

学校编码: 10384

分类号__密级

学号: 21720081152691

UDC

厦 门 大 学

硕 士 学 位 论 文

胁迫条件下红树植物叶片汞释放及汞对红
树植物生理生态的影响

Flux of Atmospheric Mercury of Mangrove Leaves under
Mercury Stress and Impacts of Mercury Stress on Mangrove
Ecophysiology

袁彦婷

指导教师姓名: 丁振华 教授

专业名称: 生态学

论文提交日期: 2011年5月

论文答辩时间: 2011年7月

学位授予日期: 2011年9月

答辩委员会主席: 胡恭任

评阅人:

2011年7月

厦门大学学位论文原创性声明

本人呈交的学位论文是本人在导师指导下,独立完成的研究成果。本人在论文写作中参考其他个人或集体已经发表的研究成果,均在文中以适当方式明确标明,并符合法律规范和《厦门大学研究生学术活动规范(试行)》。

另外,该学位论文为()课题(组)的研究成果,获得()课题(组)经费或实验室的资助,在()实验室完成。(请在以上括号内填写课题或课题组负责人或实验室名称,未有此项声明内容的,可以不作特别声明。)

声明人(签名):

年 月 日

厦门大学学位论文著作权使用声明

本人同意厦门大学根据《中华人民共和国学位条例暂行实施办法》等规定保留和使用此学位论文，并向主管部门或其指定机构送交学位论文（包括纸质版和电子版），允许学位论文进入厦门大学图书馆及其数据库被查阅、借阅。本人同意厦门大学将学位论文加入全国博士、硕士学位论文共建单位数据库进行检索，将学位论文的标题和摘要汇编出版，采用影印、缩印或者其它方式合理复制学位论文。

本学位论文属于：

1.经厦门大学保密委员会审查核定的保密学位论文，于
年 月 日解密，解密后适用上述授权。

2.不保密，适用上述授权。

（请在以上相应括号内打“√”或填上相应内容。保密学位论文应是已经厦门大学保密委员会审定过的学位论文，未经厦门大学保密委员会审定的学位论文均为公开学位论文。此声明栏不填写的，默认为公开学位论文，均适用上述授权。）

声明人（签名）：

年 月 日

摘要

红树植物对汞具有较高的富集能力，其叶片和大气之间有着频繁的汞交换。为认识红树植物叶片富集和释放气态汞的规律和生物学机制，对秋茄（*Kandelia obovata*）、白骨壤（*Avicennia marina*）和桐花树（*Agiceras corniculatum*）三种红树植物幼苗进行急性（14h）高浓度（100ppm）的 Hg^{2+} 胁迫实验，测定三种植物叶片与大气之间气态汞交换通量的昼间变化，同时对秋茄、白骨壤、桐花树的光合作用指标和各部位汞含量进行测定。此外，对代表性非泌盐植物秋茄和代表性泌盐植物白骨壤进行了不同浓度（1ppm、5ppm、10ppm、50ppm、100ppm）的 5d 汞胁迫实验，测定叶片汞交换通量、生理生态特征和 Hg^{2+} 在植物根尖和叶片的亚细胞分布，研究汞交换通量与红树植物生理生态特征的关系，结果表明：

- 1、对照组秋茄、白骨壤和桐花树叶片多表现为对大气汞的吸收，而 100ppm 汞胁迫组植物叶片均表现为释放汞，释汞通量大小的顺序为：白骨壤>桐花树>秋茄。三种红树植物叶片气态汞释放通量的昼间变化规律不相同，秋茄、白骨壤幼苗叶片气态汞的释放表现为双峰型曲线，但它们的释汞通量峰值出现的时间不同；桐花树叶片对气态汞的释放表现为单峰型曲线，峰值出现在 15:00 时。
- 2、植物生理生态活动直接影响红树植物与大气的汞交换。蒸腾作用、气孔开合以及植物体内 Hg^{2+} 还原酶的活性都能影响红树植物叶片释放气态汞；其次，光照和温度也是促进植物释放气态汞的主要因素。秋茄、白骨壤和桐花树叶片气态汞的释放规律与各自净光合速率（ P_n ）的变化基本一致，释汞通量的峰值与净光合速率的峰值出现在同样的时间；叶片的释汞通量随温度升高而增加，当温度最高时，叶片的释汞通量达到峰值。
- 3、100ppm 汞胁迫后，三种红树植物的净光合速率均低于各自的对照植物，但昼间变化规律不同，秋茄对照组和胁迫组的净光合速率曲线均为单峰型，峰值出现在 13:00；白骨壤对照组为单峰型曲线，胁迫后变为双峰型曲线；桐花树幼苗对照组和胁迫组均表现为双峰型曲线，峰值出现在 11:00 和 15:00，其中胁迫后的白骨壤幼苗和桐花树幼苗均有“午休”现象。影响秋茄

和桐花树光合作用的可能是非气孔因素；白骨壤光合作用的限制因素可能是气孔因素。高 Hg^{2+} 胁迫 12h 后三者的叶绿素含量均有下降，加速了红树叶片的衰老。

- 4、三种植物各部位总汞含量大小为：根>茎>叶，表明根是这三种红树植物幼苗富集汞的主要部位。其中白骨壤幼苗的根汞含量最高，三种红树植物幼苗根部的汞含量与叶片释放气态汞通量有极显著正相关关系，茎部和叶部的汞含量也与叶片释汞通量显著相关。
- 5、不同浓度汞溶液对白骨壤和秋茄 5d 胁迫，两种红树植物都表现出对汞的释放。中高浓度（10ppm、50ppm、100ppm）胁迫下的红树植物叶片释汞通量高于低浓度（1ppm、5ppm）胁迫。白骨壤和秋茄幼苗叶片释汞通量与各部位根、茎、叶中 Hg 含量均显著相关。
- 6、汞可以抑制白骨壤叶片的光合活性，随着胁迫时间的增加，叶片净光合速率、叶绿素含量降低。气孔是中低浓度汞（1ppm、5ppm）胁迫下抑制白骨壤幼苗光合作用的主要因素，而高浓度汞胁迫下抑制白骨壤幼苗光合作用的因素是由气孔和其他因素（如叶肉光合能力、1,5-二磷酸羧化酶（Rubisco）活性与含量等因素）共同作用。低浓度汞胁迫对白骨壤幼苗叶片 SOD、POD 活性有一定的促进作用，高浓度则表现为抑制作用。
- 7、Hg 在秋茄叶片和根尖亚细胞各组分布均为：可溶部分>细胞壁>细胞器>细胞膜，而且随着胁迫浓度和胁迫时间的增加，各组中汞含量也增加，说明液泡区域化和细胞壁的 Hg 沉淀是秋茄对重金属的解毒、耐性和富集的主要方式。根尖亚细胞中的 Hg 含量高于叶片亚细胞，且均远远大于对照细胞组分中的汞含量。

关键词：红树植物；气态汞；光合作用；抗氧化酶活性；亚细胞分布

Abstract

Mangrove species showed high accumulation abilities of Hg, and there was a frequent exchange of mercury between mangrove leaves and atmosphere. In order to study the biology mechanisms and variation law of enrichment and release of atmospheric Hg of mangrove species, designing the experiments of Hg²⁺ stress on three mangrove species that was *Kandelia obovata*, *Avicennia marina* and *Agiceras corniculatum*. The experiments focus on two topics: The seedlings of *Kandelia obovata*, *Avicennia marina* and *Agiceras corniculatum* were stressed by High concentration (100ppm) for 14 hours and another experiment that salt-rejecting plant *Kandelia obovata* and salt-secreting plant *Avicennia marina* were stressed by Hg²⁺ of different concentrations (1, 5, 10, 50, 100ppm) for 5 days. To measure the diurnal changes of Hg fluxes between mangrove leaves and atmosphere, photosynthesis parameters of mangroves seedlings, the total mercury (Hg) concentrations in different organs and sub-cellular distribution of Hg in root and leaves of *Kandelia obovata*. Some conclusions were drawn as follows:

1. Atmospheric Hg was absorbed by the control group of mangrove leaves, while stressed group of three mangrove seedlings by 100ppm Hg²⁺ showed a release of Hg from leaves, and a variety of mangrove plants on the release flux of atmospheric mercury in the order are: *Avicennia marina* > *Agiceras corniculatum* > *Kandelia obovata*. Leaves of three mangrove species in diurnal variation of atmospheric mercury emissions were not the same: *Avicennia marina* and *Kandelia obovata* showed double peak curve but the first peak occurred at different time; while there was only one peak of *Agiceras corniculatum* and the peak occurred at 15:00.
2. The physiological and ecological activities of mangroves can directly affect Hg exchange of plants and atmosphere. Transpiration, stomatal opening and closing and activities of Hg²⁺ reductase influenced Hg emissions of mangrove species, what's more, light and temperature can also promote release of Hg. Law of release of atmospheric Hg of *Kandelia obovata*, *Avicennia marina* and *Agiceras corniculatum* was the same with changes of their net photosynthetic rate. The peak of flux of atmospheric Hg and P_n occurred at the same time, while the flux of Hg

emission of leaves was increased with temperature heading up, and the flux of mercury release in the peak when temperature was highest.

3. Net photosynthetic rates of three mangrove species stressed by Hg^{2+} (100ppm) were lower than their respective control plants. The diurnal variation curve of net photosynthetic rate had only one peak of both control and stressed group of *Kandelia obovata*, and the peak was at 13:00. *Avicennia marina* had a different law that the curve of P_n had two peak occurred at 13:00 and 17:00 under stressed by Hg^{2+} , while there was one peak at 13:00 under control. The diurnal variation curve of net photosynthetic rate had two peak of both control and stressed group of *Agiceras corniculatum*, and the peak was at 11:00 and 15:00. There was a midday depression of seedlings of *Avicennia marina* and *Agiceras corniculatum* under Hg^{2+} stress. P_n had an opposite trend with intercellular carbon dioxide concentration (C_i) so that photosynthesis of *Kandelia obovata* and *Agiceras corniculatum* seedlings may be affected by non-stomatal factors, while the diurnal variation of P_n was the same with C_i so that the inhibition of photosynthesis of *Avicennia marina* seedlings was mainly caused by stomatal activities. Chlorophyll content decreased after Hg^{2+} treatment because of Hg^{2+} can accelerate the velocity of leaf ageing.
4. Roots of mangrove seedlings were main organ of accumulation of mercury. Total mercury concentrations in the different organs of mangroves in the order were: root>stem>leaf, and root of *Avicennia marina* had the highest mercury content. The statistics analysis showed a significant positive correlation between total Hg content of root and Hg fluxes of leaf release of mangrove species, and total Hg content of stem and leaf also had a positive related with Hg fluxes of leaf release.
5. *Avicennia marina* and *Kandelia obovata* showed a release of atmospheric Hg after different concentration of Hg^{2+} for 5 days. The flux of atmospheric Hg emissions of mangrove under middle and high Hg^{2+} stress (10, 50, 100ppm) was much higher than that stressed by low Hg^{2+} concentration (1, 5ppm). There were positive correlations among the flux of atmospheric Hg emissions, the content of total Hg in root, stem and leaves, while Hg emissions of *Avicennia marina* and total Hg content in root and leaf had a significant positive correlation, as well as flux of atmospheric Hg emissions of *Kandelia obovata* and total Hg content in root and stem.

6. Hg can inhibit the activities of Photosynthesis so that net photosynthetic rate and chlorophyll content of *Avicennia marina* decreased with the extended cultivation time and increase of Hg concentrations,. Under low concentrations of Hg, photosynthesis of *Avicennia marina* seedlings may be affected by stomatal activities, while the inhibition of photosynthesis under high concentration of Hg was mainly caused by non-stomatal factors. Low concentrations of Hg promoted SOD and POD activities while high concentrations of Hg inhibited that.
7. Results of distribution of Hg in sub-cellular of *Kandelia obovata* leaves and root were as follows: soluble component >cell wall ingredient >organelle ingredient >membrane ingredient, and it was concluded that Hg was mainly adsorption in soluble component and cell wall of sub-cellular of *Kandelia obovata* leaves and root. Content of Hg in sub-cellular of root was higher than that of leaves, and the accumulation content of Hg was enhanced by the increasing strength of Hg treatment and time.

Keywords: mangroves; atmospheric mercury; photosynthesis; antioxidase activity; subcellular distribution

目 录

摘 要	I
ABSTRACT	III
目 录	VI
CONTENT	IX
第一章 绪论	1
1 大气汞的生物地球化学行为及植物对大气汞的吸收和释放	1
1.1 大气汞的污染来源	1
1.2 大气汞的污染特征	2
1.3 植物对大气汞的吸收和释放	2
2 汞污染对植物生理生态的影响	4
2.1 汞污染对植物幼苗生长和发育的影响	4
2.2 汞污染对植物生理生化和细胞结构的影响	4
3 选题意义	5
第二章 急性 (14H) 高强度汞胁迫条件下红树叶片与大气之间的汞交换	7
1 材料与方法	7
1.1 供试植物与试验设计	7
1.1.1 供试植物	7
1.1.2 三种红树植物叶片气态汞交换通量的测定	7
1.2 主要试剂与仪器	8
1.3 试验方法	8
2 结果与讨论	10
2.1 高汞胁迫三种红树幼苗叶片与气态汞交换的昼间变化及其影响因素	10
2.1.1 秋茄幼苗叶片释汞通量的昼间变化	11
2.1.2 白骨壤幼苗叶片释汞通量的昼间变化	12
2.1.3 桐花树幼苗叶片释汞通量的昼间变化	13
2.2 高汞胁迫三种红树植物幼苗光合作用的昼间变化	16
2.2.1 秋茄幼苗光合作用昼间变化	16

2.2.2 白骨壤幼苗光合作用昼间变化·····	17
2.2.3 桐花树幼苗光合作用昼间变化·····	18
2.2.4 高汞胁迫三种红树幼苗叶片的叶绿素含量·····	21
2.3 三种红树幼苗根茎叶的总汞含量·····	22
2.4 相关性分析·····	24
第三章 不同浓度汞胁迫对白骨壤和秋茄叶片汞交换和生理生态特征的影响·····	27
1 材料与方法·····	27
1.1 供试植物与试验设计·····	27
1.2 主要试剂和试验器材·····	28
1.3 试验方法·····	29
2 结果与讨论·····	31
2.1 不同浓度汞胁迫对白骨壤幼苗叶片汞交换的影响和生理生态响应·····	31
2.1.1 白骨壤幼苗叶片与大气汞交换的特征·····	31
2.1.2 白骨壤幼苗各部位的汞含量·····	33
2.1.3 不同浓度汞胁迫对白骨壤幼苗生理生态的影响·····	35
2.1.3.1 白骨壤幼苗净光合速率、气孔导度和胞间二氧化碳浓度的变化·····	35
2.1.3.2 汞胁迫对白骨壤幼苗叶绿素含量的影响·····	37
2.1.3.3 汞胁迫对白骨壤幼苗抗氧化酶活性的影响·····	38
2.1.3.4 相关性分析·····	40
2.2 不同浓度汞胁迫对秋茄幼苗叶片汞交换的影响和汞在亚细胞组分的分布·····	43
2.2.1 秋茄幼苗叶片与大气汞的交换特征·····	43
2.2.2 秋茄幼苗各部位汞含量·····	44
2.2.3 汞在秋茄幼苗叶片和根尖亚细胞的分布特征·····	46
第四章 结论·····	50
参考文献·····	52
致谢·····	61

Content

Abstract (in Chinese)	I
Abstract (in English)	III
Chapter1: Introduction	1
1 Biogeochemical behavior of atmospheric mercury and absorption and release of atmospheric mercury of plants.	1
1.1 Sources of atmospheric mercury pollution	1
1.2 Characteristics of atmospheric mercury pollution	2
1.3 Absorption and release of atmospheric mercury of plants	2
2 Effect of Hg pollution on some eco-physiological indexes of plants	4
2.1 effect of Hg pollution on the growth and development of plants.....	4
2.2 effect of Hg pollution on physiological and biochemical character and cell structure of plants.....	4
3 Background and study purpose	5
Chapter 2: Flux of atmospheric mercury between atmosphere and leaves of mangrove species under high concentration Hg²⁺ and acute time (14h) stressed	7
1 Materials and methods	7
2 Results and discussion	10
2.1 Exchange of atmospheric mercury between mangroves and atmosphere and controlling factors under high Hg stress.....	10
2.1.1 Diurnal variation of atmospheric Hg exchange between <i>Kandelia obovata</i> and atmosphere.....	11
2.1.2 Diurnal variation of atmospheric Hg exchange between <i>Avicennia marina</i> and atmosphere.....	12
2.1.3 Diurnal variation of atmospheric Hg exchange between <i>Agiceras corniculatum</i> and atmosphere.....	13
2.2 Diurnal variations of Photosynthesis of three mangrove species under high Hg ²⁺ stress.....	16
2.2.1 Diurnal variations of Photosynthesis of <i>Kandelia obovata</i>	16
2.2.2 Diurnal variations of Photosynthesis of <i>Avicennia marina</i>	17
2.2.3 Diurnal variations of Photosynthesis of <i>Agiceras corniculatum</i>	18

2.2.4 The chlorophyll contents of three mangrove species	21
2.3 The mercury content of three mangrove species organs under 100ppm Hg ²⁺ stress	22
2.4 Correlation matrix of indicators and atmospheric Hg flux	24
Chapter 3: Flux of atmospheric Hg between atmosphere and leaves of mangrove species under different concentration Hg²⁺ and impacts of mercury stress on ecophysiology	27
1 Materials and methods.....	27
2 Results and discussion.....	31
2.1 Exchange of atmospheric Hg between atmosphere and leaves of Avicennia marina under different concentration Hg ²⁺ and impacts of mercury stress on ecophysiology	31
2.1.1 Exchange of atmospheric mercury between Avicennia marina and atmosphere under different Hg ²⁺ concentration stress	31
2.1.2 The mercury content of Avicennia marina organs	33
2.1.3 Impacts of mercury stress on Avicennia marina seedlings ecophysiology...	35
2.1.3.1 Effect of Hg on Pn, Gs and Ci of Avicennia marina seedlings.....	35
2.1.3.2 Effect of Hg on the chlorophyll a b content of Avicennia marina seedlings.....	37
2.1.3.3 Effect of Hg on antioxidase activities of Avicennia marina seedlings	38
2.1.3.4 Correlation matrix of Photosynthesis indicators and Antioxidase activity.....	40
2.2 Exchange of atmospheric mercury between Kandelia obovata and atmosphere under different Hg ²⁺ concentration stress and subcellular fractions of Kandelia obovata.....	43
2.2.1 Hg stress on Kandelia obovata's atmospheric Hg flux in different times.....	43
2.2.2 The mercury content of Kandelia obovata organs.....	44
2.2.3 Hg distribution in subcellular fractions of Kandelia obovata.....	46
Chapter 4 Conclusion	50
References	52
Acknowledgement.....	61

第一章 绪论

汞是一种特殊的具有生物毒性的重金属，经生物富集和食物链放大后对人体健康产生严重的危害。气态元素汞 (Hg^0) 能够随大气循环并长时间远距离迁移沉降，使陆生生态系统受到污染，因此大气汞的污染研究成为学术界关心的热点之一 (Lanborg *et al.*, 1994)。植物作为陆地生产系统的第一生产者，对整个生态系统的发展有重要作用，植物可以从大气、大气干湿沉降、土壤、水等多种来源累积汞 (刘汝海等, 2004)。因此，汞在植物生态系统中的循环机制和大气与植物生态系统的汞交换的研究，对于解决汞的全球生态环境问题有非常重要的意义。

1 大气汞的生物地球化学行为及植物对气汞的吸收和释放

由于可以随大气进行长距离传输，汞被公认为“全球性污染物” (Hansen & Danscher, 1997)。大气汞循环是汞全球循环的重要组成部分。

1.1 大气汞的污染来源

大气汞主要来自自然释放，人为释放和沉降汞的再释放过程。

汞在自然界分布极广，自然释放汞进入大气的过程包括地球的去气作用、火山活动、地热活动及土壤表面的释放。另外，水体、植物表面的自然释放及森林火灾也是大气汞的重要来源 (Nriagu, 1989; Lindqvist *et al.*, 1991)。自然释放汞过程向大气排放的汞主要以气态单质汞为主 (Schroeder & Munthe, 1998)，气态单质汞在大气中的驻留时间长达 0.5~2a，并随大气循环在全球尺度上传输使得大气成为不同环境介质中汞迁移转化的重要传输通道。由于大气汞的来源很多且影响因素复杂，其中气候条件的影响较为显著 (童银栋等, 2010)，因此目前已有的全球汞生物地球化学模型对自然源大气汞的估算偏差较大，从 1000~4000t 不等 (Mason, 1994, 2002; Lamborg *et al.*, 2002)。人为释放汞源有城市垃圾和医疗垃圾焚烧、氯碱生产、燃煤、金属冶炼和炼汞活动等，人为汞释放源不仅向大气排放气态单质汞，还排放相当数量的居留时间短的活性气态汞和颗粒态汞。Mason 等 (1994) 估计，全球约有 70% 的汞来自于人为

活动释放，剩下的三分之一来自于自然源。大气汞沉降后的再释放也是大气汞的一个重要来源。大气汞的沉降主要以化学活性较强的 Hg^{2+} 为主，在太阳辐射和还原性条件的作用下，大量沉降的 Hg^{2+} 还原为 Hg^0 后重新释放到大气中（冯新斌等, 2009）。

1.2 大气汞的污染特征

大气汞包括气态总汞和颗粒态汞。颗粒态汞既包括颗粒物表面的挥发性汞（如 HgO 和 HgCl_2 ），也包括颗粒物结合的 HgO ， HgS 等。气态总汞占大气总汞的 95%，可分为原子态汞和活性气态汞（RGM）。 Hg^0 可以长距离传输，停留时间长且参与全球汞循环； Hg^+ 易与颗粒物结合在源附近沉降；气态 Hg^{2+} 易溶于水，并随着雨雪降至地面，不同形态的汞可以互相转化。虽然活性汞在气态汞中所占的比例很小，但是由于其水溶性和相对活泼的化学性质成为大气汞干、湿沉降的主要贡献者，其含量直接影响大气汞干湿沉降的速度，是衡量大气汞对地面生态系统影响的重要因素（商立海等, 2003）。

不同于其他重金属，汞在一定程度上可以通过大气进行循环。大气-植物之间存在汞交换，据估计，全球森林向大气释放的汞为 850~2000t/a（Lindberg *et al.*, 1998），其中热带森林约占了 50% 以上。植物体内的汞通过自然生长、森林砍伐或者森林火灾等过程释放到大气中。

1.3 植物对大气汞的吸收和释放

叶片是植物与大气进行汞交换的主要器官，这一过程是动态的双向过程，叶片既可以吸收汞，也可以释放汞。决定交换进行方向的因素主要是大气汞的含量、土壤汞含量，植被类型及各种气象条件。

植物从环境中吸收汞的渠道主要是土壤和大气。主要有以下方式：通过根部从土壤和土壤溶液中吸收和富集离子态汞、原子态汞和甲基汞（Bishop & Lee, 1998; Cocking *et al.*, 1995）；叶片气孔直接吸收大气中的元素汞（刘汝海等, 2003）；颗粒汞和活性汞可以沉降到叶片，并被植物吸收（Rea *et al.*, 2001）；叶片从大气降水中吸附汞（Xiao *et al.*, 1998）。大气-叶片之间的汞交换占植物对环境中汞输入输出的主导地位（Ferrara *et al.*, 1991）。

植物叶片是富集汞的重要器官。部分农作物和蔬菜如辣椒、黄瓜、玉米等植物的叶片是汞含量最高的器官（刘德绍等, 1999; 刘玉荣, 2007），刘汝海等

(2004) 研究发现三江平原湿地植物的叶片中汞含量较高, 主要是由于叶片表面气孔比茎多, 有较强的吸收气态汞的能力。在生长季中冷杉和白云杉的针状叶中汞含量也增加了两倍以上 (Rasmussen, 1995)。植物可以直接吸收大气中的 Hg^0 , 因此一些植被覆盖区域, 沉降所占比例可能会升高, 甚至占到总沉降通量的 90% 以上 (Poissant *et al.*, 2005)。汞的沉降速率还取决于环境条件和地表类型, 森林生态系统很大程度上增加了大气汞的湿沉降通量, 这是因为植被叶片所吸附的大量颗粒汞和活性气态汞会随着降雨被冲刷进入地表生态系统 (冯新斌等, 2009), 如付学吾等 (2008) 对贡嘎山地区研究发现森林地区大气汞的湿沉降通量约是空旷地区的 2-3 倍。

植物叶片与大气汞的交换是一个动态过程, 高浓度大气汞的条件下, 直接导致叶面吸收大气汞使植物体内富集汞 (冯新斌等, 2009), 即大气汞浓度高的地区, 大气汞较土壤汞是植物更为重要的汞源, 例如我国贵州矿区天然生长的苔藓总汞含量高且与近地表大气汞浓度呈正相关关系 (梁鹏等, 2008); 李志博等 (2003) 也曾报道当空气中汞含量为 $0.020\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 时植物从空气中吸收汞, 当空气中汞含量为 $0.002\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 时植物释放汞。补偿点的发现 (Hanson *et al.*, 1995) 也支持了这一观点, 大气汞浓度高于补偿点时, 植物吸收汞, 低于补偿点时植物释放汞。Ericksen 等 (2003) 研究发现, 大气汞浓度高时, 植物是大气汞的汇, 而大气汞浓度低时, 植物是大气汞的源。叶片与大气交换的双向过程也具有高度的物种依赖性 (Ericksen *et al.*, 2004; Lodenius *et al.*, 2003, 2004; Ludwig *et al.*, 2001), 刺槐、高秆草原等植物主要以大气汞的沉降吸收为主 (Gustin *et al.*, 2008a; Fay *et al.*, 2007), 部分北方森林植物和一些果树以释放汞为主 (刘德绍等, 2001)。植物对大气汞的释放主要与它的生理生态活动有关, 蒸腾作用、气孔开合、植物体内 Hg^{2+} 与 Hg^0 的转换机制等都是影响植物叶片向大气释放汞的因素, 其他影响叶片释放汞的因素还有树叶的温度、树叶表面条件 (干或湿)、土壤 Hg^0 含量、大气氧化物含量以及叶片或树的年龄等 (Leonard, 1998)。Lindberg 等 (1998) 测定阔叶林和针叶林向大气的释汞通量, 研究表明阔叶林和针叶林顶部均表现出向大气强烈的释汞; 对湿地植物的研究也同样发现植物是大气汞的重要来源 (Zhang & Lindber, 2000)。Leonard 等 (1998a,b) 研究也发现植被在白天的释汞量比夜晚高一个数量级。植被显著的汞释放不仅代表了汞在植物中的传输途径, 也代表了植物向大气对流层的自

然释汞或再释汞 (Lindberg *et al.*, 1998)

2 汞污染对植物生理生态的影响

2.1 汞污染对植物幼苗生长和发育的影响

汞是植物生长的非必需有毒元素，极易经大气、水源和土壤进入植物体内。植物对汞有较强的生物富集效应 (Pergent, 1998; 蒋蓉芳等, 2000)，当植物体中汞浓度达到一定限值时就会抑制植物的生长 (Jordan, 1990)。有机汞、无机汞化合物和汞蒸气，都会引起植物汞中毒，而有机汞对植物生长的抑制作用比无机汞大得多，主要影响植物根系的新陈代谢 (付学吾等, 2005)。长期积累的汞能够抑制光合作用，干扰水分和矿质代谢，抑制酶活性，从而使植物出现生长迟缓、叶片枯萎、产量下降等症状，严重时导致植物死亡 (Zenk, 1996)。陈秀启 (1995) 研究发现培养基中汞离子浓度达到500ppm以上时，烟草的生长发育全被抑制；孔祥生 (1999) 等试验测得随着汞浓度的增加，小麦幼苗的生长受到抑制；康丽峰 (2009) 等用不同浓度汞胁迫秋茄幼苗生长也发现随着土壤汞浓度增高，秋茄幼苗生长发育迟缓并有萎焉现象，干物质积累也逐渐降低。马成仓等 (1999) 利用不同浓度 HgCl_2 溶液对大豆种子进行砂培试验研究，结果表明：0.05mmol/L HgCl_2 对大豆幼苗的生长发育无明显影响，大于0.1mmol/L时，大豆幼苗生长速率减慢，根系活力也明显下降。通常的植物对汞毒害并不十分敏感，在一般污染情况下植物都未能表现出汞的毒害症状，但此时植物体往往已富集了较高水平的汞，这对主要靠陆生食物链生活的人类来说，是一个非常严重的问题 (牟树森和青长乐, 1997)。

2.2 汞污染对植物生理生化和细胞结构的影响

汞对植物细胞膜抗氧化酶系统有严重影响，也会破坏线粒体、叶绿体和细胞核结构的完整性 (尤文鹏等, 1999)。高等植物汞暴露，使叶片光合作用和蒸腾作用减弱，叶绿素合成和吸水能力降低 (Godbold & Huttermann, 1986)。曾斌等 (2008) 研究表明 Hg^{2+} 可以加快水稻叶绿素的分解速率，并且影响叶绿素酶合成的活性，造成叶绿素含量降低；李大辉等 (1999) 用不同浓度 Cd^{2+} 、 Hg^{2+} 处理菱 (*Trapa bispinosa*) 幼苗，发现两种离子的各处理浓度均抑制菱幼苗生长。因此汞能抑制植物的光合作用，造成光合产物短缺，使植物生长受阻，

Degree papers are in the "[Xiamen University Electronic Theses and Dissertations Database](#)". Full texts are available in the following ways:

1. If your library is a CALIS member libraries, please log on <http://etd.calis.edu.cn/> and submit requests online, or consult the interlibrary loan department in your library.
2. For users of non-CALIS member libraries, please mail to etd@xmu.edu.cn for delivery details.

厦门大学博硕士论文摘要库