

贵州万山汞矿区苔藓植物对汞的吸附和富集特征

张来^{1,2}, 张显强¹, 孙敏^{1*}

(1. 西南大学生命科学学院, 三峡库区生态环境教育部重点实验室, 重庆市三峡库区植物生态与资源重点实验室, 重庆 400715; 2. 安顺学院化学与生物农学系, 安顺 561000)

摘要:在所设定的贵州万山汞矿区调查范围内, 有6种苔藓植物, 其中常见种为东亚褶叶藓和大羽藓。结果表明, 苔藓能高度富集汞, 东亚褶叶藓和大羽藓的汞含量随污染源距离和相对高度的增加而降低; 不同苔藓对汞的吸附等温线具共同性, 吸附量随平衡液浓度的增加而增大, 东亚褶叶藓对 Hg 的吸附量比大羽藓大, 吸附特征都能用 Liner、Freundlich 和 Langmuir 方程很好地拟合, 其中以 Langmuir 方程的拟合效果最佳 ($R=0.9926$ 和 $R=0.9769$), 吸附量分别为 $356.24 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 和 $236.72 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 。吸附动力学特征表明, 苔藓吸附量随浓度的升高而增加, 在 0.5 h 内迅速增加, 到 2 h 时基本达到最大吸附量, 其后基本不变。

关键词:贵州万山汞矿区; 东亚褶叶藓; 大羽藓; 吸附和富集; 汞污染

中图分类号: X173 **文献标识码:** A **文章编号:** 0250-3301(2011)06-1734-06

Study on the Characteristics of Adsorption and Enrichment of Mercury by the Mosses in Mining Districts in Wanshan Guizhou

ZHANG Lai^{1,2}, ZHANG Xian-qiang¹, SUN Min¹

(1. Key Laboratory of Eco-Environments in Three Gorges Reservoir Region (Ministry of Education), Chongqing Key Laboratory of Plant Ecology and Resources Research in Three Gorges Reservoir Region, School of Life Science, Southwest University, Chongqing 400715, China; 2. Department of Chemistry and Bio-agronomy, Anshun College, Anshun 561000, China)

Abstract: Six mosses in Hg mining district of Wanshan, Guizhou, including *Palamocladium sciureum* (Mitt.) Broth and *Thuidium cymbifolium* (Doz. et Molk.) B. S. W., were sampled to study their adsorption and accumulation of mercury (Hg). The results showed that the mosses could enrich Hg, and Hg concentrations of *P. sciureum* and *T. cymbifolium* were decreased with the augmentation of the pollution-source distance. The mosses have commonness in the adsorption isotherm for Hg and the adsorption quantity increased with the density of the equilibrium solution. The adsorption quantity of *P. sciureum* was higher than that of *T. cymbifolium*. The adsorption characteristics fit well with the Liner equation, Freundlich equation and Langmuir equation, and the best fitting was Langmuir equation ($R=0.9926$ and $R=0.9769$). The adsorption quantity of *P. sciureum* and *T. cymbifolium* were $356.24 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ and $236.72 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ respectively. The adsorption kinetic characteristics showed that the adsorption quantity increased with the augmentation of Hg density. The adsorption increased fast in the initial 0.5 h and reached the maximum adsorption at 2 h. The mathematic model showed that the Exponent equation and Elovich equation could commendably fit the Hg adsorption dynamics of *P. sciureum* and *T. cymbifolium* ($R=0.9541$ and $R=0.9996$).

Key words: mercury mining Guizhou; *P. sciureum*; *T. cymbifolium*; enrichment and adsorption; mercury contamination

贵州万山汞矿储量居全国第一, 已探明汞的储量为4万t, 约占全国的80%^[1]。同时贵州万山汞矿的开采活动所造成的“三废”直接排放于自然环境中, 日积月累, 对生态环境造成了严重的破坏^[2], 对当地的生态系统及居民的身体健康造成了巨大的影响。

苔藓植物在生态系统有着十分重要的作用, 能忍受恶劣的环境条件, 苔藓植物不仅能指示环境中的各种污染物, 而且能富集重金属和净化大气环境^[3~8], 有关这方面的研究已经取得了很大的进展, 但利用苔藓植物对贵州万山汞矿的吸附和富集的研究鲜见报道^[9~18]。本研究通过对贵州万山汞矿区苔藓植物的种类、生长状况和分布特征进行调查, 并定量分析优势苔藓植物中 Hg 的含量和特性; 利用苔

藓植物对环境污染指示和富集汞的特性, 选择优良的敏感性和耐受性较强的苔藓植物种类, 以期万山汞矿区生态环境恢复提供指示生物修复材料。

1 材料与方法

1.1 样点设置与调查内容

选择具有代表性的万山汞矿区一坑、二坑、四坑、五坑和六坑为苔藓植物的生物监测点, 调查苔藓植物的种类组成、群落覆盖度、频度、生长状况和生

收稿日期: 2010-07-11; 修订日期: 2010-09-26

基金项目: 三峡库区生态环境与生物资源省部共建国家重点实验室开放基金项目 (SKL-2010-03)

作者简介: 张来 (1977~), 男, 博士研究生, 副教授, 主要研究方向为资源植物, E-mail: zhanglai1977725@126.com

* 通讯联系人, E-mail: jwscm@swu.edu.cn

长基质等. 在调查的基础上, 确定区内占有明显优势的大羽藓 *Thuidium cymbifolium* (Doz. et Molk.) B. S. M 和东亚褶叶藓 *Palamocladium sciureum* (Mitt.) Broth 为实验材料.

1.2 样品处理与分析

苔藓样品用自来水清洗 4 次, 除去泥土、浮尘和枯枝等杂物. 用去离子水冲洗 3 次, 置于 60℃ 烘箱内烘干. 烘干的样品粉碎后, 储存于袋内备用. 大气中汞含量的测定方法采用文献 [19] 的方法; 样品中 Hg 含量测定用 HNO₃-H₂SO₄-V₂O₅ 消煮, 消煮液用 F732-G 型测汞仪测定^[20].

1.3 吸附特性实验

1.3.1 等温吸附-解吸实验

称取 6 份干样品, 每份 1.0 g, 分别置于 6 个 100 mL 烧杯中, 依次加入质量浓度分别为 0、1、10、50、100、200 mg·L⁻¹ 的 Hg 溶液 (HgCl₂) 100 mL, 重复 3 次. 在室温下培养培养吸附 2 h, 根据上清液与处理溶液的元素浓度, 按下式计算 Hg 吸附量^[21]:

$$S = \frac{c_0 - c_1}{m} V_0$$

式中, S 为平衡时苔藓吸附的 Hg (mg·kg⁻¹), c_0 为初始加入的标液浓度 (mg·L⁻¹), c_1 为平衡液中的 Hg (mg·L⁻¹), V_0 为加入的标液体积 (mL), m 为苔藓样重 (g). 计算出吸附量后, 分别用以下方程拟合吸附等温线.

Liner 方程: $X = Kc$

式中, X 为 Hg 元素吸附量 (mg·kg⁻¹), K 为常数, c 为平衡液元素浓度 (mg·L⁻¹).

Langmuir 方程: $\frac{c}{X} = \frac{c}{X_m} + \frac{1}{KX_m}$

式中, X 为 Hg 元素吸附量 (mg·kg⁻¹); X_m 为 Hg 元素最大吸附量 (mg·kg⁻¹); K 为与结合能有关的常数, c 为 Hg 平衡液元素浓度 (mg·L⁻¹).

Freundlich 方程: $\lg X = \lg a + n \lg c$

式中, X 、 c 含义同上, a 、 n 分别为吸附参数和常数.

1.3.2 吸附动力学实验

取 1.0 g 洗净、风干的苔藓实验样品 5 份于 5 个 100 mL 的烧杯中, 分别加入质量浓度为 10、50、100、200 mg·L⁻¹ 的 HgCl₂ 溶液 100 mL, 搅匀, 静置. 室温下浸泡吸附, 分别于 0.5、1、1.5、2、3、4、6、8、12 h 取样, 每次抽取 1 mL 溶液测定 Hg 离子浓度. 按下列方法计算吸附量^[22]. 对吸附过程, 第 1 次采样时被苔藓吸附的 Hg 为:

$$S_1 = \frac{(c_0 - c_1)}{m} V_0$$

式中, c_0 和 V_0 分别为初始加入 Hg 浓度 (mg·L⁻¹) 和体积 (L); c_1 为第 1 次采样时溶液中 Hg 浓度; S_1 为第 1 次采样时被苔藓吸附的 Hg (mg·kg⁻¹); m 为风干苔藓植物的重量 (kg).

由于每次采样都有一定体积的溶液被移走, 因而在计算苔藓吸附的 Hg 时应校正体积. 因此, 每个时段所吸附的 Hg 为:

$$\delta S_i = \frac{(c_{i-1} - c_i)(V_0 - V_{i-1})}{m}$$

式中, δS_i 为每个采样时间段被苔藓植物吸附的 Hg (mg·kg⁻¹); c_{i-1} 和 c_i 分别为前一次采样和本次采样时溶液中 Hg 浓度 (mg·L⁻¹); V_0 含义同前; V 为每次采样的体积.

每次采样时苔藓植物对 Hg 的累积吸附量 S_i 为:

$$S_i = S_{i-1} + \delta S_i$$

通过以上计算, 可得到每种苔藓在不同时刻对不同浓度 Hg 的吸附量.

将计算所得的不同时段苔藓对 Hg 的吸附量用表 1 中的动力学方程进行拟合, 寻求最优方程, 以相关系数 r 判断模型优劣^[23].

表 1 吸附动力学方程¹⁾

Table 1 Equations of adsorption dynamics		
方程名称	方程	简化形式
指数方程	$S_t = a(1 - e^{-bt})$	—
指数 (双常数) 方程	$\lg S_t = \lg a + b \lg t$	$y = a + b \lg t$
Elovich 方程	$S_t = a + b \ln t$	$y = a + b \ln t$
抛物线方程	$S_t/S_n = Rt^{1/2} + c$	$y = a + bt^{1/2}$

1) S_t 为 t 时间内累积吸附 (解吸) 量; S_n 为表现平衡的吸附 (解吸) 量; a 、 b 为动力学方程参数

2 结果与讨论

2.1 万山汞矿区常见苔藓植物种类组成

通过采集, 获标本 60 号, 经鉴定为 6 个种, 即青藓、大羽藓、长柄缩叶藓、卷叶毛灰藓、拟草藓和东亚褶叶藓 (表 2). 其中以东亚褶叶藓和大羽藓占明显优势, 在每个采样点出现频率较高且生长茂盛, 可聚为一类; 长柄缩叶藓和拟草藓在 5 个采样点较常见, 但覆盖度较低, 可聚为一类; 青藓和卷叶毛灰藓只是偶尔出现, 覆盖度很低 (图 1). 因此, 根据调查和统计分析, 选取东亚褶叶藓和大羽藓为研究对象.

2.2 万山汞矿区苔藓植物与大气中 Hg 含量分析
通常认为苔藓中重金属的含量可以反映大气中

表 2 贵州万山汞矿区苔藓植物种类组成

Table 2 Coverage of the moss species in mercury mining district in Wanshan Guizhou

植物名称	覆盖度				
	一坑区	二坑区	四坑区	五坑区	六坑区
青藓 <i>Brachythecium piligerum</i>	1	1	1	1	1
大羽藓 <i>Thuidium cymbifolium</i> (Doz. et Molk.) B. S. D	3	2	3	3	3
长柄缩叶藓 <i>Ptychomitrium longisetum</i> Reim. et Sak.	2	1	3	2	2
卷叶毛灰藓 <i>Hypnum revolutum</i> Lindb	1	2	1	1	2
拟草藓 <i>Pseudoleskeopsis zippellfi</i> (Dory et Molk) Broth.	2	1	2	1	3
东亚褶叶藓 <i>Palamoclaodium sciureum</i> (Mitt.) Broth	3	3	3	3	3

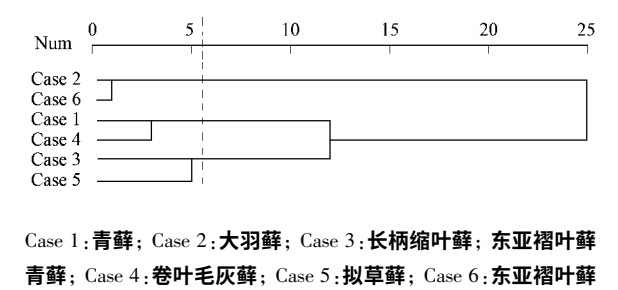


图 1 贵州万山汞矿区苔藓植物聚类分析

Fig. 1 Cluster analysis of the mosses in mercury mining district in Wanshan Guizhou

重金属的污染程度^[24].表 3 表明空气 Hg 与东亚褶叶藓和大羽藓的 Hg 含量具密切的相关性.冶炼厂附近的四坑和六坑,空气中 Hg 含量分别是 440 ng·m⁻³和 680 ng·m⁻³;东亚褶叶藓则分别为 50 mg·kg⁻¹和 95 mg·kg⁻¹,大羽藓为 25 mg·kg⁻¹和 49 mg·kg⁻¹.

表 3 苔藓植物和大气中的汞含量

Table 3 Hg content in moss and air

采样位置	大气汞含量 /ng·m ⁻³	苔藓汞含量/mg·kg ⁻¹	
		东亚褶叶藓	大羽藓
一坑	55	8.5	4.8
二坑	52	8.7	2.6
四坑	440	50	25
五坑	290	11	4.2
六坑	680	95	49

冶炼总厂附近的 50 m 范围内,东亚褶叶藓和大羽藓(以 FW 计,下同)对 Hg 有较强的富集作用,分别达 331.4 mg·kg⁻¹和 241.3 mg·kg⁻¹,距冶炼总厂 800 m 处含量剧降,仅为 25.02 mg·kg⁻¹和 18.24 mg·kg⁻¹,分别降至原含量的 1/13.25 和 1/13.23.距冶炼总厂 10 km 的敖寨乡,汞含量分别为 1.6 mg·kg⁻¹和 0.98 mg·kg⁻¹.以上说明与污染源距离愈远,苔藓汞含量愈低(图 2).冶炼总厂附近距地面

不同高度的的东亚褶叶藓和大羽藓,距地面约 120 cm 杨树树干上,汞含量分别为 50.2 mg·kg⁻¹和 31.7 mg·kg⁻¹,而距地面约 20 cm 处的岩石上,分别为 331.4 mg·kg⁻¹和 241.3 mg·kg⁻¹,分别增加 6.6 和 7.6 倍(图 3);在相差 100 cm 的高度内,汞含量相差极大,主要是由于汞蒸气的比重大于空气,所以随高度的增加,空气中的汞含量快速降低,说明东亚褶叶藓和大羽藓对大气汞污染有明显的耐受性.

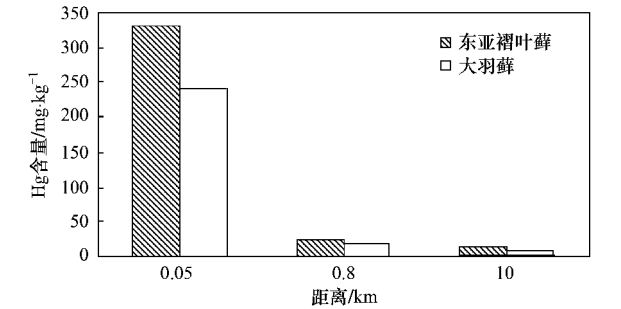


图 2 与冶炼总厂不同距离处大羽藓和东亚褶叶藓中 Hg 的含量

Fig. 2 Hg concentrations in *P. sciureum* and *T. cymbifolium* at different distances near a smeltery

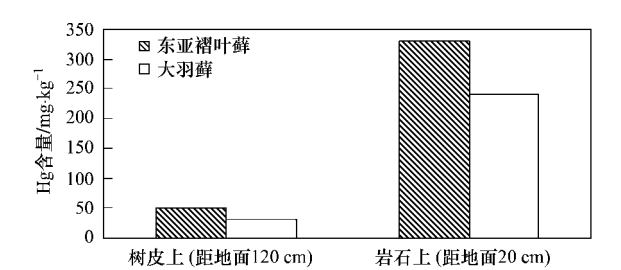


图 3 冶炼厂附近距地面不同位置大羽藓和东亚褶叶藓中 Hg 的含量

Fig. 3 Hg concentrations in *P. sciureum* and *T. cymbifolium* at different locations away from ground

2.3 苔藓植物的吸附-解吸特性

2.3.1 苔藓植物对 Hg 的等温吸附特性

苔藓对重金属元素的吸收是一个快速过程,其机制主要是离子交换和微粒捕获^[25]. 苔藓植物在金属离子溶液中浸泡 2 h 后,对 Hg 的吸附等温线如图 4 和图 5. 东亚褶叶藓和大羽藓对汞的吸附等温线有共性,即平衡液浓度较低时,苔藓植物对 Hg 的吸附量也低,随着平衡液浓度的升高,吸附量增大. 其中,东亚褶叶藓对 Hg 的吸附量比大羽藓的吸附量大. 但在本实验浓度范围内,2 种苔藓植物对 Hg 的吸附都未达到最大吸附量.

用 Liner、Freundlich 和 Langmuir 方程拟合苔藓对 Hg 的等温吸附特征参数,结果见表 4,3 个方程

的相关系数 R 值都达到了显著水平,都能很好地拟合苔藓对 Hg 的吸附,这说明苔藓植物对 Hg 的吸附机制与土壤等对金属离子的吸附机制基本类似. 但 3 个方程中,以 Langmuir 方程拟合苔藓对 Hg 的吸附特征效果最佳 ($R = 0.992\ 6$ 和 $R = 0.976\ 9$),Freundlich 方程次之 ($R = 0.962\ 5$ 和 $R = 0.987\ 2$),Liner 方程最差. 用 Langmuir 方程拟合得到的饱和吸附量数值表明苔藓植物对 Hg 有很强的吸附能力,东亚褶叶藓和大羽藓对 Hg 的最大吸附量分别为 $356.24\ \text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ 和 $236.72\ \text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$.

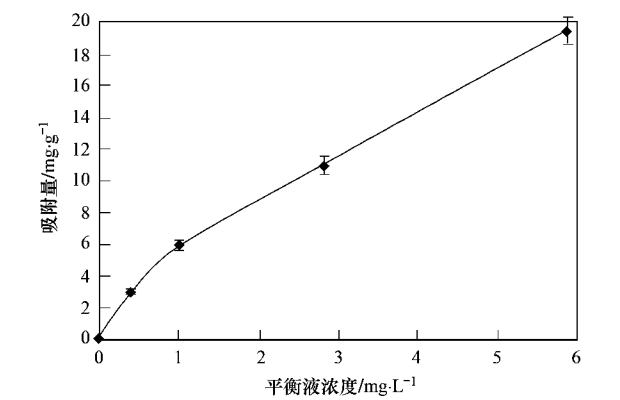


图 4 东亚褶叶藓对 Hg 的吸附等温线
Fig. 4 Hg adsorption isotherm of *P. sciureum*

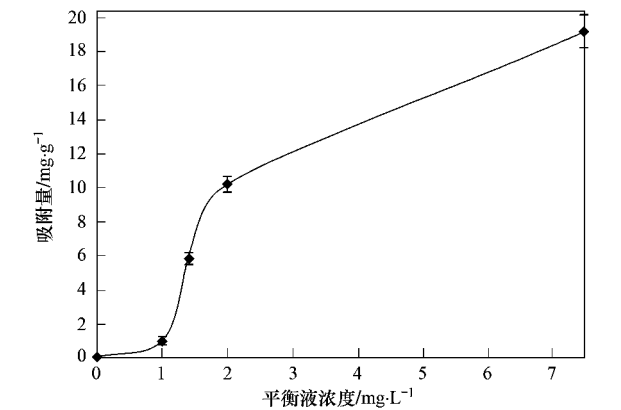


图 5 大羽藓对 Hg 的吸附等温线
Fig. 5 Hg adsorption isotherm of *T. cymbifolium*

表 4 东亚褶叶藓和大羽藓对 Hg 的等温吸附特征参数			
Table 4 Characteristic parameters of Hg isothermal adsorptions of <i>P. sciureum</i> and <i>T. cymbifolium</i>			
物种	Liner 方程 $S = Kc + b$	Freundlich 方程 $S = Kc_n$	Langmuir 方程 $S = S_m c / (c + 1/K)$
东亚褶叶藓	$S = 1.211c + 0.736$ $R = 0.974\ 1$	$S = 2.365c^{0.757}$ $R = 0.987\ 2$	$S = 40.852c / (c + 118.613)$ $R = 0.992\ 6, S_m = 40.852$
大羽藓	$S = 2.109c + 1.229$ $R = 0.976\ 7$	$S = 4.380c^{0.683}$ $R = 0.962\ 5$	$S = 33.625c / (c + 6.414)$ $R = 0.976\ 9, S_m = 33.625$

2.3.2 苔藓植物对 Hg 溶液的吸附动力学特征

由图 6 可知,2 种苔藓对 Hg 的吸附动力学有共性. 在反应初始阶段,即在 0.5 h 内吸附量迅速增加,在 2 h 时基本达到最大吸附量,2 h 以后增加十分缓慢,基本没有变化. 这说明它是一个主动快速过程. 随着 Hg 溶液浓度的升高,吸附量逐渐增加,Hg 溶液浓度为 $10\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,东亚褶叶藓和大羽藓 2 h 的吸附量分别为 $0.50\ \text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ 和 $0.49\ \text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$; Hg 溶液浓度为 $200\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,吸附量分别为 $10.41\ \text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ 和 $10.21\ \text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$,都提高了近 20 倍.

可以认为,苔藓植物吸附 Hg 的过程有 2 个阶段:起始时的快速反应阶段和一段时间后的慢速反应阶段. 东亚褶叶藓吸附 Hg 较大羽藓快,浓度吸附能力高,这可能与它们的生长形态有关:前者分枝较多,网状结构较复杂;苔藓的种类和形态直接影响到对 Hg 的吸收能力. 因为苔藓对金属元素离子的吸收主要取决于多毛分枝结构,这种结构的表面有大量的离子交换位点,能与金属离子发生离子交换^[26]. 2 种苔藓的吸附动力学方程中,以指数(双常数)方程和 Elovich 方程能很好地拟合苔藓对汞的吸附 ($R = 0.954\ 1$ 和 $R = 0.999\ 6$,见表 5).

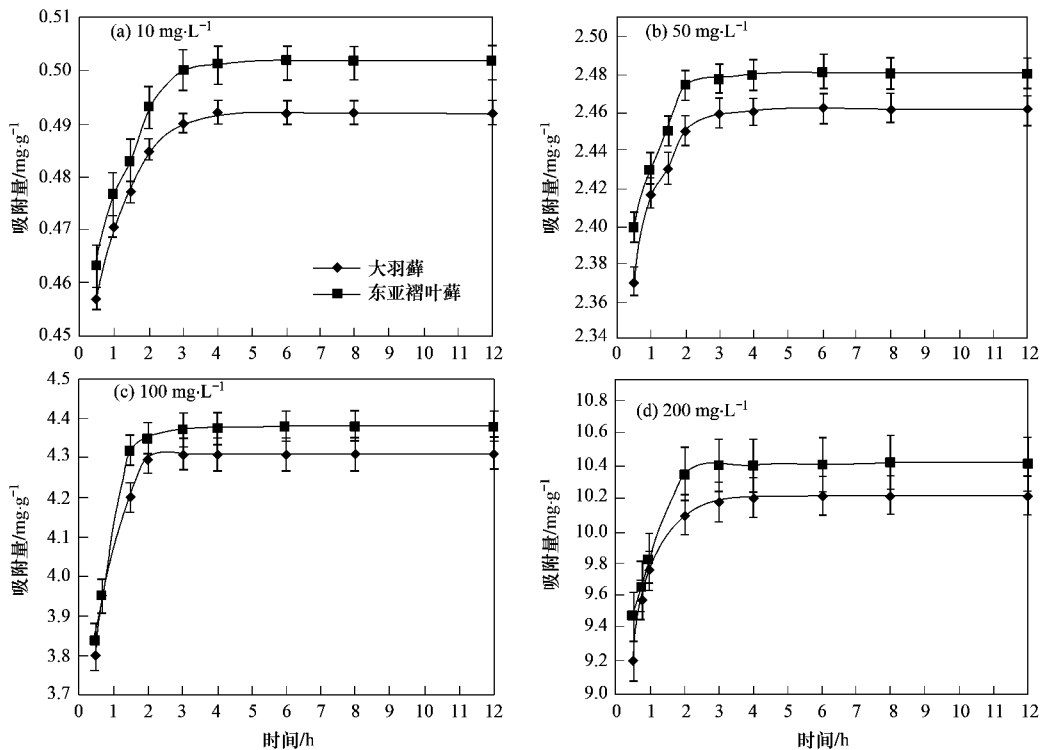


图6 东亚褶叶藓和大羽藓对不同浓度 Hg 溶液的吸附动力学特征

Fig. 6 Adsorption kinetic characteristics for different Hg concentrations by *P. sciureum* and *T. cymbifolium*

表5 东亚褶叶藓和大羽藓对 100 mg·L⁻¹ 汞溶液吸附动力学方程

Table 5 Adsorption kinetic equations for *P. sciureus* and *T. cymbifolium* in 100 mg·L⁻¹ Hg solution

苔藓名称	指数方程 $S_t = a(1 - e^{-bt})$	指数(双常数)方程 $\lg S_t = \lg a + b \lg t$	Elovich 方程 $S_t = a + b \ln t$	抛物线方程 $S_t/S_n = Rt^{1/2} + c$
东亚褶叶藓	$S_t = 3.175(1 - e^{-4.67x})$ $R = 0.6755$	$\lg S_t = 2.997 + 0.137 \lg t$ $R = 0.9996$	$S_t = 2.997 + 0.137 \ln t$ $R = 0.9996$	$S_t = 0.151t^{1/2} + 2.856$ $R = 0.9708$
大羽藓	$S_t = 4.292(1 - e^{-6.08x})$ $R = 0.7281$	$\lg S_t = 4.183 + 0.084 \lg t$ $R = 0.9541$	$S_t = 4.183 + 0.084 \ln t$ $R = 0.9541$	$S_t = 0.0881t^{1/2} + 4.104$ $R = 0.8870$

3 结论

(1) 贵州万山汞矿区所调查范围内,通过采集,获标本 60 个,经鉴定为 6 个种,即青藓、大羽藓、长柄缩叶藓、卷叶毛灰藓、卷叶毛灰藓、拟草藓和东亚褶叶藓。其中出现频率较高、生长较茂盛,具有明显优势的种类为东亚褶叶藓和大羽藓;长柄缩叶藓和拟草藓较为常见,但覆盖度较低;青藓和卷叶毛灰藓只是偶尔出现。

(2) 证实了东亚褶叶藓和大羽藓植物中汞含量与空气中汞含量之间的相关性,其变化规律为随汞源距离的增加而逐渐降低,随高度的增加而下降。

(3) 东亚褶叶藓和大羽藓对 Hg 的吸附等温线具有共性,其吸附量随平衡液浓度的增加而增大,平衡液浓度较低时,对 Hg 的吸附量也较低,平衡液浓

度升高,吸附量随之增大。东亚褶叶藓对 Hg 的吸附量比大羽藓的吸附量大,但在本实验浓度范围内,2 种苔藓对 Hg 的吸附都未达到最大吸附量。

(4) 苔藓植物对 Hg 的吸附动力学在反应起始阶段,0.5 h 内吸附量迅速增加,2 h 基本达到最大吸附量,此后增加十分缓慢,基本没有变化。据此可将苔藓植物吸附 Hg 的过程划分为 2 个阶段:快速反应阶段和慢速反应阶段。东亚褶叶藓吸附 Hg 较大羽藓快,表明它对 Hg 的吸附能力较大羽藓强。贵州万山汞矿区苔藓植物对汞的吸附是自然选择的结果,从吸附特征看,胞外吸收占明显的优势。

(5) 贵州万山汞矿区苔藓植物的生态分布、富集机制和吸附特征的生态功能非常重要,能够指示汞环境污染、汞在生态系统中的分布、迁移和转化。这一特点对于汞污染的原位修复具有重要意义。

参考文献:

[1] 胡人亮. 苔藓生物学[M]. 北京: 高等教育出版社, 1987. 1-14, 433-439.

[2] 刘家彦. 贵州省环境污染对农业生态环境的影响[J]. 贵州环
保科技, 1998, (4): 40-44.

[3] Sucharová J, Suchara I. Atmospheric deposition levels of chosen
elements in the Czech Republic determined in the framework of
the International Bryomonitoring Program 1995[J]. Science of the
Total Environment, 1998, **223**: 37-52.

[4] Schilling J S, Lehman M E. Bioindication of atmospheric
heavymetal deposition in the Southeastern US using the moss
Thuidium delicatulum [J]. Atmospheric Environment, 2002, **36**:
1611-1618.

[5] Rühling A, Tyler G. Changes in the atmospheric deposition of
minor and rare elements between 1975 and 2000 in south
Sweden, asmeasured by moss analysis [J]. Environmental
Pollution, 2004, **131**: 417-423.

[6] Samecka-Cymerman A, Kempers A J. Comparison between natural
background concentrations of heavymetals in bryophytes from the
sudety mountains and Swiss Alps [J]. Chemosphere, 1998, **36**
(12): 2661-2671.

[7] Salemaa M, Derome J, Helmisaari H, *et al.* Element accumulation
in boreal bryophytes, lichens and vascular plants exposed to heavy
metal and sulfur deposition in Finland[J]. Science of the Total
Environment, 2004, **324**: 141-160.

[8] Shaw J, Jules E S, Beer S C. Effects of metals on growth,
morphology and reproduction of *Ceratodon purpureus* [J]. The
Bryologist, 1991, **94**(3): 270-277.

[9] 安丽, 曹同, 俞鹰浩. 上海市小羽藓属植物重金属含量及其与
环境的关系[J]. 应用生态学报, 2006, **17**(8): 1490-1494.

[10] 黄文琥, 张朝晖. 贵州烂泥沟金矿 5 种苔藓植物的生物地球
化学研究及生物探矿潜力分析[J]. 黄金, 2006, **12**(27): 12-
15.

[11] 江洪, 张朝晖. 贵州晴隆老万场红土型金矿三种藓类植物及
其土壤基质的重金属元素测定及相关性分析[J]. 广西植物,
2007, **27**(4): 610-615.

[12] 汪文云, 张朝晖. 老万场金矿藓类重金属富集特性及其生态
修复潜力研究[J]. 金属矿山, 2008, **9**: 134-139.

[13] 李冰, 张朝晖. 贵州烂泥沟金矿区苔藓植物及其生态修复潜
力分析[J]. 热带亚热带植物学报, 2008, **16**(6): 511-515.

[14] 郭宇, 游钦, 张欣, 等. 矿山环境中苔藓植物重金属元素的地
球化学特征——以大冶铜绿山为例[J]. 地质科技情报,
2009, **28**(4): 121-126.

[15] 刘荣相, 张朝晖. 贵州东南部喀斯特汞金矿带苔藓植物及其
重金属富集特征[J]. 中国岩溶, 2010, **29**(1): 41-47.

[16] 梁鹏, 杨永奎, 何磊, 等. 贡嘎山原始森林区苔藓植物重金属
含量及其对汞的吸附特征[J]. 应用生态学报, 2008, **19**(6):
1191-1196.

[17] 丁振华, 王文华, 瞿丽雅, 等. 贵州万山汞矿区汞的环境污染
及对生态系统的影响[J]. 环境科学, 2004, **25**(2): 111-114.

[18] 曹清晨, 姜玉霞, 张元勋, 等. 同步辐射 XRF 和 XANES 研究重
金属污染环境中小羽藓体内硫元素的生物指示作用[J]. 环
境科学, 2009, **30**(12): 3663-3668.

[19] 何灿, 高良敏, 汪桂林, 等. AMA254 汞分析仪测定颗粒物中痕
量总汞的研究[J]. 中国环境监测, 2009, **25**(4): 26-29.

[20] 仇广乐. 贵州省典型汞矿区汞的环境地球化学研究[D].
贵阳: 中国科学院地球化学研究所, 2005.

[21] 张增强, 张一平, 全林安, 等. 镉在土壤中吸持等温线及模拟
研究[J]. 西北农业大学学报, 2000, **28**(5): 88-94.

[22] Wei S Q, Mu Z J, Qing C L. Effects of several organic substances
on the solubility and adsorption-Desorption behaviors of cadmium
in purplish soil[J]. Acta Pedologica Sinica, 2003, **40**(1): 110-
117.

[23] 余贵芬, 青长乐, 牟树森, 等. 汞在腐殖酸上的吸附与解吸特
征[J]. 环境科学学报, 2001, **21**(5): 601-606.

[24] Rühling U. Atmospheric heavy metal deposition in Europe-
estimations based on moss analysis [M]. Copenhagen: Nordic
Council of Ministers, 1994.

[25] Richardson D H S. The Biology of mosses [M]. Oxford: Black
Well Scientific Publications, 1981.

[26] MarKert B A. Use of *Polytrichum formosum*(mossas) as a passive
biomonitor for heavy metal pollution(cadmium, copper, lead and
zinc) [J]. Science of the Total Environment, 1989, **86**(2): 289-
294.