

锰的人体暴露水平与控制措施

孙中兴, 姜永根, 王海银

摘要: 锰在空气、水、土壤中均能检出, 在自然界分布广泛但不均匀, 地下水中锰含量较地表水的高, 南方土壤中锰含量较北方的高; 锰矿开采冶炼及含锰制品(汽油添加剂三烷基甲基戊基锰、锰焊条等)的使用会对周围环境造成锰污染。这都会使人体暴露在高锰环境中, 而人体对锰的过量暴露会引起神经系统损伤。本文综述报道锰在我国的人体暴露水平、健康危害, 以及控制措施。

关键词: 锰; 暴露; 环境; 控制措施

Exposure Levels to Manganese in Human Being and Related Control Strategy SUN Zhong-xing, JIANG Yong-gen, WANG Hai-yin (Sanitary Monitoring Department, Songjiang District Center for Disease Control and Prevention, Shanghai 201620, China)

Abstract: Manganese can be detected in air, water and soil but the distribution is not even in the ecosphere. The concentration of manganese in groundwater is higher than in surface water and higher in the southern soil than in the northern. Manganese-related industries and the usage of manganese-containing products (methylcyclopentadisnlyl manganese tricarbonyl in gasoline, welding rod, etc) may introduce contamination to environment. Excessive exposure to manganese in human may cause nervous system dysfunction. In this paper, the human exposure and hazards of manganese in China were reviewed. In addition, control measures to manganese were also discussed.

Key Words: manganese; exposure; environment; control measures

锰作为化工原料在工业生产中得到广泛应用, 锰的冶炼及相关产品的生产和使用也会对生态环境造成锰污染。锰在地壳中广泛分布, 由于地质结构的关系, 锰在局部地区会呈现异常高的分布水平, 即会影响该环境中人体对锰的摄入量。锰是人的必需微量元素, 但如果摄入锰过量也会造成健康损伤。

1 锰在环境介质中的水平

锰(Mn), 相对分子质量 54.94, 在地壳中的丰度为 0.085%, 以氧化物的形态存在, 分布广泛。锰在工业上主要用于制造电焊条、干电池去极剂。

空气中的锰以气溶胶形态存在, 能吸附于空气中的颗粒物。在锰矿石的开采冶炼、锰合金的使用(如电焊操作)中, 会出现局部空气严重锰污染。近来, 无铅汽油的推广使得甲基环戊二烯三羧基锰(MMT)得到大量使用, MMT 的使用使得加油站、交通道路等处空气中锰浓度升高。此外燃煤也会带来锰的大气污染。我国为用煤大国, 煤中平均含锰 77 mg/kg, 最高值超过 1000 mg/kg^[1], 燃煤排放的烟尘导致空气中锰浓度的提高, 于燕等^[2]对大气总悬浮颗粒物中锰浓度进行测定, 结果显示西安市采暖期工业区和交通繁忙区空气中锰浓度均高于非采

暖期与对照区。此外, 在生产汽油防爆剂、染料、塑料、农药等产品的工业中也用锰及其化合物作原料, 致使这些工业产品的生产及使用过程中都会对环境造成锰的污染。不同环境介质中锰的浓度水平不同(表 1)。

表 1 环境介质中锰的浓度

环境介质	地点	浓度	参考文献	发表时间
空气 (mg/m ³ , 以 MnO ₂ 计)	电焊作业场所	0.07~9.42	高广信 ^[3]	2003
	锰矿区外围 12 km 处	563	陈兰 ^[4]	2005
	加油站	0.22~0.76	王充 ^[5]	2008
	城市交通要道	0.008 7~0.82	王充 ^[6]	2007
水 (mg/L)	地表水 (上海嘉定)	0.14	袁红 ^[7]	2001
	地下水 (江汉平原东区)	0.40	曾昭华 ^[8]	2004
	地下水 (鄱阳湖区)	0.10		
	地下水 (长三角南部)	0.55		
	地下水 (汉川市)	0.01~6.80	周昭红 ^[9]	2008
	地下水 (珠三角)	0.01~8.32	梁国玲 ^[10]	2009
	水库 (水深 2 m)	0.02	谢信南 ^[11]	2008
	水库 (水深 10 m)	0.15		
土壤 (mg/kg)	南京	508	曾睿 ^[12]	2009
	湖南	441		
	重庆	1 008		
	黑龙江	466		
	云南	486		
	贵州	177		
	山东	173		

[项目基金] 上海市、区(县)疾病预防控制中心学科人才培养科研项目资助计划(编号: 区 2007-6)

[作者简介] 孙中兴(1981—), 男, 学士, 主管医师; 研究方向: 环境卫生; E-mail: sun983357@citiz.net

[作者单位] 松江区疾病预防控制中心卫生监测科, 上海 201620

地表水中锰主要以溶解态和胶体态(铁锰化合物胶体)存在,如果水中有机物浓度高,胶体态锰被有机物包裹形成高稳定性锰^[13]。地下水中的锰主要来自地下岩石及矿物中含锰化合物的溶解,主要受氧化还原环境控制^[14]。不同的环境下水中锰含量不同,陈伯雄^[15]调查水库水、泉水、井水中锰(限值 0.1 mg/L)合格率分别为 90.6%、94.2%、77.7%。谢信南等^[11]调查发现水库水流动性较差时,水越深锰浓度越高。富阳市 2003—2005 年调查结果显示,水源中锰含量呈季节性变化,第一季度合格率最低^[16],可能与当地第一季度河水水量减少、稀释能力降低相关。溶解性有机质能够还原锰的氧化物,使地面水中锰含量呈上升趋势,袁红^[7]报道上海市嘉定区地面水中锰浓度呈上升趋势,与有机物污染有一定关系。

土壤中锰主要来自于成土母质,根据其存在形态的不同可分为水溶态锰、交换态锰、还原态锰、矿物态锰和有机态锰,其中前三者被称为有效态锰,可被植物根系吸收。锰在土壤中分布广泛,但不同地区、不同类型的土壤锰含量变幅很大。我国土壤含锰总趋势是南方的酸性土壤比北方的石灰性土壤高。企业排放的含锰烟尘、废水、废渣都会污染土壤,影响土壤中有效态锰的含量,在其污染的土壤上种植的蔬菜将含有较高浓度的锰。

2 人体锰暴露途径及暴露水平

人群锰暴露主要来源于空气、饮水及食物。空气中锰主要以烟尘形式经呼吸道吸收,也可直接通过鼻腔经嗅丝转运到达中枢神经系统,而有机锰可经皮肤吸收。室外大气中锰的水平较低,赵金平等^[17]研究显示在距地面 20 m 处空气中锰含量约为 0.000 16 mg/m³。空气中锰的暴露主要以职业人群暴露水平较高,尤其是焊接操作工人^[18]。电焊作业时工人锰暴露的情况受通风环境及生产方式的影响极大,吴琨等^[19]调查显示车间内锰及无机化合物在治理前质量浓度高达 1.71 mg/m³经综合治理后能降低到 0.06 mg/m³。MMT 的使用使加油站空气含锰达 0.22~0.76 mg/m³,交通要道附近的空气锰浓度也比较高,高于居住区大气中锰的标准 0.01 mg/m³。乞文旭^[20]综合多个研究认为 MMT 的使用引起的环境污染低于国际标准安全值,但要关注潜在危险人群尤其是儿童。

水中锰为溶解状态,容易吸收,吸收率高于食物中锰。袁红^[7]对无除锰设备的集中式供水单位水源水、出厂水及管网末梢水中锰含量进行调查,发现各组间差异无统计学意义($P>0.05$),与李常勇等^[16]调查结果一致,都提示居民末梢水中的锰主要来自水源水,不同水源的饮用水中锰含量,由低至高通常为河水<浅层井水<水库水<深层井水<非深井地下水。何彩虹^[21]对肇庆市 1999—2001 年生活饮用水中锰进行调查,自来水中锰检测范围为未检出~0.54 mg/L,井水中锰检测范围为未检出~2.37 mg/L,合格率分别为 95.39%、70.97%。袁红^[6]调查上海市嘉定区管网水锰含量为 0.01~0.71 mg/L,超标率为 60.18%,和蓉等^[22]调查浙江省学校饮用水卫生状况时发现学校中市政供水首位不合格指标是锰。

不同食物在其生长过程中对锰的富集不同,因此食物含锰量也不同^[23]:一般粗粮、坚果、海产品锰含量较高,糙米、核

桃、海参等含锰达 0.110~0.347 mg/g;茶叶中锰含量也较高,可达 0.15 mg/g;蔬菜、豆类含锰中等,茼蒿、甘蓝、花生、马铃薯等含锰 0.010~0.096 mg/g;精致谷类及肉、蛋、奶、食用油类等含锰较低(<0.002 mg/g)。食物锰是人体锰摄入的最主要来源,主要在小肠吸收,但吸收率低,约为 2%~15%。当膳食中锰含量高时吸收率低,缺乏时吸收率高,可能与食物中的锰在胃液中溶解度低有关,使机体能通过吸收率的高低对体内锰的稳态起调节作用。

3 锰的健康影响

锰是人体必需的微量元素,参与体内酶的合成与激活,特别是蛋白质和脂肪代谢所必需的酶,同时还是维持免疫功能、调节血糖、细胞能量生成与生殖、消化、骨生长所必需的。锰摄入缺乏会引起生长迟缓、生育力损害以及出生缺陷。另一方面,过量锰暴露与不可逆的脑疾病有关,其表现为神经系统功能紊乱以及内分泌异常。

锰中毒的主要机理涉及神经细胞凋亡、神经递质代谢紊乱、突触传导功能障碍,亦与基因易感性和遗传多态性有关^[24]。YOKE 等^[25]研究显示,血液中的锰能够通过血脑屏障的载体进入脑部,脑部锰摄入的速度大于排出的速度,造成锰在脑内蓄积。荆俊杰等^[26]研究锰染毒小鼠后发现肝和脑是锰的重要靶器官,且锰在脑中有蓄积性。还有动物实验表明,含锰氧化物的超微粒子能从嗅觉神经通路进入中枢神经系统^[27]。

贾克等^[28]研究锰对大鼠脑谷氨酸代谢及酶活性影响时,发现锰可引起大鼠脑 SDH、Na⁺-K⁺-ATPase 和 GS 活性降低以及 PAG 活性升高,造成谷氨酸代谢失衡。郑安等^[29]研究发现,锰大量暴露可诱导机体产生大量的自由基,诱导线粒体及溶酶体损伤,其涉及多基因调控,最终诱导细胞的凋亡。

李宁^[30]研究发现,从事锰作业工人的类神经症和自主神经功能紊乱症状的检出率明显高于非锰作业者,自觉症状和发锰检测值与非锰作业比较,差异有统计学意义。杨书林等^[31]的研究表明,从事锰暴露的电焊作业工人在抑郁、疲劳、精力充沛三项情感状态指标与非锰暴露组比较差异有明显统计学意义;在简单视觉运动反应时、数字跨度、手提转捷度、数字译码、Benton 视觉保留两组比较差异有统计学意义,得出锰接触对神经行为功能有一定影响,但未发现工龄与神经行为负效应有明显量效关系。王充等^[5]调查发现加油站工人尿锰、发锰高于对照组,提示工人体内锰负荷较高。

王荔等^[32]研究发现,锰污染地区小学 4~5 年级学生神经行为受到影响。HAFEMAN 等^[33]对孟加拉国的 6537 名妇女和其子女做锰暴露研究发现,水锰暴露高于标准者的子女出生后的第一年的死亡率比非暴露组要高($OR=1.8$, 95%CI=1.2~2.6)。

一般食物摄取锰不会引起中毒症状,但也有文献报道:陕南秦巴山区粮食的锰含量较高,对当地 161 名 7~17 岁儿童青少年发锰含量进行了检测,结果为(6.6±5.3)μg/g,明显高于食用商品粮的城镇儿童发锰(2.8±2.3)μg/g 的水平($P<0.01$),当地 6~14 岁中小学生平均智商(65.23)低于宁夏同龄儿童(74.38)^[34]。锰摄入不足也会影响健康,窦磊等^[35]研究发现,肝癌高发区土壤锰含量低于低发区,推测锰含量较低可能是肝癌高发的重

要影响因子之一。

由于锰参与机体的各种代谢,可以通过对人体锰相关生物标志物的检测分析来了解人体内的暴露情况和健康效应,评价环境中的锰接触对人体的影响(表2)。

表2 锰的部分生物标志物及测定值

名称	测定对象	例数	测定值	参考文献	发表时间
全血锰	1~14岁儿童	1027	(4.89±2.67)μg/L	李萌 ^[36]	2006
尿锰	电焊工人	270	(0.22±0.31)μg/mg	张文静 ^[37]	2010
尿香草草酸	电焊工人	270	(1.01±0.78)μg/mg		
尿香草扁桃酸	电焊工人	270	(0.61±0.35)μg/mg		
发锰	对照区儿童	147	(2.11±1.35)μg/g	王荔 ^[38]	2002
	锰污染区儿童	166	(2.67±2.42)μg/g		
血清锰	对照组	110	(10.30±10.61)μg/L	周远忠 ^[39]	2010
	锰接触组	100	(20.88±17.40)μg/L		
唾液锰	对照组	110	(10.40±7.47)μg/L		
	锰接触组	100	(21.16±9.97)μg/L		
血清超氧化物歧化酶	对照组	37	(484±147)μgHb	张龙连 ^[40]	2000
	接锰组	50	(637±101)μgHb		
血清丙二醛	对照组	37	(5.40±1.74)μmol/mL		
	接锰组	50	(3.06±1.93)μmol/mL		
血清胆碱酯酶	对照组	55	(240.3±82.7)nmol/L	姜岳明 ^[41]	2001
	锰粉组	55	(273.4±84.4)nmol/L		
血清免疫球蛋白IgG	对照组	84	(10.26±1.96)g/L	陈小敏 ^[42]	2005
	暴露组	37	(11.42±2.35)g/L		

4 控制措施

4.1 加强监测

加强对空气、水和土壤中锰的环境监测,重点是职业场所空气和居民饮用水中锰的监测,MMT的使用对环境的锰污染也要重视。通过监测发现高锰暴露环境,尽早采取预防和控制措施,同时对相应的高危人群进行生物监测,做到早发现、早治疗,减少锰造成的健康损失。

4.2 开发应用降锰、脱锰技术

根据锰在不同环境介质中产生和分布扩散的特点,开发应用降锰、脱锰技术,降低或避免人群高锰环境下的暴露。如在职业场所使用除锰设施减低工人呼吸带的锰浓度,对使用高锰水源的集中式供水单位推广除锰设施,研究新技术减少工业企业直接排放或MMT的使用对空气的锰污染等。同时,对于长期锰暴露人群尤其是锰中毒患者,研究新方法来减低体内锰负荷,避免或治愈疾患。

4.3 研究锰对健康的影响及效果评估

在现有的基础上,研究锰的中毒机制、锰暴露的剂量反应关系、个体对锰的易感因素、长期低浓度暴露的健康影响等,确定锰中毒的生物标记物,制定锰暴露评估标准和暴露评估方法。

4.4 加强管理

为了减少过量锰接触引起人体的健康损失,我国已经制定了一些标准,从多方面对环境中的锰的暴露水平和源头进行管理控制(表3)。

表3 锰的相关控制标准

项目名称	标准限值	标准名称
车间空气	0.15 mg/m ³	工作场所有害因素职业接触限值(GBZ 2.1—2007)
居住区大气	0.01 mg/m ³	工业企业设计卫生标准(TJ 36—1979)
集中式生活饮用水地表水	0.1 mg/L	地表水环境质量标准(GB 3838—2002)
生活饮用水	0.1 mg/L	生活饮用水卫生标准(GB 5749—2006)
汽油	0.018 g/L	车用汽油有害物质控制标准(GWKB 001—1999)

在膳食摄入方面,我国营养学会推荐锰的每日适宜摄入量为成人3.5mg,可耐受最高摄入量为10mg,其他人群尚未制订。美国食品与营养委员会制定了锰的每日适宜摄入量和最高摄入量^[43](表4)。

表4 锰的每日适宜摄入量与最高摄入量(mg/d)

年龄	每日适宜摄入量		最高摄入量
	男性	女性	
0~6月	0.003	0.003	*
7~12月	0.6	0.6	*
1~3岁	1.2	1.2	2
4~8岁	1.5	1.5	3
9~13岁	1.9	1.6	6
14~18岁	2.2	1.6	9
19岁以上	2.3	1.8	11
妊娠期	—	2.0	—
哺乳期	—	2.6	—

[注]*: 仅从食物和配方奶粉中摄入。

在严格执行标准的同时,还要加强对环境中潜在含锰污染物的管理控制,比如废旧电池、锰相关行业的工业“三废”等。

综上所述,锰是人体的必需微量元素,具有重要的生理功能,摄入不足会影响人体健康,摄入过量会发生锰中毒。由于锰在自然界及生物圈中广泛存在,锰缺乏病较少见,而锰中毒较常见,但多为职业性接触锰尘导致。人体通过普通饮食不会导致锰中毒,但由于地质原因或工业污染,可能通过空气或饮水长期处在低水平的锰暴露环境,由此引发的健康风险值得关注,尤其是儿童等易存在潜在风险的人群。

(志谢: 诚挚感谢上海市疾病预防控制中心袁东副主任医师给予的指导和帮助。)

参考文献:

[1] 唐修义, 赵继尧, 黄文辉. 中国煤中的九中金属元素[J]. 中国煤田地质, 2002, 14(增刊): 43-54.

[2] 于燕, 张振军, 李义平. 西安市大气颗粒物污染现状及其金属特征研究[J]. 环境与健康杂志, 2003, 20(6): 359-360.

[3] 高广信, 吴永会, 郭艳萍, 等. 电焊作业慢性职业性危害调查[J]. 中国工业医学杂志, 2003, 16(2): 107-108.

[4] 陈兰, 刘新卫, 秦德智. 矿山开采锰污染的时序分布[J]. 黑龙江科技学院学报, 2005, 15(2): 123-125.

[5] 王充, 徐雷, 郑琳. 广州市加油站工人体内锰负荷调查[J]. 现代预防医学, 2008, 35(8): 1547-1548, 1550.

- [6] 王充, 徐雷, 郑琳. 汽油抗爆剂甲基环戊二烯三羰基锰对广州大气污染的评价[J]. 现代预防医学, 2007, 34(7): 1300-1302.
- [7] 袁红. 嘉定区生活饮用水锰含量纵向分析[J]. 上海预防医学, 2001, 13(6): 267-268.
- [8] 曾昭华. 长江中下游地区地下水中 Mn 元素的背景特征及其形成[J]. 上海地质, 2004(1): 9-12.
- [9] 周昭红, 王树明, 舒端. 汉川市地下水砷、铁、锰含量检测结果分析[J]. 公共卫生与预防医学, 2008, 19(2): 86-87.
- [10] 梁国玲, 孙继朝, 黄冠星, 等. 珠江三角洲地区地下水锰的分布特征及其成因[J]. 中国地质, 2009, 26(4): 899-906.
- [11] 谢信南, 张日树, 邓友文, 等. 某水厂水源锰超标污染水质调查报告[J]. 江苏卫生保健: 学术版, 2008, 10(1): 19.
- [12] 曾睿, 张果, 何忠俊, 等. 土壤锰素营养及锰在烟草上的应用研究进展[J]. 江西农业学报, 2009, 21(9): 105-109.
- [13] 孙士权, 马军, 黄晓东, 等. 高锰酸钾预氧化去除太湖原水中稳定性铁、锰[J]. 中国给水排水, 2006, 22(21): 6-13.
- [14] 雷万荣, 唐春梅, 江凌云. 浅谈地下水中铁、锰质的迁移与富集规律[J]. 江西科学, 2006, 24(1): 80-82.
- [15] 陈伯雄. 福建省连江县生活饮用水水源水中铁和锰含量的调查[J]. 环境与健康杂志, 2007, 24(7): 544.
- [16] 李常勇, 盛金芳, 胡建江, 等. 富阳市生活饮用水锰、氨氮污染的调查[J]. 中国卫生检验杂志, 2007, 17(1): 130-131.
- [17] 赵金平, 谭吉华, 毕新慧, 等. 广州市灰霾期间大气颗粒物中无机元素的质量浓度[J]. 环境化学, 2008, 27(3): 322-326.
- [18] 薛秀琴, 张瑞娟. 锰健康研究的现状和未来研究[J]. 国外医学: 医学地理分册, 2008, 29(1): 44-45.
- [19] 吴琨, 安红秋, 祁成, 等. 某汽车公司电焊作业职业危害及治理情况[J]. 职业与健康, 2007, 23(16): 1398-1400.
- [20] 乞文旭, 徐兆发. 新型汽油添加剂 MMT 的环境污染及其特征[J]. 环境与职业医学, 2007, 24(1): 92-94.
- [21] 何彩虹. 肇庆市生活饮用水中铁锰含量的调查[J]. 实用预防医学, 2004, 11(1): 129-130.
- [22] 和蓉, 张振荣, 应笑. 浙江省学校饮用水卫生现状调查[J]. 中国学校卫生, 2009, 30(10): 956-957.
- [23] 孙长颖, 孙秀发, 凌文华. 营养与食品卫生学[M]. 6版. 北京: 人民卫生出版社, 2007: 72-73.
- [24] 颜伟, 王克跃. 锰的神经毒性及其机制研究进展[J]. 微量元素与健康研究, 2009, 26(3): 67-69.
- [25] YOKEL RA. Manganese flux across the blood-brain barrier[J]. Neuromolecular Med, 2009, 11(4): 297-310.
- [26] 荆俊杰, 陆晓菁, 陈敏, 等. 锰对小鼠脑和肝脏脂质过氧化及其钙、铁、锌的影响[J]. 毒理学杂志, 2009, 23(2): 138-140.
- [27] ELDER A, GELEIN R, SILVA V, et al. Translocation of inhaled ultrafine manganese oxide particles to the central nervous system[J]. Environ Health Perspect, 2006, 114(8): 1172-1178.
- [28] 贾克, 徐兆发, 徐斌, 等. 锰对大鼠脑谷氨酸代谢及酶活性影响[J]. 中国公共卫生, 2008, 24(3): 346-347.
- [29] 郑安, 牛丕业. 锰对神经细胞凋亡的影响[J]. 山西医科大学学报, 2009, 40(9): 797-800.
- [30] 李宁. 某锰系铁合金厂锰对工人健康危害的调查[J]. 职业与健康, 2008, 24(24): 2658-2659.
- [31] 杨书林, 伏骥. 电焊作业对工人神经行为功能的影响[J]. 职业卫生与应急救援, 2009, 27(1): 31-33.
- [32] 王荔, 骆常好, 刘中国, 等. 锰暴露与儿童神经行为关系[J]. 中国公共卫生, 2007, 23(11): 1309-1310.
- [33] HAFEMAN D, FACTOR-LITVAK P, CHENG Z, et al. Association between manganese exposure through drinking water and infant mortality in Bangladesh[J]. Environ Health Perspect, 2007, 115(7): 1107-1112.
- [34] 梁兢波, 邹斌, 阮永华, 等. 陕南秦巴山区粮食中铜、锰、铁、锌含量及其对健康的影响; 中国医学地理研究[M]. 北京: 中国医药科技出版社, 1994: 63.
- [35] 窦磊, 周永章, 李勇, 等. 珠江三角洲典型肝癌高发区土壤锰形态及其生态效应[J]. 应用生态学报, 2008, 19(6): 1362-1368.
- [36] 李萌, 唐吟岫, 杨玉华. 电感耦合等离子体原子发射光谱法测定血锰及儿童血锰含量调查[J]. 检验医学, 2006, 21(3): 225-227.
- [37] 张文静, 刘正亮, 邵华, 等. 锰职业接触工人生物标志物的研究[J]. 中华劳动卫生职业病杂志, 2010, 28(12): 926-928.
- [38] 王荔, 刘中国, 郑兰, 等. 锰暴露区儿童头发微量元素调查[J]. 中国校医, 2007, 21(3): 245-246.
- [39] 周远忠, 陈健, 史秀娟, 等. 人群锰接触水平的早期生物标志物探索[J]. 中华劳动卫生职业病杂志, 2010, 28(9): 645-647.
- [40] 张龙连, 卢玲, 郭文瑞, 等. 锰电焊对作业工人血 SOD、MDA 影响的研究[J]. 中国公共卫生, 2000, 16(5): 454-455.
- [41] 姜岳明, 陆继培, 黄志碧, 等. 锰对工人血清胆碱酯酶活性和尿香草扁桃酸含量的影响[J]. 铁道劳动安全卫生与环保, 2001, 28(3): 187-189.
- [42] 陈小敏, 刘林飞, 骆公成, 等. 职业性锰暴露工人血清免疫球蛋白水平观察[J]. 中国民康医学, 2005, 17(7): 337-338.
- [43] Food and Nutrition Board. DRI, dietary reference intakes for vitamin A, vitamin K, boron, chromium, copper, iodine, iron, manganese, molybdenum, nickel, silicon, vanadium, and zinc[M]. Washington, D.C: National Academies Press, 2001: 404-414.

(收稿日期: 2010-06-03)

(英文编审: 金克峙; 编辑: 徐新春; 校对: 王晓宇)