

文章编号: 1000-5463(2001)03-0123-08

硒的生物循环及含硒活性物质研究进展

郭宝江¹, 黄 峙², 刘学诗³

(1. 华南师范大学生物技术研究所, 广东广州 510631; 2. 暨南大学生物工程学系, 广东广州 510632;
3. 信阳卫生学校, 河南信阳 464000)

摘要:概述硒的生物循环和含硒活性物质研究的进展。

关键词:硒; 生物循环; 生物有机化途径; 含硒活性物质

中图分类号: O635.1 **文献标识码:** A

自从 1817 年瑞典学者 Berzalins 发现硒(selenium, Se)元素以来,对该元素生物学意义的认识不断加深.1950 年,发现因牧草中缺硒而导致家畜大规模犯病(如繁殖力下降、生长抑制、白肌病、渗出性素质、摇摆病等)之后,研究硒的生理作用及功能形式才为世人所瞩目,并由 Schwarz 和 Foltz 首先提出硒是动物必需的微量元素^[1];1970 年,随着含硒酶谷胱甘肽过氧化物酶(Glutathione peroxidase, GPx)的发现,证实硒也是人体必需的微量元素^[2]. 现有的成果表明,克山病、大骨节病、癌症、心脑血管疾病、糖尿病、不育症等 40 余种疾病均与缺硒有关^[3]. 硒的生物循环及含硒活性物质研究为开发优质含硒医药和营养产品提供方法和途径.

1 硒的生物循环

1.1 环境中的硒

由于硒的化学性质与硫类似,所以地壳里的大多数硒出现在硫化物岩石中. 沉积岩覆盖四分之三地球表面,是农业土壤的主要母质,决定了土壤中硒的最初含量,是影响硒生物循环的基础因素. 硒缺乏主要见于环境低硒带如火成岩地区(约占地球土壤母质的 20%). 另外,在酸性土壤中硒与铁或铝容易形成复合物,大大降低了植物对硒的吸收,硒进入食物链受阻,使可利用硒减少,因此土壤缺硒是全世界广泛存在的问题^[4]. 在我国除湖北恩施、陕西紫阳两地是天然富硒地区外,全国有 72% 国土为不同程度的缺硒区,特别是由东北—西南走向形成一条低硒带,造成食物链的普遍低硒状态,这些地区约有一亿多人的膳食结构中硒含量不足. 由于土壤中的硒含量过低,会导致生物种群缺硒而影响食物链系统中硒的生物循环,造成人类硒状态表现出地域性差异. 在一些低硒带,已发现有硒缺乏的地方性疾病,如克山病就是一种可能主要由于硒缺乏而引起的地方性心肌病,卡-贝病(大骨节病)是一种引起关节畸形的关节炎,也与饮食硒缺乏有极大相关性,大规模补硒已收到良好治疗效果. 大气中的硒可来自火山喷发、矿物燃烧及生物作用引起的硒挥发,可随降水进入水体和土壤. 水中的硒主要来自岩石风化、水土流失、降水及生物体,并可经沉积或生物体利用而进入硒循环^[5].

收稿日期: 2001-02-27

作者简介: 郭宝江(1936~),男(汉族),广东佛山人,教授,博士生导师.

1.2 微生物中的硒

硒在微生物的作用下可以发生甲基化,将无机形态的硒转化为挥发性的二甲基硒,一般认为这是微生物的环境解毒作用.但硒对微生物有更重要的生物意义.早在1954年Pinsent发现^[5]第一个微生物硒蛋白甲酸脱氢酶后,人们对硒在微生物中的生物化学功能的研究不断取得新的进展,并相继发现了一系列含硒酶,它们主要有^[5,3,17]:(1)甲酸脱氢酶(Formate dehydrogenase)甲酸脱氢酶存在于许多产生甲烷的微生物中,以甲酸作为唯一可发酵的底物.微量的硒为这个酶的活性所必需,硒以硒代半胱氨酸(selenocysteine, Sec)形式存在于酶的活性中心.(2)甘氨酸还原酶(Glycine reductase)梭菌属的甘氨酸还原酶是一种参与甘氨酸代谢的含硒酶.它催化甘氨酸还原脱氨基生成乙酸并放出能量生成ATP,其中硒以Sec存在,并在催化反应中起重要作用.(3)氢化酶(Hydrogenase)这个酶的分子量为340kDa,含有4个Sec残基,分别位于4个42kDa亚单位中,有证据表明离子化的硒氢基是这个酶的氧化还原中心.微生物对硒的代谢是硒生物循环中的重要环节.

硒和病毒的关系表现在硒与病毒感染、病毒的毒力和病毒性疾病的进展有关.如HIV、HBV、痘病毒等的基因结构中具有编码硒蛋白的能力^[6].传染性软疣病毒(MCV)含有与谷胱甘肽过氧化物酶(GPx)同源的硒蛋白基因,编码一种硒蛋白,对人角质细胞抗UV辐射和超氧离子引起的细胞毒作用有保护作用,同时也为MCV提供保护^[7];出血热病毒也含有一种潜在的硒蛋白基因,所编码蛋白可组装16个Sec,研究者认为该蛋白与病毒致病性有关^[8].Beck及其同事已发现^[4],在硒缺乏宿主,无致病性的温和柯萨奇病毒株(CVB3/0)可突变为有毒力的病毒株,这一现象可能与克山病的发生有关.

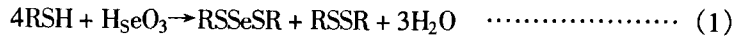
1.3 植物中的硒

硒经植物吸收进入营养链,人类的硒源来自动植物对硒的代谢和转化产物.由于土壤和水中的硒在地域上分布不均衡,使得植物中硒的含量存在着地区性差异,同一种类植物相差几倍甚至几十倍.处于同一自然环境条件下的各种不同植物硒含量也存在明显差异,因此硒是否为植物所必需仍无定论.根据植物对硒积蓄能力的不同,可分为硒积蓄植物(如黄耆属)和非硒积蓄植物^[9].无论在硒积蓄植物或非积蓄植物中,硒都能被代谢为有机硒化合物.生物有机化过程的第一步是硒酸盐在叶中被还原为亚硒酸盐,亚硒酸盐则很容易被生物有机化^[10].植物组织中存在的硒形态可粗略地分为有机硒和无机硒,总的看来植物体内无机硒含量较少,大部分为有机硒.有机硒化物主要是各种甲基硒化物和含R-Se-R'形式的氨基酸,此外一部分有机硒是以RNA、多糖果胶、多酚结合态存在^[11].在硒非积蓄植物中,硒大多存在于蛋白质中,而在硒积蓄植物中,硒存在于非蛋白质的氨基酸中.人们在关心硒对植物的生理作用的同时,更关心硒对栽培作物的影响,已初步证明低浓度的硒具有促进植物生长发育的作用,并可增加作物硒含量^[11,12].

1.4 动物中的硒

硒是动物必需的微量元素.除单质硒外,动物对各种形态的硒均能高效摄取,其中硒代蛋氨酸(Se-Met)为主动转运,与蛋氨酸为相同转运系统,Sec、亚硒酸钠为非主动转运,其摄入不受相应含硫类似物影响^[5].由于硒与硫化学特性的相似性,最初认为硒是按照硫代谢途径进行.但总结近年来研究成果发现,硫与硒代谢具有某些显著差异,微量元素硒在动物体内的主要代谢模式为:无机硒盐在肝、脾、血中被酶转化为亚硒酸盐,亚硒酸盐还原反应是重要代谢途

径,红细胞通过 GSH 作用快速摄入和代谢亚硒酸盐,产物可能是 H_2Se ,已确立的非酶反应包括四个巯基化合物与一分子亚硒酸作用生成三元硒硫化物(RSSeSR)及一系列反应.具体过程如下^[13]:



H_2Se 进入同化和异化途径,前者指硒以 Sec 形式掺入硒蛋白中,这是一个非常复杂的生物化学过程,特别是第 21 种蛋白质氨基酸—Sec 及其基因水平的调控是对传统生物化学的发展和补充.在哺乳动物至少已发现并分离有 35 种硒蛋白,其中功能比较明确的硒蛋白是^[4,14,15]:GPx 家族(GPx1, GPx2, GPx3, GPx4)、脱碘酶家族(Iodothyronine deiodinases, ID1, ID2, ID3)、硫氧还蛋白还原酶家族(Thioredoxin reductases, TR1, TR2, TR3)、硒蛋白 P(Selenoprotein P)等.它们具有防止膜结构及生物大分子的氧化损伤;合成并调节活性甲状腺素 T_3 水平;参与 DNA 合成并调节 DNA 表达等广泛的生理作用.后者还有许多细节存在争论,但较多的研究支持 Challenger 提出^[5]的硒的生物甲基化机理,经甲基化过程,具有高度毒性的 H_2Se 转化为低毒的二甲基硒(可从呼吸道排泄)和动物尿中的主要硒排泄物——三甲基硒,在硒代谢中,甲基化和去甲基化可能是常常发生的.研究表明,通常硒的排泄形式为二甲基硒化物、尿三甲基硒离子和一种未知尿硒化合物.所以动物体内的硒也可分为有机硒和无机硒.

硒的生物循环反映了硒及其化合物从低级到高级生物,由简单到复杂,由无机硒到有机硒的生物转化过程.硒经过生物有机化作用,转化为多种含硒蛋白、硒酶、含硒多糖等生物大分子化合物,显示硒生物功能的复杂性和多样性.硒经生物循环进入食物链构成人类营养来源,并成为决定人体硒状态的最基本因子.

2 人体硒的来源

2.1 摄食中硒的含量

日常的主要食品为粮食类食物、动物性食物、水果和蔬菜等,一般而言,动物性食物含硒量高于植物性食物,且以动物内脏含硒量为最高,禾谷类和豆类食物的含硒量比水果和蔬菜高.以南京市农贸市场出售的主要食物为例^[16],动物性食物平均含硒量为 $0.1835 \pm 0.1835 \mu g/g$,以鱼类最高(平均硒含量为 $0.2512 \pm 0.2027 \mu g/g$),海鱼硒含量($0.4023 \mu g/g$)高于淡水鱼($0.1908 \mu g/g$),其它动物性食品以内脏硒含量较高(如猪肝中硒含量达 $0.4681 \mu g/g$);禾谷类和豆类食物的含硒量较低(小于 $0.05 \mu g/g$).水果和蔬菜的平均硒含量更低(分别为 $0.0061 \pm 0.0048 \mu g/g$, $0.0074 \pm 0.0063 \mu g/g$),苦瓜含硒最高,为 $0.0255 \mu g/g$.因此,从食品硒源的品种差异来看,各类食物的硒营养意义表现为:动物性食物(鱼、肉及动物内脏等)优于禾谷干豆类食物,禾谷干豆类食物又优于水果及蔬菜.由于我国人群每日摄入的食物仍以禾谷类为主,所以禾谷类食物一般是人体硒摄入的重要来源.而水果和蔬菜类食物,只有大量摄入时才对人体硒有一定的营养意义.

在欧美国家也较少有理想的营养硒源^[4].据称鱼、贝类、螃蟹较好,但因鱼种类、所含硒化合物及与其它金属(如汞、砷等)相互作用等原因,鱼作为硒源对提高硒水平并不令人满意.小

麦虽然是一种良好的硒源,但由于欧洲大陆土壤硒的贫乏而使小麦中含硒甚微,尽管如此,小麦和谷类因食用普遍而成为人们较稳定的硒源(约占摄入硒的 22%)。在欧美,肉类、家禽和鱼是最主要的硒源(约占摄入硒的 36%)。

2.2 摄食中硒的形态

硒是氧族元素,具有多种成键特性,在氧族元素比较中,硫和硒由于 d 轨道参与成键,其化合物类型应比氧更为丰富多样,但实际上,至今发现的含硒生物分子中,硒的成键方式单一,这意味着硒经生物有机化作用而成为食品硒源的形态是受局限的。食物来源的硒从存在形态上分为有机硒和无机硒。有机硒主要有:含硒蛋白、含硒多肽及含硒氨基酸如 Se-Met 和 Sec、含硒多糖,无机硒主要指硒酸盐和亚硒酸盐。

硒在蛋白质中有两种存在状态^[3]:一种为非共价结合,已发现硒存在于白蛋白、球蛋白、脂蛋白、血红蛋白、肌红蛋白、肌球蛋白、核蛋白等蛋白质中,这种结合是非特异的,并随时间而有动态变化;另一种为共价结合,其中硒的确切形式是 Sec 和 Se-Met,含 Sec 的硒蛋白是哺乳动物中最主要的含硒蛋白质,动物体中约有 80% 的硒是以这种形式存在。植物蛋白质结合硒看来更为复杂,色谱分析表明,对硒积聚植物而言,硒可能作为含硫氨基酸代谢中间产物类似物存在,如硒代胱硫醚和甲基 Sec,硒结合蛋白很少;而对于非积聚硒植物来说,硒则主要与蛋白质结合,且硒大部分为 Se-Met 形式,如小麦中至少 50%,苜蓿中 70% 为这种有机硒形式。含硒多肽主要指硒谷胱甘肽。含硒多糖在自然界,尤其是在植物中的存在已经得到证实,其中硒

以两种可能形式存在: $-\text{ReH}$ 、 $\text{R}_1-\overset{\text{O}}{\parallel}{\text{Se}}-\text{O}-\text{R}_2$, 研究者不断从植物提取出硒多糖,并对其结构和功能进行了研究,如大蒜含硒多糖、箬叶硒多糖、螺旋藻硒多糖等^[17,18,19]。无机硒则主要来自饮水及硒添加食品。

膳食硒的低水平及形态的差异引起的生物利用度较低对人体健康有潜在的威胁,仅靠天然摄食中的硒不足以满足人体的正常需要。特别是当今癌症等许多疾病无特效良药的时候,通过摄取足够的硒来预防多种疾病的发生显得尤其重要,但亚硒酸钠等无机硒的毒性高,因此开发高效安全的含硒活性物质势在必行。

3 含硒活性物质

补硒可以预防和治疗某些疾病并维持人体合理的营养状态。传统的补硒方式主要是直接用无机硒盐制成口服制剂。然而硒的化学性质决定了硒具有多种价态和结合态,不同形态的硒可能在生物活性、同化途径、毒性等方面有很大差别。硒的有效性与毒性也往往是共存的。普遍认为,有机硒与无机硒相比毒性小、生物利用度高。体内外实验也表明有机硒在激发免疫反应上比无机硒显著^[20]。筛选并寻求安全低毒或无毒、生物利用度高、成本低和易于推广的有机硒源具有重要的实践意义。含硒活性物质研究主要集中在以下两方面:

3.1 化学合成含硒活性物质

在生化“构-效”关系研究的基础上,利用有机化学合成技术已制备出一些有生物活性的含硒物质。如含硒磺胺噻唑、硒代胱氨酸、6-硒代嘌呤、硒代氧杂蒽、Ebselen(2-苯基-1,2-苯丙异唑-3[2H])、1,4-二硒亚甲苯氰酸盐(1,4-phenylenebis[methylene] selenocyanate p-

XSC)、四种含硒脂类化合物(甲基硒化物、二苯基硒化物、硒三苯基氯化物和甲基硒化物)等^[17]。并对这些有机硒化合物在抗病毒、抗炎、抗辐射、抗肿瘤等方面的作用进行了广泛的临床研究。特别是对具有类似硒酶活性的小分子硒化合物 Ebselen 尤为关注,研究发现它具有广泛的抗炎、抗动脉粥样硬化和细胞保护活性,机理可能如下: Ebselen 及其代谢产物和巯基化物通过可再生循环清除过氧化氢等自由基,保护生物膜和脂蛋白;低浓度的 Ebselen 可抑制多种参与炎症反应的酶活性,如脂氧合酶、NO 合成酶、NADPH 氧化酶、蛋白激酶 C、 $H^+/K^+ - ATP$ 酶等。四种含硒脂类化合物在甲基亚硝基脲诱导的鼠乳腺癌模型中具有抗癌作用,其中甲基硒化物抑癌有效率为 79%,甲基硒化物为 66%,硒三苯基氯化物 27%,二苯基硒化物 10%。组织中硒累积浓度以甲基硒化物最高(肝和肾增加 3 倍,乳腺增加了 14 倍),甲基硒化物和二苯基硒化物硒累积量中等(肝和肾增加 1.5 倍,乳腺增加了 2.5 倍),而硒三苯基氯化物则无累积。且生物学活性以甲基硒化物最高,甲基硒化物次之,而二苯基硒化物最低。相信化学家会合成更多的含硒活性物质及药物。

向生物活性物质载体上人工引入活性硒元素,是合成含硒活性物质的另一手段。我国科学家唐家骏等^[18]人研究出一种有机合成的硒多糖-硒化角叉菜胶;陈春英等^[5]用箬叶多糖与硒化合物反应得到硒酸酯多糖。生物效应的初步研究表明,这些硒多糖在提高血液的硒含量和 GPx 活性等方面具有显著作用。值得注意的是,最近我国学者报导^[21,22],通过制备含有谷胱甘肽结合位点的单克隆抗体,然后用化学突变方法将谷胱甘肽过氧化物酶催化基因-硒半胱氨酸插入抗体结合部位,由此获得了含硒的抗体酶。活性检测表明,这种抗体酶的谷胱甘肽过氧化物酶活性较目前世界上最成功的 GSH-GPx 模拟物-Ebselen 的活性高 1100 倍,甚至于超过 GPx。这也是世界上首次合成的具有这么高活性的含硒抗体酶。由于抗体对抗原有特异识别和结合能力,可以把含硒抗体酶直接导向靶位而发挥作用。无疑这将为硒活性物质研究开辟一个崭新的领域。不饱和脂肪酸也可作为置换硒的载体^[23],亚麻酸、亚油酸、油酸及其硒化物对人肝癌细胞有杀伤作用,并对癌细胞 DNA 合成均有明显抑制。其中硒化亚麻酸对 BEL-7402 人肝癌细胞有很强的杀伤能力, $500 \mu\text{g} \cdot \text{mL}^{-1}$ 即可杀灭全部肝癌细胞,且具有剂量效应关系。

3.2 生物有机化含硒活性物质

硒的生物有机化方法是一种大量获取有机硒的安全有效的途径。美国学者提出的硒化学抗癌新战略^[4,24],即通过生物转化和有机硒化合物来开发有机硒源。利用生物体的同化功能,使硒进入蛋白质、多糖或脂类等生物大分子中,提高生物体(主要是植物或微生物)中的硒含量,并可进一步从中提取活性硒成份,或通过硒的生物循环获得富含有机硒的动物产品。由于生物有机化硒类似天然食物中的硒形式,易于人体吸收利用,生物活性高且毒性较低,同时可结合并提高不同生物原有的营养特性,还可从根本上改良贫硒地区的营养生态链,具有无可比拟的优点。已知生物有机硒有数十种^[25,26],是生物体对无机硒吸收和转化的结果,并且许多还是硒的功能形式。

3.3 生物有机化载体及产品

当前人们已广泛地应用植物或微生物作为硒的生物有机化载体进行含硒活性物质的研究和开发。已报道的有富硒酵母、富硒大蒜、富硒黄芪、富硒菇类、富硒西洋参、富硒麦芽、富硒茶、富硒鸡蛋、富硒牛奶、富硒螺旋藻等^[5,27]。

酵母具有高度的富硒能力及将无机硒转化为有机硒的能力。徐辉碧等^[5]采用麦芽汁加亚硒酸钠作培养基,培养得到富硒酵母,富硒酵母的硒含量可高达 1000 $\mu\text{g/g}$,通常为 300 $\mu\text{g/g}$ 左右,是一种很好的功能性食品。经检验分析,硒酵母中的硒化合物主要是 Se-Met。通过人与动物的实验结果表明,硒酵母中硒的生物效力是氧化硒盐等无机硒的 10-20 倍。硒水平相当的富硒酵母的毒性大大低于亚硒酸钠。抗癌实验还表明,富硒酵母对 3-甲基胆蒎(MCA)诱发大鼠肺癌、可移植的路易斯肺癌、S180 腹水瘤、肝癌、乳腺癌均有一定的抑制作用。

通过富含无机硒的培养基料,可培养出富硒食用菌。在富硒食用菌栽培过程中,随着无机亚硒酸钠转化为有机硒,产品中的蛋白质含量也有一定的增加,特别是必需氨基酸含量的提高尤其显著,幅度达 25% - 43%,明显提高成品食用菌的营养价值。

茶树是富硒能力较强的植物,利用土壤-茶树系统的富硒培养方法,使土壤的硒含量达到一定的浓度,茶树在生长过程中吸收土壤中的硒并富集于叶子中,所得茶叶就富含硒元素,其中的硒多为有机硒。富硒茶可明显改善血和组织硒水平,增强免疫功能。目前,我国的紫阳硒茶、恩施富硒茶、福州富硒花茶和广东的国宾富硒茶等品种,其硒含量在 0.5 - 4 $\mu\text{g/g}$ 之间。

通过谷物种子发芽法转化无机硒为有机硒,可生产良好的功能性富硒食品原料,进一步生产富硒饼干、面条和面包等系列食品,应用前景广阔。

被誉为人类“未来食品”的螺旋藻具有生长快、营养价值高、培养简便、对无机硒有较强耐性等优点,是对无机硒进行生物有机化的理想载体。螺旋藻营养价值的突出特点表现在蛋白质含量极高,而硒的生物有机化重要方式和活性形式是含硒蛋白复合物。螺旋藻中硒的含量甚微,通过对钝顶螺旋藻进行富硒培养,藻体可有效地对无机硒进行生物有机化^[28],并从中分离出含硒藻蓝蛋白,进行了蛋白质晶体学初步研究,有望揭示其中硒的结合形式。另有实验报道^[29]富硒螺旋藻对⁶⁰Co- γ 线胸部照射大鼠诱发肺炎有防治作用。但尚未见正式的富硒螺旋藻产品。

4 展望

含硒活性物质的研究和开发具有广阔的实际应用价值,但必须建立在硒的生理作用、生物循环和生物有机化研究基础之上。

4.1 硒化合物的生物学作用机制

硒与生物体的相互作用,特别是硒对人类健康作用的研究已很深入,含硒酶 GPx 家族的作用代表了硒的抗氧化机制,脱碘酶的功能反映了硒在甲状腺素代谢中的重要意义。但仍存在许多有待阐明的问题,如硒激发免疫功能的机制还不明确;睾酮生物合成和精子正常成熟过程中需要硒的参与,其中 GPx4 在精子体尾交界处所表现的酶功能及结构功能双重性;不同硒化合物对蛋白激酶 C 的氧化还原修饰及对信号传导途径的影响;硒的化学保护作用 and 肿瘤防治等问题值得进一步研究,并可为含硒药物研制提供分子水平的实验依据。

4.2 硒的活性形式

硒的生物循环和生物有机化系统可提供复杂多样的含硒物质,不同生物有机化载体对硒的富集和转化能力不同,硒的有机化形态也多种多样。良好的硒有机化载体不仅要有较强的富硒能力,而且要有较强的转化活性硒形式的能力,从农作物、食用菌、茶叶、生物培养及发酵

产品中筛选出理想的富硒、有机化硒载体是含硒活性物质研究的重要环节,也是进一步深入研究硒活性形式及功能的前提。

4.3 含硒活性物质的功能和毒性评价

补硒有治疗和预防多种疾病及癌症的潜在价值,但多种含硒化合物具有极强毒性,任何夸大硒的生理作用和使用不适当的含硒物质,都将对机体造成伤害。当前,含硒活性物质的开发应用主要产品形式是食品、功能性食品、保健品等,所以在研究和开发含硒活性物质的同时,必须进行含硒活性物质的功能和毒副作用监测和评价。

参考文献:

- [1] Schwarz K, Foltz C M. Selenium as an integral part of factor 3 against dietary necrotic liver degeneration [J]. J Am Chem Soc, 1957, 79: 3292 ~ 3293.
- [2] Rotruck J T, Pope A L, Ganther H E, et al. Selenium: Biochemical role as a component of glutathione peroxidase [J]. Science, 1973, 179: 588 ~ 590.
- [3] KVICALA J. Selenium and organism [J]. Cas Lek Cesk, 1999, 138(4): 99 ~ 10.
- [4] Marret P Rayman. The importance of selenium to human health (review) [J]. The Lancet, 2000, 356: 233 ~ 241.
- [5] 徐辉碧. 硒的化学, 生物化学及其在生命科学中的应用[M]. 武昌: 华中理工大学出版社, 1994. 104 ~ 194.
- [6] Taylor E W, Nadimpalli R G, Ramanatha C S. Genomic structures of viral agents in relation to the biosynthesis of selenoproteins[J]. Biol Trace Elem Res, 1997, 56 (1) : 83 ~ 91.
- [7] Shisler J L, Senkevich T G, Berry M F, et al. Ultraviolet - induced cell death blocked by a selenoprotein from a human dermatotropic poxvirus[J]. Science, 1998, 279 (5347): 102 ~ 105.
- [8] Ramanathan C S, Taylor E W. Computational genomic analysis of hemorrhagic fever viruses. Viral selenoproteins as a potential factor in pathogenesis[J]. Biol Trace Elem Res, 1997, 56 (1): 93 ~ 106
- [9] Virupaksha TK, Shrift A. Biochemical differences between selenium accumulator and non - accumulator Astragalus species[J]. Biochem - Biophys - Acta, 1965, 107: 69 ~ 80.
- [10] Butler G W, Peterson P J. Uptake and metabolism of inorganic form of selenium - 75 by Spirodela oblongorhiza[J]. Austu J Biol Sci, 1967, 20: 77 ~ 86.
- [11] 左银虎. 环境与植物中硒形态研究进展[J]. 植物学通报, 1999, 16(4): 378 ~ 380.
- [12] 吴永尧, 罗泽民, 陈建英, 等. 水稻硒蛋白及其硒结合形态研究[J]. 华中师范大学学报(自然科学版), 2000, 34(2): 223 ~ 225.
- [13] Stadtman T C. Selenocysteine[J]. Annu Rev Biochem, 1996, 65 : 83 ~ 100.
- [14] Burk R F, Hill K E. Orphan selenoproteins[J]. Bioassays, 1999, 21 (3): 231 ~ 237.
- [15] Glydyshev V N, Jeang K, Wootton J C, et al. A new human selenium - containing protein: Purification, characterization, and cDNA sequence[J]. J Biol Chem, 1998, 273: 8910 ~ 8915.
- [16] 陈历程. 南京市主要食物含硒量分析及居民硒营养水平评价[J]. 食品科学, 2000, 21(10): 57 ~ 58.
- [17] 徐碧辉, 黄开勋, 高中洪. 硒蛋白与硒多糖[J]. 科学, 1997, 49(5): 22 ~ 25.
- [18] 唐家骏, 芮海凤. 硒化角叉菜胶的制备及其理化性质和生化活性研究[J]. 生物化学与生物物理学报, 1988, 20(3): 259 ~ 266.
- [19] 庞启深, 郭宝江, 阮继红. 螺旋藻抗辐射多糖的提纯及分析[J]. 生物化学与生物物理学报, 1989, 21 (5): 445 ~ 449.
- [20] 吴振荣. 微量元素与免疫功能[J]. 国外医学(地理分册), 1992, 1: 20 ~ 22.

- [21] Lou G M, Zhu Z Q, Ding L, et al. Generation of selenium - contained abzyme by using chemical mutation[J]. Biochem Biophys Res Commun, 1994, 198(3): 1240 ~ 1246.
- [22] Luo G, Ding L, Liu Z, et al. A selenium - containing abzyme, the activity of which surpassed the level of native glutathione peroxidase[J]. Ann N Y Acad Sci, 1998, 864(3): 136 ~ 141.
- [23] 谢丽涛,黄济群. 不饱和脂酸及其硒化物对 BEL - 7402 人肝癌细胞的杀伤作用及 DNA 合成的影响[J]. 中国肿瘤临床, 1998,25(7):501 ~ 504.
- [24] Yoshida M, Fukunaga K, Tsuchita H, et al. An evaluation of the bioavailability of selenium in high - selenium yeast[J]. J Nutr Sci Vitaminol Tokyo, 1999, 45(1): 119 ~ 128.
- [25] Spolar M R, Schaffer E M, Beelman R B, et al. Selenium - enriched Agaricus bisporus mushrooms suppress 7,12 - dimethylbenz[a] anthracene bioactivation in mammary tissue[J]. Cancer Lett, 1999, 138(1 ~ 2): 145 ~ 150.
- [26] 蔡翠华. 生物转化的营养意义[J]. 食品科技, 2000, (5): 52 ~ 53.
- [27] 胡秋辉. 富硒茶提高大鼠非特异性免疫功能的效应[J]. 食品科学, 2000, 21(11): 56 ~ 58.
- [28] 李乐农, 张季平, 郭宝江, 等. 富硒螺旋藻中含硒藻蓝蛋白的纯化、结晶及初步晶体学研究[J]. 中国科学(C辑), 2000, 30(5):449 ~ 455.
- [29] 朱茂祥, 葛桂秀, 杨陟华等. 富硒螺旋藻对 ^{60}Co - (线胸部照射大鼠诱发肺炎的防治作用[J]. 军事医学科学院院刊, 1997,21(3):185 ~ 189.

ADVANCES IN RESEARCH ON BIOLOGICAL CYCLE OF SE AND ACTIVE SE - CONTAINING SUBSTANCES

GUO Bao - jiang¹, HUANG Zhu², LIU Xue - shi³

(1. Biotechnology Research Institute, South China Normal University, Guangzhou 510631, China; 2. Department of Biotech, Ji Nan University, Guangzhou 510632, China; 3. Xinyang Health School of He Lan Province, Xinyang 464000, China)

Abstract: As an essential trace element, selenium (Se) is of fundamental importance to human health. There is evidence that less - overt Se deficiency can have adverse consequences for many diseases susceptibility. Se enters the food chain through plants, which take it up from the soil. Supplementation in a large scale with Se - containing products significantly decreased in diseases (eg, cardiovascular disease, cancer, viral infection etc.) morbidity and mortality of individuals in the regions notable for their low soil content of Se. Recognition of the importance of biological cycle and bio - organized pathway of Se helps us in promoting the exploitation of active se - containing products. Advances in the studies on biological cycle of Se and active se - containing products are reviewed.

Key words: selenium; biological cycle; bio - organized pathway; active Se - containing substance

【责任编辑 黄玉萍】