

贵阳市 2 种不同类型草地的汞释放通量

付学吾^{1,2}, 冯新斌^{1*}, 王少锋^{1,2}, 仇广乐^{1,2}, 李平^{1,2}

1. 中国科学院地球化学研究所, 环境地球化学国家重点实验室, 贵州 贵阳 550002

2. 中国科学院研究生院, 北京 100039

摘要: 利用动态通量箱法对贵阳市人工草坪和天然草地的汞释放通量进行了野外实测。结果表明: 春季和夏季的草地是大气中汞的来源, 并未出现明显的季节性变化, 其平均汞释放通量为 $(7.8 \pm 15.7) \sim (41.5 \pm 15.2) \text{ ng}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$, 且天然草地的汞释放通量明显高于人工草坪。草地的汞释放通量具有明显的日变化特征, 白天汞释放通量显著高于夜间, 最大值通常出现在午后, 最小值则出现在夜间。草地的汞释放通量与光照强度、土壤温度、大气温度呈显著的正线性关系, 与大气相对湿度呈负线性关系。大气中气态总汞的质量浓度是影响草地汞释放通量的另一个重要因素。大气中气态总汞质量浓度的升高能够抑制草叶片向大气中释放汞, 而高质量浓度的气态总汞可导致大气中的汞向草叶片的强烈沉降。

关键词: 汞释放通量; 草地; 影响因素

中图分类号: X173 文献标识码: A 文章编号: 1001-6929(2007)06-0033-05

Mercury Flux Rate of Two Types of Grasslands in Guiyang

FU Xue-wu^{1,2}, FENG Xin-bin¹, WANG Shao-feng^{1,2}, QIU Guang-le^{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, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China

Abstract: Measurements of mercury exchange flux were conducted from cultivated lawn and forest wild grassland in Guiyang City by using a dynamic flux chamber method. Generally, lawn and grassland were the source of atmospheric mercury in spring and summer sampling campaigns. No seasonal change of Hg exchange fluxes was observed and the mean Hg fluxes ranged from 7.8 ± 15.7 to $41.5 \pm 15.2 \text{ ng}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$. The mean Hg flux from forest wild grassland was obviously higher than those from cultivated lawn. Hg fluxes between grassland and lawn and atmosphere exhibited clearly diurnal cycle with elevated Hg fluxes in the daytime comparing to those at night, and the maximum Hg fluxes were generally observed in the afternoon and the lowest observed at night. Hg flux was positively linear with solar radiation, soil and air temperature, and negatively correlated with air relative humidity. Total gaseous mercury (TGM) concentration in the ambient air was another important factor that regulated Hg flux from grassland. Elevated atmospheric TGM concentration could inhibit Hg emission from grass foliar, and extremely high TGM concentration was the primary reason causing high deposition flux to grass foliar.

Key words: mercury flux; grassland; influence factor

土壤是大气汞的一种重要来源^[1], 土壤汞含量、大气汞浓度、光照强度等是影响土壤汞释放通量的主要因素^[2]。目前关于土壤释汞的研究有很多, 但主要集中在裸露土壤和大气汞交换通量方面, 难以全面评价陆表生态系统对全球大气汞的贡献。草地作为一种陆表生态系统, 其汞释放通量的研究一直比较缺乏。Obrist 等^[3]通过实验室的研究指出, 全球

草地向大气的年汞释放量为 1 300~ 2 300 t, 仅草地的汞释放量就已经超过 Nriagu^[1]对全球陆地生态系统年均汞释放量的估算值(20~ 1 200 t)。草地是陆地生态系统的主要组成部分, 而我国是世界上第二大草地资源国家, 天然草地面积约占国土总面积的 40%^[4]。草地和大气间的汞交换可以分为土壤和草叶片与大气的汞交换 2 个部分。草叶片对土壤的覆盖, 可以大大降低到达土壤表层的光照, 降低土壤温度和土壤与大气临界面的湍流系数, 因此在有光照的条件下可能会降低土壤的汞释放通量^[5]; 另一方面, 草叶片和大气的汞交换对草地的汞释放也起着重要的作用。有研究表明, 草叶片是大气中 Hg^0 的汇^[6]。但也有研究^[3]指出, 被草地覆盖的土壤的汞

收稿日期: 2007-03-22 修订日期: 2007-06-22

基金项目: 中国科学院知识创新工程重要方向项目(KZCX-SW-443)

作者简介: 付学吾(1981-), 男, 河南鄆城人, 博士研究生,

fuxuewu@mails.guas.ac.cn

* 责任作者, fengxinbin@vip.skgg.cn

释放通量只占草地汞释放总量的 10%~30%,说明草叶片是草地汞释放的主要途径. 对其他植物叶片的研究也发现,叶片具有缓慢向大气释放汞的能力^[7]. 目前对植物叶片释放汞的解释有以下 2 种:

①植物通过蒸腾作用向大气中释放从土壤溶液中吸收的汞^[8]; ④叶片上沉降的颗粒态和活性态汞转化为 Hg^0 后向大气的再释放^[9]. 由于草地生态系统的复杂性,不同类型草地的汞释放通量也许会有很大的差别,因此对草地汞释放通量的研究需要更多的工作. 笔者通过动态通量箱法对 2 种较为低矮的草地类型进行了研究,旨在揭示草地汞释放通量的规律和影响因素.

1 研究地点和方法

1.1 采样地点和时间

2005 年春季和夏季对贵阳市的人工草坪和天然草地进行了野外实测. 贵阳市位于中国西南云贵高原的东部,海拔 1 000~1 100 m,属亚热带湿润温和型气候,年均大气温度为 15.3 °C. 采样点 1 位于中国科学院地球化学研究所. 中国科学院地球化学研究所所属科研区,附近无较大工矿企业,主要受居民生活活动的影响,所研究草地类型为多年生冬季黑麦草,高约 7~15 cm. 采样点 1 的采样时间包括 4 个时段: 2005-04-09T00:00-10T08:00, 2005-04-12T21:00-13T21:00, 2005-05-20T00:00-21T00:00 和 2005-06-23T18:00-25T08:00; 此外,对草地附近土壤的汞释放通量也进行了测量,时间为 2005-04-13T21:50-14T08:00. 采样点 2 位于贵阳市西北部的黔灵山上,为野生林区,附近无工矿企业,几乎无人作为活动. 所研究草地类型为空心禾,高约 8~12 cm. 采样点 2 的采样时间为 2005-04-15T21:00-17T20:00; 对草地附近土壤的测量时间为 2005-04-17T20:00-18T08:00.

1.2 汞释放通量的测定方法及仪器

采用目前国际上广泛应用的动力学通量箱法测定草地-大气以及土壤-大气界面的汞交换通量(见图 1). 将通量箱置于被测地表,用土壤将通量箱边缘密封,以避免漏气带来的测量误差. 用 2 个聚四氟乙烯导管分别连接通量箱的进气口、出气口和 Tekran 2537A 测汞仪, Tekran 2537A 测汞仪每 5 min 采集 1 个样品,并用冷原子荧光光谱法(CVFA)进行分析. 通过使用配套的 Tekran 1100 控制 Tekran 2537A 测汞仪每隔 10 min 交替采样并测定进入和流出通量箱的气态汞含量,用计算机记录数据. 同时,

用抽气泵对通量箱进行换气,使通量箱中空气的流速保持在 $0.9 \text{ m}^3/\text{h}$ ^[10],以避免因空气流速的变化带来的测定误差^[10].

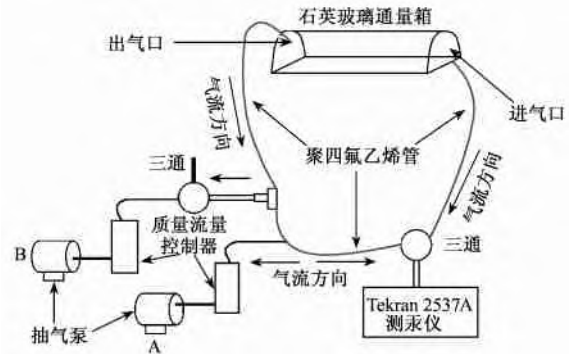


图 1 通量箱法测量汞释放通量的实验装置

Fig. 1 The setup of the dynamic flux chamber for measuring mercury flux over grass land

同时用多功能气象工作站(Global Water - ④)记录与通量测量同步的大气温度、相对湿度、光照强度、土壤温度、风速等气象数据.

1.3 汞释放通量计算方法

根据质量守恒定律,汞释放通量的计算公式为:

$$F = (C_o - C_i) \times Q \div A$$

式中, F 为汞释放通量, $\text{ng}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$; C_o 为流出通量箱的气态汞含量, ng/m^3 ; C_i 为进入通量箱的气态汞含量, ng/m^3 ; Q 为通量箱内的空气流速, m^3/h ; A 为通量箱的底面积, m^2 . 取 2 个流出通量箱的气态汞含量的平均值与其前后 4 个进入通量箱的气态汞含量的平均值的差,用以计算汞释放通量,以降低偶然性因素可能造成的计算误差.

2 结果和讨论

2.1 草地-大气的汞交换通量

基于整日草地-大气的汞交换通量统计结果见表 1. 由表 1 可见, 2 个采样点不同时期草地的汞释放通量日均值为 $(7.8 \pm 15.7) \sim (41.5 \pm 15.2) \text{ ng}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$, 略高于 Obrist 等^[3] 同期所测黑麦草地-大气的汞交换通量 $(12.4 \sim 16.0 \text{ ng}/(\text{m}^2 \cdot \text{h}))$, 与重庆市夏季草地的汞释放通量 $((33.2 \pm 36.1) \text{ ng}/(\text{m}^2 \cdot \text{h}))$ 相当^[11]. 草地与大气间的汞交换通量表现为双向性, 但总体而言, 测量期间以草地向大气的汞释放为主, 只在采样点 1 的 4 和 6 月夜间出现了部分汞沉降过程. 采样点 2 草地的汞释放通量明显高于采样点 1. 采样点 2 属于贵阳市相对洁净区域, 其大气和土壤的汞含量均低于采样点 1, 加之采样期间主要为阴雨天气, 光照强度较弱, 草地类型的差

别可能是其汞释放通量较高的主要原因。在相同的天气情况(晴天)下,草地的汞释放通量略低于 2003 年贵阳市土壤的汞释放通量 ($(44.7 \pm 36.5) \text{ ng}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$)^[12],这说明在有光照的情况下,植被覆盖度对地表汞的释放通量有一定的抑制作用。目前在关于植被能否向大气排放汞的问题上存有一定的争议:较多的研究认为,植物叶片中的汞主要来源于对大气 Hg^0 的吸收^[13];但也有研究指出,植物叶片能

缓慢地向大气中释放汞^[7]。笔者选取了与采样点 1 和采样点 2 临近的 2 个夜间草地和土壤的汞释放通量做对比(见表 1),结果显示,夜间草地汞的释放通量高于土壤,说明在一定条件下草叶片也是大气中汞的一个来源。而草叶片的释汞途径有 2 种:①可能是汞通过植物根部从土壤溶液中被吸收后经蒸腾作用释放到大气中;④大气活性态和颗粒态汞向叶片干湿沉降后转化为 Hg^0 的再释放。

表 1 汞释放通量统计结果¹⁾

Table 1 Statistical summary of the mercury flux over grassland

采样点	采样时间	平均值	最大值	最小值	方差	释放/沉降	大气温度/°C
采样点 1	2005-04-09T00:00-10T00:00	25.6	85.5	-5.8	20.9	66/6	18.7
	2005-04-12T21:00-13T21:00	7.8	66.7	-32.8	15.7	56/16	19.2
	2005-05-20T00:00-21T00:00	38.7	166.0	1.1	36.4	67/0	18.4
	2005-06-24T00:00-25T00:00	24.9	154.0	-25.3	42.2	48/24	24.3
采样点 2	2005-04-15T21:00-17T20:00	41.5	77.0	13.4	15.2	143/0	17.2
采样点 1	草地 2005-04-12T21:50-13T08:00	7.2	18.0	-6.0	4.8	30/2	12.7
	土壤 2005-04-13T21:50-14T08:00	-2.5	11.5	-27.8	10.7	15/16	12.4
采样点 2	草地 2005-04-16T20:00-17T08:00	34.1	55.5	20.9	9.2	36/0	11.3
	土壤 2005-04-17T20:00-18T08:00	20.7	29.1	11.9	4.3	35/0	11.1

1) 基于整日数据统计结果。

2.2 草地汞释放通量的日变化及影响因素

除 4 月 13 日以外,不同季节 2 个采样点的草地和大气间的汞交换通量显示出一致的昼夜变化特征(见图 2),即从早上草地的汞释放通量开始增加并在午后 13:00 左右达到最大值,然后逐渐降低直到在夜间或凌晨达到最低值,表明草地的汞释放通量明显受气象条件的控制。对 6 月同步测量的草地汞释放通量和各种气象因子的相关性分析发现,草地

和大气间的汞交换通量受气象条件变化的影响较为明显(见表 2)。汞释放通量与土壤温度、光照强度、大气温度等气象因子呈明显的正线性关系,与大气相对湿度呈负线性关系,这与 Obrist 等^[3]对草地汞释放通量的研究基本一致。草地和大气间的汞交换通量包括土壤和草叶片 2 个部分。目前有关裸露土壤的汞释放通量研究较多:王少锋等^[5,10]对汞矿区和背景区土壤汞释放通量的研究指出,光照强度和

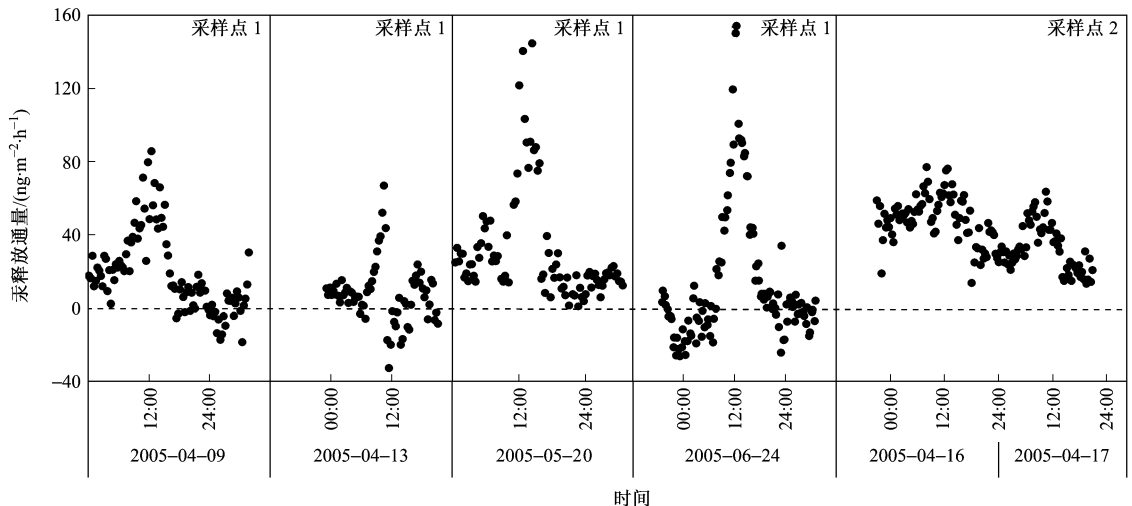


图 2 草地与大气间的汞交换通量日变化规律

Fig. 2 The diurnal cycle of mercury flux over grassland

土壤温度的升高能加快土壤表层(溶液)中 Hg^{2+} 光致还原反应进程,是影响土壤汞释放通量的2个最主要因素.此外,对植物叶片和大气间的汞交换通量的测量结果也表明,光照强度和大气温度是影响植物汞释放通量的重要因素,光照条件下植物叶片的汞释放通量明显高于无光照射时^[7].对于植物叶片而言,气象条件特别是光照强度和大气温度控制着植物蒸腾作用、颗粒及活性汞的光致还原反应速率^[14],从而影响植物叶片的汞释放.草地的汞释放通量日变化规律类似于裸露土壤的汞释放通量特征,这种类似的昼夜特征很可能说明被草地覆盖的土壤的汞释放通量对草地的汞释放通量有重要贡献.

不同于其他采样阶段,4月13日草地的汞释放通量表现出明显不同的日变化特征,当日草地的汞释放通量最大值($66.7 \text{ ng}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$)出现在10:30,然后很快下降,到中午11:30达到最低值($-32.8 \text{ ng}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$).图3是草地的汞释放通量和大气气态总汞质量浓度的日变化特征.从图3可明显看出,草地的汞释放通量和大气气态总汞质量浓度呈明显的负相关关系($R = -0.38, P < 0.01$);而草地和大气间的汞交换通量由强烈释放向沉降的快速转换,则极有可能是由于大气气态总汞质量浓度的升高所引起.有研究^[7,15]指出,植物叶片和大气间的汞交换通量是双向性的,且存在一个补偿点:当大气气态总汞的质量浓度低于补偿点的质量浓度时,植物叶片表现为大气汞的来源;而当大气气态总汞的质量浓度升高到超过补偿点的质量浓度时,则以大气气态汞向叶片的沉降占主导地位.

表2 草地汞释放通量和气象因子间的相关系数

Table 2 Relationship between mercury flux and some meteorological factors

项目	汞释放通量	光照强度	大气温度	土壤温度	空气相对湿度	风速
汞释放通量	1					
光照强度	0.73	1				
大气温度	0.58	0.57	1			
土壤温度	0.87	0.83	0.77	1		
空气相对湿度	-0.48	-0.50	-0.92	-0.63	1	
风速	0.04	0.07	—	0.03	—	1

3 结论

a. 贵阳市2种类型草地主要表现为大气中汞的来源,其汞释放通量的日均值为(7.8 ± 15.7)~

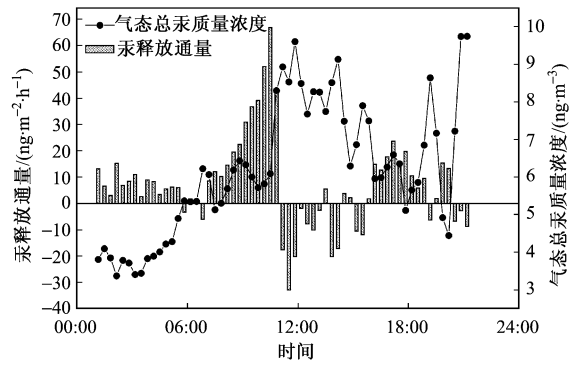


图3 采样点1草地的汞释放通量和大气气态总汞质量浓度的日变化特征

Fig. 3 The diurnal cycle of mercury flux and atmospheric TGM mass concentration at sampling site 1

(41.5 ± 15.2) $\text{ng}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$, 低于贵阳市土壤向大气的汞释放通量.

b. 不同类型草地的汞释放通量有一定的差异,潮湿的林间天然草地的汞释放通量显著高于人工草坪.

c. 草地的汞释放通量由土壤和草叶片的释放组成,并以土壤汞的释放占主要部分.

d. 草地的汞释放通量具有显著的日变化规律,白天的汞释放通量明显高于夜间,汞释放通量的最大值通常出现在午后,最小值则出现在夜间或凌晨,气象条件特别是光照强度和大气温度是影响草地汞释放通量的重要因素.大气中气态总汞的质量浓度是影响草地汞释放通量的另一个重要因素:大气中气态总汞质量浓度的升高能够抑制草叶片向大气中释放汞;而高质量浓度的气态总汞可导致大气中的汞向草叶片的强烈沉降.

参考文献:

[1] Niagu J O. A global assessment of natural sources of atmospheric trace metals[J]. Nat, 1989, 338: 47-49.

[2] Carpi A, Lindberg S E. Application of a Teflon TM dynamic flux chamber for quantifying soil mercury flux: tests and results over background soil [J]. Atmos Environ, 1998, 32(5): 873-882.

[3] Obrišt D, Gustina M S, John A, et al. Measurements of gaseous elemental mercury fluxes over intact tallgrass prairie monoliths during one full year [J]. Atmos Environ, 2005, 39:957-965.

[4] 韩永伟, 高吉喜. 我国草地主要生态系统环境问题分析与防治对策[J]. 环境科学研究, 2005, 18(3): 60-62.

[5] 王少锋, 冯新斌, 仇广乐, 等. 万山汞矿区地表与大气界面间汞交换通量研究[J]. 环境科学, 2006, 27(8): 1487-1494.

[6] Xiao Z, Sommar J, Lindqvist O, et al. Atmospheric mercury deposition to grass in south Sweden [J]. Sci Total Environ, 1998, 213: 85-94.

- [7] Ericksen J A, Gustin M S. Foliar exchange of mercury as a function of soil and air mercury concentrations[J]. *Sci Total Environ*, 2004, 324: 271-279.
- [8] Xu X, Yang X, Miller D R, *et al.* Formulation of bi-directional atmosphere surface exchanges of elemental mercury [J]. *Atmos Environ*, 1999, 33: 4345-4355.
- [9] 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]. *Atmos Environ*, 2001, 35: 3453-3462.
- [10] 王少锋, 冯新斌, 仇广乐, 等. 贵州红枫湖地区冷暖两季土壤/大气界面间汞交换通量的对比[J]. *环境科学*, 2004, 25(1): 123-127.
- [11] 张成, 何雷, 王定勇, 等. 重庆几种地表类型土/气界面汞交换通量[J]. *环境科学学报*, 2005, 25(8): 1085-1090.
- [12] 侯亚敏, 冯新斌, 王少锋, 等. 贵阳市及其郊区土壤-大气界面间汞交换通量的初步研究[J]. *土壤学报*, 2005, 42(1): 52-58.
- [13] Ericksen J A, Gustin M S, Schoman D E, *et al.* Accumulation of atmospheric mercury in forest foliar[J]. *Atmos Environ*, 2003, 37: 1613-1622.
- [14] 王静, 程积民, 万惠娥, 等. 黄土高原芨芨草光合作用和蒸腾作用的初步研究[J]. *草业学报*, 2003, 12(6): 47-52.
- [15] Hanson P J, Lindberg S E, Tabberer T A, *et al.* Foliar exchange of mercury vapor: evidence for a compensation point [J]. *Water Air Soil Pollut*, 1995, 80: 373-382.

(责任编辑:潘风云)