当土壤外源碘施用量 $> 50 \text{ mg/m}^2$ 时,被试蔬菜中碘的含量增加速度变缓。另外,不同的蔬菜对外源碘的吸收量存在明显差异,在供试的 8 种蔬菜中,芥菜和大白菜对外源碘的吸收量最大,当土壤外源碘施用量为 150 mg/m^2 时,芥菜和大白菜中碘的含量分别可达 103.3 mg/kg 和 79.3 mg/kg ,分别是对照组的 85 倍和 170 倍。

为了了解蔬菜从土壤中吸收的海藻碘在蔬菜组织细胞内的存在状况,以海藻有机碘肥施用量为 150 mg/m^2 时的大白菜为观察对象,通过透射电子显微镜扫描的显微分析,从微观角度观察蔬菜细胞内碘的存在位置。从图 5-a 中可以看到未施用海藻有机碘肥的大白菜叶细胞的叶绿体、细胞壁和液泡等,但未见有碘化银粒(ig),而从图 5-b 中可以看到,施用海藻有机碘肥的大白菜叶细胞中除了有叶绿体、细胞壁和液泡外,出现了黑色的碘化银粒(ig),这表明了大白菜根系从土壤中吸收的海藻外源碘,随着同时吸收的水分,在植物的蒸腾作用下,被运输至叶细胞的叶绿体中。上述研究结果表明,施用海藻有机碘肥,海藻碘可以进入土壤,并通过生物地球化学转移过程,被蔬菜植物所吸收,最终培育出含碘蔬菜。

为了深入了解海藻有机碘肥施入土壤后,经过植物吸收、雨水淋滤和时间历程等一系列生物地球化学和环境地球化学过程,土壤中外源碘的动态变化情况,笔者测定了土壤中水溶性的含量变化,并通过淋溶试验,分析了土壤外源碘的溶出率。从图 6 中可以看到,当土壤施用海藻有机碘肥培育含碘蔬菜后,土壤中水溶性碘含量随外源碘施用量的增加而迅速增加,尽管经过第 2 茬蔬菜种植,土壤中水溶性碘含量相比第

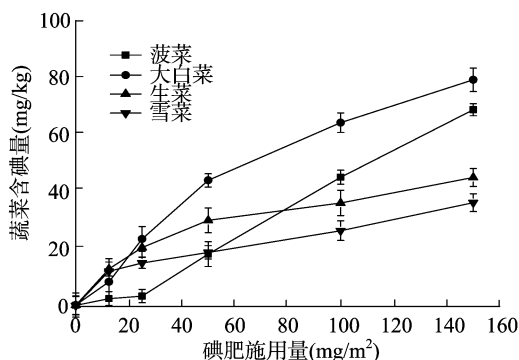
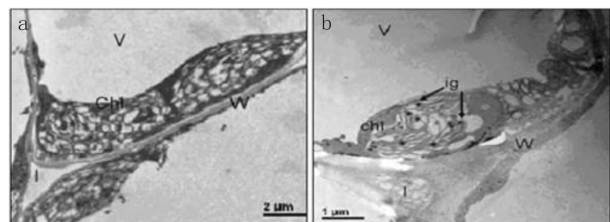
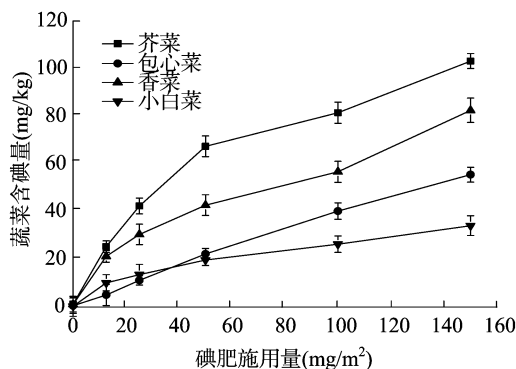


图4 蔬菜中碘的含量随土壤外源碘施用量的变化



Chl—叶绿体; W—细胞壁; V—液泡; I—细胞间隙;
ig—碘化银粒

图5 施用海藻有机碘肥前(a, 12 000×)后
(b, 20 000×)大白菜叶细胞透射电子显微镜图

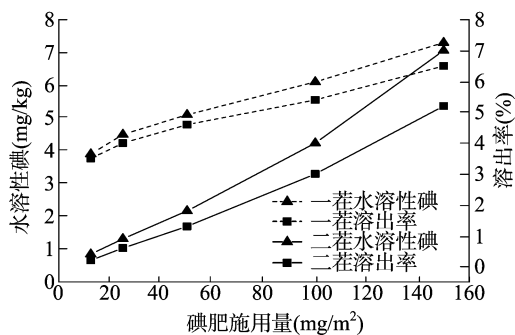


图6 土壤中水溶性碘与碘溶出率随海藻有机碘肥施用量的变化

1 茬有所降低,但是,随外源碘施用量增加而增加的速率仍然维持在较高的水平,这个结果表明,通过施用海藻有机碘肥进入土壤的海藻碘以水溶性的形态存在,具有很强的生物活性,易被蔬菜植物所吸收。碘的溶出率是评价碘在土壤中稳定性的一个重要参数,它可以衡量随着时间变化,由于蒸发作用或淋失作用而导致土壤中碘含量下降的程度。从图6中还可以看到,土壤碘的溶出率随土壤水溶性的增加而增加,然而,无论是第1茬还是第2茬土壤碘的溶出率较低($<6.5\%$),且2茬蔬菜培育后土壤碘的溶出率曲线相近,尤其是在外源碘浓度较低时,这一现象更为明显,这说明海藻有机碘肥一方面能够将海藻碘有效地释放进入土壤,另一方面能够将海藻碘较好地保存在土壤中,从而使碘在土壤中的持效性更好,有利于更多碘被蔬菜植物吸收,这与海藻有机碘肥中硅藻土具有很强的吸附能力有关^[27],具有微孔结构的硅藻土作为海藻碘载体,不仅能够使海藻碘缓慢释放,而且还具有改良土壤和有利于碘被作物吸收的特点。

上述研究结果表明,长期施用海藻有机碘肥,可以提高土壤碘的背景含量,这不仅能够直接培育出含碘蔬菜、粮食和水果等植物性食品,可以使人们通过日常膳食得到自然补碘,而且能够使水体、生物和整个食物链中碘的含量水平得到提高,从而使缺碘的生态环境得到改善,为最终实现彻底消除“碘缺乏病”创造条件。

2.3 海带修复生态环境模式

据统计,中国大型海藻的养殖面积达 $1.107 \times 10^9 \text{ hm}^2$,海藻产品的总产量为 $1.6 \times 10^6 \sim 1.8 \times 10^6 \text{ t/年}$,按照光合作用换算的固碳量为 $4.8 \times 10^5 \sim 5.4 \times 10^5 \text{ t/年}$ 、固氮量为 $0.96 \times 10^5 \sim 1.08 \times 10^5 \text{ t/年}$ 、固磷量为 $4.8 \times 10^3 \sim 5.4 \times 10^3 \text{ t/年}$ ^[28]。在我国的海藻产品中,海带的产量约为 $9.0 \times 10^5 \text{ t/年}$ ^[29],以

本试验数据推算(以本试验测定的 N、P 最低值分别为 1.606% 、 0.160% 为准),目前我国通过海带养殖,可以去除海水中的 N 和 P 分别为 $1.5 \times 10^4 \text{ t/年}$ 和 $1.4 \times 10^3 \text{ t/年}$,分别约占中国大型海藻年固氮量和年固磷量的 14% 和 28% ,由此可见,海带养殖已经在降低海水富营养化过程中起着重要的作用。

海带作为一种具有高经济价值的海产品,在我国的养殖已有百年历史,从最初的仅限于辽东、山东半岛附近海域发展到今天,人工养殖已经推广到浙江、福建、广东等地沿海,基本覆盖了整个中国的沿海海域。海带不但可以作为经济作物和某些食品工业的原料,最新的研究表明,海带是提取生物能源,如乙醇或沼气理想的原料^[30]。由此可见,以扩大海带养殖为基础,构建一条海带综合利用的产业链,不但可以改善海水富营养化问题,也能同时满足食品、工业、能源产业的发展需求,如海藻产品、制取乙醇等清洁能源等,更重要的是还可以通过含碘蔬菜的培育,提高土壤中的含碘量,并经过生物地球化学作用过程,使整个食物链中的碘含量水平逐步得到提高,最终改善整个环境中的含碘量。该模式不仅为修复沿海海域水体富营养化和改善缺碘生态环境提供了技术框架,而且也建立了包括规模化海带养殖、海带发酵提取生物质能源、海藻有机碘肥生产、含碘植物性食品培育在内的一条完整的产业链提供了技术路线。

3 结论

本试验测定 4 种大型海藻——海带中主要营养元素 N、P、K、Ca、Mg 的平均含量分别为 1.921% 、 0.265% 、 1.292% 、 0.787% 、 0.602% ,微量营养元素 I、Fe、Zn、Cu、Mn、Pb、Hg、Cd 的平均含量分别为 $3\ 203$ 、 157.1 、 16.5 、 1.49 、 7.4 、 1.41 、 0.46 、

0.72 $\mu\text{g/g}$ 。其中,营养元素较毒性元素更容易被吸收,且碘的含量随纬度降低呈现明显降低的趋势。不同样品中营养元素的差异性较为明显,在选取海带作为海藻碘肥原料时,应以高N、P、I,富Fe、Mn,贫Pb、Hg、Cd为参考,综合考虑各种营养元素含量。

利用海带制成的海藻有机碘肥作为土壤外源碘,可以被蔬菜植物根系吸收,并被输送至叶细胞的叶绿体中,施用海藻有机碘肥可以使土壤中水溶性碘含量明显提高,土壤外源碘的溶出率 $<6.5\%$,这表明海藻有机碘肥不仅可以直接培育出含碘蔬菜,而且可以有效改善缺碘土壤的生态环境。利用海带残渣制取有机碘肥,不仅彻底解决了海藻生产清洁能源的残渣问题,而且可以进一步提高碘和氮、磷、钾的含量,从而大大降低了生产成本。

基于大型海藻——海带富碘和对氮、磷有较强吸收能力,以及海带本身又是提取生物质能源理想原料等特点所建立的修复生态环境的模式,不仅为修复沿海海域水体富营养化和改善缺碘生态环境提供了技术框架,也为建立包括规模化海带养殖、海带发酵提取生物能源、海藻有机碘肥生产、含碘植物性食品培育在内的一条完整的产业链提供了技术路线。

参考文献:

- [1] 中国近海岸海域环境质量公报[EB/OL]. [2015-05-21]. http://www.cnemc.cn/publish/totalWebSite/news/news_45525.html.
- [2] Stokal M, Yang H, Zhang Y, et al. Increasing eutrophication in the coastal seas of China from 1970 to 2050[J]. Marine Pollution Bulletin, 2014, 85(1): 123-140.
- [3] 任华峰, 苗英霞, 邱金泉, 等. 硅藻土助滤剂在海水净化中的应用[J]. 化工进展, 2014(1): 238-241, 246.
- [4] 寇希元, 张雨山, 王 静, 等. 羧甲基壳聚糖复合絮凝剂净化海水的试验研究[J]. 海洋环境科学, 2011, 30(4): 496-498, 503.
- [5] Easley R, Byrne R. Correction to spectrophotometric calibration of pH electrodes in seawater using purified m-cresol purple[J]. Environmental Science & Technology, 2015, 49(9): 5841.
- [6] Fei X G. Solving the coastal eutrophication problem by large scale seaweed cultivation[J]. Hydrobiologia, 2004, 512(1/2/3): 145-151.
- [7] Dang H, Li J, Chen R, et al. Diversity, abundance, and spatial distribution of sediment ammonia-oxidizing Betaproteo bacteria in response to environmental gradients and coastal eutrophication in Jiaozhou Bay, China[J]. Applied and Environmental Microbiology, 2010, 76(14): 4691-4702.
- [8] 李 恒, 李美真, 曹 婧, 等. 温度对几种大型海藻硝氮吸收及其生长的影响[J]. 渔业科学进展, 2013, 34(1): 159-165.
- [9] 张才学, 白富进, 孙省利, 等. 流沙湾冬、春季大型海藻的微量元素分析[J]. 海洋与湖沼, 2010, 41(1): 154-160.
- [10] 赵素达. 海洋重金属污染及其对海藻的毒害作用[J]. 青岛教育学院学报, 1999(1): 40-42.
- [11] Liu P, Liu S J, Su X H, et al. Relationship between urinary iodine and goiter prevalence; results of the Chinese national iodine deficiency disorders survey[J]. Journal of Endocrinological Investigation, 2010, 33(1): 26-31.
- [12] Zimmermann M. The effects of iodine deficiency in pregnancy and infancy[J]. Paediatric and Perinatal Epidemiology, 2012, 26(Suppl 1): 108-117.
- [13] Fuge R. Soils and iodine deficiency[M]//Essentials of medical geology. Springer Netherlands, 2013: 417-432.
- [14] Hynes K, Otahal P, Hay I, et al. Mild iodine deficiency during pregnancy is associated with reduced educational outcomes in the offspring: 9-year follow-up of the gestational iodine cohort[J]. The Journal of Clinical Endocrinology and Metabolism, 2013, 98(5): 1954-1962.
- [15] Wang Y, Zhang Z, Ge P, et al. Iodine deficiency disorders after a decade of universal salt iodization in a severe iodine deficiency region in China[J]. The Indian Journal of Medical Research, 2009, 130(4): 413-417.
- [16] 李丽娟, 吴粤秀, 陈贯一, 等. 碘酸钾和碘化钾对碘缺乏大鼠大脑抗氧化能力的影响[J]. 中国地方病学杂志, 2003, 22(1): 31-32.
- [17] 王 欣, 石福增, 苏亚楠, 等. 加碘盐烹饪过程中碘损失的研究[J]. 中国预防医学杂志, 2006, 7(4): 261-263.
- [18] 李 锋. 富碘青菜烹饪后碘含量分析研究[J]. 杭州农业与科技, 2015(3): 28-29.
- [19] Braga A C, Yoneshigue - Valentine Y. Nitrogen and phosphorus uptake by the Brazilian kelp *Laminaria abyssalis* (Phaeophyta) in culture[J]. Hydrobiologia, 1996, 326/327(1): 445-450.
- [20] Velimirov B. Formation and potential trophic significance of marine foam near kelp beds in the Benguela upwelling system[J]. Marine Biology, 1980, 58(4): 311-318.
- [21] 刘会萍. 蔬菜植物吸收外源碘的生化影响与生物有效性[D]. 杭州: 浙江大学, 2014.
- [22] 鲍士旦. 土壤与农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2010: 264-269.
- [23] 翁焕新, 洪春来, 夏天虹, 等. 蔬菜植物碘强化: 一种人体自然补碘的新途径[J]. 科学通报, 2012, 58(5/6): 444-451.
- [24] 翁焕新, 蔡奇雄. 一种含碘复合肥的制造方法: ZL94108836.7[P]. 1994-08-02.
- [25] Gall E R, Küpper F C, Kloreg B. A survey of iodine content in *Laminaria digitata*[J]. Botanica Marina, 2004, 47(1): 30-37.
- [26] Teas J, Pino S, Critchley A, et al. Variability of iodine content in common commercially available edible seaweeds[J]. Thyroid, 2004, 14(10): 836-841.
- [27] Weng H, Weng J, Yan A, et al. Increment of iodine content in vegetable plants by applying iodized fertilizer and the residual characteristics of iodine in soil[J]. Biological Trace Element Research, 2008, 123(1/2/3): 218-228.
- [28] 柴召阳, 何培民. 我国海洋富营养化趋势与生态修复策略[J]. 科学, 2013, 65(4): 48-52.
- [29] 安鑫龙, 李雪梅, 徐春霞, 等. 大型海藻对近海环境的生态作用[J]. 水产科学, 2010, 29(2): 115-119.
- [30] Wargacki A, Leonard E, Win M, et al. An engineered microbial platform for direct biofuel production from brown macroalgae[J]. Science, 2012, 335(666): 308-313.