

DOI: 10.7524/j.issn.0254-6108.2017.03.2016071001

刘婷, 郑祥民, 刘飞, 等. 上海市香樟树叶总汞含量时空分布及影响因素[J]. 环境化学, 2017, 36(3): 486-495.

LIU Ting, ZHENG Xiangmin, LIU Fei, et al. Seasonal and spatial distribution of mercury contents in *Camphora* leaves and its influencing factors in Shanghai[J]. Environmental Chemistry, 2017, 36(3): 486-495.

## 上海市香樟树叶总汞含量时空分布及影响因素\*

刘婷 郑祥民\*\* 刘飞 秦艺帆 周立旻

(华东师范大学地理科学学院, 上海, 200241)

**摘要** 2014年8月至2015年5月对上海市26个公园绿地中香樟树叶进行采集,共获取104份样品进行总汞含量测定.结果表明,上海市叶汞平均含量为 $64.8 \pm 26.6 \mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,范围为16.6—132.6  $\mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ .叶汞含量随生长周期不断累积,季节变化表现为春季>冬季>秋季>夏季,而叶汞累积量均值按季节表现为秋季>冬季>春季.叶片总汞含量空间差异明显,呈由城市西北向东南逐渐递减的趋势,叶汞累积量在工业园区与中心城区具有较高的值,城市东南沿海地区与远郊区叶汞累积量较低,在局地气象因子影响下,不同季节略有不同.叶汞累积量高值区域主要出现在污染源的下风向,并且风速越大,叶汞累积量高值区域的范围越大,而海洋气团下风向的累积量较小;年降水量越大的区域叶汞含量越低,春秋季节叶汞累积量与降水量呈显著负相关( $P < 0.05$ );臭氧浓度与叶汞累积量的变化趋势暗示着臭氧浓度是影响叶汞累积量的一个重要因素.

**关键词** 香樟树, 叶汞含量, 叶汞累积量, 时空分布, 影响因素, 上海.

## Seasonal and spatial distribution of mercury contents in *Camphora* leaves and its influencing factors in Shanghai

LIU Ting ZHENG Xiangmin\*\* LIU Fei QIN Yifan ZHOU Limin

(School of Geographic Sciences, East China Normal University, Shanghai, 200241, China)

**Abstract:** *Camphora* leaves in urban parks in Shanghai were collected during the period of August 2014 to May 2015 for mercury content analyses. The results show that mercury contents in *Camphora* leaves varied from 16.6 to 132.6  $\mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ , with a mean value of  $64.8 \pm 26.6 \mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ . The leaves accumulated mercury along with its growth, and the contents exhibited distinct seasonal variation by the following order: spring>winter> autumn>summer, while the accumulations are in the order of autumn>winter>spring. The distribution of mercury contents had significant spatial variation, which trends to decrease gradually from the northwest to southeast in the study area. It can be seen that heavily polluted industry areas and city center have higher accumulation, while it is much lower in the coastal areas in the southeast of the city and outer suburban areas. Furthermore, influenced by the local meteorological conditions, seasonal accumulation displayed different degrees of variation. However, climatic factors are of great influence to the mercury distribution. Higher accumulation appeared in the downwind areas primarily, and pollution area increased with the wind speed the mercury concentration is low. In the areas where annual precipitation is high, and correlation analysis shows a significant negative correlation ( $P < 0.05$ ). Seasonal accumulation decreased with the

2016年7月10日收稿(Received: July 10, 2016).

\* 华东师范大学地理学国家理科基地科研训练及科研能力提高项目(J1310028)资助.

**Supported by** the Project for East China Normal University National Science Talent Training Base for Research Training(J1310028).

\*\* 通讯联系人, Tel: 15201806791, E-mail: xmzheng@re.ecnu.edu.cn

**Corresponding author**, E-mail: xmzheng@re.ecnu.edu.cn

ozone concentration, which suggests ozone is a significant factor for mercury accumulation in leaves.

**Keywords:** *Camphora*, mercury concentrations, mercury accumulation, seasonal and spatial distribution, factors, Shanghai.

汞是一种在常温常压下以液态存在的金属,能够在食物链中传递并有生物放大效应<sup>[1]</sup>,在大气中主要以气态汞和颗粒汞的形式存在,气态元素汞( $Hg^0$ )能够稳定地在大气中驻留 0.5—2 a 并进行远距离的传输<sup>[2]</sup>,被列入世界 8 种重点控制的长距离传输污染物之一<sup>[3]</sup>.大气中的汞能够被植物叶片表面及叶肉组织吸收富集<sup>[4]</sup>,而根系对土壤中的汞的吸收只有少量向茎部和叶片迁移<sup>[5]</sup>,其量与叶片的吸收量相比非常微小,可以忽略不计,植物这种吸收汞的特性可以反映植物叶片的生境大气环境特征,现已被广泛地应用于生物监测和生物指示.

目前,对植物体中的汞含量的研究对象偏重于蔬菜及道路两侧树木<sup>[6-8]</sup>,以及城市不同功能区植物总汞含量的种间差异或者同种植物的不同部位对汞的富集<sup>[9]</sup>,研究区多集中在重污染城市和汞矿区<sup>[10-11]</sup>.植物气孔吸收大气中的汞并累积在叶片中,风速风向、降水量以及大气中臭氧浓度是影响大气汞浓度、大气颗粒物汞浓度的重要因素<sup>[12-14]</sup>,能够对叶片累积汞产生一定的影响.城市公园绿地是城市中主要的开放空间,免受交通干道与其他人为因子的影响,其叶汞含量能够代表城市平均的污染水平.

香樟作为常绿树种在上海广泛分布,故香樟树叶作为研究对象能够使采样点分布均匀且供各季节采集测试.本次研究采集 2014 年 8 月至 2015 年 5 月上海市公园绿地中不同季节末期的香樟树叶作为研究对象,并收集统计采样期间风速风向、降水量以及大气中  $O_3$  浓度的数据,研究上海市叶汞含量与季节累积量的时间与空间变化特征,探索上述各项气象因子对其时空分布特征的影响.

## 1 材料与方法 (Materials and methods)

### 1.1 采样区概况

上海市地处东经 120°51′至 122°12′,北纬 30°40′至 31°53′之间,属亚热带季风性气候,四季分明,降水充沛,植被主要以落叶阔叶林和常绿阔叶林为主,城市化水平较高,植被受人类活动影响较大.上海市工业发达,区内分布着众多大型重点产业园,包含钢铁、化工产业,空气污染严重<sup>[15]</sup>.本次研究考虑上海季风方向及城郊区布局,参考工业布局与植物分布状况,共选取公园绿地样点 26 个,样点分布图见图 1.

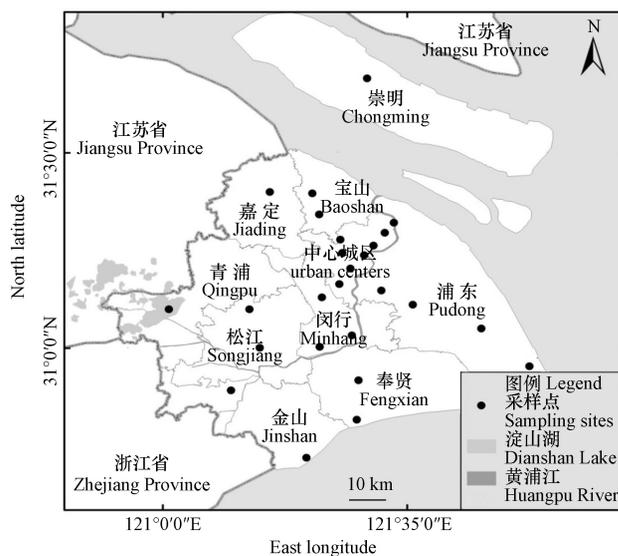


图 1 研究区采样示意图

Fig.1 The sampling sites of study area

### 1.2 样品采集

通过对上海市绿化树种进行调查,采取上海市广泛分布、具有代表性的常绿树种香樟作为研究对

象,分别于2014年8月末、11月末与次年2月末、5月末采集夏季、秋季、冬季、春季末期共104份香樟树叶片作为样品.采取10—15棵香樟树距离地面4.5 m处的香樟树叶混匀作为一个采样点的样品,采样时对采样处做好标记,四季采集同一区域内的叶片.样片采集后带回实验室使用 $8\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 半胱氨酸溶液超声清洗30 min,再用高纯水洗净,冷冻干燥后使用粉碎机粉碎后密封保存待用.

### 1.3 数据测量与统计

称取预处理后的香樟树叶样品约0.1 g,直接采用美国LECO公司AMA 254型汞分析仪测定,以NIST1633b为质控标样,汞加标回收率控制在90%—105%以内.实验所得的树叶及土壤汞含量数据均做质量归一化处理,并按照统计学原理,剔除离群数据.

风速风向数据来自于天气网按天统计的数据,降水量数据由上海市气象局11个气象站点1981—2010年月降水数据统计而来,在上海市空气质量实时发布系统查询得到 $\text{O}_3$ 月变化数据.

## 2 结果与讨论(Results and discussion)

本次研究采集上海市26个采样区的香樟树叶进行总汞含量的测定,剔除离群数据后统计分析显示,上海市叶汞的平均含量为 $64.8\pm 26.6\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,范围为 $16.6\text{—}132.6\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,各季节叶汞含量变化较大(表1).本次研究使用夏季叶汞含量作为叶片汞本底含量,用相邻季节的叶汞含量差值计算叶片在秋、冬、春季对汞的累积量,结果显示不同季节叶片对汞的累积量有所变化,且数据振幅较大,说明树叶汞累积量区域差异显著,局地大气环境状况不同,影响树叶汞含量变化的因素较多.

表1 植物叶片中汞含量与累积量统计数据

Table 1 Contents and accumulations of mercury in the leaves

	夏季含量 Summer content/ ( $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ )	秋季含量 Autumn content/ ( $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ )	冬季含量 Winter content/ ( $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ )	春季含量 Summer content/ ( $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ )	秋季累积量 Autumn accumulation/ ( $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ )	冬季累积量 Winter accumulation/ ( $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ )	春季累积量 Spring accumulation/ ( $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ )
最大值	71.3	91.1	120.5	132.6	42.1	32.2	43.3
最小值	16.6	20.1	30.9	34.4	1.0	0.9	0.2
平均值	41.3	58.9	73.6	85.6	17.7	14.6	12.0
标准偏差	13.6	17.9	23.0	27.2	13.5	8.7	10.0

与国内外研究结果相比,上海市香樟叶汞含量整体较高(表2),高于国内空气污染较轻的城市,如昆明、丽江<sup>[16]</sup>,与东北哈尔滨的几种绿化树种叶汞平均含量相当<sup>[17]</sup>,远低于国内大型的重污染工业城市,如湖南株洲<sup>[18]</sup>.发达国家重视汞污染状况,从排放到治理有严格的管理机制,所以汞污染水平总体很低<sup>[19]</sup>,美国明尼苏达大学发现美国不同乔木老叶中汞含量较少<sup>[20]</sup>,最大值只有上海市的1/3.与国外污染较为严重的区域,例如西班牙 Almadén 汞矿区<sup>[21]</sup>与上世纪累积排放大量污染物质的位于西班牙东南地区的 Jodar<sup>[22]</sup>相比,上海市叶汞含量较低.

表2 国内外不同地区叶汞含量比较

Table 2 Comparison of mercury content in leaves in some cities of China and other countries

地区 Area	时间 Time	研究对象 Research object	叶汞浓度 Mercury content/ ( $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ )	数据来源 Source
昆明、思茅、丽江	2003年	石楠等16个绿化树种	2.0—39.0	[16]
哈尔滨	2003.9—2003.10	24种乔木与6种灌木	4.0—772.0	[17]
株洲	2001	香樟、大叶黄杨、杉木等	900.0—6290.0	[18]
Twin Cities, 美国	2004—2005	银杏等6中落叶乔木老叶	16.3—44.8	[20]
Almadén 汞矿区	2010.5—2011.9	橄榄树	200.0—6600.0	[21]
Jodar, 西班牙	2014年	橄榄树	46.0—453.0	[22]

## 2.1 季节变化特征

植物体内的汞主要来自于土壤与大气,但研究表明,土壤吸收的汞绝大部分被埋藏在土壤中植物的根系所吸收,树叶对土壤中汞的吸收因子很低<sup>[23]</sup>,说明土壤中的汞转移到叶片并吸收的潜能很低,与国内其他研究相符合<sup>[24-25]</sup>.植物叶片吸收大气中的汞并随着叶片生长而累积<sup>[26-27]</sup>,这种现象在汞污染严重的区域尤其明显<sup>[28]</sup>,所以叶汞含量在一定程度上能够反映研究区域的大气汞污染情况.

如图 2 所示,香樟树叶汞含量从夏季开始逐渐累积,直至春季叶汞含量达到最大,叶汞含量按季节表现为春季>冬季>秋季>夏季,均值分别为  $85.6 \pm 27.2$ 、 $73.6 \pm 23.0$ 、 $58.9 \pm 17.9$ 、 $41.3 \pm 13.6 \mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ .这与其他对落叶乔木的研究结果不同.落叶乔木春季叶汞开始累积到秋季含量最大<sup>[29]</sup>,造成这种现象的主要原因是研究对象不同,本次研究的香樟树属于常绿树种,在新叶萌发期落叶,夏季采集的是当年萌发的新叶,汞在叶片中刚开始积累,所以叶汞含量最低,春季的样品是处在同一生长周期的老叶,春季叶片最老,叶汞含量最大,春季含量甚至是夏季的两倍.如图 2 所示,四季叶汞含量的中位数位置、四分位间距框的位置与高度随生长周期不断升高,汞在叶片中不断积累,汞含量逐渐增大;但从上、下边缘的位置看,四季叶汞含量数据波动较大,这表明受本地污染源与气象因子的综合影响,不同地区对汞的累积程度差别较大,局地叶汞含量较大.夏季叶汞含量在青浦区有一个异常值,青浦区位于上海西部,与江苏浙江接壤,大气污染严重,尤其是淀山湖地区,在局地气象因子的作用下,更成了污染物的聚集地,叶汞含量相对较高,是夏季叶汞含量均值的 1.3 倍.

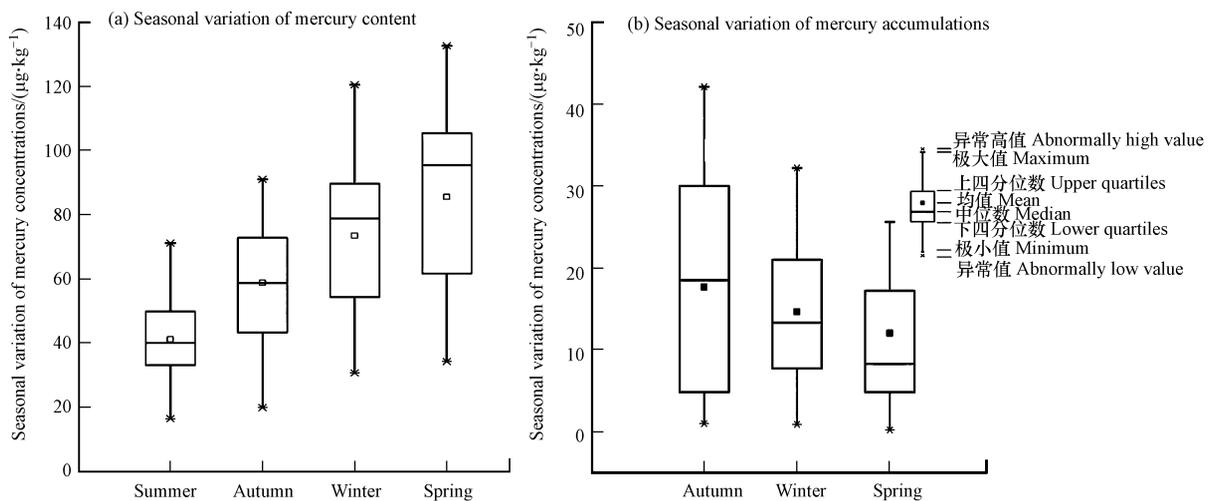


图 2 香樟树叶汞含量与累积量的季节变化

Fig.2 Seasonal variation of mercury contents and accumulations in *Camphora* leaves

叶汞在各季节的累积量也有所变化,叶汞累积量均值按季节表现为秋季>冬季>春季,均值分别为  $17.7 \pm 13.5$ 、 $14.6 \pm 8.7$ 、 $12.0 \pm 0.10 \mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 与大气总汞季节变化一致<sup>[12]</sup>,上海无明显的采暖期,说明叶汞累积量除了本地源贡献之外,还与局地的气象条件有关.叶片累积量大于 0,说明叶片随季节变化持续地吸收大气中的汞,使得叶片汞含量随季节稳定增长,这与美国学者认为叶片累积大气汞是一个不可逆的过程并随着生长不断累积汞的研究结果相一致<sup>[20]</sup>.植物叶片能够稳定地吸收大气中的汞,各季节对汞的累积量不同主要是受局地污染源与气象因子的综合影响,不同地区不同季节大气汞污染程度不同,对汞的累积程度不同.叶汞的春季累积量在嘉定区的盘陀子公园有异常高值,这说明在春季叶片对大气中的汞累积量较大.

## 2.2 空间变化特征

由于汞在叶片中逐渐累积,所以使用生长后期的春季老叶汞含量进行克里金插值表征叶汞总量在空间上的变化,如图 3 所示;使用各季节的叶汞累积量进行插值表示累积量在空间上的变化,如图 4 所示.春季叶汞含量是整个生长周期中汞的总累积量,表征叶汞在空间上的整体变化.上海市春季叶汞含量在崇明岛整体较低,在其他地区呈现西高东低,北高南低的分布趋势,高值区集中分布在工业污染严

重的工业园区和人为扰动强烈、交通拥堵的市中心地区,沿海地区和人为扰动较少的远郊区叶汞含量较低.崇明岛-浦东新区-奉贤区临海一带受海源影响,较干净的海源气团到达陆地,降低区域的大气汞污染程度,叶汞含量较小.

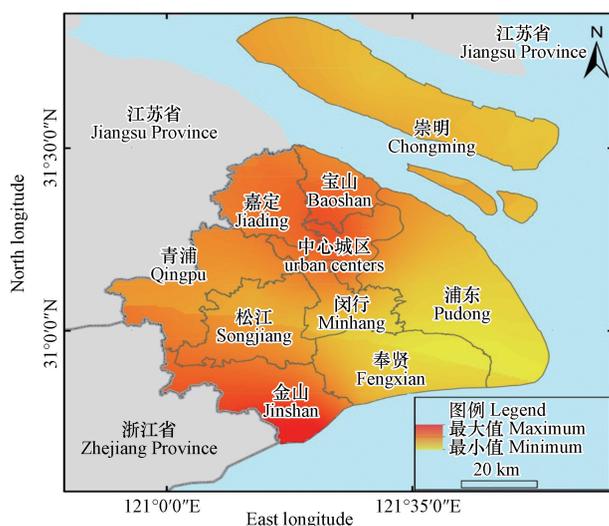


图3 春季叶汞总量空间分布

Fig.3 Spatial distribution of mercury content in *Camphora* leaves in spring

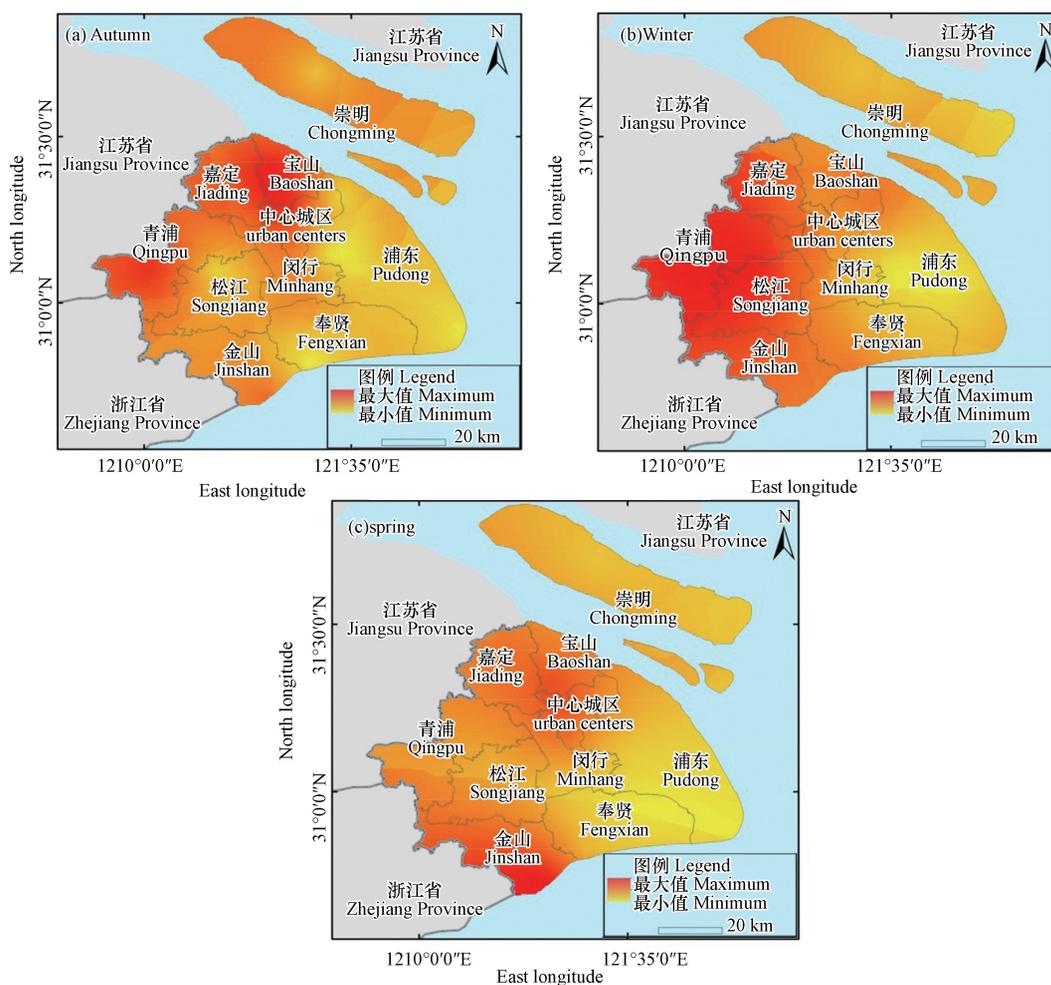


图4 不同季节叶汞累积量空间分布

Fig.4 Spatial distribution of mercury accumulations in *Camphora* leaves in different seasons

而冶金、化工、燃煤是造成大气汞污染主要的原因<sup>[30]</sup>,宝山区以及吴淞工业区分布着以钢铁、电力、煤炭、工业气体相关生产为主的工厂,工业生产向周围环境排放大量的废气、废水、废渣,造成严重的环境汞污染,所以宝山区叶汞含量受本地污染源影响较大,均值高达  $108.1 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ .金山区是中国发展现代石油化工产业的重要基地,能源消耗量大,环境压力大,叶汞含量高达  $97.8 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ .青浦区本地无明显的污染源,但其处在特殊的地理位置,容易受外来源的影响,叶汞累积量甚至达到  $132.6 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ .中心城区交通拥堵,人为扰动强烈,叶汞含量为  $101.0 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ .

叶汞在各季节的累积量的空间分布差异较大,秋季累积量(图 4(a))高值主要集中在工业聚集的宝山区、金山区与闵行奉贤一带的吴泾化工区与上海化工区,在青浦区淀山湖附近与中心城区叶汞也有较高的累积;冬季叶汞累积量(图 4(b))高值区域范围较大,整体分布在上海市距海岸较远的嘉定-青浦-松江-金山一带,宝山区与中心城区冬季累积均值达  $16.6 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ;春季累积量(图 4(c))高值只集中在金山区与中心城区,且范围较小.各季节累积量的空间分异特征表明除去局地的污染源,气象因子对汞含量的累积作用也起到重要的影响.

### 2.3 气象因子对叶汞含量的影响

#### 2.3.1 风速风向

汤庆合、赵曦等发现风速风向对汞的分布影响显著,上风向的污染物容易被风迁移至下风向,造成下风向污染物的聚集<sup>[31-32]</sup>,故按天统计采样期间上海市本地风速风向数据,得到风向玫瑰图,如图 5 所示.上海市秋季多 4—5 级风,主导风向为东南风,其次风速大于  $5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  的北风对大气中污染物的迁移与扩散起到了重要的作用,结合图 4(a)所示,东南风带来海洋上空干净的气流,大气中污染物较少,使得东南靠海的区域叶汞含量偏低,金山区原本是空气污染严重的石油基地,在强劲的北风作用下,污染物被带向金山区以南的方向扩散迁移,叶汞在秋季的累积量有所降低.冬季受东亚季风影响,盛行西北风且风速较大,西北风将江浙地带的污染物质迁移至接壤的青浦淀山湖地区,在强劲的风力作用下进而向其他区县扩散转移,致使扩大污染范围,造成大范围地区的叶汞累积量升高,如图 4(b)所示,冬季叶汞累积量高值范围最大.春季以 2—3 级微风为主,东风与东南偏南风频率较大且风速较大,吴泾工业区、中心城区的污染物容易发生迁移并沉积在下风向地区,造成春季嘉定区盘陀子公园叶汞累积量的异常高值,如图 4(c)所示,金山区一带受微弱的东北风影响,风速较小,不利于污染物的扩散,工业生产使得污染物聚集,累积在叶片中的汞含量升高,甚至是秋季累积量的 1.7 倍,而淀山湖地区的污染物也在持久强劲的东风与东南偏南风的作用下发生迁移,叶汞累积量降低.

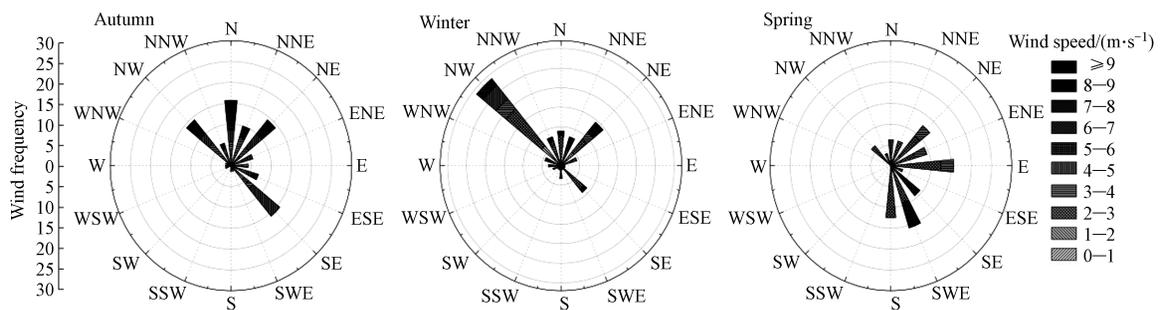


图 5 上海市秋冬春季风向玫瑰图

Fig.5 Wind rose map of Shanghai in autumn, winter and spring

#### 2.3.2 降水

上海市属于季风气候,降水充沛,利用上海市气象局 11 个气象站点 1981—2010 年月降水数据统计近年来上海市各区年均降水量,运用克里金插值展现其空间分布状况,如图 6 所示.

上海市年降水量高值区域集中在城市东部沿海地区,而西部内陆地区与崇明降水量较少,呈现出由东向西逐渐递减的纬向分异特征,与四季累积含量最高的春季叶汞含量的空间变化趋势具有明显的对应关系,年均降水量的高值区域叶汞含量普遍较低,与图 3 相比较,浦东-奉贤-闵行一带叶汞含量较低,平均含量低于  $60.0 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,而这一地带年降水量却较大,平均达到了 1200 mm,浦东地区甚至达到了 1240 mm,仅次于市区;与此同时,叶汞含量较大,汞污染较严重的宝山区-嘉定区-青浦区一带年降水量



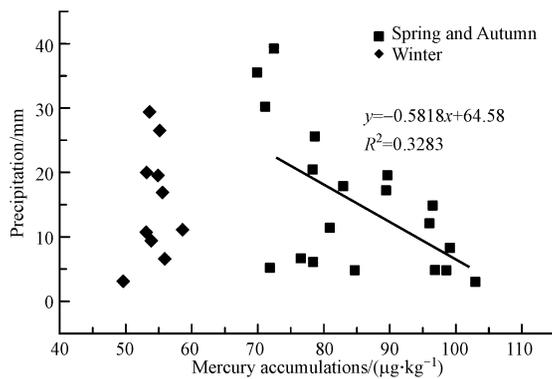


图8 上海市各区县降水量与叶汞累积量的相关性

Fig.8 Correlation between precipitation and mercury accumulations in Shanghai

### 2.3.3 大气中 O<sub>3</sub> 浓度

统计样品采集期间上海市大气臭氧日最大 8 h 均值, 臭氧浓度的月变化如图 9 所示. 采样期间臭氧平均浓度为  $102.72 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ , 春季 3 月开始超出平均浓度并逐渐升高, 秋季 11 月浓度开始降低, 冬季 12 月臭氧浓度降低到最小值, 整体呈现出春季 > 秋季 > 冬季的分布趋势, 而研究表明城市尺度上郊区下风向臭氧浓度高于城区<sup>[35]</sup>, 上海市臭氧分布呈市中心区域-市郊-外围农村逐渐增强的趋势, 在宝山、浦东及西北区域的浓度明显高于市中心<sup>[36]</sup>, 而在浦东、奉贤及西北区域一带春秋季节叶汞累积量相较于冬季有明显降低的趋势(图 4), 尤其是近年来空气污染严重的青浦地区, 春季叶汞累积量分别仅为秋、冬季节的 1/3、1/2. 上海市无采暖季, 叶汞高值在空间上分布在工业园区与中心城区, 污染源无明显的季节变化, 而春、秋季节叶汞的高值分布除了与当地的主导风向及其他局地气象因子息息相关外, 推测还与大气中臭氧的变化相关. 大气中的臭氧具有强氧化作用, 容易将占大气汞 95% 以上的气态元素汞 ( $\text{Hg}^0$ )<sup>[34]</sup> 氧化为活性气态汞 ( $\text{Hg}^{2+}$ ),  $\text{Hg}^{2+}$  易溶于水, 在特殊的城市气候作用下(如雨水的清除作用) 容易被带走或沉降至地表, 因此  $\text{Hg}^0$  的氧化过程导致可被植物气孔吸收的汞减少<sup>[37]</sup>, 从而降低叶汞的累积量.

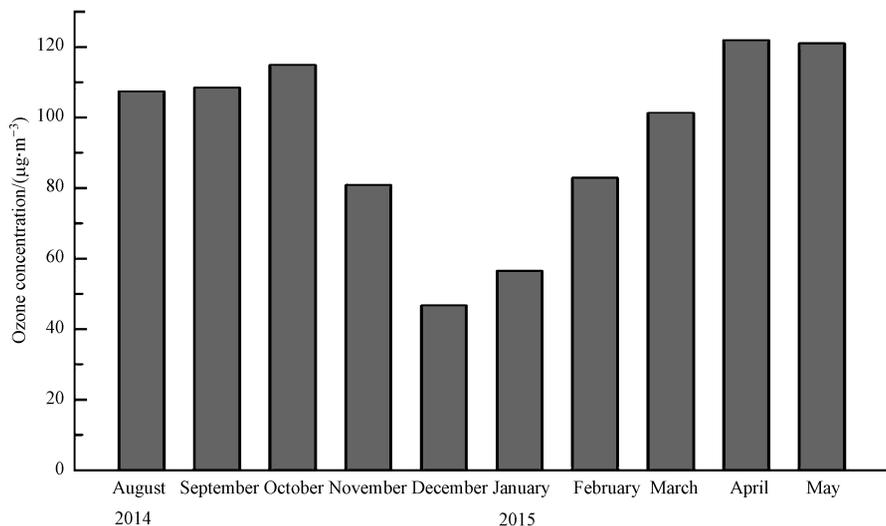


图9 上海市大气 O<sub>3</sub> 浓度在采样期间的变化

Fig.9 Variation of ozone level in Shanghai at the sampling period

## 3 结论 (Conclusion)

(1) 上海市香樟树叶汞含量范围为  $16.6\text{--}132.6 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 平均含量为  $64.8\pm 26.6 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 与国内外研究结果相比, 汞含量较高, 说明上海市大气环境受到一定程度的汞污染.

(2)叶汞含量季节变化明显,季节含量变化表现为春季>冬季>秋季>夏季,均值分别为  $85.6\pm 27.2$ 、 $73.6\pm 23.0$ 、 $58.9\pm 17.9$ 、 $41.3\pm 13.6$   $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,呈现随生长周期不断累积且不能向大气再释放的过程;叶片中的叶汞累积量的季节变化表现为秋季>冬季>春季,均值分别为  $17.7\pm 13.5$ 、 $14.6\pm 8.7$ 、 $12.0\pm 10.0$   $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ .

(3)上海市春季叶汞总累积量空间分异特征明显,总体呈现西高东低,北高南低的分布趋势,高值区集中分布在工业污染严重的工业园区和人为扰动强烈、交通拥堵的市中心地区,沿海地区 and 人为扰动较少的远郊区叶汞含量较低.与此同时,叶汞各季节累积量的空间分布差异较大,秋季累积量高值分布在工业区与青浦区,冬季累积量高值区域范围较大,主要分布在嘉定-青浦-松江-金山一带,春季累积量高值范围较小,只集中出现在金山区与中心城区.

(4)风速风向对叶汞累积量的分布影响显著,风速较小时叶汞累积量高值区域较小,局地累积量较高,风速较大时累积量高值区域较大,而风向的研究说明叶汞累积量在陆地污染源下风向的区域累积,海洋干净气团下风向的叶汞累积量较低;降水量的分布与叶汞的空间变化趋势具有明显的对应关系,降水量的高值区域叶汞量普遍较低,春、秋季节叶汞累积量与降水量显著负相关( $P<0.05$ ),冬季降水量较小,与叶汞累积量相关性不明显;大气中臭氧浓度的时间变化及普遍的分布规律与叶汞的季节累积量变化趋势相反,这暗示着臭氧浓度是影响叶汞累积量的一个重要因素.

#### 参考文献 (References)

- [ 1 ] ZAHIR F, RIZWI S J, HAP S K, et al. Low dose mercury toxicity and human health[J]. *Environmental Toxicology & Pharmacology*, 2005, 20(20):351-360.
- [ 2 ] 孙阳昭, 陈扬, 蓝虹, 等. 中国汞污染的来源、成因及控制技术路径分析[J]. *环境化学*, 2013, 32(6):937-942.  
SUN Y Z, CHEN Y, LAN H, et al. Study on pollution sources, cause of mercury pollution and its control technical roadmap in China [J]. *Environmental Chemistry*, 2013, 32(6):937-942 (in Chinese).
- [ 3 ] KUSS J, SCHNEIDER B. Variability of the gaseous elemental mercury sea-air flux of the Baltic Sea [J]. *Environmental Science & Technology*, 2007, 41(23):8018-8023
- [ 4 ] GONZALEZ C M, CASANOVAS S S, PIGNATA M L. Biomonitoring of air pollutants from traffic and industries employing *Ramalina ecklonii* (Spreng.) Mey. and Flot. in Córdoba, Argentina[J]. *Environmental Pollution*, 1996, 91(3):269-277.
- [ 5 ] PATRA M, SHARMA A. Mercury toxicity in plants[J]. *Botanical Review*, 2000, 66(3):379-422.
- [ 6 ] 刘芳, 王书肖, 吴清茹, 等. 大型炼锌厂周边土壤及蔬菜的汞污染评价及来源分析[J]. *环境科学*, 2013, 34(2):712-717.  
LIU F, WANG S X, WU Q R, et al. Evaluation and source analysis of the mercury pollution in soils and vegetables around a large-scale zinc smelting plant[J]. *Environmental Science*, 2013, 34(2):712-717. (in Chinese)
- [ 7 ] 叶军. 桂林交通干道旁侧土壤、植物、大气系统汞污染研究[D]. 桂林: 桂林工学院, 2006.  
YE J. Research on mercury pollution of soils, plants and atmosphere beside the traffic arteries in Guilin[D]. Guilin: Guilin Institute of Technology, 2006 (in Chinese).
- [ 8 ] 侯明, 钱建平, 张力, 等. 桂林市菜地土壤—蔬菜汞污染研究和评价[J]. *生态环境*, 2004, 13(4):575-577.  
HOU M, QIAN J P, ZHANG L, et al. Investigation and assessment on mercury pollution in soils and vegetables of Guilin[J]. *Ecology and Environment*, 2004, 13(4):575-577 (in Chinese).
- [ 9 ] 张磊, 张磊, 周震峰. 青岛市不同功能区常见绿化植物及土壤汞污染特征[J]. *生态环境*, 2008, 17(2):802-806.  
ZHANG L, ZHANG L, ZHOU Z F. Mercury pollution characteristics of plants and soils in different functional areas in Qingdao City [J]. *Ecology and Environment*, 2008, 17(2):802-806 (in Chinese).
- [ 10 ] 张倩, 朱雪梅, 傅海辉, 等. 某关闭汞矿区附近农田蔬菜中的汞污染评价[J]. *生态学杂志*, 2015, 34(5):1389-1395.  
ZHANG Q, ZHU X M, FU H H, et al. Mercury pollution assessment for vegetables from a cropland near a closed mercury mine[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2015, 34(5):1389-1395 (in Chinese).
- [ 11 ] 李海华, 申灿杰, 李跃伟, 等. 郑州市郊区蔬菜对有害元素汞(Hg)的富集规律研究[J]. *河南科学*, 2003, 21(3):361-363.  
LI H H, SHEN C J, LI Y W, et al. Study on regulations that harmful element(Hg) is absorbed in soil-vegetables system in the suburb of Zhengzhou City[J]. *Henan Science*, 2003, 21(3):361-363 (in Chinese).
- [ 12 ] 张艳艳, 修光利, 张大年, 等. 上海市大气总汞季节变化特征及与气象条件的关系[J]. *环境科学与技术*, 2012, 35(1):155-158.  
ZHANG Y Y, XIU G L, ZHANG D N, et al. Total gaseous mercury in ambient air of Shanghai: Its seasonal variation in relation to meteorological condition[J]. *Environmental Science & Technology*, 2012, 35(1):155-158 (in Chinese).
- [ 13 ] KIM K H, KIM M Y. The temporal distribution characteristics of total gaseous mercury at an urban monitoring site in seoul during 1999—2000[J]. *Atmospheric Environment*, 2001, 35(25):4253-4263.
- [ 14 ] 梁隆超, 仇广乐, 陈卓. 贵阳市大气颗粒物(PM2.5)汞浓度分布特征及影响因素[J]. *生态学杂志*, 2015, 34(2):510-515.  
LIANG L C, QIU G L, CHEN Z. Pollution characteristics and affecting factors of mercury in particulates PM2.5 in Guiyang[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2015, 34(2):510-515 (in Chinese).
- [ 15 ] 包良满, 张元勋, 李晓林, 等. 上海工业区大气颗粒物中硫的化学形态和分布[J]. *中国环境科学*, 2009, 29(3):231-236  
BAO L M, ZHANG Y X, LI X L, et al. Speciation and distribution of sulfur in size-fractionated particulate matters in industrial district of

- Shanghai[J]. China Environmental Science, 2009, 29(3):231-236(in Chinese).
- [16] 何蓉, 张学星, 周筑, 等. 几种城市绿化树种叶片中铅砷铬镉汞元素的含量特征[J]. 西部林业科学, 2005, 34(3):11-24.  
HE R, ZHANG X X, ZHOU Z, et al. Contents of Pb, As, Cr, Cd and Hg in leaves of sixteen urban tree species[J]. Journal of West China Forestry Science, 2005, 34(3):11-24 (in Chinese).
- [17] MU L Q, SUN H Y. Absorption capacity of major urban afforestation species in north-eastern China to heavy metal pollutants in the atmosphere[J]. Journal of Forestry Research, 2004, 15(1):73-76.
- [18] 陈学泽, 龙春梅, 张新民. 树叶中锌、镉、汞的含量与环境质量之间的关系[J]. 中南林业科技大学学报, 2002, 22(2):77-79.  
CHEN X Z, LONG C M, ZHANG X M. Relationship between the content of Zn, Cd, Hg in tree leaves and the environment quality[J]. Journal of Central South Forest University, 2002, 22(2):77-79 (in Chinese).
- [19] MUKHERJEE P, BAHN M M, MCKINSTRY R C, et al. Differences between gray matter and white matter water diffusion in stroke: Diffusion-tensor MR imaging in 12 patients[J]. Radiology, 2000, 215(1):211-220.
- [20] LAACOURI A, NATER E A, KOLKA R K. Distribution and uptake dynamics of mercury in leaves of common deciduous tree species in Minnesota, U.S.A[J]. Environmental Science & Technology, 2013, 47(18):10462-10470.
- [21] HIGUERAS P, AMOROS J A. Time and space variations in mercury and other trace element contents in olive tree leaves from the Almadén Hg-mining district[J]. Journal of Geochemical Exploration, 2012, 123:143-151.
- [22] LOPEZBERDONCES M A, MARIA E J, AMOROS J A, et al. Hg contents in soils and olive-tree (*Olea Europea*, L.) leaves from an area affected by elemental mercury pollution (Jódar, SE Spain)[C]//EGU General Assembly. 2014.
- [23] 李海华. 郑州市郊区土壤-植物(蔬菜)系统有害元素富集规律研究[D]. 郑州:河南农业大学, 2001.  
LI H H. Study on regulations that harmful elements are absorbed in soil-plant(vegetables) system in the suburb of Zhengzhou City[D]. Zhengzhou: Henan Agricultural University, 2001 (in Chinese).
- [24] 张磊, 张磊. 招远市区土壤及常见绿化植物汞污染特征[J]. 生态毒理学报, 2014, 9(5):933-939.  
ZHANG L, ZHANG L. Pollution pattern of mercury in topsoil and common landscape plants in the downtown Zhaoyuan[J]. Asian Journal of Ecotoxicology, 2014(5):933-939 (in Chinese).
- [25] 赵宏伟, 钟秀萍, 刘阳生, 等. 深圳市清水河垃圾焚烧厂周围地区优势植物的汞污染研究[J]. 环境科学, 2009, 30(9):2786-2791.  
ZHAO H W, ZHONG X P, LIU Y S, et al. Mercury pollution investigation in predominant plants surrounding Shenzhen, Qingshuihe municipal solid waste incineration plant[J]. Environmental Science, 2009, 30(9):2786-2791 (in Chinese).
- [26] 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.
- [27] LOUIS V L S, RUDD J W M, KELLY C A, et al. Importance of the forest canopy to fluxes of methyl mercury and total mercury to boreal ecosystems[J]. Environmental Science & Technology, 2001, 35(15):3089-3098.
- [28] HIGUERAS P, AMOROS J A. Time and space variations in mercury and other trace element contents in olive tree leaves from the Almadén Hg-mining district [J]. Journal of Geochemical Exploration, 2012, 123:143-151.
- [29] 李志博, 王起超. 长春市主要木本植物汞的污染特征[J]. 中国科学院大学学报, 2003, 20(4):477-481.  
LI Z B, WANG Q C. Characters of main plants polluted by mercury in Changchun City[J]. Journal of the Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, 2003, 20(4):477-481 (in Chinese).
- [30] PORCELLA D B, RAMEL C, JERNELOV A. Global mercury pollution and the role of gold mining: An overview[J]. Water Air & Soil Pollution, 1997, 97(3):205-207.
- [31] 汤庆合, 丁振华, 江家骅, 等. 大型垃圾焚烧厂周边环境汞影响的初步调查[J]. 环境科学, 2005, 26(1):196-199.  
TANG Q H, DING Z H, JIANG J H. Environmental effects of mercury around a large scale msw incineration plant[J]. Environmental Science, 2005, 26(1):196-199 (in Chinese).
- [32] 赵曦, 李娟, 黄艺, 等. 珠三角某垃圾焚烧厂周边植物叶片汞含量空间格局及影响因素[J]. 生态毒理学报, 2015, 10(4):105-114.  
ZHAO X, LI J, HUANG Y, et al. Spatial pattern and influencing factors of mercury levels in leaves of plants surrounding a solid waste incinerator in the Pearl River Delta[J]. Asian Journal of Ecotoxicology, 2015, 10(4):105-114(in Chinese).
- [33] 金维明. 降水量变化对大气污染物浓度影响分析[J]. 环境保护科学, 2012, 38(2):23-26.  
JIN W M. Analysis on impact of precipitation variation on atmospheric pollutants concentration [J]. Environmental Protection Science, 2012, 38(2):23-26 (in Chinese).
- [34] 冯新斌, 陈玖斌, 付学吾, 等. 汞的环境地球化学研究进展[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2013, 32(5):503-530.  
FENG X B, CHEN J B, FU X W, et al. Progresses on environmental geochemistry of mercury[J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2013, 32(5):503-530 (in Chinese).
- [35] 段玉森, 张懿华, 王东方, 等. 我国部分城市臭氧污染时空分布特征分析[J]. 环境监测管理与技术, 2011(s1):34-39.  
DUAN Y S, ZHANG Y H, WANG D F, et al. Spatial-temporal patterns analysis of ozone pollution in several Cities of China[J]. The Administration and Technique of Environmental Monitoring, 2011(s1):34-39 (in Chinese).
- [36] 李俊, 徐丽萍. 上海市环境空气臭氧浓度时空分布特征的调查[J]. 新疆环境保护, 2000, 22(2):71-73.  
LI J, XU L P. Survey on ozone concentration characters of time-space distribution in Shanghai Ambient air[J]. Environmental Protection of Xinjiang, 2000, 22(2):71-73 (in Chinese).
- [37] 阴永光, 李雁宾, 蔡勇, 等. 汞的环境光化学[J]. 环境化学, 2011, 30(1):84-91.  
YIN Y G, LI Y B, CAI Y, et al. Environmental photo-chemistry of mercury[J]. Environmental Chemistry, 2011, 30(1):84-91 (in Chinese).