ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第36卷 第8期

Vol.36 No.8

2015

中国科学院生态环境研究中心 主办

科学出版社 出版

中国期刊方阵

双奖期刊

中华人民共和国新闻出版总署

环境科学
(HUANJING KEXUE) ENVIRONMENTAL SCIENCE
第36卷 第8期
2015年8月15日

目 次

开顶式气室原位研究水稻汞富集对大气汞浓度升高的响应

陈剑[1,2],王章玮[1*],张晓山[1],秦普丰[3],陆海军[3]

(1. 中国科学院生态环境研究中心大气环境科学实验室,北京 100085; 2. 中国科学院大学资源与环境学院,北京 100049; 3. 湖南农业大学资源环境学院,长沙 410128)

摘要:采用开顶式气室熏气实验和土壤加汞培育实验,原位研究水稻各器官汞富集对大气汞质量浓度升高的响应关系. 结果表明,水稻根中汞含量与大气汞质量浓度无显著相关性($P > 0.05$),与土壤汞含量呈显著正相关($R = 0.998\ 8$, $P < 0.05$),表明水稻根中的汞主要来自于对土壤中汞的吸收累积. 水稻茎中汞含量随大气汞质量浓度的升高呈线性增加($R_B = 0.964\ 6$, $R_U = 0.983\ 1$, $P < 0.05$),且上部茎中汞含量高于下部茎; 茎下部汞含量随土壤汞含量的升高呈线性增加($R = 0.990\ 1$, $P < 0.05$),茎上部汞含量随土壤汞含量的升高呈二次拟合增加($R = 0.998\ 9$, $P < 0.05$),且下部茎汞含量高于上部茎,说明茎汞含量受土壤和大气汞浓度的共同影响. 水稻叶中汞含量与大气汞质量浓度呈显著正相关($R = 0.998\ 5$, $P < 0.05$),与土壤汞含量也有很好的线性关系($R = 0.998\ 3$, $P = 0.058\ 5$),表明水稻从大气吸收的汞主要积累在叶片中,从土壤吸收的汞主要富集在根中并通过茎部向叶部传输. 利用实验建立的函数关系对水稻地上生物质中汞的大气来源估算,至少 60% ~94% 和 56% ~77% 水稻叶和上部茎中的汞来自大气,而大气对下部茎仅贡献 8% ~56%. 由此水稻地上部分生物质汞主要来自对大气汞的吸收,为区域大气汞的收支及汞循环模型提供理论依据.

关键词:开顶式气室; 气态单质汞; 土壤汞; 水稻; 原位

中图分类号: X171 **文献标识码**: A **文章编号**: 0250-3301(2015)08-2997-07 **DOI**: 10.13227/j.hjkx.2015.08.036

Open-top Chamber for *in situ* Research on Response of Mercury Enrichment in Rice to the Rising Gaseous Elemental Mercury in the Atmosphere

CHEN Jian[1,2], WANG Zhang-wei[1*], ZHANG Xiao-shan[1], QIN Pu-feng[3], LU Hai-jun[3]

(1. Laboratory of Atmospheric Environmental Sciences, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China; 2. College of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. College of Resources & Environment, Hunan Agricultural University, Changsha 410128, China)

Abstract: *In situ* research was conducted on the response of mercury enrichment in rice organs to elevated gaseous elemental mercury (GEM) with open-top chambers (OTCs) fumigation experiment and soil Hg enriched experiment. The results showed that Hg concentrations in roots were generally correlated with soil Hg concentrations ($R = 0.998\ 8$, $P < 0.05$) but insignificantly correlated with air Hg concentrations ($P > 0.05$), indicating that Hg in rice roots was mainly from soil. Hg concentrations in stems increased linearly ($R_B = 0.964\ 6$, $R_U = 0.983\ 1$, $P < 0.05$) with elevated GEM, and Hg concentrations in upper stems were usually higher than those in bottom stems in OTCs experiment. Hg concentrations in bottom stems were generally correlated with soil Hg concentrations ($R = 0.990\ 1$, $P < 0.05$) and second-order polynomial ($R = 0.998\ 9$, $P < 0.05$) was fitted for Hg concentrations in upper stems to soil Hg concentrations, and Hg concentrations in bottom stems were usually higher than those in upper stems in soil Hg enriched experiment, indicating the combining impact of Hg from air and soil on the accumulation of mercury in stems. Hg concentrations in foliage were significantly correlated ($P < 0.05$) with air Hg and linearly correlated with soil Hg ($R = 0.998\ 3$, $P = 0.058\ 5$), implying that mercury in foliage was mainly from air and some of Hg in root from soil was transferred to foliage through stem. Based on the function in these filed experiments, it was estimated that at least 60%-94% and 56%-77% of mercury in foliage and upper-stem of rice was from the atmosphere respectively, and yet only 8%-56% of mercury in bottom-stem was attributed to air. Therefore, mercury in rice aboveground biomass was mainly from the atmosphere, and these results will provide theoretical basis for the regional atmospheric mercury budgets and the model of mercury cycling.

Key words: open-top chamber; GEM; soil Hg; rice; *in situ*

收稿日期: 2015-01-15; **修订日期**: 2015-03-24

基金项目: 国家自然科学基金项目(41373124, 41073092, 41371461); 国家重点基础研究发展规划(973)项目(2013CB430002)

作者简介: 陈剑(1990 ~),男,硕士研究生,主要研究方向为大气汞循环,E-mail: chenjianev2008@126.com

* 通讯联系人,E-mail: wangzhw@rcees.ac.cn

汞是环境中毒性最强的重金属元素之一,由于其特殊的物理化学性质,主要以气态单质汞(gaseouse elemental mercury,GEM)的形式存在于大气中[1],并随大气传输扩散到世界各地,被公认为全球性污染物[2,3]. 大气汞在迁移转化过程中,会通过干湿沉降的形式进入地面,使陆生生态系统受到污染[4]. 陆地植被作为陆生生态系统的重要组成部分,可通过地上部分吸收大气中的汞,通过地下部分从土壤中吸收汞,并在植物体中富集[2,5]. 调查研究发现,在大气汞污染较严重的区域,植物体中汞的含量远高于对照区域[6],表明大气汞对植物汞的累积贡献明显. 大量研究表明,木本植物叶中的汞主要来自于对大气汞的吸收,根中汞则主要来自于对土壤汞的吸收[7~11],而对于草本植物,目前的研究结果仍无定论,且对农作物中汞的研究较少. 从汞的生物地球化学循环角度来看,有必要弄清草本植物尤其典型农作物中汞的大气和土壤来源,为全球汞循环模型提供理论依据.

研究大气痕量气体浓度变化对农作物的影响,需要在一个稳定的已知浓度环境下进行,大量研究表明,气室是一个很好的装置[12]. 从第一个气室问世以来,气室的发展经历了密闭式静态气室,密闭式动态气室和开顶式动态气室这 3 个阶段[13]. 目前,开顶式动态气室因其可以为植物提供比较接近自然的生长环境,得到世界各国的高度重视和广泛应用[6,14]. 国内外已成功应用开顶式气室研究了 CO_2、O_3 等气体对农作物的影响[12~15],而气态汞对农作物的开顶式气室熏气实验仅见作者所在课题组对我国北方旱作小麦和玉米等有报道[16,17]. 稻田是一种独特的湿地生态系统,水稻是我国三大典型农作物之一,其对汞的富集能力很强[18]. 因此,本研究采用开顶式气室熏气实验和土壤加汞培育实验,通过控制各气室内汞蒸气的质量浓度以及调节土壤中不同汞水平,原位研究水稻各器官汞富集对大气汞浓度升高的响应关系,以期为掌握大气汞污染陆生生态系统的规律及影响提供参考依据.

1 材料与方法

1.1 开顶式气室(OTCs)系统的构建

开顶式气室为 Heagle 型[19],主要由气室主体、GEM 生成系统和布气系统三部分组成(图 1 和图 2). 气室主体为长 1.5 m,宽 1.4 m,高 1 m(地面以上部分)的长方体; 为减少外部气体对室内气体的影响,长方体顶部架设一个高 0.53 m,顶边长和宽分别为 0.50 m 和 0.45 m,收缩角度为 45°的平截头体[20],气室总体积约为 2.835 m^3. 气室骨架由直径 36 mm 的 PVC 管连接构成,四面紧密覆盖 0.08 mm 厚的透明聚氯乙烯塑料薄膜. GEM 生成系统是利用汞在常温下呈液态且易挥发这一原理,在一根上部直径 2 cm、长 40 cm,下部直径 4 cm、长 10 cm 的玻璃管底部加入少量液态元素汞(liquid elemental mercury,LEM),没入恒温槽液面以下,设定恒温槽温度在 20℃左右,为 GEM 均匀稳定的产生提供一个接近恒温且略低于环境温度的条件. 产生的 GEM 由一定流量的载气(高纯氮气)通过内径 2 mm 的聚四氟塑料管带出玻璃管并引至田间,与鼓风机产生的气流相混合后以调节阀门大小控制进入不同气室的气流. 布气系统是由 PVC 管将气流从底部通入气室[21],PVC 管分两侧和上部密布小孔,小孔的直径和数量由 PVC 管的直径决定,一般应满足小孔总面积等于或大于 PVC 管的横截面积[14]. 该底部布气系统的优点在于气体能在气室内分布均匀,且不易沉降.

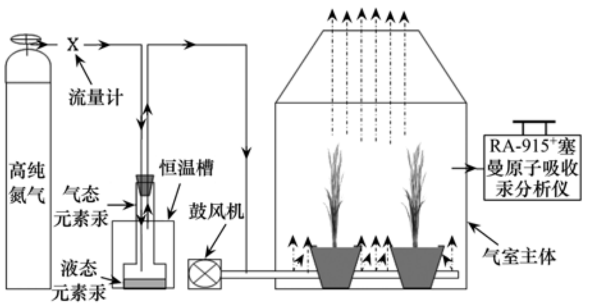

图 1 OTC 结构示意

Fig. 1 OTC structure schematic diagram

图 2 OTCs 大田效果

Fig. 2 OTCs field rendering

1.2 实验设计

实验地点位于湖南农业大学农资系实验基地,实验田面积 30 m×10 m,供试水稻为该地区广泛播种的中青优 2 号. 根据 1972 年联合国环境会议公

布的空气平均汞质量浓度[(1 ~ 50) ng·m^{-3}]及在线监测实验区近地表大气背景汞质量浓度[(5 ± 2) ng·m^{-3}],开顶式气室熏气实验共设 4 组汞质量浓度水平,分别为(5 ± 2)(CK)、15 ~ 20、45 ~ 50 和 90 ~ 100 ng·m^{-3},每个水平 3 个重复. 每个气室盆栽水稻 4 盆,每盆 4 株,提前育苗并移栽至盆中放入各气室内. 为避免相互遮荫,各气室之间留有 3 m 的间距. 气室内汞质量浓度通过浮子流量计调节载气流速来控制,每 50 s 左右气室由离心鼓风机(690 m^3·h^{-1})完成一次彻底换气. 从 2013-08-31 正式开始熏气,到 2013-09-25 结束熏气,24 h 连续供气,气室内汞质量浓度由 RA-915$^+$ 塞曼原子吸收汞分析仪(Lumex Inc.,Russia)在线监测.

土壤加汞培育实验通过添加不同剂量的 $HgCl_2$ 水溶液来调节土壤汞含量,并仔细混匀. Ericksen 等[22]的实验结果表明,土壤添加 $HgCl_2$ 溶液后,立即会有汞向大气排放,62 d 后排放通量保持在相对稳定且较低的水平. 朱小翠等[23]的实验结果表明,外源 $HgCl_2$ 进入土壤后的形态分布为残留态 > 酸溶态 > 碱溶态与活性态,且稳定性依次下降,随时间的延长,后 3 种形态的汞逐渐向残留态汞转化. 因此,在种植水稻前,土壤添加不同剂量的 $HgCl_2$ 溶液并老化 7 个月,降低水稻培育过程中土壤汞向大气的排放. 与熏气实验同时将水稻秧苗移栽至气室外 4 组不同土壤汞含量水平的盆中,每个水平盆栽水稻 4 盆,每盆 4 株,测定土壤汞含量分别为 84.8(CK)、(746 ± 23)、(1 104 ± 31)和(2 598 ± 20) ng·g^{-1}.

1.3 采样与分析

熏气阶段正处于水稻的拔节期(jointing stage),熏气结束后,采集熏气和土培水稻植株每个水平每个重复各 1 株,并收集各植株根部土壤分别装入自封袋带回实验室,先用自来水将植株及其根部泥土冲洗干净,再用去离子水多次冲洗. 分离水稻根、茎、叶,且茎、叶样品去掉叶鞘包被,茎部均分为上部茎和下部茎两部分. 所有样品经冷冻干燥并磨碎,-4℃保存以备分析.

样品总汞浓度由 Milestone DMA-80 直接测汞仪测定,样品经热化学分解后由高纯氧气作载气,通过催化炉捕集去除其他气体杂质(卤素、氮硫氧化物等),迅速加热金汞齐化管释放富集其上的汞蒸气,用单波长原子吸收分光光度计在 253.7 nm 的波长下测量[24]. 植物标样为 GBW10020[柑橘叶,(150 ± 20) ng·g^{-1}],样品加标回收率为 98% ~ 103%;土壤标样为 GBW08303[污染农田土壤,(2 150 ± 60) ng·g^{-1}]和 GBW07404[石灰岩土壤,(590 ± 50) ng·g^{-1}],样品加标回收率分别为 95% ~ 107% 和 96% ~ 105%. 每个样品测 2 次取平均值,每测 10 个样品用标样进行回测以评价仪器的稳定性. 仪器对固体样品的检出限为 0.005 ng,重复性 RSD < 1.5%.

2 结果与讨论

2.1 熏气前后气室内土壤汞含量的变化

熏气前后分别采集各气室内水稻根部土壤(20 cm)和表层土壤(1 cm),并分析土壤中总汞含量. 结果(表 1)表明,各气室在熏气前后水稻根部土壤和气室表层土壤的汞含量均无显著差异(P > 0.05);在不同大气汞质量浓度下根部土壤和表层土壤中汞含量也无显著差异(P > 0.05). 熏气后土壤的汞含量较熏气前略低,表明气室内土壤有轻微汞释放,这与气室内的快速上升气流及温度、光照有关,Gillis 等[25]和 Wallschläger 等[26]的研究显示,风速的增强能够促进土壤汞的释放,Ma 等[27]报道土壤汞的释放与温度、光照强度等有明显的相关性. 由此本研究的熏气过程中未有 GEM 沉降而导致气室内土壤汞含量的增加.

表 1 熏气前后水稻根部土壤和表层土壤汞含量的变化1)

Table 1 Changes of Hg contents in rice rhizosphere soil and surface soil before and after fumigation

大气汞质量浓度 /ng·m^{-3}	熏气前/ng·g^{-1}		熏气后/ng·g^{-1}	
	根部土壤	表层土壤	根部土壤	表层土壤
5 ± 2	231.8 ± 32.8(a)	273.6 ± 11.0(a)	201.3 ± 27.4(a)	195.9 ± 12.6(a)
15 ~ 20	228.4 ± 17.2(a)	266.8 ± 7.2(a)	188.3 ± 29.5(a)	177.9 ± 14.6(a)
45 ~ 50	190.3 ± 6.3(a)	229.5 ± 4.2(a)	180.5 ± 15.1(a)	220.7 ± 9.3(a)
90 ~ 100	195.1 ± 9.5(a)	262.3 ± 19.2(a)	200.7 ± 33.1(a)	244.1 ± 33.4(a)
平均值	211.4 ± 21.7	258.1 ± 19.6	192.7 ± 10.1	209.6 ± 28.9

1) 同行括号内的相同字母表示无显著差异(P > 0.05),下同

2.2 水稻根汞对大气/土壤汞浓度升高的响应

水稻根汞含量在不同大气汞质量浓度下无显著差异(图 3, P > 0.05),但随土壤汞含量的升高呈二次拟合增加(图 4,R = 0.998 8,P < 0.05),表明水稻

根中汞含量与大气汞质量浓度无显著相关性，与土壤汞含量呈显著正相关. Niu 等[16,17]对小麦、玉米及其他 4 种作物的研究结果表明，根中汞含量随土壤汞含量的增加而线性增加，与大气汞质量浓度无显著相关性. 对于木本植物而言，研究表明根汞含量与土壤汞含量呈显著正相关[7,9]. Millhollen 等[10]对草本植物的研究结果也表明，种植在高汞含量土壤的植物根中汞含量较高. 两个实验结果共同表明，水稻根中的汞主要来自于对土壤中汞的吸收累积.

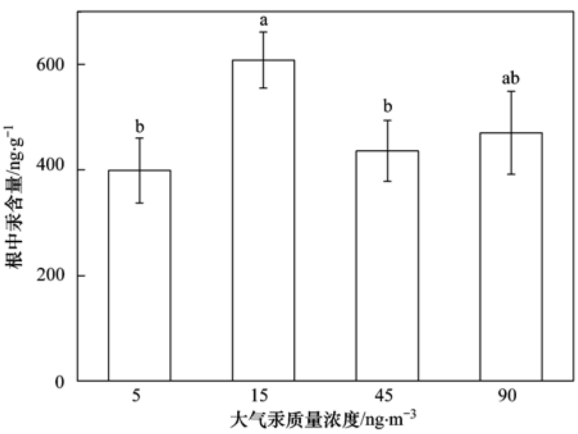

图 3 大气汞对水稻根汞含量的影响

Fig. 3 Effects of air Hg on root Hg content in rice

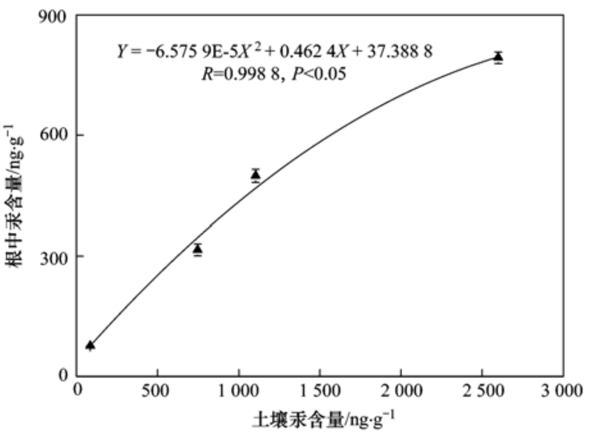

图 4 土壤汞对水稻根汞含量的影响

Fig. 4 Effects of soil Hg on root Hg content in rice

2.3 水稻茎汞对大气/土壤汞浓度升高的响应

水稻茎上部和茎下部的汞含量在不同大气汞质量浓度下均有显著差异(图 5，$P < 0.05$)，且随着大气汞质量浓度的升高呈线性增加(茎下部 $R_B = 0.9646$，茎上部 $R_U = 0.9831$). 在相同的大气汞质量浓度下，水稻茎上部的汞含量均高于茎下部，表明茎上部对大气汞的吸收累积要大于茎下部.

水稻茎上部的汞含量随土壤汞含量的升高呈二次拟合增加(图 6，$R_U = 0.9989$，$P < 0.05$)，茎下部汞含量随土壤汞含量的升高呈线性增加($R_B = 0.9901$，$P < 0.05$). 在背景土壤汞含量下，茎上部汞含量比茎下部汞含量高，而在加汞土壤水平下，水稻茎下部的汞含量均高于茎上部，表明土壤汞含量的变化对水稻茎下部的影响较大.

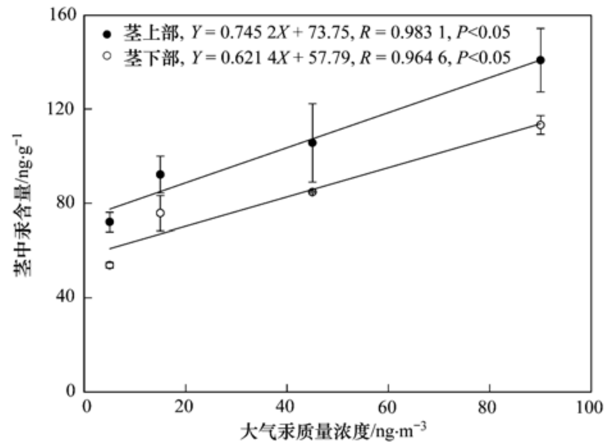

图 5 大气汞对水稻茎汞含量的影响

Fig. 5 Effects of air Hg on stem Hg content in rice

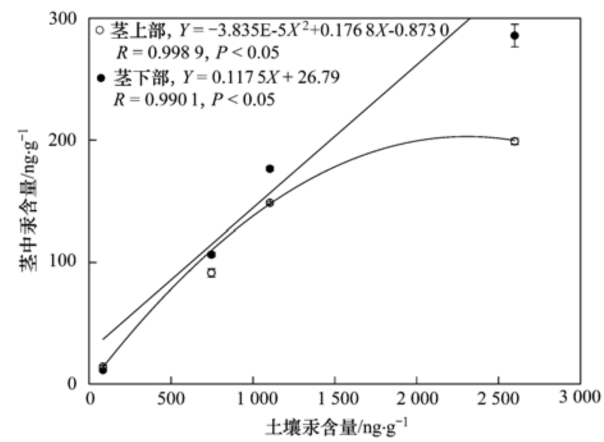

图 6 土壤汞对水稻茎汞含量的影响

Fig. 6 Effects of soil Hg on stem Hg content in rice

两个实验结果共同说明，水稻茎中的汞一部分来自于对大气汞的吸收，一部分来自于根吸收的土壤汞向地上部分的传输. 熏气水稻上部茎的汞含量普遍高于下部茎的汞含量，土壤加汞水稻上部茎汞含量均低于下部茎，而上部茎组织生长时间又比下部茎组织生长时间短，表明大气汞对茎中汞的积累影响更大. 这与 Niu 等[16]对小麦和玉米茎中汞对大气/土壤汞浓度的响应关系结果一致. Fay 等[11]对 3 种木本植物的研究结果也表明，茎汞含量受土壤和大气汞浓度的共同影响，但大气汞浓度对其影响更

大. Greger 等[28]对于 5 种农作物的研究表明,土壤中仅有 0.17% ~2.5%的汞传输到地上部分.

2.4 水稻叶汞对大气/土壤汞浓度升高的响应

开顶式熏气实验结果表明,水稻叶中汞含量在不同大气汞质量浓度下有显著差异(图 7,$P<0.05$),且随着大气汞质量浓度的升高呈二次拟合增加($R=0.998\,5$);土壤加汞实验结果(图 8)显示,水稻叶中汞含量随着土壤汞含量的升高也呈二次拟合增加($R=0.998\,3$),但相关性不显著($P>0.05$)且拟合系数远小于熏气实验拟合结果.以上表明水稻叶中汞主要来自于对大气汞的吸收,部分根吸收的土壤汞也可通过茎向叶片传输并富集.

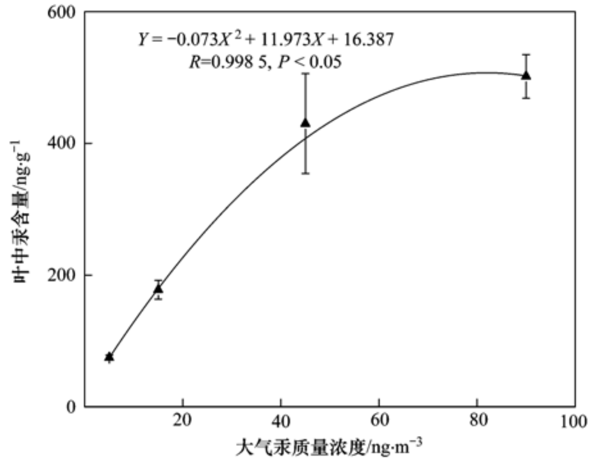

图 7　大气汞对水稻叶汞含量的影响

Fig. 7　Effects of air Hg on foliage Hg content in rice

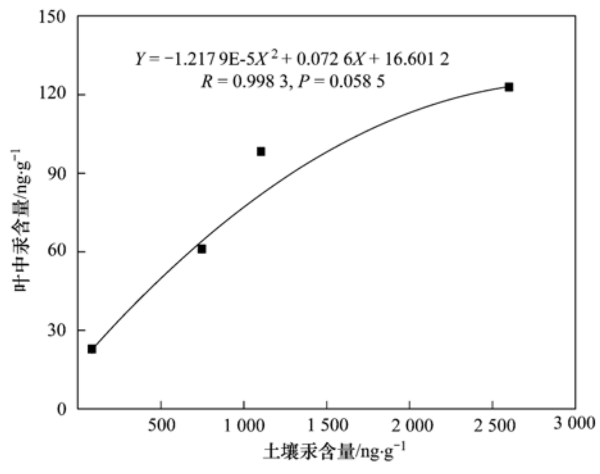

图 8　土壤汞对水稻叶汞含量的影响

Fig. 8　Effects of soil Hg on foliage Hg content in rice

目前,学术界普遍认为树木叶中的汞主要来自于对大气汞的吸收[7,9,10].对于草本植物,Niu 等[16,17]的田间实验表明,小麦、玉米、生菜、萝卜、苜蓿和黑麦草的叶汞含量随大气汞质量浓度的增加而线性增加;郑顺安等[29]对 5 种叶菜类植物的研究结果表明,叶菜汞含量与污灌区气态汞含量对数之间呈现极显著的线性关系;De Temmerman 等[30,31]的现场观测实验也发现,黑麦草和叶菜类植物叶汞含量与氯碱厂周边大气汞质量浓度有较好的线性关系.另一方面,杜道灯等[32]的研究表明小麦和水稻茎叶中汞的残留量随土壤汞处理含量的增加而显著增加,且 Schwesig 等[33]估测曲芒发草(*Deschampsia flexuosa*)和小叶麦冬草(*Calamagrostis villosa*)叶中汞来自土壤的比例分别高达 93% 和 30%.由此草本植物叶中汞的来源还存在很大的不确定性.

2.5 水稻地上生物质中汞的大气来源

开顶式气室熏气和土壤加汞培育实验表明,水稻地上组织汞既来自对大气汞的吸收又来自土壤汞的传输富集,那么究竟大气对水稻地上组织汞的贡献比率是多少?利用土壤培育实验中水稻叶汞对土壤汞含量的响应关系($Y=-1.217\,9\text{E-}5X^2+0.072\,6X+16.601\,2$),在本研究熏气实验土壤汞平均含量(192.7 $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$)下,水稻叶汞含量为 30.1 $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$,假设该叶汞全部来自于土壤汞的传输富集,结合熏气实验水稻叶汞对大气汞质量浓度的响应,可获得不同大气汞质量浓度下,水稻叶中汞来自大气的至少为 60% ~94%(图 9).同理,利用熏气实验中水稻叶汞对大气汞质量浓度的响应关系($Y=-0.073X^2+11.973X+16.387$),在本研究平均大气汞质量浓度(5 $\text{ng}\cdot\text{m}^{-3}$)下,水稻叶汞来自土壤传输至多为 39%.因此水稻叶中的汞主要来自于对大气汞的吸收,Laacouri 等[34]对 4 种落叶乔木的研究也表明,叶片组织是大气汞在植物体内汞储存重要的库.水稻茎中的汞一部分来自于对大气汞的吸收,一部分来自于根吸收的土壤汞向地上部分的传输.根据土壤加汞培育实验水稻上部茎汞含量对土壤汞的拟合关系($Y=-3.835\text{E-}5X^2+0.176\,8X-0.873\,0$),在熏气实验土壤汞平均含量(192.7 $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$)下,水稻上部茎汞含量为 31.8 $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$,假设该茎汞全部来自对土壤汞的富集,结合开顶式熏气实验,上部茎中汞来自大气的至少为 56% ~77%(图 9);同理,根据土壤加汞培育实验水稻下部茎中汞含量对土壤汞的拟合关系($Y=0.117\,5X+26.79$),结合开顶式熏气实验,下部茎中汞来自大气的仅为 8% ~56%(图 9).由此,水稻地上部分生物质汞主要来自对大气汞的吸收.

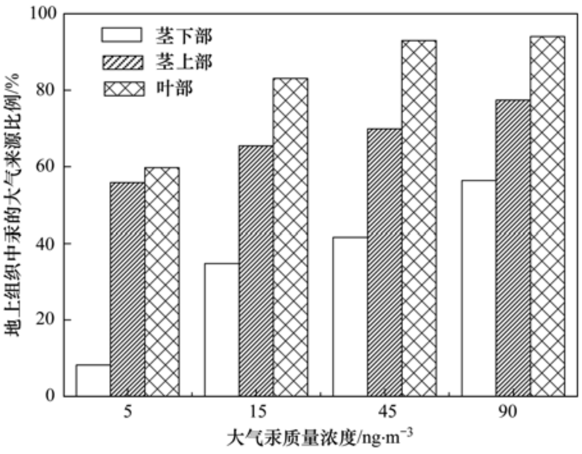

图 9 地上生物质中汞的大气来源比例

Fig. 9 Ratio of Hg from atmosphere in aboveground biomass

3 结论

(1) 采用开顶式气室结合恒温 GEM 生成系统提供稳定的气态元素汞源,可根据实验设计需求调控各熏气室内不同大气汞浓度水平,且底部布气法在整个熏气过程中未发生气态汞的沉降,因此本实验方法在研究大气-植物间汞的交互作用方面是可行的.

(2) 熏气气室内大气汞质量浓度的升高对水稻叶中汞的积累有显著影响,土壤汞含量的升高对水稻根中汞的积累有显著影响,茎中汞含量受大气和土壤汞的共同影响,且茎上部受大气汞的影响较大,茎下部受土壤汞的影响较大.

(3) 结合开顶式熏气实验和土壤加汞培育实验的结果,水稻根中汞全部来自于对土壤汞的富集,地上组织中汞主要来自于对大气汞的吸收,且叶部对大气汞的吸收大于茎部对大气汞的吸收,同时有少部分来自根吸收的土壤汞向上传输,在茎部和叶部富集.

参考文献:

[1] Fitzgerald W F, Mason R P, Vandal G M. Atmospheric cycling and air-water exchange of mercury over mid-continental lacustrine regions [J]. Water, Air, & Soil Pollution, 1991, **56**(1): 745-767.

[2] 冯新斌, 仇广乐, 付学吾, 等. 环境汞污染[J]. 化学进展, 2009, **21**(2-3): 436-457.

[3] 杨永奎, 王定勇. 大气汞的时空分布研究进展[J]. 四川环境, 2007, **25**(6): 91-95.

[4] 王定勇, 牟树森, 青长乐. 大气汞对土壤-植物系统汞累积的影响研究[J]. 环境科学学报, 1998, **18**(2): 194-198.

[5] 赵甲亭, 李云云, 高愈希, 等. 贵州万山汞矿地区耐汞野生植物研究[J]. 生态毒理学报, 2014, **9**(5): 881-887.

[6] Baldi F. Mercury pollution in the soil and mosses around a geothermal plant [J]. Water Air and Soil Pollution, 1988, **38**(1-2): 111-119.

[7] Ericksen J A, Gustin M S, Schorran D E, *et al*. Accumulation of atmospheric mercury in forest foliage [J]. Atmospheric Environment, 2003, **37**(12): 1613-1622.

[8] Lindberg S E, Jackson D R, Huckabee J, *et al*. Atmospheric emission and plant uptake of mercury from agricultural soils near the Almaden mercury mine [J]. Journal of Environmental Quality, 1979, **8**(4): 572-578.

[9] Frescholtz T F, Gustin M S, Schorran D E, *et al*. Assessing the source of mercury in foliar tissue of quaking aspen [J]. Environmental Toxicology and Chemistry, 2003, **22**(9): 2114-2119.

[10] Millhollen A G, Gustin M S, Obrist D. Foliar mercury accumulation and exchange for three tree species [J]. Environmental Science & Technology, 2006, **40**(19): 6001-6006.

[11] Fay L, Gustin M. Assessing the influence of different atmospheric and soil mercury concentrations on foliar mercury concentrations in a controlled environment [J]. Water, Air, & Soil Pollution, 2007, **181**(1-4): 373-384.

[12] 陈法军, 戈峰, 苏建伟. 用于研究大气二氧化碳浓度升高对农田有害生物影响的田间试验装置[J]. 生态学杂志, 2005, **24**(5): 585-590.

[13] 王春乙, 郭建平, 白月明, 等. O_3 浓度增加对冬小麦影响的试验研究[J]. 气象学报, 2002, **60**(2): 238-242.

[14] 郑启伟, 王效科, 冯兆忠, 等. 用旋转布气法开顶式气室研究臭氧对水稻生物量和产量的影响[J]. 环境科学, 2007, **28**(1): 170-175.

[15] Musselman R C, Mc Cool P M, Oshima R J, *et al*. Field chambers for assessing crop loss from air pollutants [J]. Journal of Environmental Quality, 1986, **15**(2): 152-157.

[16] Niu Z C, Zhang X S, Wang Z W, *et al*. Field controlled experiments of mercury accumulation in crops from air and soil [J]. Environmental Pollution, 2011, **159**(10): 2684-2689.

[17] Niu Z C, Zhang X S, Wang S, *et al*. The linear accumulation of atmospheric mercury by vegetable and grass leaves: potential biomonitors for atmospheric mercury pollution [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2013, **20**(9): 6337-6343.

[18] 仇广乐, 冯新斌, 王少锋, 等. 贵州汞矿矿区不同位置土壤中总汞和甲基汞污染特征的研究[J]. 环境科学, 2006, **27**(3): 550-555.

[19] Heagle A S, Body D E, Heck W W. An open-top field chamber to assess the impact of air pollution on plants [J]. Journal of Environmental Quality, 1973, **2**(3): 365-368.

[20] 王春乙. OTC-1 型开顶式气室的结构和性能与国内外同类气室的比较[J]. 环境科学进展, 1996, **4**(1): 50-57.

[21] Mandl R H, Weinstein L H, McCune D C, *et al*. A cylindrical, open-top chamber for the exposure of plants to air pollutants in the field [J]. Journal of Environmental Quality, 1973, **2**(3): 371-376.

[22] Ericksen J A, Gustin M S, Lindberg S E, *et al*. Assessing the potential for re-emission of mercury deposited in precipitation from arid soils using a stable isotope [J]. Environmental Science & Technology, 2005, **39**(20): 8001-8007.

[23] 朱小翠, 青长乐, 皮广洁. 土壤汞形态及其影响因素的研究[J]. 土壤学报, 1996, **33**(1): 94-100.

[24] US EPA Method 7473. Mercury in solids and solutions by thermal decomposition, amalgamation, and atomic absorption spectrophotometry [S]. Test Methods for Evaluating Solid Waste, Physical/Chemical Methods, 2000.

[25] Gillis A A, Miller D R. Some local environmental effects on mercury emission and absorption at a soil surface [J]. Science of the Total Environment, 2000, **260**(1-3): 191-200.

[26] Wallschläger D, Turner R R, London J, *et al*. Factors affecting the measurement of mercury emissions from soils with flux chambers [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres (1984-2012), 1999, **104**(D17): 21859-21871.

[27] Ma M, Wang D, Sun R, *et al*. Gaseous mercury emissions from subtropical forested and open field soils in a national nature reserve, southwest China[J]. Atmospheric Environment, 2013, **64**: 116-123.

[28] Greger M, Wang Y D, Neuschütz C. Absence of Hg transpiration by shoot after Hg uptake by roots of six terrestrial plant species [J]. Environmental Pollution, 2005, **134**(2): 201-208.

[29] 郑顺安, 韩允垒, 郑向群. 天津污灌区内气态汞的污染特征及在叶菜类蔬菜中的富集[J]. 环境科学, 2014, **35**(11): 4338-4344.

[30] De Temmerman L, Claeys N, Roekens E, *et al*. Biomonitoring of airborne mercury with perennial ryegrass cultures [J]. Environmental Pollution, 2007, **146**(2): 458-462.

[31] De Temmerman L, Waegeneers N, Claeys N, *et al*. Comparison of concentrations of mercury in ambient air to its accumulation by leafy vegetables: An important step in terrestrial food chain analysis [J]. Environmental Pollution, 2009, **157**(4): 1337-1341.

[32] 杜道灯, 李应学, 周毅, 等. 土壤汞对小麦、水稻生长和残留的影响[J]. 农业环境保护, 1987, **6**(5): 9-11.

[33] 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**(2): 445-455.

[34] Laacouri A, Nater E A, Kolka R K. Distribution and uptake dynamics of mercury in leaves of common deciduous tree species in Minnesota, USA[J]. Environmental Science & Technology, 2013, **47**(18): 10462-10470.

HUANJING KEXUE

Environmental Science (monthly)

Vol. 36 No. 8

Aug. 15, 2015

CONTENTS

环境科学

（HUANJING KEXUE）

（月刊　1976 年 8 月创刊）

2015 年 8 月 15 日　第 36 卷　第 8 期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

（Monthly　Started in 1976）

Vol. 36　No. 8　Aug. 15, 2015

主　　管	中国科学院
主　　办	中国科学院生态环境研究中心
协　　办	（以参加先后为序） 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院
主　　编	欧阳自远
编　　辑	《环境科学》编辑委员会 北京市 2871 信箱（海淀区双清路 18 号，邮政编码：100085） 电话：010-62941102，010-62849343 传真：010-62849343 E-mail：hjkx@ rcees. ac. cn http：//www. hjkx. ac. cn
出　　版	科学出版社 北京东黄城根北街 16 号 邮政编码：100717
印刷装订	北京北林印刷厂
发　　行	科学出版社 电话：010-64017032 E-mail：journal@ mail. sciencep. com
订 购 处	全国各地邮电局
国外总发行	中国国际图书贸易总公司 （北京 399 信箱）

Superintended	by	Chinese Academy of Sciences
Sponsored	by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
Editor-in -Chief		OUYANG Zi-yuan
Edited	by	The Editorial Board of Environmental Science（HUANJING KEXUE） P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel：010-62941102, 010-62849343； Fax：010-62849343 E-mail：hjkx@ rcees. ac. cn http：//www. hjkx. ac. cn
Published	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing　100717, China
Printed	by	Beijing Bei Lin Printing House
Distributed	by	Science Press Tel：010-64017032 E-mail：journal@ mail. sciencep. com
Domestic		All Local Post Offices in China
Foreign		China International Book Trading Corporation（Guoji Shudian）, P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号：ISSN　0250-3301 / CN　11-1895/X　　**国内邮发代号**：2-821

国 内 定 价：120.00 元　　**国外发行代号**：M 205

国内外公开发行