

植物中汞的研究进展

付学吾^{1,2}, 冯新斌¹, 王少锋^{1,2}, 李仲根^{1,2}, 李平^{1,2}

1. 中国科学院 地球化学研究所, 贵阳 550002; 2. 中国科学院 研究生院, 北京 100039

摘 要:植物生态系统中汞的环境过程是生物地球化学循环过程的重要组成部分,且与整个生态系统中各物种的生存和发展密切相关。本文介绍了植物中汞生物地球化学循环的进展,包括汞对植物的生物毒性、植物中汞的来源、分布与迁移转化、植物-大气间汞的交换过程及其研究方法,以及植被在生态系统间汞循环中的重要作用,最后简要介绍今后的研究重点和热点。

关 键 词:汞;植物;生物毒性;迁移转化;生物地球化学循环

中图分类号:X173 **文献标识码:**A **文章编号:**1007-2802(2005)03-0232-07

汞是一种有严重生物毒性的环境污染物,它的有机化合物具严重的神经毒性^[1],经生物富集和食物链放大后将产生更加严重的后果。植物作为陆地生态系统的第一生产者,也是食物链的最底层,其生存和质量状况制约着整个生态系统的发展,因此对于汞在植物生态系统(森林、草地、湿地和农田)中的分布、迁移和转化有着非常重要的意义。早期由于缺乏汞在植物中累积、迁移和转化方面的知识,使大量的无机汞和有机汞进入了植物生态系统。20世纪50年代汞作为种子消毒剂、肥料和除莠剂开始了广泛的应用,1952~1974年,仅日本就向农田施用了 8.8×10^5 t含汞为0.27%的杀虫剂^[2]。此外,随着工业的发展,由人为源和自然源释放(包括人为源的再释放)到大气中的汞(Hg⁰达95%以上),在大气中的滞留时间为1~2 a^[3],经长距离的迁移,沉降到较为偏远的森林、草地和湿地生态系统,造成了土壤和植被汞含量的升高^[4]。植物生态系统中汞的污染已经到了不容忽视的地步。植物对汞有较强的生物富集效应^[5,6],这严重扰乱了植物的生长及以植物为生长基础的动物的发育^[7]。所以,汞在植物生态系统中循环机制的研究对于解决汞的全球生态环境问题有至关重要的意义。

1 汞对植物的生物毒性

上个世纪40年代,就广泛开展了汞对植物基因影响的机制研究^[8]。随后又研究了汞对植物生长、发育的抑制以及汞对土壤理化性质的破坏,并取得了许多的成果。

1.1 汞对土壤理化性质的破坏

土壤是植物营养和水分的来源,是植物赖以生存的基础,土壤内部理化机制的改变会影响植物的生长和发育。土壤中微生物群落对营养元素的来源、物质的转化起着十分关键的作用^[9],汞是重金属中对微生物毒性最强的一种,会破坏微生物群落的结构和多样性^[10]。汞的污染还会造成土壤中原生动物物种的减少、多样性下降,进而影响到土壤生态系统物质的循环和能量的流动^[11]。汞的污染还会严重抑制酶的活性^[12],导致氮、磷和有机物的正常转化失调,影响植物的生长和发育^[13]。

1.2 汞对植物生长发育的影响

研究表明,低浓度汞可一定程度地刺激植物的生长^[14],但高浓度的汞会抑制种子的萌发,降低根部和茎部的长度和重量,使植物生长减缓;Hg的毒性比Cd、Pb、Cu的毒性要强^[15,16](表1)。

收稿日期:2004-11-30收到,2005-05-13改回

基金项目:国家自然科学基金资助项目(40276311)

第一作者简介:付学吾(1981—),男,硕士研究生,主要从事汞的生物地球化学研究。

表 1 无机汞对植物生长发育的毒理性作用

Table 1 Toxicity of inorganic mercury on the growth of plants

植物名称	溶液(浓度)	浸泡时间	植物生理反应
红藻	HgCl ₂ (1.0 mg/L)	6 h	生长减慢,降低 50% ^[17]
红藻	HgCl ₂ (0.5 mg/L)	12 h	生长减慢,降低 50% ^[17]
红藻	HgCl ₂ (0.25 mg/L)	24 h	生长减慢,降低 50% ^[17]
水草	HgCl ₂ (7.4 mg/L)	14 d	枝体 50%死亡 ^[18]
水草	HgCl ₂ (1.0 mg/L)	28 d	枝体 50%死亡 ^[18]
西红柿	HgCl ₂ (1.0 mg/L)	10 d	根部和茎部生长受到抑制,但组织未受破坏 ^[19]
小麦	HgCl ₂ (1.0 mg/L)	35 d	种子活力下降,幼苗生长受到抑制,程度随浓度加深 ^[16]
水稻	HgCl ₂ (1.0 μm)	5~7 d	发芽率明显下降,根部和枝节的长度和重量明显低于正常值,毒性强于铅 ^[15]

有机汞的毒性主要是影响植物根系的新陈代谢。经有机汞浸泡的植物种子,发芽阶段由于根系损伤而影响植物生长阶段水分的吸收、营养成分的迁移及光合作用。有机汞对植物生长的抑制作用更强,世界健康协会^[20]的研究报告指出,在水生生态系统中,有机汞对植物的毒性作用比无机汞大得多。

1.3 汞对植物内部生理机制的影响

汞对 SH 自由基有很强的亲和力,会扰乱任何未受保护的蛋白质的正常功能。汞会结合到蛋白质分子的同一条链或两条相邻的链上^[21],汞和蛋白质的结合会增加某些 DNA 片段的密度,从而改变它们在 DNA 链上的位置,改变 DNA 的正常结构,当蛋白中汞的含量达到一定程度时就导致蛋白质的沉淀^[22]。汞也会影响植物的光合作用^[23],经含汞(Hg²⁺)溶液短时间处理的植物,光合作用色素粒和叶绿素含量会有所增加;但随浸泡时间的增长,上述物质的含量会减少,同时严重影响到光合作用中电子的传递,抑制光照和黑暗条件下植物的光合作用^[21]。此外,Hg²⁺还会与叶绿素蛋白中的氨基酸结合,降低细胞外膜缩多氨酸的含量,影响第二光合作系统的正常功能^[25]。汞对光合作用的影响除取决于对汞的吸收方式(进入细胞组织的程度)外,还与植物的年龄有关^[26]。无机汞与有机汞对植物内部机制影响的方式和程度都有差异,无机汞主要作用于原生质的细胞膜,而有机汞则主要破坏细胞质组织的完整性和新陈代谢。烷基汞由于具高脂溶性、在植物体内难以分解的特性,毒性要强于无机汞。研究表明,不同浓度汞溶液对蚕豆有丝分裂的影响有很大的差异^[27],低浓度(1~5 μg/mL)可以促进细胞分裂,高浓度(5 μg/mL 以上)则会抑制细胞的分裂。有丝分裂指数的下降,会导致染色体功

能失常,其破坏程度随浸泡时间和溶液浓度而增强。

2 植物中的汞

2.1 植物中汞的来源

研究表明,植物从周围环境中摄取汞的方式主要有以下四种:

(1)通过根部从土壤和土壤溶液中吸收和富集离子态、原子态和甲基汞^[28~30]。根部吸收汞受到许多条件的影响,如土壤中汞的形态和含量、植物的年龄、土壤中有有机质的含量、土壤中碳的交换容量、CO₂ 含量和氧化还原电位^[31]。

(2)通过叶片气孔的呼吸作用从大气中吸收汞(Hg⁰ 和甲基汞)。这个过程受到大气中汞含量、叶片气孔的呼吸状况和植物年龄的影响^[32,33];

(3)叶片从大气中吸收或吸附二价汞、活性二价汞及颗粒态汞^[34,35]。

(4)叶片从大气降水中吸收汞^[36]。

当然,不同类型的植物从环境中吸收汞的方式和程度有一定的差异,苔藓中汞几乎全部来自大气和降水,这使苔藓早在 20 世纪 60 年代就成为地区汞沉降的指示性植物,是区域汞污染的一种简单有效的指示植物^[37]。近年来开展了用苔藓研究区域性汞干沉降的工作^[38]。对大多数植物来说,以上四种方式吸收汞的过程都是存在的,只是不同来源的汞对植物体汞的贡献有一定的差异。一般来说,大气汞是植物体内汞的主要来源,而植物从土壤中吸收的汞非常有限^[30,33]。这主要是由于从土壤中吸收汞受到以下条件的制约:1)土壤中含量较高的腐殖酸和有机质能与汞形成惰性化合物,从而影响汞的迁移^[39];2)从土壤中吸收的汞绝大部分滞留在根部,而不会向茎部和叶片迁移。由于植物根部生物量较小,根部吸收也可能会达到饱和,所以限制了吸收^[40]。

2.2 汞在植物中的形态和分布

植物可以从周围环境中摄取各种形态的汞,但有些形态的汞(颗粒态和氧化态盐类)很难进入植物体内^[36],植物体内主要含 Hg^0 、 Hg^{2+} 、 CH_3Hg^+ 与 $C_2H_5Hg^+$ ^[11]。由于目前的研究手段有限,研究工作主要集中于总汞和甲基汞。一般来说,甲基汞在

植物体内的含量很有限,一般在 5% 以下。这与土壤中甲基汞的含量非常一致^[12]。但一些生长于生物甲基化能力较强场所的植物,如水稻中的甲基汞百分含量则会较高^[13]。水生生态系统中植物叶片甲基汞百分含量高于旱地植物叶片甲基汞含量^[35](表 2)。

表 2 植物中汞的含量分布特征

Table 2 Mercury concentrations and distributions in plants

植物名称(干重)	汞含量 / $ng \cdot g^{-1}$				所占比率(%)				整株含量 / $ng \cdot g^{-1}$
	根部	叶片	茎部	果实	根部	茎部	叶片	果实	
意大利黑麦草 ^[36]	36	58	12						42
意大利黑麦草 ^[36]	36	79	62						56
海草 ^[5]		43.4	69.6			4.6	95.4		67.9
珙桐 ^[11]	0~11 800	0~543	0~1800						
虎耳科灌木 ^[11]	0~24 6000	~6420	0~3650						
黄杉 ^[11]	0~37 4000	~2210	0~8960						
椴叶唐棣 ^[11]	0~18 7000	~3370	0~5370						
柳树 ^[11]	0~16 700	0~345	0~3520						
越橘 ^[30]	79	22	25		26.4	60.8	12.8		28
茅草 ^[30]	90	32	24		30.4	55.7	13.9		37
波状须草 ^[30]	41	38	15		17.4	55.9	26.7		28

汞在植物中的分布是不均匀的,不同植物中各枝体部分汞相对含量有一定的差异。但由于根部生物量有限,所以汞主要分布在茎部和叶片部分(表 2)。汞在植物体中的含量和分布要看植物的类型、土壤和大气中的汞含量。

植物中汞含量还受年龄的影响,一般来说,生长的时间越长,各组织部分汞含量越高^[32,33,35]。另一方面,植物中甲基汞的百分含量与植物的年龄呈负相关^[32]。植物中汞含量和分布受周围汞污染状况的影响。一般,根部与土壤中的汞含量的相关性要于叶片部分^[11],另一方面,仇广乐^[45]指出,苔藓的汞含量与大气中总汞含量的相关性较好。

2.3 汞在植物体内的迁移转化

研究指出,根部吸收的汞很难迁移到植物的其他部分,这主要是由于根部与其他组织间有很强的阻碍汞迁移的机制^[30,40,46]。但也有研究表明,这种迁移方式还是存在的。Bishop^[28]指出,根部对叶片汞的贡献约 10%。Todal^[17]认为根部的迁移会加大叶片对汞的释放;而叶片所吸收的汞也会迁移到根部^[18]。相对而言,甲基汞在植物中的迁移比较容易^[30]。汞在植物中形态的转变也是存在的,有人^[19,50]通过对苔藓汞含量和湿地一大气间汞的交换的研究指出, Hg^{2+} 和 Hg^0 之间可能存在相互转化的机制。Guimaraes^[51]对巴西泛滥平原水体甲基

化的研究发现,浮根或固定根的大型漂浮植物根部甲基汞产生量高出表层沉积物一个数量级,水草可能是强烈产生甲基汞的生物相。

3 植物在汞的生物地球化学循环中的作用

植被是全球生态系统的重要一环,在汞的生物地球化学循环中起着关键的作用。

3.1 植物可以作为大气汞的源和汇

这可通过两个方式实现:

(1)通过叶片和大气的交互作用吸收或排放汞。植被与大气之间汞的交换是动态的,植物叶片既可以吸收大气汞,又可将汞释放到大气中,这是一个双向过程,决定这个过程方向(释放或吸收)的是大气汞含量、土壤(或湿地)汞含量、植被类型以及各种气象条件^[52~54]。由于植被覆盖面积在全球总面积中占有很大的比例,所以揭示不同生态系统与不同气候条件下植被与大气间汞交换的规律有着非常重要的意义。Kothny^[55]指出,植被是大气汞的源。Kozuchowski^[56]测量了植物一大气间的汞交换通量。目前研究植物一大气汞交换通量主要有如下两种方法:1)箱法测量^[52,53,54]:应用于实验室研究,可以依需要改变土壤和大气汞的含量,还可以控制温度、光照等气象条件,对揭示植物一大气汞交换通量

的一些规律的效果较好。研究表明,土壤和大气的汞相对含量决定着汞迁移的方向,而温度、光照、植物光合作用,以及蒸腾速率对通量大小的有一定的影响。这种方法由于受到箱体积的制约,所采用的植被体形一般都较小,限制了揭示实际环境中植物对大气汞的贡献的研究。2)微气象梯度法:采用野外直接测量,利用垂直方向上汞的浓度梯度和鲍文比(通过测量 CO₂ 或 H₂O 气体的通量以及热感通量和浓度梯度计算)来计算植物(或+土壤)-大气汞交换通量^[57-58],以直接反映植被(或+土壤)对大气汞的贡献。但这种方法对仪器测量的精度和分析速率的要求都比较高,对气象和地形条件也有一定

的依赖性。Lindberg^[57]通过对美国田纳西州与瑞典森林植被和大气间汞交换的研究指出,全球森林对大气汞的贡献较大,约为 850~2000 t/a。

此外,Xu^[59]提出了用土壤溶液汞含量和植物蒸腾速率来计算汞的释放。

(2)植被在燃烧和林木采伐过程中向大气中释放汞。植物燃烧过程中,体内的汞几乎全部释放到大气中,其中绝大部分是 Hg⁰(>87%以上)和颗粒态汞^[60]。燃烧过程表层土壤温度升高,也会加大土壤中汞的释放。Friedli^[60]对全球森林火灾所释放的汞的估算为 853 t,约占全球汞释放总量的 13%。

表 3 植被对地区汞沉降的贡献

Table 3 Mercury deposition contributed from plant in some areas

地 点	甲基汞 (mg · ha ⁻¹ · a ⁻¹)				总汞/mg · ha ⁻¹ a ⁻¹			
	Wet deposn	Through fall	Litter fall	Total canopy	Wet deposn	Through fall	Litter fall	Total canopy
加拿大安大略湖西北部森林 ^[35]	0.9	0.9	0.8	1.7	70	80	120	200
瑞典东南部森林湿地 ^[45]	1.2	1.6	6.0	7.6	100	230	230	460
瑞典北部斯瓦特博格森林 ^[45]	0.8	1.7	3.0	4.7	70	150	180	330
芬兰帕尼卡森林 ^[45]	1.0		6.4		51		595	
美国马歇尔森林 ^[45]					65	130	123	253
美国沃克湿地 ^[52]					100	140	300	440
美国占勃连湖区盆地 ^[63]					79	119	130	249
美国休伦湖区湿地 ^[61]					87	105	114	219
德国积水盆地 ^[70]			10~40				400~7800	
地中海(水草) ⁷⁰							0.99~10	
瑞典东南部森林(4~5月) ^[65]	0.04	0.02	0.055	0.075	1.12	1.6	2.3	3.9

3.2 植物对土壤、水生生态系统的污染

植物对汞有较强的富集特性^[5],植物中汞的含量一般为(10~100) nμg/g,污染区可达 10 nμg/g^[30,32,35,41]。植物中汞主要来源于大气^[30,33],植物死亡腐烂后,体内所含的汞几乎全部进入土壤或水生生态系统,导致系统中汞含量升高。植物体中汞进入土壤和水体中有三种方式:

(1)汞随叶片的脱落进入地表^[35,61]。

(2)叶片吸收的一部分汞(颗粒态和氧化盐类)很难进入植物体内部,但在降水时会进入雨水,从而进入土壤和水体^[62,63]。

(3)植物死亡后,枝体腐烂分解,汞随之进入土壤或水体中。

研究表明,植物对土壤与湿地汞的污染相当严重,一般是湿沉降的 2~5 倍^[35](表 3)。

4 植物中汞的研究方向

植被在全球生态系统中占有重要的地位:全球植被面积约为 4682 万 km²,耕地为 1506 万 km²,湿地 514 万 km²;植被对汞在大气、土壤以及生物链间的迁移转化起着“承上启下”的作用。目前对汞在植物中研究的系统性、全面性和深入程度都有待加强。今后的研究重点和热点有:

(1)自然条件下汞对植物的毒性作用。前人在植物对汞的基因学与实验室研究做了大量的工作,但缺乏自然条件下汞对植物生长、发育和植物本身耐受性方面的研究。

(2)汞在植物的迁移转化及对食物链高营养级生物的影响。汞是人类食物链中毒性最强且易于富集放大的有毒物质^[41],特别是有机形态的汞,由于水

生生态系统(湿地、沼泽、稻田)是产生甲基汞的重要场所^[43,51],通过植物的富集和食物链的放大,对高营养级生物的生存状况和人类的健康构成了严重的威胁^[43,66]。

(3)植被在全球汞循环中的作用。植被对汞在大气、土壤、湿地和湖泊的迁移转化中起着重要的作用^[35,37,65],同时也是最为复杂的生态系统;精确、全面地揭示植被在汞的生物地球化学中迁移转化规律,是当前一个重要课题。

我国是世界上汞污染比较严重的国家之一,但汞污染研究工作开展比较晚,目前各项工作还处于起步阶段,特别是植物中汞的生物地球化学循环研究,更是落后于西方发达国家。

参考文献(Reference):

- [1] US EPA. Mercury study report to congress[R]. EPA-452/R-97-003, Office of Air Quality Planning and Statement Printing Office, Washington D. C., December, 1997.
- [2] Nakagawa R, Yumita Y. Change and behavior of residual mercury in paddy soil and rice of Japan[J]. *Chemosphere*, 1998, 37:1483-1487.
- [3] Che Jen Lin, Pehkonen S O. The chemistry of atmospheric mercury: A review[J]. *Atmospheric Environment*, 1991, 33: 2067-2079.
- [4] Melieres M A, Pourchet M, Dominipue P C, Gaucher P. Mercury in canopy leaves of French Guiana, in remote areas[J]. *The Sci. Total Environ.*, 2003, 311:261-267.
- [5] Pergent Martini C. *Posidonia oceanica* a biological indicator of past and present mercury contamination[J]. *Marine Environmental Research*, 1998, 45: 101-111.
- [6] 蒋蓉芳,周德源,戴修道.植物净化空气汞污染的研究[J]. *上海环境科学*, 2000, (10): 473-474;494.
Jiang Rongfang, Zhou Dehao, Dai Xiudao. Study on purification of air mercury pollution by plant[J]. *Shanghai Environmental Science*, 2000, (10): 473-474;494. (in Chinese with English abstract)
- [7] Jordan D. Mercury contamination; Another threat to the Florida Panther endangered species, Technical Bulletin, US[J]. *Fish and Wildlife Service*, 1990, 15:1-2.
- [8] Flora S, Beaniceli C. Genotoxicity of mercury compounds; A review[J]. *Mutat. Res.*, 1994, 317:57-59.
- [9] 池振明.微生物生态学[M]. 济南:山东大学出版,1999. 65.
Chi Zhenming. *Microecology*[M]. Jinan: Shandong University Published, 1995. 65. (in Chinese)
- [10] Miller A K, Westerguard K. The effect of long-term mercury pollution on the soil microbial community[J]. *Microbiology Ecology*, 2001, 36:11-19.
- [11] 牛世全,宁应之,马正学,龚大洁,刘左军,许亚国.重金属复合污染土壤中原生动物的群落特征[J]. *甘肃科学学报*, 2002, 14:44-48.
Niu Shiquan, Ning Yingzhi, Ma Zhengxue, Gong Dajie, Liu Zuojun, Xu Yaguo. Studies on the community characteristic of protozoa in the soil with compound pollution of heavy metal[J]. *J. Gansu Science*, 2002, 14: 44-48. (in Chinese with English abstract)
- [12] 和文祥,朱铭莪,张一平.土壤脲酶与汞关系的作物效应[J]. *西北农林科技大学学报*, 2002, 30:68-71.
He Wenxiang, Zhu Ming'e, Zhang Yiping. Crop effect on the relationship between soil urease activity and mercury[J]. *J. Northwest Sci-Tech University of Agriculture and Forest (Nat. Sci. ed.)*, 2002, 14:44-48. (in Chinese with English abstract)
- [13] 关松荫.土壤酶及其研究方法[M]. 北京:北京农业出版社, 1987.
Guan Songmeng. *Soil enzyme and research method*[M]. Beijing: Beijing Agriculture Published, 1987. (in Chinese)
- [14] 杨保华,官春云,陈剑红. 菹齿眼子菜、沼生水马齿对汞耐受性与浓缩性研究[J]. *湖南有色金属*, 2004, 20(2):36-39.
Yang Baohua, Guan Chunyun, Chen Jianhong. Study on concentrate and tolerance of *Callitriche* and *palustris* L. and *Potamogeton pectinatus* L. for Hg[J]. *Hunan Non-Ferrous Metal*, 2004, 20(2):36-39. (in Chinese)
- [15] Mishra A, Choudhmri M A. Amelioration of lead and mercury affection germination and rice seed growth by antioxidants [J]. *Boiologia Plantarum*, 1998, 41:469-473.
- [16] 马成仓,洪发水.汞对小麦种子萌发和幼苗生长作用机制初探[J]. *植物生态学报*, 1998, 22:373-378.
Ma Chengcang, Hong Fashui. Preliminary explanation of the mechanism about effects of mercury on wheat seed germination and seedling growth [J]. *Acta Phytoecology Sinica*, 1998, 22:373-378. (in Chinese with English abstract)
- [17] Boney A D. Sub-lethal effects of mercury on marine algae [J]. *Marine Pollution Bull.*, 1971, 2:69-71.
- [18] Brown C L, Fang C S. Uptake of mercury vapor by wheat, an assimilation[J]. *Science of Total Environment*, 1978, 61: 430.
- [19] Suszycynky E M, Shan J R. Phytotoxicity and accumulation of mercury in tobacco subjected to different exposure routes [J]. *Environment Toxicol. Chemistry*, 1992, 14:61-67.
- [20] World Health Organization(WHO). Mercury-environmental Aspect[R]. 1989. Geneva, Switzerland.
- [21] Clarkson T W. The pharmacology of mercury compounds Annu[J]. *Rev. Pharmacol.*, 1972, 12:375-406.
- [22] Manomita P, Niladri B, Bandopadhyay B, Sharma A. Comparison of mercury, lead and arsenic with respect to genotoxic effects on pant system and the development of genetic tolerance [J]. *Environ. Experi. Botany*, 2004. Submitted.
- [23] Bonifacio R S, Moutano M N. Inhibitory effects of mercury and cadium on seed germination of *Ennalus aeoroides* (L. f)

- [J]. *Bull. Environ. Contamination Toxicol.*, 1998, 60: 45–51.
- [24] Krupa Z, Baszynski T. Some aspects of heavy metal toxicity towards photosynthetic apparatus direct and indirect effect on light and dark reactions[J]. *Acta Physiol. Plant*, 1995, 17: 177–190.
- [25] Barner M, Carpentier R. The action of mercury on the binding of extrinsic polypeptides associated with water oxidizing complex of photo-system II [J]. *FEBS Lett.*, 1995, 360: 251–254.
- [26] Shaw B P, Rout N P. Age-dependent response of *Phaseolus aureus* Roxb to inorganic salt mercury and cadmium[J]. *Acta Physiol. Plant*, 1998, 20: 85–90.
- [27] 曹德菊, 黄祥明, 张浩. 汞对蚕豆根尖细胞诱变效应[J]. *安徽农业科学*, 2003, 31: 383–397.
Cao Deju, Huang Xiangming, Zhang Hao. The Toxicity of mercury on the fine cell mutagenic effect of broad bean[J]. *Anhui Agriculture Science*, 2003, 31, 383–397. (in Chinese)
- [28] Bishop K H, Lee Y H. Xylem Sap as a pathway for total mercury and methylmercury transport from soil to tree canopy in the boreal forest[J]. *Biogeochemistry*, 1998, 40: 101–113.
- [29] Cocking D, Rohrer M, Thomas R, Walker J, Ward D. Effects of root morphology and Hg concentration in the soil on uptake by terrestrial vascular plants[J]. *Water, Soil and Air Pollut.*, 1995, 80: 113–116.
- [30] Schwesig D, Krebs O. The role of ground vegetation in the uptake of mercury and methylmercury in a forest ecosystem [J]. *Plant and Soil*, 2003, 253: 445–455.
- [31] Crowder A. Acidification metals and macrophytes[J]. *Environment Pollut.*, 1991, 71: 171–203.
- [32] Ericksen J A, Gustin M S, Schorran D E, Johnson D W, Lindberg S E, Coleman J S. Accumulation of atmospheric mercury in forest foliar [J]. *Atmospheric Environment*, 2003, 37: 1613–1622
- [33] Fleck J A, Grigal D F, Keeler G J. Mercury uptake by trees: An observational experiment[J]. *Water, Soil and Air Pollut.*, 1998, 115: 513–523
- [34] Rea A W, Lindberg S E, Keeler G J. Dry deposition and foliar leaching of mercury and selected trace elements in deciduous forest throughfall[J]. *Atmospheric Environment*, 2001, 35: 3453–3462.
- [35] Vincent L, Louis S T, John W M, Kelly C A. Importance of the forest canopy to flux of methylmercury and total mercury to boreal ecosystems[J]. *Environmental Science and Technology*, 2001, 35: 3089–3098.
- [36] Xiao Z, Sommar J, Lindqvist O, Gionleka E. Atmospheric mercury deposition to grass in South Sweden[J]. *Science of Total Environment*, 1998, 213: 85–94.
- [37] 王少锋, 冯新斌, 仇广乐, 付学吾. 夏季红枫湖地区农田土壤—大气界面汞交换通量的初步研究[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 2004, 23(1): 19–23.
Wang Shaofeng, Feng Xinbin, Qiu Guangle, Fu Xuewu. Study of mercury exchange rate between air and soil surface in summer season at the Hongfeng reservoir region, Guizhou, China[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 2004, 23(1): 19–23. (in Chinese with English abstract)
- [38] Lodenius M. Dry and wet deposition of mercury near a chlor-alkali plant[J]. *Science of the Total Environment*, 1997, 213: 53–56.
- [39] Wang D Y, Qing C L, Guo T Y, Guo Y J. Effects of humic acid on transport and transformation of mercury in soil-plant systems[J]. *Water, Soil and Air Pollut.*, 1997, 95: 35–43.
- [40] Patra M, Sharma A. Mercury toxicity in plants[J]. *Bot. Rev.*, 2000, 66: 379–422.
- [41] Lodenius M. Mercury in terrestrial ecosystem: A review [A]. Watras C J, Huckabee J W, eds. *Mercury pollution: Integration and synthesis*, Chelsea, MI: Lewis, 1994. 343–354.
- [42] Lindqvist O. Mercury in Swedish environment recent research on cause consequence and corrective method[J]. *Water, Soil and Air Pollut.*, 1991, 55: 7.
- [43] Horvat M, Nolde N, Fajon V, Jereb V, Logar M, Lojen S, Jacimovic R, Falnoga I, Qu Liya, Faganelli J, Drobne D. Total mercury and methylmercury and selenium in mercury polluted areas in Guizhou Province, China[J]. *Science of Total Environment*, 2003, 304: 231–254.
- [44] Ellis R W, Eslick L. Variation and range of mercury uptake into plants at mercury contaminated abandoned mine site[J]. *Environmental Contamination and Toxicity*, 1997, 59: 763–769.
- [45] Qiu Guangle, Feng Xinbin, Wang Shaofeng, Shang Lihai. Mercury and methylmercury in riparian soil, sediments, mine-waste calcines, and moss from abandoned Hg mines in east Guizhou Province, Southwestern China[J]. *Applied Geochemistry*. in press.
- [46] Cavallini A, Natali L, Durante M, Meserti B. Mercury uptake distribution and DNA affinity in Durum wheat (*Triticum Durum* Desf) plants[J]. *Science of Total Environ.*, 1991, 243/244: 119–127.
- [47] Todal L L, Taylor G E, Gustin M S, Fernandez C L. Mercury and plants in contaminated soil: I uptake, partitioning and emission to the atmosphere [J]. *Environmental Toxicol. Chem.*, 1998, 17: 2063–2071.
- [48] Gaggi C, Chemello G, Bacci E. Mercury-vapor accumulation in azalea leaves[J]. *Chemosphere*, 1991, 22: 869–872.
- [49] Balarama M V, Karunasagar D, Arunachalam J. Study of mercury pollution near a thermometer factory using lichens and mosses[J]. *Environmental Pollution*, 2003, 124: 357–360.
- [50] Poissant L, Martin P, Xu Xiaohong, Zhang Hong, Beauvais

- C. Atmospheric mercury speciation and deposition in the Bay ST. Francois wetland[J]. *J. Geophysical Research*, 2004, 109.
- [51] Guimaraes J R D, Meilb M. Mercury net methylation in five tropical flood plain regions of Brazil: High in the root zone of floating macrophyte mats but low in surface sediments and flooded soils[J]. *The Science of Total Environ.*, 2000, 261: 99–107
- [52] Hanson P J, Lindberg S E, Tabberer T A, Owens J G, Kim K H. Foliar exchange of mercury vapor: Evidence for a compensation point[J]. *Water, Soil and Air Pollut.*, 1995, 80: 373–382.
- [53] Erickson J A, Gustin M S. Foliar exchange of mercury as a function of soil and air mercury concentrations[J]. *Science of Total Environment*, 2004, 32: 271–279.
- [54] Frescholtz T F, Gustin M S. Soil and foliar mercury emission as a function of soil concentration[J]. *Water, Soil and Air Pollut.*, 2004, 155: 223–237.
- [55] Kothny E L. The three phase equilibrium of mercury in nature, trace elements in the environments[J]. *ACS*, 1973, 123: 149–170.
- [56] Kozuchowski I, Johnson D L. Gaseous emission of mercury from an vascular plants[J]. *Nature*, 1978, 224: 468–469.
- [57] Lindberg S E, Hanson P J, Meyers T P, Kim K H. Air surface exchange of mercury vapor forests—The need for a re-assessment of continental biogenic emissions [J]. *Atmospheric Environment*, 1998, 32: 895–908.
- [58] Lindberg S E, Meyers T P. Development of an automated micrometeorological method for measuring the emission of mercury vapor from wetland vegetation[J]. *Wetland Ecology and Management*, 2001, 9: 333–343.
- [59] Xu Xiaohong, Yang Xiusheng, Miller D R, Helble J J, Carney R J. Formulation of bidirectional atmosphere-surface exchanges of elemental mercury[J]. *Atmospheric Environment*, 1999, 33: 4345–4355.
- [60] Friedli H R, Radke L F. Mercury emission from burning of biomass from temperate North American forest: Laboratory and airborne measurements[J]. *Atmospheric Environment*, 2003, 37: 253–267.
- [61] Lee Y H, Bishop K H, Munhte J. Do concepts about catchment cycling of methylmercury and mercury in boreal catchments stand the test of time? Six years of atmospheric inputs and runoff export at Svartberget, northern Sweden[J]. *The Science of the Total Environment*, 2000, 260: 11–20.
- [62] Kolka P K, Nater E A. Atmospheric inputs of mercury and organic carbon into forested upland/Bog watershed[J]. *Water, Soil and Air Pollut.*, 1999, 113: 273–294.
- [63] Rea A W, Keeler G J, Schereatskoy T. The deposition of mercury in throughfall and litterfall in the lake champlain watershed, a short-term study[J]. *Atmospheric Environment*, 1996, 30: 3257–3263.
- [64] Rea A W, Lindberg S E, Keeler G J. Mercury accumulation in foliar over time in the two northern mixed hard wood forest [J]. *Water, Soil and Air Pollut.*, 2002, 133: 49–67.
- [65] Hultberg H. Cycling of methyl mercury and mercury. Response in the forest roof catchment to three years of decreased atmospheric deposition [J]. *Water, Air and Soil Pollut.*, 1995, 80: 415–424.
- [66] Akagi H, Malm O, Kinjo Y, Kinjo Y, Harada M, Fernando J, Branches P, Wolfgang C, feiffer P, Kato H. Methylmercury pollution in the Amazon, Brazil[J]. *Sci. Total Environ.*, 1999, 217: 81–91.

Advances of Research on Mercury in Plants

FU Xue-wu^{1,2}, FENG Xin-bin¹, WANG Shao-feng^{1,2}, LI Zhong-gen^{1,2}, LI Ping^{1,2}

1. *State Key Laboratory of Environmental Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002, China*; 2. *Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China*

Abstract: The environmental process of mercury in plants is a vital part in the bio-geochemical cycling process of mercury, with close relationship to the existence and development of species in the whole ecosystem. Some advances of researches on the bio-geochemical cycling process of mercury in plants have been reviewed in this paper. They include the bio-toxicity of plants caused by mercury in plants, the source, distribution, transportation and transformation of mercury in plants, mercury exchange processes between plants and atmosphere and their research methods, and the important function of vegetation on mercury cycling in the ecosystem. Finally, some key and hot research areas have been briefly addressed for further study.

Key words: mercury; plant; bio-toxicity; transportation and transformation; biogeochemistry