

Pb, Cu 和 Zn 在自然水体生物膜中铁/锰氧化物等组分上的富集规律

赵兴敏¹, 花修艺¹, 付尧², 董德明¹, 刘劲夫¹

(1. 吉林大学环境与资源学院, 长春 130012;
2. 东北师范大学生命科学学院, 长春 130024)

摘要 用选择性萃取法萃取天然基质采集的生物膜中的铁/锰氧化物, 考察生物膜上铁/锰氧化物对水体中 Pb, Cu 及 Zn 的富集作用. 结果表明, 锰氧化物对生物膜富集 Pb 起主要作用, 而铁氧化物和除铁/锰氧化物以外的以有机质为主的其它组分的作用很小; 膜上其它组分对 Cu 的富集贡献较大, 锰氧化物的贡献与铁氧化物的接近; 锰氧化物对 Zn 的富集贡献最大, 铁氧化物和其它组分的贡献比较接近. 锰氧化物对 Pb, Cu 及 Zn 的富集能力分别高于铁氧化物的富集能力, 铁氧化物和锰氧化物对 3 种金属富集能力的大小顺序分别是 Zn > Cu > Pb 和 Zn > Pb ≥ Cu.

关键词 生物膜; 铁/锰氧化物; Pb, Cu, Zn; 富集

中图分类号 X132 **文献标识码** A **文章编号** 0251-0790(2006)09-1645-05

自然水体生物膜对水环境中重金属有较强的吸附作用, 研究表明, 生物膜中的铁/锰氧化物对生物膜吸附重金属具有重要的作用^[1,2]. Nelson^[3] 和 Wilson^[4] 等分别在实验室内利用加和模型研究了人工基质上培养的生物膜中各主要化学组分对 Pb 的吸附, 结果表明, 锰氧化物对 Pb 的吸附贡献最大, 其它组分的贡献较小. Dong 等^[5] 用选择性萃取法研究了人工基质上培养的生物膜在生长过程中对水体中 Pb 的吸附, 结果也表明, 生物膜上锰氧化物对 Pb 的吸附起主要作用, 其它组分的作用较小. 而以上这些实验都是在 Pb 浓度为 0.2 ~ 2.0 μmol/L 下进行的, 这一浓度已经超出了一般地表水中 Pb 的浓度, 而且自然水体与实验室内模拟实验的条件不同, 前者影响因素复杂, 后者影响因素单一, 因此实验室内的吸附实验并不一定能代表野外的实际情况. 此外, 人工基质生物膜是在自然水体水面以下 30 cm 处进行培养的, 受水体底泥和底层悬浮物的影响比较小, 且培养时间远小于天然基质上生物膜的生长时间, 不能代表水体的真实情况.

本实验中的生物膜是从天然基质上直接获得的, 其生长环境复杂, 更能反映天然水体的实际情况. 由于生物膜中铁氧化物和锰氧化物含量相差很大, 而且它们对重金属的吸附能力也不相同^[1,2], 因此有必要将铁氧化物和锰氧化物分开, 分别考察它们的作用. 本研究采用文献[5]方法研究了 Pb, Cu 及 Zn 在天然基质生物膜中主要化学组分上的富集情况, 对于深入了解重金属在自然水体生物膜上的富集规律具有重要的作用.

1 实验部分

1.1 生物膜的采集、前处理和定量

选择松花江吉林市区段采集自然水体生物膜, 具体的采样时间和地点见表 1. 将附着生物膜的岩石从水中取出, 用塑料器具轻轻地将生物膜刮入盛有微量矿物盐 (Minimal mineral salts, MMS)^[1] 溶液的聚乙烯瓶中, 在短时间内转移到实验室.

收稿日期: 2005-09-12.

基金项目: 国家自然科学基金 (批准号: 20477014) 及教育部高等学校博士学科点专项科研基金 (批准号: 20020183056) 资助.

联系人简介: 董德明 (1957 年出生), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事环境污染与控制化学及环境规划与评价研究.

E-mail: dmdong@mail.jlu.edu.cn

Table 1 Sites, time and natural conditions of water for sampling surface coatings

Sample number	Site	Time	Water temperature/°C	pH value of water
1	Linjiangmen Bridge	July, 2004	20	7.06
2	Jinlin Bridge	July, 2004	20	7.06
3	Linjiangmen Bridge	October, 2004	15	7.21
4	Jinlin Bridge	October, 2004	15	7.21
5	Jiangwan Bridge	October, 2004	15	7.21
6	Longtan Bridge	October, 2004	15	7.21

将采集到的生物膜过孔径为 2 mm 的标准筛, 去除杂质后, 加入一定体积的 MMS 溶液, 用磁力搅拌器搅拌均匀, 待用. 采用文献[6]的方法对生物膜定量: 取不同体积(2.0, 3.5, 5.0, 7.5 和 10.0 mL)搅拌均匀的生物膜悬浊液, 测量不同体积生物膜的干重, 并对体积与干重进行线性回归分析, 建立生物膜悬浊液体积与干重的关系.

1.2 生物膜的选择性萃取分析

为考察生物膜中铁/锰氧化物对 Pb, Cu 和 Zn 的富集作用, 需要把铁/锰氧化物从生物膜中有效地分离开来, 再考察各组分的富集贡献.

本文采用选择性萃取方法萃取生物膜上的铁/锰氧化物, 具体萃取条件为: 0.008 mol/L $\text{NH}_2\text{OH} \cdot \text{HCl}$ + 0.01 mol/L HNO_3 , 萃取 30 min 可有效分离锰氧化物; 0.8 mol/L $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_4$ 在 pH = 6.5 条件下萃取 40 min 可同时分离铁/锰氧化物^[7]. 用质量分数为 15% 的 HNO_3 溶液萃取 24 h, 萃取液中的 Fe, Mn, Pb, Cu 及 Zn 含量作为生物膜上酸溶态 Fe, Mn, Pb, Cu 及 Zn 的总量. 萃取实验在离心管中进行, 萃取液体积为 25 mL, 萃取时轻轻振荡. 经 $\text{NH}_2\text{OH} \cdot \text{HCl}$ 和 $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_4$ 萃取后的生物膜经润洗后, 用质量分数为 15% 的 HNO_3 溶液萃取膜上剩余的金属, 利用差减法得到萃取液中的金属含量.

用 WYX-9004 型火焰原子吸收分光光度计 (FAAS) 测定萃取液中 Fe, Mn 及 Zn 的含量, 用石墨炉原子吸收分光光度计 (GFAAS) 测定 Pb 和 Cu 的含量, 用 ICP-MS 测定水中各金属的含量.

1.3 统计分析方法

生物膜上除了对重金属起主要吸附作用的铁/锰氧化物外, 铝氧化物和有机质等对吸附也有一定的贡献, 但是相对于铁/锰氧化物而言, 它们的吸附作用较小^[1,3]. 因此, 本研究重点分析了生物膜中铁/锰氧化物的富集作用, 将膜上除铁/锰氧化物以外的以有机质为主的剩余组分作为一个整体统称为其它组分, 这样就有:

$$\Gamma_{\text{M}} = a\Gamma_{\text{Mn}} + b\Gamma_{\text{Fe}} + \Gamma_{\text{others}}$$

Γ_{M} 表示每一种萃取剂萃取后膜上剩余的重金属量 ($\mu\text{mol/g}$); Γ_{Mn} , Γ_{Fe} 和 Γ_{others} 分别表示单位质量生物膜中富集在锰氧化物、铁氧化物和其它组分上的重金属量 ($\mu\text{mol/g}$); a 和 b 表示萃取后膜上剩余 Mn, Fe 占原膜中 Mn, Fe 的百分率. 根据各萃取剂萃取后得到的金属萃取率和萃取量, 联立方程, 计算出膜上各主要化学组分对 Pb, Cu 和 Zn 的富集量 (Γ_{Mn} , Γ_{Fe} 和 Γ_{others}).

2 结果与讨论

2.1 生物膜和水中各主要化学组分的含量

将酸溶态金属含量列于表 2. 表 2 中数据表明, 不同时间和地点采集的生物膜上铁/锰氧化物的含量有一定的差异, 其中铁氧化物含量比锰氧化物含量高约 1~2 个数量级, 其它金属含量的大小顺序是 $\text{Zn} > \text{Cu} > \text{Pb}$. 同一时间不同地点以及同一地点不同时间采集的生物膜上金属含量具有一定的变化. 主

Table 2 Pb, Cu and Zn enrichment coefficients on surface coatings

Sample number	$10^{-4}K_{\text{Pb}}/$ ($\text{g} \cdot \text{mL}^{-1}$)	$10^{-4}K_{\text{Cu}}/$ ($\text{g} \cdot \text{mL}^{-1}$)	$10^{-4}K_{\text{Zn}}/$ ($\text{g} \cdot \text{mL}^{-1}$)	Sample number	$10^{-4}K_{\text{Pb}}/$ ($\text{g} \cdot \text{mL}^{-1}$)	$10^{-4}K_{\text{Cu}}/$ ($\text{g} \cdot \text{mL}^{-1}$)	$10^{-4}K_{\text{Zn}}/$ ($\text{g} \cdot \text{mL}^{-1}$)
1	1.4	2.7	0.8	4	1.4	2.6	2.3
2	1.6	2.7	1.5	5	0.8	2.9	1.7
3	2.0	2.4	1.8	6	1.4	1.5	0.7

要是因为影响生物膜形成和生长的因素很多, 主要包括水文条件、基质类型、水中微生物的数量和种类、水中有机和无机化学组成、水体的地球化学环境以及光照、水温等^[8~10]. 上述各因素单独或共同发生变化, 导致生物膜的生物和化学性质发生变化, 从而使膜上金属含量发生变化. 根据生物膜和水中的金属含量, 计算得出的自然水体生物膜对水中 Pb, Cu 及 Zn 的富集系数(即重金属在生物膜中的富集量与其在水中含量的比值)见表 2. 表 2 中数据显示, 生物膜对水中 Pb, Cu 及 Zn 的富集系数均很大, 说明生物膜对水中的重金属具有很强的富集作用.

2.2 铁/锰氧化物的萃取结果

由于不同时间或地点采集的生物膜化学组成、结构和微生物种类等均不同, 导致同一萃取剂对不同生物膜的萃取效果不同, 但相差并不大. 表 3 给出了各萃取剂对铁/锰氧化物的萃取量(即单位质量的生物膜中被萃取的铁/锰氧化物的量)和萃取率(被萃取的铁/锰氧化物占生物膜中铁/锰氧化物总量的百分数). 由表 3 可以看出, $\text{NH}_2\text{OH} \cdot \text{HCl}$ 对不同时间和不同地点采集的生物膜上锰氧化物的萃取率为 79%~86%, 对铁氧化物的影响很小(萃取率 4%~13%); $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_4$ 去除了 68%~78% 的铁氧化物和 86%~96% 的锰氧化物. 说明选择性萃取方法可较有效地分离生物膜上的铁/锰氧化物.

Table 3 Assessment of removal of Fe, Mn, Pb, Cu and Zn from surface coatings by selective extractions

No.	Extrac- tants ^a	$\Gamma_{\text{Fe}}/$ ($\mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1}$)	Extraction rate(%)	$\Gamma_{\text{Mn}}/$ ($\mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1}$)	Extraction rate(%)	$\Gamma_{\text{Pb}}/$ ($\mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1}$)	Extraction rate(%)	$\Gamma_{\text{Cu}}/$ ($\mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1}$)	Extraction rate(%)	$\Gamma_{\text{Zn}}/$ ($\mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1}$)	Extraction rate(%)
1 ^b	A	332.0 ± 1.0	100	9.18 ± 0.02	100	0.184 ± 0.010	100	0.672 ± 0.000	100	1.892 ± 0.031	100
	B	14.8 ± 0.1	4	7.69 ± 0.00	84	0.129 ± 0.010	70	0.250 ± 0.016	37	1.185 ± 0.015	63
	C	256.0 ± 2.0	77	8.65 ± 0.00	94	0.150 ± 0.005	82	0.422 ± 0.031	63	1.354 ± 0.000	72
2 ^b	A	648.0 ± 3.0	100	22.5 ± 0.0	100	0.357 ± 0.010	100	0.938 ± 0.016	100	3.108 ± 0.015	100
	B	39.9 ± 0.3	6	18.1 ± 0.0	80	0.208 ± 0.010	58	0.234 ± 0.031	25	1.243 ± 0.015	40
	C	459.0 ± 10.0	71	21.1 ± 0.0	94	0.285 ± 0.000	80	0.484 ± 0.016	52	2.108 ± 0.000	68
3 ^c	A	307.0 ± 2.0	100	27.8 ± 0.1	100	0.256 ± 0.000	100	0.609 ± 0.016	100	4.046 ± 0.031	100
	B	15.2 ± 0.2	5	22.1 ± 0.1	79	0.197 ± 0.010	77	0.094 ± 0.000	15	1.123 ± 0.092	28
	C	209.0 ± 2.0	68	25.0 ± 0.4	90	0.227 ± 0.000	89	0.281 ± 0.000	46	1.831 ± 0.138	45
4 ^c	A	331.0 ± 3.0	100	46.4 ± 0.4	100	0.314 ± 0.010	100	0.906 ± 0.031	100	4.677 ± 0.031	100
	B	42.2 ± 1.0	13	39.7 ± 0.1	86	0.201 ± 0.024	64	0.172 ± 0.000	19	1.497 ± 0.108	32
	C	258.0 ± 2.0	78	44.8 ± 0.2	96	0.256 ± 0.010	82	0.375 ± 0.047	41	3.185 ± 0.046	68
5 ^c	A	304.0 ± 13.0	100	39.2 ± 0.4	100	0.251 ± 0.000	100	0.906 ± 0.047	100	3.985 ± 0.154	100
	B	37.1 ± 1.3	12	33.8 ± 0.4	86	0.193 ± 0.005	77	0.172 ± 0.016	19	1.031 ± 0.046	26
	C	230.0 ± 3.0	76	36.4 ± 0.3	93	0.227 ± 0.039	90	0.297 ± 0.031	33	2.692 ± 0.015	68
6 ^c	A	223.0 ± 4.0	100	8.15 ± 0.15	100	0.184 ± 0.010	100	0.578 ± 0.047	100	3.031 ± 0.077	100
	B	24.2 ± 1.4	11	6.96 ± 0.02	85	0.136 ± 0.005	74	0.047 ± 0.000	8	1.323 ± 0.108	44
	C	165.0 ± 4.0	74	7.02 ± 0.13	86	0.169 ± 0.005	92	0.125 ± 0.031	22	1.554 ± 0.015	51

a. A. 15% HNO_3 , for 24 h; B. 0.008 mol/L $\text{NH}_2\text{OH} \cdot \text{HCl}$ + 0.01 mol/L HNO_3 , for 30 min; C. 0.8 mol/L $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_4$, pH = 6.5, for 40 min. b. Average ± standard deviation ($n=5$). c. Average ± deviation ($n=2$).

2.3 铁/锰氧化物等组分对 Pb, Cu 和 Zn 的富集

富集在铁/锰氧化物和其它组分上的 Pb, Cu 和 Zn 的萃取情况见表 3, 由表 3 数据经统计分析得出的生物膜上各主要化学组分对 Pb, Cu 及 Zn 的富集贡献(即膜中铁氧化物、锰氧化物和其它组分对重金属的富集量在生物膜对重金属的总富集量中所占的比例)分别见图 1(A)~图 1(C).

由于生物膜中的 Pb 主要结合在铁/锰氧化物上^[1,2], 在膜上大部分锰氧化物(79%~86%)被萃取的同时, 有 58%~77% 的 Pb 也被萃取下来, 用 $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_4$ 萃取生物后, 膜上有 80%~92% 的 Pb 被萃取掉. 从图 1(A)可以看出, 锰氧化物对 Pb 的富集贡献很大, 约为 72%~97%, 远高于铁氧化物和其它组分的吸附贡献, 铁氧化物和其它组分的富集贡献很小且较接近. 这是因为自然水体中 Pb 的浓度较低, 而当 Pb 浓度较低时, Pb 主要结合在锰氧化物上^[1,2], 这与以往用替代物^[3]和萃取前后的生物膜^[4]对铅的吸附以及 Dong 等^[5]对美国纽约州中部 Cayuga 湖中培养的生物膜对水中铅的清除情况类似, 即在 Pb 浓度很低时, 金属氧化物尤其是锰氧化物的吸附起主要作用, 其它组分的作用很小. 说明已往的实验室研究与天然水中的情况具有一定的可比性, 因此可在实验室内实验模拟自然水体的情况.

同一种生物膜经 $\text{NH}_2\text{OH} \cdot \text{HCl}$ 和 $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_4$ 分别萃取后, 从膜上萃取下来的 Cu 分别占 Cu 总量的

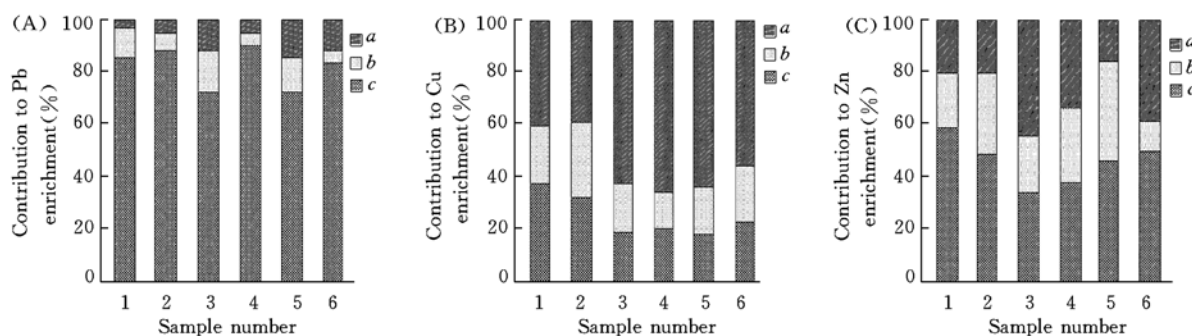


Fig. 1 Contributions of major chemical components to Pb(A), Cu(B) or Zn(C) enrichment

a. Other components; b. Fe oxides; c. Mn oxides.

8%~37% 和 22%~63%，这可能是因为生物膜上的 Cu 除一部分与铁/锰氧化物结合外，还有相当一部分与生物膜上的其它组分，如有机质等结合。

由图 1(B) 可以看出，生物膜上以有机质为主的其它组分对 Cu 的富集贡献(39%~66%)比铁氧化物和锰氧化物的贡献大，而锰氧化物的贡献与铁氧化物的贡献基本一致。

已报道的研究结果表明，东北地区河流沉积物中 Cu 的各种存在形态相对含量的大小次序为：残渣态 > 有机态 > 铁锰氧化物态 > 碳酸盐态 > 可交换态，铜在有机态中的相对含量明显高于其它各次生态，反映了 Cu 和有机质具有高度的亲和性^[11]。而生物膜生长在河流的岩石、表层沉积物和矿物颗粒表面，生长过程中受沉积物和底层悬浮物的影响较大。所以松花江水体生物膜中 Cu 的各种存在形态相对含量的次序可能与沉积物的类似，即与有机态结合的 Cu 含量可能较高，而其它存在形式的 Cu 含量可能较低。

就 Zn 而言，生物膜上 Zn 与铁/锰氧化物的结合情况介于 Pb 和 Cu 之间，大部分锰氧化物被萃取的同时，有 26%~63% 的 Zn 被萃取掉。铁/锰氧化物被同时萃取后，有 45%~72% 的 Zn 释放出来。图 1(C) 表示的是生物膜上各主要化学组分对 Zn 的富集贡献，从图 1(C) 可以看出，锰氧化物对 Zn 的富集贡献较大(34%~59%)，铁氧化物的贡献与其它组分的贡献基本接近，体现了生物膜中少量存在的锰氧化物对于生物膜富集 Zn 的重要性。

2.4 铁/锰氧化物等组分对 Pb, Cu 和 Zn 富集规律的比较

对比不同季节生物膜上铁/锰氧化物对各金属的富集贡献发现，1 和 2 号采样点处膜上铁/锰氧化物的贡献总体上要比其它采样点的大，这可能是因为 7 月份水温较高、光照充足及水中微生物丰富可能导致形成有利于提高生物膜上铁锰氧化物吸附活性的结构和形态。

由于生物膜上的铁/锰氧化物对重金属有很强的富集作用，所以本文集中计算了铁/锰氧化物对 3 种金属的富集能力(即单位量的某组分对重金属的富集量)，结果见表 4。由表 4 可以看出，对于所有采样点而言，锰氧化物对 Pb, Cu 和 Zn 的富集能力分别高于铁氧化物的约 1 个数量级。从总体上看，铁氧化物和锰氧化物对 3 种金属富集能力的大小顺序分别是 Zn > Cu > Pb 及 Zn > Pb ≥ Cu。重金属与铁/锰氧化物的结合是金属与铁/锰氧化物联结在一起的被包裹或本身就成为氢氧化物沉淀的部分，属于较强的离子键结合的化学形态^[11]，Pb, Cu 及 Zn 在生物膜中铁/锰氧化物上的富集能力除了与膜上铁/锰氧化物的富集点位有关外，还与金属的含量、水解常数及离子半径等因素有关。

Table 4 Abilities of Pb, Cu and Zn enrichment on the ferromanganese oxides of surface coatings

Sample number	$n(\text{Pb})/n(\text{Fe})$ (mmol/mol)	$n(\text{Cu})/n(\text{Fe})$ (mmol/mol)	$n(\text{Zn})/n(\text{Fe})$ (mmol/mol)	$n(\text{Pb})/n(\text{Mn})$ (mmol/mol)	$n(\text{Cu})/n(\text{Mn})$ (mmol/mol)	$n(\text{Zn})/n(\text{Mn})$ (mmol/mol)
1	0.060	0.747	3.34	17.10	16.70	43.6
2	0.025	0.460	2.32	9.78	12.30	43.4
3	0.163	0.362	4.45	8.13	4.28	31.8
4	0.033	0.544	5.38	5.15	2.82	28.0
5	0.158	0.543	6.09	6.53	4.08	38.3
6	0.036	0.596	6.78	18.80	15.00	42.1

3 结 论

生物膜上对铅起主要富集作用的是锰氧化物, 而铁氧化物和其它组分的作用很小, 这与以往实验室中生物膜对重金属的吸附结果相似; 相对铁/锰氧化物而言, 膜上除铁/锰氧化物以外的以有机质为主的其它组分对 Cu 起主要富集作用(富集贡献为 72%~90%), 锰氧化物的富集贡献接近于铁氧化物的富集贡献; 锰氧化物对 Zn 的富集贡献为最大, 为 34%~59%, 铁氧化物和其它组分的贡献较小, 且比较接近. 锰氧化物对 Pb, Cu 和 Zn 的富集能力均高于铁氧化物的富集能力, 在本研究条件下, 铁氧化物和锰氧化物对 Pb, Cu 和 Zn 富集能力的大小顺序分别是 $Zn > Cu > Pb$, $Zn > Pb \geq Cu$.

参 考 文 献

- [1] Dong D., Nelson Y. M., Lion L. W. *et al.*. *Water Res.* [J], 2000, **34**(2): 427—436
- [2] DONG De-Ming(董德明), LI Yu(李 鱼), HUA Xiu-Yi(花修艺) *et al.*. *Chem. J. Chinese Universities(高等学校化学学报)*[J], 2001, **22**(8): 1379—1381
- [3] Nelson Y. M., Lion L. W., Shuler M. L. *et al.*. *Limnol. Oceanogr.* [J], 1999, **44**(7): 1715—1729
- [4] Wilson A. R., Lion L. W., Nelson Y. M. *et al.*. *Environ. Sci. Technol.* [J], 2001, **35**(15): 3182—3189
- [5] Dong D., Derry L. A., Lion L. W. *et al.*. *Water Res.* [J], 2003, **37**(7): 1662—1666
- [6] DONG De-Ming(董德明), LI Yu(李 鱼), HUA Xiu-Yi(花修艺). *Environ. Sci. (环境科学)*[J], 2003, **24**(1): 131—134
- [7] ZHAO Xing-Min(赵兴敏), HUA Xiu-Yi(花修艺), ZHANG Jing-Jing(张菁菁) *et al.*. *J. Jilin University, Earth Science Edition(吉林大学学报, 地球科学版)*[J], 2005, **35**(4): 505—509
- [8] Fuchs S., Haritopoulou T., Wilhelmi M. *et al.*. *Water Sci. Tech.* [J], 1996, **34**(7/8): 137—140
- [9] Hunt A. P., Parry J. D. *et al.*. *Biofouling*[J], 1998, **12**(4): 287—303
- [10] Rao T. P. G., Venugopalan V. P., Nair K. V. K. *et al.*. *Biofouling*[J], 1997, **11**(4): 265—282
- [11] JIN Xiang-Can(金相灿), XU Nan-Ni(徐南妮), ZHANG Yu-Tian(张雨田) *et al.*. *Sediment Pollution Chemistry(沉积物污染化学)* [M], Beijing: Environmental Science of China Press, 1992: 342—347

Enrichment of Pb, Cu and Zn on Ferromanganese Oxides from Surface Coatings Collected in Natural Water

ZHAO Xing-Min¹, HUA Xiu-Yi¹, FU Yao², DONG De-Ming^{1*}, LIU Jin-Fu¹

- (1. *College of Environment and Resources, Jilin University, Changchun 130012, China;*
- 2. *School of Life Sciences, Northeast Normal University, Changchun 130024, China*)

Abstract Selective extraction technology was used to extract Fe oxides and Mn oxides from surface coatings. The concentrations of Fe, Mn, Pb, Cu and Zn after extracting were measured to study the enrichment of Pb, Cu and Zn on Fe oxides, Mn oxides and other components. The results show that Mn oxides contribute most to Pb enrichment and the contributions of Fe oxides and other components are relatively small. For Cu enrichment on each component, the contributions of other components are significantly higher and the contributions of Fe oxides are similar to the that of Mn oxides. The contributions of Mn oxides to Zn enrichment are higher, while the contributions of Fe oxides are close to the contributions of other components. The Pb, Cu and Zn enrichment abilities of Mn oxides are bigger than the enrichment abilities of Fe oxides. The Pb, Cu and Zn enrichment abilities of Fe oxides and Mn oxides follow this order respectively: $Zn > Cu > Pb$, $Zn > Pb \geq Cu$.

Keywords Surface coatings; Fe and Mn oxides; Pb, Cu and Zn; Enrichment

(Ed. : A, G)