

水培大米草吸收汞及其 净化环境作用的探讨*

仲崇信 钦 佩

(南京大学大米草及海滩开发研究所)

互花米草 (*Spartina alterniflora*) 是美国东南沿海的主要盐沼植物, 其每年的生产量至少为 $700\text{g}/\text{m}^2$ 。H. L. Windom 指出, 这种植物每年对汞的富集量为当年沉积物中汞的积累量的十倍以上¹⁾。作为互花米草和欧洲米草的天然杂交种大米草 (*S. anglica*), 对汞污染的反应如何呢? 我们的试验证明, 大米草对汞等污染物质的吸收和抵抗能力至少不应小于其亲本。同时, 本文在用大米草净化环境方面提供了一些设想。

一、水培和测定方法

水培工作是选用生长发育阶段不同的两类大米草苗进行的。一类是实生苗, 另一类是分蘖苗。实生苗是1981年3月初播的种, 7周后, 当土培实生苗具2—3片真叶, 地上部分平均高达22cm, 地下部分平均长达6cm时, 进行水培。用于水培的分蘖苗, 是同年5月底在本校植物园大缸内选取的, 其地上部分平均高达35cm, 地下部分平均长达12cm, 具有4—5片叶子。水培营养液为Hoagland(1938)溶液, pH为5.3。水培在实验室内进行, 在水培苗的上方2m处安置有400W生物效应灯, 以保证每日的光照。每周换一次营养液, 4周后加汞。水培实生苗分成5组, 各组分别标有0, A, B, C, D的字母, 0组为对照, 其余各组营养液汞浓度分别为0.1, 1, 10, 100ppm; 水培分蘖苗分成6组, 各组分别标有0, A, B, C, D, E的字母, 0组为对照, 其余各组营养液汞浓度分别为1, 10, 40, 70, 100ppm。每组

均有三个重复。在每周换营养液后, 即按各组浓度加汞。两类水培苗的加汞持续时间, 均为4周。

在加汞4周后即取样, 进行样品消化处理^[1], 然后用国产YYG-77型冷原子荧光测汞仪测定样品的总汞含量。

二、试验结果

大米草实生苗对汞的吸收, 随营养液汞浓度的增加而呈正相关。如A组, 原营养液汞浓度为0.1ppm, 实生苗地上部分汞含量平均为4.91ppm, 根部汞含量平均为254.87ppm。随着营养液中汞浓度增大, 大米草中平均汞含量也增高。至D组, 原营养液汞浓度为100ppm, 实生苗地上部分含汞平均为953.8ppm, 根部汞含量平均为25208.3ppm。然而富汞倍数却以A组为著, 其中, 地上部分富集汞平均是原营养液汞浓度的49倍, 而根部的富集倍数平均是2550。D组富集汞的倍数却最小, 地上部分平均为9.5, 根部平均为252 (如表1, 2)。

大米草分蘖苗对汞的吸收亦随营养液汞浓度的增加而呈正相关。如A组原营养液汞浓度为1ppm, 分蘖苗地上部分汞含量平均为32.7ppm, 根部汞含量平均为2382.35ppm。随着营养液中汞浓度的增大, 大米草中平均汞含量也增高, 至E组, 原营养液汞浓度为100ppm,

* 我校化学系周玳同志指导测汞, 特致谢意。

1) 根据 Windom, H. L. 于1972年1月在美国工程师学会国家水源工程学会会议上的报告——Mercury distribution in Estuarine Nearshore Environment.

表1 水培大米草实生苗加汞4周后地上部分汞含量测定

组 号	0			A			B			C			D		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
原加汞量 (ppm)	0			0.1			1			10			100		
植株地上部分汞含量(ppm)	0	0	0	6.58	3.97	4.17	37.04	27.78	31.25	258.33	235.09	300.00	809.78	915.79	1135.71
富集倍数	0	0	0	66	40	42	37	28	31	26	24	30	8	9	11

表2 水培大米草实生苗加汞4周后根部汞含量测定

组 号	0			A			B		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
原加汞量 (ppm)	0			0.1			1		
植株根部汞含量 (ppm)	0	0	0	287.04	269.23	208.33	2265.63	2013.89	2265.63
富集倍数	0	0	0	2870	2690	2080	2266	2014	2266

组 号	C			D		
	1	2	3	1	2	3
原加汞量 (ppm)	10			100		
植株根部汞含量 (ppm)	12750.00	14411.76	18823.53	26041.67	26250.00	23333.33
富集倍数	1275	1441	1882	260	263	233

表3 水培大米草分蘖苗加汞4周后地上部分汞含量测定

组 号	0			A			B		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
原加汞量 (ppm)	0			1			10		
植株地上部分汞含量(ppm)	0	0	0	34.72	30.05	33.33	331.03	273.13	246.15
富集倍数	0	0	0	35	30	33	33	27	25

组 号	C			D			E		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
原加汞量 (ppm)	40								
植株地上部分汞含量(ppm)	670.10	608.11	568.18	753.01	909.09	904.41	1052.63	1086.42	1144.44
富集倍数	17	15	14	11	13	13	11	11	11

植株地上部分汞含量平均为1094.5ppm, 根部汞含量平均为33918.1ppm。然而富汞倍数却以A组为著, 其地上部分从营养液中富集汞平均是原浓度的32倍, 而其根部的富集倍数则平均是2382。E组的富汞倍数最低, 地上部分和

根部分别为11和339 (如表3, 4)。

不同生长期的大米草营养器官吸收和抵抗汞的能力不同。通过两类苗加汞后的形态和长势的比较, 可看出分蘖苗的抗汞毒害的能力显然大于实生苗。对于1 ppm的汞浓度营养液,

表4 水培大米草分蘖苗加汞4周后根部汞含量测定

组 号	0			A			B		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
原加汞量 (ppm)	0			1			10		
植株根部汞含量 (ppm)	0	0	0	2500.00	2235.29	2411.76	18518.52	16000.00	11904.76
富集倍数	0	0	0	2500	2235	2412	1852	1600	1190

组 号	C			D			E		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
原加汞量 (ppm)	40			70			100		
植株根部汞含量 (ppm)	29411.76	23809.52	19166.67	31250.00	32258.06	32500.00	33333.33	34210.53	34210.53
富集倍数	735	595	479	446	461	464	333	342	342

实生苗已非常敏感,有不少植株枯萎;而分蘖苗在此汞浓度中生长却与对照的长势相仿。10 ppm的汞浓度就可使实生苗致死;而分蘖苗却对它反应不大。直至40ppm的汞浓度才使分蘖苗的叶片卷缩,作出明显的反应。另外,从两类苗汞含量检测数据中可看出,无论是地上部分或根部,分蘖苗的汞含量总是多少高于实生苗。当然,二者的富汞能力在短期内并未显示出很大差别。如选择1 ppm, 10ppm和100ppm这三种汞浓度组的两类苗富汞倍数加以比较,运用方差分析就可知,两类苗的地上部分和根部的富汞倍数差异均不显著(如表5, 6)。

基于这一点,我们以大米草分蘖苗吸收汞的检测数据,绘制了其地上部分和根部对汞的吸收曲线(如图1, 2),用来反映大米草吸收汞的规律。

从以上这两段曲线所反映的规律来看,大米草对汞的吸收与原营养液汞浓度呈正相关。随着营养液汞浓度 x 的增大, $\hat{y}$ 在曲线上各点的曲率越小,这在根吸收曲线上表现得尤为明显,显示了富汞倍数随之下下降的趋势。

从生态学的观点出发,统计每桶营养液中全部水培植株的总吸汞量对衡量大米草群体在环境中的净化作用是有价值的。表7提供了这

表5 大米草实生苗与分蘖苗地上部分富汞倍数之比较

苗的类别 \ 浓度	1ppm		10ppm		100ppm	
	观察值 X	$\bar{X} \pm S_{\bar{X}}$	观察值 X	$\bar{X} \pm S_{\bar{X}}$	观察值 X	$\bar{X} \pm S_{\bar{X}}$
实 生 苗	37.04	32.02 ± 2.70	25.84	26.45 ± 1.90	8.10	9.54 ± 0.96
	27.78		23.51		9.16	
	31.25		30.00		11.36	
分 蘖 苗	34.72	32.7 ± 1.38	33.10	28.34 ± 2.50	10.53	10.94 ± 0.27
	30.05		27.31		10.86	
	33.33		24.62		11.44	

附方差分析之结果:由 $F = 0.789$, 查表得 $F_{0.05} = 4.75$, $F < F_{0.05}$, 可见, 二类苗地上部分富汞倍数差异不显著。

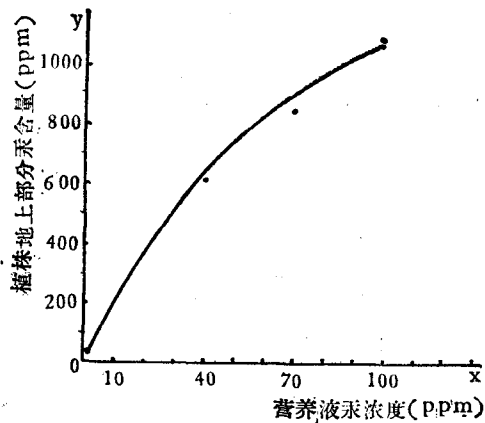
表6 大米草实生苗与分蘖苗根部富汞倍数之比较

苗的类别	1ppm		10ppm		100ppm	
	观察值X	$\bar{X} \pm S_{\bar{X}}$	观察值X	$\bar{X} \pm S_{\bar{X}}$	观察值X	$\bar{X} \pm S_{\bar{X}}$
实 生 苗	2265.63		1275.00	1532.84±	260.42	
	2013.89	2181.72±83.91	1441.18		262.50	252.08±9.39
	2265.63		1882.35	181.22	233.33	
分 蘖 苗	观察值X	$\bar{X} \pm S_{\bar{X}}$	观察值X	$\bar{X} \pm S_{\bar{X}}$	观察值X	$\bar{X} \pm S_{\bar{X}}$
	2500.00		1851.85	1547.44±	333.33	
	2235.29	2382.35±77.82	1600.00		342.11	339.18±2.92
	2411.76		1190.48	192.72	342.11	

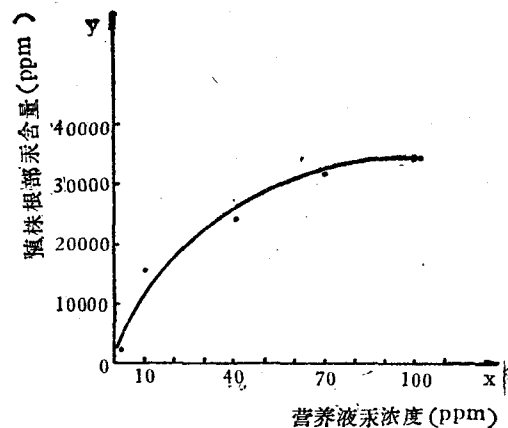
附方差分析之结果：由 $F=1.099$ ，而 $F_{0.05}=4.75$ ， $F < F_{0.05}$ ，可见，二类苗根部富汞倍数差异也不显著。

表7 全桶大米草分蘖苗总吸收汞量百分数

浓 度 组 别	0	A	B	C	D	E
原营养液汞浓度 (ppm)	0	1	10	40	70	100
原营养液总加汞量 (mg)	0	12	120	480	840	1200
换营养液时剩余汞浓度均值 (ppm)	0	0.05	5.33	24.00	45.50	60.42
4 周营养液剩余总汞含量 (mg)	0	0.60	64.00	288.00	546.00	725.04
取样植株 (3株) 总汞含量 (mg)	0	1.2828	5.6584	16.5646	28.3346	37.4754
水培植株 (12株) 总汞含量 (mg)	0	5.1310	22.6334	66.2586	113.3386	149.9014
植株吸收汞量占原加汞量百分数	0	42.76	18.86	13.80	13.49	12.49

图1 大米草分蘖苗地上部分吸收汞曲线
曲线相关方程式：

$$\hat{y} = 1300 - 10^{3.1127 - 0.0075x}$$

图2 大米草分蘖苗根部吸收汞曲线
曲线相关方程式：

$$\hat{y} = 3500 - 10^{4.5156 - 0.0146x}$$

方面的一些数据。这些数据表明，栽培在装有3 l营养液中的12株大米草分蘖苗的总吸收汞量是可观的。其中，原加汞量较低的水培桶中的

草苗吸收百分数较大，尤其是汞浓度为1ppm的水培组中，植株的吸收百分数最大，达到42.76%。另外，用植株总含汞量与4周营养

液剩余总含汞量之和同原加汞量相减,可得出4周内营养液中汞损失量的估计值;以原加汞浓度为1 ppm的水培组损失最大,占原营养液总加汞量的52%,而其余各浓度水培组的汞损失均在22—28%上下。

三、结论和讨论

1. 大米草吸收汞与基质汞含量呈正相关
大米草对汞具强烈的吸收,这种吸收与基质(如本试验中的水培营养液)中汞浓度的正相关可用一指数方程来描述(如图1, 2)。然而,随着基质含汞量的升高,大米草的富汞倍数却不断下降;也就是说大米草不可能无限制地吸收汞,当基质中汞含量达到某一数值时,大米草对汞的吸收将趋于一个定值。这是由于高浓度的汞对大米草的毒害作用加强,反而抑制了植株对汞的吸收。

2. 大米草吸收汞的能力随基质不同而各异

拿土培加汞试验与水培加汞试验相比,虽说吸收规律一致,然前者植株对汞的吸收就远不如后者。根据我所及南京大学环科所土培试验小组提供的大米草土培加汞的试验资料表明,在拌有100ppm氯化汞的土壤中,生长了12周的大米草实生苗地上部分含汞量平均为12.34ppm,其根部含汞量平均为1766.68ppm,与本文提供的相应浓度组的水培资料(地上部分含汞量平均为953.76ppm,根部含汞量平均为25208.33ppm)相比,则低得多。这是由于汞进入土壤后,或被土壤胶体所吸附,或变为难溶的硫化汞等沉积下来,或与土壤中的粘土矿物络合而被固定,不易为大米草所吸收。而水培大米草则直接从营养液中吸收无机汞盐,所以汞的积累比土培的就多。

3. 大米草不同器官富集汞的能力不同
大米草营养器官富汞能力的顺序为:根>叶>地上茎。这是由于根部直接与含汞溶液接触,使被吸收的汞与根部的蛋白质起反应而沉积在植株的地下部分,不易向地上部分转移。另外,叶的含汞量比茎高,是由于前者能通过

其上较多的气孔吸收逸入空气中的汞,当然,叶片较高的渗透压及蒸腾拉力对汞在茎叶中的分布也是很有影响的。

4. 大米草不同生长发育阶段的抗汞和吸收汞的能力不同

大米草分蘖苗抵抗汞毒害的能力显然比实生苗要强。将相同汞浓度下两类苗的汞含量检测数据作一比较,又可清楚地看出,分蘖苗对汞的吸收能力较强。显然,实生苗处于幼年期,其叶片的数目、株重和株长均不及分蘖苗,况且后者是在三年生的大米草根茎上萌发出来的,从母体上又获得充足的养分而长得更为茁壮。因此,后者对汞的吸收和抵抗能力均比前者强。

然而,用方差分析比较两类苗三个浓度组的富汞倍数,并未发现有显著差异。这说明在不长的加汞时间(4周)内,在苗龄相差不大的实生苗与分蘖苗之间,富集汞的能力是没有明显区别的;这也进一步证明了大米草是具有很强富汞能力的植物,哪怕在2—3片真叶的幼苗期都能顽强地体现出来。

5. 耐汞性和耐盐性的关系

综上所述,大米草是一种高度耐汞的植物。由于它又属于典型的盐生植物,所以它的耐汞性和耐盐性有着不可分割的联系。如大米草的光合强度较高(与它属C₄植物有关)、呼吸强度偏低、有机酸与蛋白质含量较高等生理生化特征和“抗盐型”代谢,对它忍耐和抵抗高浓度汞环境同样适用。另外,长期的盐生生境给大米草植体造就了一个富含钠、钾、镁、钙等阳离子的内环境,而这个内环境恰好可发挥有关离子(特别是镁和钙)对汞的拮抗作用^[3]从而部分地抵销或减弱了汞对植物组织的毒害作用。还值得一提的是, *S. townsendii*(集合种)是*S. alterniflora*和*S. maritima*的天然杂交种,获得了双倍的染色体数目,而其分种大米草(*S. anglica*)获得了更多的染色体数目。多倍体的生命力和抗盐性是较强的。无疑,这在*S. anglica*的耐汞方面也得到了充分的体现。

6. 大米草净化环境作用的估价

大米草是典型的抗汞植物，且有较高的富汞能力。

如表7所列的全桶12株大米草分蘖苗，总吸收汞量百分数是令人瞩目的。特别是接近通

常污染环境中汞浓度的1ppm的水培组，植株的总吸收百分数最大，达到42.76%，这是具典型生态意义的。因此，利用大米草来治理汞等重金属废水的污染，在净化环境中发挥其作用是有基础的。当然，在利用大米草治理环境污染时，不仅要看到整个植物群落对汞等重金属的吸收，还要重视大米草生态系统的作用。譬如，种在污染源附近的大米草，在保持污染源附近的水土，控制污染物质的迁移、转化、减轻二次污染等方面可发挥作用；又如，大米草土壤系统所组成的“活过滤器”，能对含汞等重金属的污水进行二级和三级处理，从而在污灌方面发挥净化作用等等。

从上述观点出发，并借鉴澳大利亚墨尔本威里比牧场的经验^[2]，本文提出一个用大米草、互花米草生态系统综合治理污水的设想，如图3。在占地条件受限制的情况下，污水仅经过氧化塘二级处理；而占地条件许可时，污水可经过梯田式的大米草草场的三级处理，然后进行其他灌溉。图中氧化塘的周围长有高科

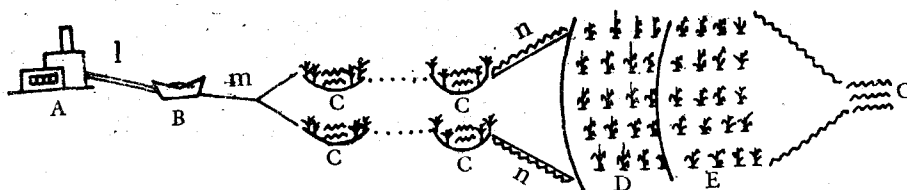


图3 大米草、互花米草生态系统综合治理污水设想

A为排放污水的工厂（污水已经过厂内处理）；B为污水一级处理（物理处理）站；C为互花米草生物氧化塘；D、E为大米草草场。l为厂内处理后排放的污水；m为一级处理后的污水；n为二级处理后的污水（灌溉草场）；o为三级处理后的水（灌溉农田等）。

的互花米草，能经受塘中心1.5米深的污水的淹渍。氧化塘并联成多条支路，以轮番接受排放的污水，每一支路又串联若干个氧化塘，以提高净化效率。污灌后的大米草植株，可将地上部分与地下部分分而治之（因为汞等重金属大量积累在地下部分）。其地上部分可用以造纸，而地下部分在定期翻土时可耙出集中，然后进行汞回收处理。

当然，以上估价和设想究竟是否可行，还有待于进一步的土培试验、生态系统净化环境模拟试验来证实。

主要参考文献

- [1] 中国科学院环境化学研究所、南京土壤研究所等编，1980。环境污染分析方法。科学出版社，第104页。
- [2] 中国科学院赴澳污灌与环境考察组，1980。出国参观考察报告。科学技术文献出版社。
- [3] Förster, U. and G. T. Wittman, 1979. Metal Pollution in the Aquatic Environment. pp. 274—276.

AN INQUIRY INTO THE MERCURY ABSORPTION OF SPARTINA ANGLICA AND ITS ENVIRONMENTAL PURIFICATION EFFECT

Zhong Chongxin and Qin pei

(Institute for Spartina Anglica and Beach Exploitation Studies)

Abstract

This is a report of preliminary water culture experiments of absorption of mercury by big rice grass, *Spartina anglica*, which is a very vigorous and stress resistant halophyte. The amounts of mercury absorbed by the shoots from water culture of different concentrations are 10—56 times the initial amounts and those absorbed by roots are 250—2500 times. The most efficient absorption by the tillers was found to be almost half of the original amount in the 1 ppm culture after four-week absorption. The curve of *S. anglica* absorption of mercury is a positive relative exponent curve. Hence *S. anglica* is found to be rather effective as an agent to remove pollutants, especially in the case of mercury.