

# 水体重金属污染的植物修复研究( I ) ——种苗过滤去除水中重金属锌

渠荣遴<sup>1</sup>, 李德森<sup>2</sup>, 杜荣骞<sup>2</sup>

(1. 天津大学分析中心, 天津 300072; 2. 南开大学生命科学学院, 天津 300071)

**摘要:**采用室内培养方法,探讨了6种作物种苗对水体中锌的去除作用。分析表明,在所选择的实验条件下,采用种苗过滤可以在144 h内使水体中锌浓度明显降低。在蓖麻、豌豆、向日葵等植物幼苗的根中分别积累了高达 $30.0 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 、 $20.5 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 和 $18.3 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 的锌,在其茎中分别积累了 $7.08 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 、 $5.89 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 和 $7.88 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 的锌。文章对实验结果进行了对比和讨论,提出选择具有“重金属超量积累倾向”的传统作物种苗进行环境水体中锌污染的植物修复,这种处理技术具有良好的应用前景。

**关键词:**植物修复; 重金属; 水体; 种苗过滤; 锌

**中图分类号:**X52      **文献标识码:**A      **文章编号:**1000-0267(2002)04-0297-04

## Research on Phytoremediation for Heavy Metal Pollution in Water I. The blastofiltration of Zn from water

QU Rong-lin<sup>1</sup>, LI De-sen<sup>2</sup>, DU Rong-qian<sup>2</sup>

(1. Analytical Center, Tianjin University, Tianjin 300072, China; 2. College of Life Sciences, Nankai University, Tianjin 300071, China)

**Abstract:** Six plant seedlings were tested for removal of Zn in water by blastofiltration method in the present study. At selected experiment conditions, the results showed that in 144 hours, the concentration of Zn was obviously decreased. In dry roots of castor - oil plant, pea and sunflower, Zn was accumulated as high as  $30.0 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ ,  $20.5 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$  and  $18.3 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ , respectively, and in the stems of the three plant seedlings, the metal was accumulated to  $7.08 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ ,  $5.89 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$  and  $7.88 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ , respectively. It may be suggested that these traditional plant seedlings in the present study characterized by “hyper - accumulator tendency” would be utilized as a good blastofiltration application prospects in phyto - remediation of Zn pollution in water.

**Keywords:** phytoremediation; heavy metal; water; blastofiltration; zinc

经由各种途径进入环境的重金属,对土壤和水源会造成一定程度的污染,并且由于这些重金属在环境中的相对稳定性,使得治理重金属污染成为一件困难和代价高昂的工作。据测算,在发达国家利用掩埋法清除1公顷土地内的重金属污染平均需要花费247.11万美元<sup>[1]</sup>;而现有的清除重金属污染的物理方法、化学方法或微生物法除代价高昂外,现场施工过程复杂,目前尚难以有效地付诸实施。

近年来,利用植物去除环境中污染物的植物修复技术受到了关注。Ilya Raskin认为植物修复所取得的最大的进步是去除环境中的重金属<sup>[2]</sup>。环境科学家们先是从研究对重金属有特殊积累能力的一些超量积累植物(Hyperaccumulator)起步,到近几年不仅局限

于研究超量积累植物,而且着手研究普通作物用于去除环境中重金属的可能性,在研究范畴与观念上发生了一定的变化。这种观念的改变主要是受超量积累植物种类稀缺(目前全世界只发现300多种)、生长缓慢和生物量小的限制,难以体现实用价值,因而对一些分布广泛、生物量大并可能具有“超量积累植物倾向”的传统作物的研究,就成为了一种必然<sup>[3]</sup>。迄今为止,已有文献涉及到玉米、向日葵、燕麦、大麦、豌豆、烟草、印地安芥菜、莴苣等植物对重金属的修复作用研究<sup>[1,4-8]</sup>,这种作用被认为是根过滤(Rhizofiltration)。1994年Ilya Raskin曾指出:根过滤是植物根部对毒性金属元素的吸收、浓缩和沉淀,是较现行的化学法及微生物沉积重金属法更具吸引力的一种含重金属废水的处理方法<sup>[7]</sup>。1997年Ilya Raskin又进一步指出:植物种苗对水中重金属的去除作用较根的去作用更强,利用植物种苗去除水中重金属被称为种苗过

收稿日期: 2001 - 10 - 24; 修订日期: 2001 - 12 - 08

基金项目: 天津市自然科学基金资助项目(00360511)

作者简介: 渠荣遴(1947—),男,天津市人,副教授,硕士生导师,主要从事仪器分析及应用化学研究。

滤(Blastofiltration), 代表了第二代植物修复技术用于含重金属废水处理的发展方向<sup>[1]</sup>。

据文献报道, Stephen D. E. 将萌发的大麦和燕麦种子在营养液中培养 10 d 后, 将实验组的培养溶液中 Zn 浓度增加到  $100 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  ( $6.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ), 3 周后测定 Zn 在燕麦茎叶中含量约占 0.096%、在大麦茎叶中含量约占 0.244%<sup>[4]</sup>。Stephen D. E. 还将萌发的印地安芥等三种植物 (*B. juncea*、*B. napus* 和 *B. rapa*) 在营养液中培养 10 d 后, 将实验组的培养溶液中 Zn 浓度增加到  $6.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , 2 周后测定几种植物茎叶中 Zn 含量达到 0.08%—0.23%、根中 Zn 含量达到 0.6%—1.1%<sup>[9]</sup>。

本研究工作的目的是在现有文献报道的基础上, 通过考察水体重金属污染植物修复新技术, 即种苗过滤去除重金属的规律, 探索该方法在含 Zn 废水生态修复中的应用可行性。

## 1 材料与方法

### 1.1 植物种子

玉米(农大 108)、玉米(高油 115)、春套高粱(抗四)、豌豆(食荚大菜豌豆 1 号)、蓖麻(841)、向日葵(河北永清)。以上种子购于天津市种子公司和天津市新技术产业园区内种子公司。

### 1.2 种苗培育方法

采用直径 20 cm 瓦盆, 内装入酸洗细沙约 13 cm 厚, 播入种子后用水浸湿, 待种子发芽后每 3 d 用自来水浇灌 1 次。植物培养室温度  $18 \text{ }^{\circ}\text{C}$ — $24 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 、自然光照  $8 \text{ h} \cdot \text{d}^{-1}$ 。玉米、豌豆、蓖麻、向日葵发芽后 14 d、高粱发芽后 28 d 将种苗由瓦盆中取出, 用自来水冲净根上沾附的细沙后, 用去离子水冲洗 3 次, 然后用药物天平将每种种苗均分为 4 组, 备用。

### 1.3 锌标准溶液配制与锌吸收实验设计

每次准确称取  $0.4550 \text{ g Zn}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  ( $>99.5$ , Fluka 试剂公司), 溶于去离子水后转移入 1 000 mL 容量瓶中定容, 得  $100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  锌标准溶液。向每个锥形瓶中准确移入 100 mL Zn 标准溶液 (Zn 总量  $10.0 \text{ mg}$ ), 然后将实验用种苗放入锥形瓶并使根部浸入 Zn 溶液中, 在锥形瓶口将种苗轻轻夹住固定。实验开始后 1、2、4、6、8、10、24、48、72、96、120 h 和 144 h 分别用移液管各取 1 mL 样品溶液, 利用原子吸收光谱法检测 Zn 的剩余量。实验进行 144 h 后, 将种苗取出并用去离子水冲洗 3 次, 然后将根、茎、叶分别剪成约 1 cm 长的小段, 放入  $80 \text{ }^{\circ}\text{C}$  烘箱中烘干 48 h, 用于植

物各器官中 Zn 积累量的测定。为考察 Zn 浓度对植物吸收的影响, 实验中还设计了分别量取 10 mL 和 20 mL Zn 标准溶液, 稀释至 100 mL 后以蓖麻为代表的不同浓度的对比实验。

### 1.4 锌的分析条件

采用火焰原子吸收光谱法对溶液及植物根、茎、叶中 Zn 含量分别进行测定。所采用的设备与分析条件为: 仪器为日立 180—80 偏振塞曼原子吸收光谱仪; 测定波长为 213.8 nm; 灯电流为 10.0 mA; 光谱通带为 1.3 nm; 助燃气为空气,  $10.0 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$ ; 燃料气为乙炔  $2.0 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$ ; 测量方式为积分 (5 s); 背景扣除方式为塞曼方式。

### 1.5 植物根、茎、叶中 Zn 测定前的样品处理方法

将干燥后的植物各部位样品准确称量后放入陶瓷坩埚中, 于马福炉中加热至  $550 \text{ }^{\circ}\text{C}$  并在此温度下保温 6 h, 待马福炉自然冷却至室温后取出坩埚, 向坩埚中加入  $5 \text{ mL } 7 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{HNO}_3$ , 微热溶解残渣后, 转移定容于 50 mL 容量瓶待测。

### 1.6 溶液样品的处理方法

将不同时间由锥形瓶中取出的 1 mL Zn 溶液样品分别定容于 10 mL 容量瓶中, 依据需要稀释适当倍数后待测。

### 1.7 数据分析和绘图软件

美国 Microcal 公司 Origin 5.0。

## 2 结果与讨论

### 2.1 种苗过滤去除水中锌的生态效应

选择一阶指数衰减拟合方法对种苗去除水中 Zn 的作用如图 1、2。

其相应的拟合函数方程分别为:

$$Y_{\text{向日葵}} = 56.31487 + 26.55378e^{-x/37.04044}$$

$$Y_{\text{豌豆}} = 55.85908 + 18.3104e^{-x/39.14757}$$

表 1 6 种作物种苗去除水中 Zn 的生态效应

Table 1 Ecological effects of removing Zn in water by 6 plant seedlings

种苗名称	种苗重 Zn 总量		Zn 剩余率/%			
	/g	/mg	8 h	24 h	72 h	144 h
向日葵(河北永清)	$8.5 \pm 0.2$	10.0	80.9	64.6	62.6	55.8
豌豆(食荚大菜豌豆 1 号)	$4.9 \pm 0.2$	10.0	70.4	66.5	57.5	56.0
玉米(高油 115)	$7.5 \pm 0.2$	10.0	70.9	66.9	60.9	52.3
玉米(农大 108)	$4.0 \pm 0.2$	10.0	61.8	56.9	54.8	53.6
春套高粱(抗四)	$3.0 \pm 0.2$	10.0	66.2	61.9	57.4	51.8
蓖麻(841)	$6.5 \pm 0.2$	10.0	55.8	54.9	54.3	53.3
蓖麻(841)	$6.2 \pm 0.2$	2.0	53.0	46.0	30.0	18.0
蓖麻(841)	$6.0 \pm 0.2$	1.0	40.0	34.0	20.0	11.0

注: 所列数据为 4 组平行实验的测定平均值。

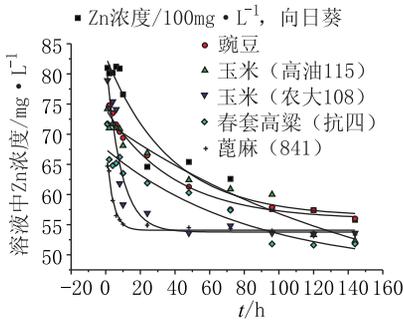


图 1 向日葵、豌豆、玉米(高油 115)、玉米(农大 108)、春套高粱(抗四)、蓖麻(841)种苗去除水中 Zn 的动力学曲线  
Figure 1 Dynamics curve of sunflower, pea, corn(Gao You 115), corn(Nong Da 108), Chinese sorghum(Kang Si), casto - oil plant(841) seedling in removing Zn from water

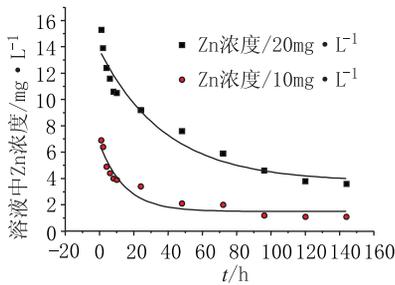


图 2 蓖麻(841)种苗去除水中 Zn 的动力学曲线  
Figure 2 Dynamics curve of casto - oil plant seedlings in removing Zn from water

$$Y_{\text{玉米(高油 115)}} = 39.0955 + 33.03937e^{-x/161.08999}$$

$$Y_{\text{玉米(农大 108)}} = 53.77813 + 29.06598e^{-x/8.48525}$$

$$Y_{\text{春套高粱(抗四)}} = 47.46146 + 20.05718e^{-x/83.06276}$$

$$Y_{\text{蓖麻} \blacktriangle} = 54.07689 + 14.77734e^{-x/3.73611}$$

$$Y_{\text{蓖麻} \blacksquare} = 3.75714 + 10.01322e^{-x/38.31782}$$

$$Y_{\text{蓖麻} \blackstar} = 1.49363 + 5.14814e^{-x/14.64554}$$

## 2.2 锌在种苗各器官中的积累

锌在种苗各器官中的积累情况见表 2。

表 2 Zn 在种苗各器官中的积累

Table 2 Accumulation of Zn in the different parts of the seedlings

种苗品种	根中 Zn	茎中 Zn	叶中 Zn
	/mg · g <sup>-1</sup>	/mg · g <sup>-1</sup>	/mg · g <sup>-1</sup>
向日葵(河北永清)	18.3	7.88	1.16
豌豆(食荚大菜豌 1 号)	20.5	5.89	1.34
玉米(高油 115)	7.81	3.23	2.23
玉米(农大 108)	10.4	3.78	1.26
春套高粱(抗四)	6.19	3.39	1.38
蓖麻(841)▲	30.0	7.08	0.72
蓖麻(841)■	14.0	1.66	0.14
蓖麻(841)★	9.04	0.98	0.11

注: 所列数据为 4 组平行实验的测定平均值; ▲Zn 浓度 100 mg · L<sup>-1</sup>; ■Zn 浓度 20 mg · L<sup>-1</sup>; ★Zn 浓度 10 mg · L<sup>-1</sup>。

## 2.3 单位质量植物种苗去除水体中 Zn 的生态效应对比

由于在实验条件下所用的各种植物种苗在高度、茎秆直径及质量上均有所差别,因此除了在水体中锌含量充分过量时以各种植物根、茎、叶每克干重中 Zn 的积累量作为一种对比方法外,还可以用单位质量植物种苗去除水中 Zn 的生态效应做为另一种对比方法。经实验 144 h 后,在 100 mg · L<sup>-1</sup> 浓度的 Zn 溶液中每克种苗对 Zn 的去除量由大到小的排列顺序依次为: 春套高粱(抗四) 1.61 mg、玉米(农大 108) 1.16 mg、豌豆(食荚大菜豌 1 号) 0.90 mg、蓖麻(841) 0.72 mg、玉米(高油 115) 0.64 mg 和向日葵(河北永清) 0.52 mg。实验还表明,在分别选择 Zn 浓度为 10 mg · L<sup>-1</sup>、20 mg · L<sup>-1</sup> 及 100 mg · L<sup>-1</sup> 时,蓖麻去除 Zn 的生态效应及各器官中 Zn 的积累量随 Zn 浓度增大而增大,但这一增大趋势并不与浓度的增加倍数呈直线性相关关系。

## 2.4 对实验现象的讨论

实验表明,种苗过滤去除水中 Zn 的生态效应与植物种类有关。在不同种类植物之间以及在相同植物的不同亚种之间,存在着对 Zn 积累程度上较明显的差异。由表 2 数据看出,在相同体积(100 mL)、相同浓度(100 mg · L<sup>-1</sup>)的 Zn 溶液中处理 144 h 后,蓖麻、豌豆、向日葵均获得了较高的根 Zn 积累与茎 Zn 积累,其中蓖麻根 Zn 积累高达 30.0 mg · g<sup>-1</sup>,豌豆与向日葵根 Zn 积累也分别达到了 20.5 mg · g<sup>-1</sup> 及 18.3 mg · g<sup>-1</sup>。此外,在向日葵、蓖麻和豌豆茎中,Zn 积累量分别达到 7.88 mg · g<sup>-1</sup>、7.08 mg · g<sup>-1</sup> 和 5.89 mg · g<sup>-1</sup>,证实在种苗过滤中由根部吸收的部分 Zn 可以通过有效的途径输送并保存在植物其它器官中。

在利用陆生植物去除水体中重金属的研究工作开展以前,科学家曾对凤眼莲、浮萍等水生植物吸收重金属以净化水体产生过极大的兴趣。但最近几年的研究表明,陆生植物具有更发达的根系,将幼小的陆生植物种苗用于水体中重金属的去除会更加有效<sup>[1]</sup>。在本实验中,我们采用生长 14 d 或 28 d 的普通作物,利用种苗过滤方法去除水中 Zn,发现在短时间内根 Zn 积累分别达到 18.3—30.0 mg · g<sup>-1</sup>、茎 Zn 积累分别达到 5.89—7.88 mg · g<sup>-1</sup> 的 3 种作物种苗具有良好的近超量积累生态效应。在将水体中 Zn 浓度设定在 100 mg · L<sup>-1</sup> 时,144 h 后蓖麻、向日葵及豌豆种苗中 Zn 含量均明显高于现有文献中已报道的实验结果;在将水体中 Zn 浓度设定在 10 mg · L<sup>-1</sup> 时,144 h

后蓖麻茎及根中 Zn 含量均与印地安芥对 Zn 吸收 2 周后的生态效应相近, 并且在使用 6.0 g 蓖麻种苗对 100 mL 10 mg · L<sup>-1</sup> 含 Zn 水样处理 144 h 后, 水中 Zn 浓度已降至 1.1 mg · L<sup>-1</sup>, 达到农田灌溉水质标准。

### 3 结论

通过对种苗过滤的实验考察, 发现该方法具有良好的去除水体中重金属 Zn 的生态效应。当水体中 Zn 浓度不超过 100 mg · L<sup>-1</sup> 时, 经 144 h 种苗过滤植物修复处理, 可使 Zn 浓度降低至原浓度的 55% 左右; 而当水体中 Zn 浓度不超过 10 mg · L<sup>-1</sup> 时, 经 144 h 种苗过滤植物修复处理, 可使 Zn 浓度降低至原浓度的 10% 左右, 表现出新一代植物修复水处理技术具有良好的生态效益与应用前景。

#### 参考文献:

- [1] Ilya Raskin, Robert D Smith and David E Salt. Phytoremediation of metals: using plants to remove pollutants from the environment[J]. *J Current Opinion in Biotechnology*, 1997, **8**(2): 221 - 226.
- [2] 桑伟莲, 孔繁翔. 植物修复研究进展[J]. 环境科学进展, 1999, **7**(3): 40 - 44.
- [3] Scott D Cunningham, William R Berti and Jianwei W Huang. Phytoremediation of contaminated soils[J]. *J Trends Biotechnol*, 1995, **13**(9): 393 - 397.
- [4] Stephen D Ebbs and Leon V Kochian. Phytoextraction of Zinc by Oat, Barley, and Indian Mustard[J]. *J Environ Sci Technol*, 1998, **32**(6): 802 - 806.
- [5] Viatcheslav Dushenkov, Nanda Kumar P B A, Harry Motto and Ilya Raskin. Rhizofiltration: The use of plants to remove heavy metals from aqueous streams[J]. *J Environmental Science & Technology*, 1995, **29**(5): 1239 - 1245.
- [6] Rufus L Chaney, Minnie Malik, Yin M Li, et al. Phytoremediation of Soil metals[J]. *J Current Opinion in Biotechnology*, 1997, **8**(3): 279 - 284.
- [7] Ilya Raskin, P B A Nanda Kumar, Slavik Dushenkov and David E Salt. Bioconcentration of heavy metals by plants[J]. *J Current Opinion in Biotechnology*, 1994, **5**(1): 285 - 290.
- [8] Kayser A, Wenger K, Keller A, et al. Enhancement of Phytoextraction of Zn, Cd, and Cu from Calcareous Soils: The use of NTA and sulfur amendments[J]. *J Environ Sci Technol*, 2000, **34**(9): 1778 - 1783.
- [9] Stephen D. Ebbs and Leon V Kochian. Toxicity of Zinc and Copper to Brassica Species: Implications for Phytoremediation[J]. *J Environ Qual*, 1997, **26**: 776 - 781.

## 中国自然科学学术期刊显示度排名表

综合类		数学类		地学类		生物类		技术科学类	
期刊名称	位次	期刊名称	位次	期刊名称	位次	期刊名称	位次	期刊名称	位次
中国科学	1	Acta Math Sin New Ser	1	地球物理学报	1	植物学报	1	金属学报	1
科学通报	2	数学年报	2	第四纪研究	2	遗传学报	2	分析试验室	2
自然科学进展	3	计算数学	3	地质学报	3	生物多样性	3	摩擦学学报	3
控制与决策	4	Chin Ann Math B	4	地理学报	4	植物生态学报	4	无机材料学报	4
中山大学学报	5	J Comput Math	5	矿床地质	5	植物生理学报	5	电力系统自动化	5
武汉大学学报	6	应用数学学报	6	岩石学报	6	中国生物化学与分子生物学报	6	计算机学报	6
北京大学学报	7	数学年刊·A	7	地质论评	7	生物化学与生物物理学报	7	电子学报	7
北京师范大学学报	8	系统科学与数学	8	地学前缘	8	生物化学与生物物理进展	8	中国稀土学报	8
南京大学学报	9	系统工程学报	9	地球化学	9	生物工程学报	9	软件学报	9
清华大学学报	10	数学进展	10	气象学报	10	实验生物学报	10	中国有色金属学报	10
物理类		化学类		农林科学类		医药卫生类		环境科学类	
期刊名称	位次	期刊名称	位次	期刊名称	位次	期刊名称	位次	期刊名称	位次
Chin Phys Lett	1	高等学校化学学报	1	中国农业科学	1	中国药理学报	1	生态学报	1
物理学报	2	分析化学	2	作物学报	2	药学学报	2	环境科学进展	2
力学学报	3	化学进展	3	林业科学	3	中华医学杂志	3	应用生态学报	3
光谱学与光谱分析	4	化学学报	4	土壤学报	4	病毒学报	4	环境科学	4
Commun Theor Phys	5	催化学报	5	植物病理学报	5	中华微生物学和免疫学杂志	5	生态学杂志	5
物理学进展	6	高分子学报	6	园艺学报	6	中华检验医学杂志	6	中国环境科学	6
光学学报	7	化学通报	7	中国水稻科学	7	中华心血管病杂志	7	环境科学学报	7
力学学报	8	物理化学学报	8	水产学报	8	中华结核和呼吸杂志	8	环境化学	8
岩石力学与工程学报	9	无机化学学报	9	北京林业大学学报	9	中华肿瘤杂志	9	自然灾害学报	9
高能物理与核物理	10	色谱	10	植物保护学报	10	中草药	10	农业环境保护	10

注: 中国科学院自然科学期刊编辑研究会自然科学学术期刊评价指标体系研究课题组运用“自然科学学术期刊评价指标体系”中的 11 个文献计量指标, 根据中国科学引文数据库 1999 年数据, 经加权统计和综合计算后, 得到我国自然科学学术期刊按学科分类的显示度排序。

(摘自 <http://www.ifc.dicp.ac.cn>)