

# 贵、重金属的生物吸附<sup>\*</sup>

张秀丽 刘月英<sup>\*\*</sup>  
(厦门大学生命科学学院 厦门 361005)

关键词 生物吸附; 贵金属; 重金属; 生物吸附剂; 吸附机理(参 33)

CLC X703

## BIOSORPTION OF PRECIOUS AND HEAVY METALS<sup>\*</sup>

ZHANG Xiuli & LIU Yueying<sup>\*\*</sup>  
(College of Life Sciences, Xiamen University, Xiamen 361005, China)

**Abstract** The biosorption of metals has already attracted a great deal of attention because of its application potential in environment protection and removal or recovery of precious and heavy metals. The research activities about biosorption of precious and heavy metal ions by the biosorbent, the biomass of microorganisms, plants and animals for deriving, was described in this paper. The mechanisms of biosorption were also reviewed. Ref 33

**Keywords** biosorption; precious metal; heavy metal; biosorbent; biosorptive mechanisms

CLC X703

采矿业和工业废水中常含有大量的重金属离子, 严重污染环境, 危害人类健康. 因此, 治理重金属污染的技术受到极大重视. 贵金属是指钌(Ru)、铑(Rh)、钯(Pd)、银(Ag)、锇(Os)、铱(Ir)、铂(Pt)、金(Au)等 8 种金属, 由于其特殊性能, 广泛应用于航天航空、电子和石油化工等工业. 随着工业的发展, 贵金属的应用愈加广泛, 但贵金属资源稀少, 冶炼困难. 因此, 从含贵金属的废料、废液和废水等“二次资源”中回收贵金属具有重要的经济和社会意义. 从废液、废水中去除重金属或回收贵金属, 传统的方法有化学沉淀法、电解法、离子交换法和膜技术分离法等, 这些方法最突出的缺点在于处理低浓度金属废水时, 操作繁琐, 运行费用较高, 能耗大, 且易造成二次污染. 生物吸附法是利用生物通过物理、化学的作用吸附金属的过程. 许多研究表明, 生物吸附技术在金属的去除或回收中具有良好的应用潜力. 本文就近几年国内外利用生物物质吸附贵、重金属及其机理的研究情况作一概述.

## 1 生物吸附

生物吸附依据吸附剂原料的来源可分为微生物吸附、植物材料吸附和动物材料吸附. 关于重金属的生物吸附, 特别是微生物的吸附, 国内外已有许多报道, 而有关贵金属的生物吸附以及动、植物材料作为吸附剂吸附贵、重金属的报道不多.

### 1.1 微生物吸附

用于生物吸附的原核微生物主要有芽孢杆菌属、假单胞菌属、链霉菌属等. 例如芽孢杆菌属中的巨大芽孢杆菌(*Bacil-*

*lus megaterium*) 在适宜的条件下, 其静息细胞每克干菌体对  $Au^{3+}$  的吸附量可达  $302.0 \text{ mg}^{[1]}$ , 其死菌体每克干菌体对  $Pt^{4+}$  的吸附量为  $94.3 \text{ mg}^{[2]}$ , 蕈状芽孢杆菌(*Bacillus mycoides*)能吸附 As, 枯草芽孢杆菌(*Bacillus subtilis*)能吸附 Pd、Zn、Cu 等金属离子<sup>[3]</sup>. 刘月英等人<sup>[4]</sup>利用从矿坑水分离的地衣芽孢杆菌(*Bacillus licheniformis*) R08 死菌体, 在适宜的条件下, 每克干菌体可吸附  $224.8 \text{ mg Pd}^{2+}$ . Texier<sup>[5]</sup>用铜绿假单胞菌(*Pseudomonas aeruginosa*) 吸附镧系金属  $La^{3+}$ 、 $Eu^{3+}$ 、 $Yb^{3+}$ , 在单组分吸附中, 该菌对这 3 种金属的最大吸附量分别为  $397.290$ 、 $326 \text{ mmol/g}$ . Mzuricio 等人报道<sup>[6]</sup>, 用 *Monoraphidium* sp., *Bakers yeast*, *Penicillium* sp. 从酸性溶液中吸附回收铀, 吸附量分别为  $1151 \text{ mg/g}$ 、 $313 \text{ mg/g}$  和  $178 \text{ mg/g}$ , 都高于活性炭的吸附量( $61 \text{ mg/g}$ ). 傅锦坤等人<sup>[7]</sup>用乳酸杆菌 A09 吸附  $Ag^+$ , 在适宜条件下, 吸附量可达  $125 \text{ mg/g}$ . 刘月英等人<sup>[8]</sup>用金霉素发酵生产的金霉素链霉菌菌丝体吸附  $Au^{3+}$ , 在起始  $Au^{3+}$  浓度  $100 \text{ mg/L}$ 、菌浓度  $2 \text{ g/L}$ 、pH 3.5 和  $30^\circ\text{C}$  条件下, 吸附 45 min, 吸附量可达  $45.6 \text{ mg/g}$ .

真核微生物的霉菌、酵母和藻类对金属也有很强的吸附能力. 霉菌中的根霉属、青霉属、曲霉属等均能吸附金属离子. 无根根霉(*Rhizopus arrhizus*)、米根霉(*R. oryzae*)、寡孢根霉(*R. oligosporus*) 可吸附多种重金属离子, 如  $Cd^{2+}$ 、 $Pb^{2+}$ 、 $Cu^{2+}$ 、 $Zn^{2+}$  等<sup>[9]</sup>. 产黄青霉(*Penicillium chrysogenum*)、小刺青霉(*P. spimulosum*) 可吸附  $Au^{3+}$  和  $Pb^{2+}$  等多种贵、重金属离子. 产黄青霉<sup>[10]</sup> 在含钙、铜、钴、镍等的金属混合液中, 可优先吸附铅, 其金属离子的吸附顺序为:  $Pb^{2+} > Cu^{2+} > Zn^{2+} > Cd^{2+} > Ni^{2+} > Co^{2+}$ . Pethkar 等人<sup>[11]</sup>用经处理的家禽羽毛包埋芽枝状枝孢, 在  $Au^{3+}$  浓度为  $100 \text{ mg/L}$ 、生物吸附剂浓度 3% 和 pH 4 的条件下, 吸附 60 min, 每克固定化细胞吸附量达  $100 \text{ mg Au}^{3+}$ . 小型真菌(*micromyces*)<sup>[12]</sup> 可吸附多种重金属离子, 其

收稿日期: 2001-12-19 修回日期: 2002-05-13 接受日期: 2002-06-26

\*国家自然科学基金资助项目(No. 29876026) Supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 29876026)

\*\*通讯作者 Corresponding author

不同的属、种均可从  $\text{AgNO}_3$  溶液中回收银。酿酒酵母 (*Saccharomyces cerevisiae*) 可吸附重金属如  $\text{Pb}^{2+}$ 、 $\text{Zn}^{2+}$ 、 $\text{Cd}^{2+}$  和金、银等贵金属。刘月英等人<sup>[13]</sup> 用啤酒发酵工业的啤酒酵母菌体吸附  $\text{Au}^{3+}$ , 在适宜的条件下, 吸附 30 min, 每克菌体吸附量可达 55.9 mg。

自然界大量存在的藻类也可用于贵、重金属的吸附。褐藻的 *Durvillaea*、*Laminaria*、*Ecklonia*、*Homosira* 对镉的吸附是钙、钾、镁的两倍<sup>[14]</sup>。张小枝等<sup>[15]</sup> 用蓝细菌满江红鱼腥藻吸附浓度每升铀低于 5.5 mg, 在 2 min 内吸附即可达到平衡。钝顶螺旋藻能用于从金—硫脲溶液回收金。颤藻 (*O. angustissima*)<sup>[16]</sup> 对锌的吸附表现出高的吸附性能, 在 129.2 mg/L 的溶液中吸附量达 641 mg/g。 *Scenedesmus obliquus* 和 *Synechocystis* sp. 也能吸附  $\text{Cu}^{2+}$ 、 $\text{Ni}^{2+}$ 、 $\text{Cd}^{6+}$ 。9 种海洋巨藻体<sup>[17]</sup> 吸附重金属 (镉、铜、铅), 每克干物质最大吸附量达 0.8~1.6 mmol, 比其它类型的藻体高。泥炭藓 (*Sphagnaceae* sp.) 可去除水中的 Fe、Al、Pb、Cu、Cd、Zn 等金属离子。Mark Spinti 等<sup>[18]</sup> 用聚合矾固定泥炭藓制成固定化菌体, 其球状小粒机械强度高、化学稳定性好、容易再生、不膨胀收缩。该固定化藻体已成功地用于从酸性矿井水中去除 Zn、Cd、Mg 等金属。

## 1.2 植物材料吸附

用植物材料制备吸附剂吸附贵、重金属鲜有报道。大型植物 *Potamogeton lucens* 经 60 °C 烘干、研磨得到直径小于 0.59 mm 的颗粒, 吸附  $\text{Cu}^{2+}$  不受等离子浓度的  $\text{Na}^+$ 、 $\text{Ca}^{2+}$  的影响, 非离子表面活性剂 (如松油) 对该吸附剂吸附  $\text{Cu}^{2+}$  也无影响, 而阴离子表面活性剂 (如油酸盐) 的阴性基团能与该吸附剂的表面阴离子基团竞争吸附溶液中的  $\text{Cu}^{2+}$ <sup>[19]</sup>。Gardea-Torresdey 等人<sup>[20]</sup> 取洗净的苜蓿 (alfalfa) 茎和叶 90 °C 烘干, 研磨, 过 100 目筛制得苜蓿颗粒作为实验材料, 从水溶液中回收金。他们用与制备苜蓿茎、叶颗粒吸附剂相同的方法制备紫苜蓿 (*Medicago sativa*) 茎、叶颗粒制剂<sup>[21, 22]</sup>, 该制剂在 pH 5.0, 吸附 5 min, 对几种金属离子的吸附量分别为  $\text{Cu}^{2+}$  368.5  $\mu\text{mol/g}$ 、 $\text{Cr}^{3+}$  215.4  $\mu\text{mol/g}$ 、 $\text{Pb}^{3+}$  168.0  $\mu\text{mol/g}$ 、 $\text{Zn}^{2+}$  56.9  $\mu\text{mol/g}$ 、 $\text{Ni}^{2+}$  49.2  $\mu\text{mol/g}$  和  $\text{Ca}^{2+}$  40.3  $\mu\text{mol/g}$ 。紫苜蓿经 0.1 mol/L HCl 预处理后对  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Cu}^{2+}$ 、 $\text{Pb}^{2+}$ 、 $\text{Ni}^{2+}$  和  $\text{Zn}^{2+}$  的回收率可达 90%, 但  $\text{Cr}^{3+}$  的回收率仅为 44%。在含有  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{Na}^+$  分别 1 000 mg/L 和  $\text{Cu}^{2+}$  100  $\mu\text{g/L}$  的溶液中, 该吸附剂对  $\text{Cu}^{2+}$  的吸附不受  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{Na}^+$  的影响。在墨西哥, *Avena monida* 收割后的茎和叶通常被焚烧, 但是 *Avena monida* 的副产物茎、叶和果实的外壳经与制备苜蓿吸附剂相同的方法制备的颗粒制剂, 可吸附  $\text{Cr}^{5+}$ , 其吸附率随温度的升高和时间的延长而增加<sup>[23]</sup>。在国内, 郑逢中等人<sup>[24]</sup> 将 4 种红树植物 (秋茄、红海榄、白骨壤、桐花树) 落叶烘干、研磨, 制成粒径为 2~3 mm 的颗粒制剂, 用于吸附  $\text{Cu}^{2+}$ 、 $\text{Pb}^{2+}$ 、 $\text{Ni}^{2+}$ 、 $\text{Cd}^{2+}$ 。结果表明, 白骨壤叶颗粒用于处理  $\text{Pb}^{2+}$  2 mg/L 或  $\text{Cd}^{2+}$  2 mg/L 时, 对  $\text{Pb}^{2+}$ 、 $\text{Cd}^{2+}$  的吸附量分别可达 0.342 mg/g 和 0.298 mg/g; 对  $\text{Cu}^{2+}$ 、 $\text{Ni}^{2+}$  的吸附, 秋茄较强, 桐花树较弱, 他们的吸附量分别相差 1.78 倍和 1.66 倍; 在重金属离子浓度 2~5 mg/L 范围内, 4 种红树植物落叶颗粒制剂的吸附量随重金属离子浓度的提高而

增大, 但吸附率无显著下降, 表明他们对重金属的吸附具有较大的潜在容量。

## 1.3 动物材料吸附

有关用动物材料作为吸附剂吸附金属的报道也很少。鸡毛 (CF) 来源广泛, 含有表面积大、复杂稳定的网状水不溶性蛋白质。用鸡毛制备的吸附剂可吸附多种贵金属 (金和铂族金属), 在一定的条件下, 对  $\text{Au}^{3+}$ 、 $\text{Pt}^{3+}$ 、 $\text{Pd}^{2+}$  的吸附分别可达鸡毛干重的 17%、13% 和 13%。当溶液中有比贵金属离子浓度高 100 倍的其它离子如  $\text{Na}^+$ 、 $\text{Fe}^{3+}$ 、 $\text{Cu}^{2+}$ 、 $\text{Ni}^{2+}$  等存在时, 该吸附剂对贵金属的吸附不受影响<sup>[25]</sup>。Ishikawa<sup>[26]</sup> 发现, 在鸡毛吸附金属中起主要作用的是动物纤维蛋白 (AFPs), 该蛋白也存在于鸡蛋壳膜 (ESM)、羊毛和蚕丝中。在相同的吸附条件下, ESM、CF、羊毛和蚕丝对金的吸附分别达到干重的 8.6%、7.1%、9.8% 和 2.4%。研究还发现 ESM 吸附金离子后, 用 0.1 mol/L NaOH 洗脱后可重复使用。

## 2 生物吸附机理

Veglio 和 Beolchini<sup>[27]</sup> 根据生物吸附金属是否依赖细胞的代谢, 把生物吸附机理分为代谢依赖的和非代谢依赖的; 而根据从溶液中去掉的金属的定位, 把生物吸附分为: (1) 胞外聚集或沉淀; (2) 细胞表面吸附或沉淀; (3) 胞内聚集。由于生物吸附剂的多样性及其结构的复杂性, 以及金属溶液组成的复杂性, 生物物质吸附金属的机理十分复杂, 在某些方面尚未完全被了解。但普遍认为生物吸附 (biosorption) 有别于生物聚集 (biological accumulation), 生物聚集依赖代谢作用, 而生物吸附与代谢无关。一些研究表明, 生物吸附机理主要有静电吸附、离子交换、络合和氧化还原等作用; 一种生物吸附剂可能通过上述机制中的一种或多种吸附某一金属离子, 而对不同的金属离子的吸附机制也可能不同。

### 2.1 静电吸附作用

Kuyucak 等人<sup>[28]</sup> 在用死的漂浮马尾藻吸附金的研究中发现, 在有其它金属离子 (如  $\text{UO}_2^{2+}$ 、 $\text{Pb}^{2+}$ 、 $\text{Zn}^{2+}$ 、 $\text{Ag}^+$ )、pH 2.5 的溶液中, 漂浮马尾藻能选择性地吸附金。他们认为在较低的 pH 条件下, 氯亚金酸盐水解生成不同的金属阴离子基团, 而在此 pH 下, 漂浮马尾藻细胞表面的功能基团, 如胺基和羧基使细胞表面带正电荷。因此, 漂浮马尾藻吸附金是其细胞表面所带的正电荷与带负电荷的金离子基团之间的静电作用的结果。死的藻类、丝状真菌和酵母菌体在 pH 4~5 时, 吸附铀、镉、锌、铜和钴, 是由于在此 pH 下, 这些金属都电离成阳离子, 而生物体上的羟基化合物大量电离, 形成带负电荷的表面。因此, 菌体吸附金属是其表面所带的负电荷与溶液中的金属阳离子之间的静电作用的结果<sup>[28]</sup>。静电吸附作用已被证明是细菌 [如生枝动胶菌 (*Zoogloea ramigera*)] 和藻类 [如普通小球藻 (*Chlorella vulgaris*)] 对铜的吸附<sup>[29]</sup>, 真菌, 如透明灵芝 (*Ganoderma lucidum*) 和黑曲霉 (*Aspergillus niger*) 吸附铅<sup>[30]</sup>, 无根根霉 (*Rhizopus arrhizus*) 吸附铜<sup>[31]</sup>、镍、锌、钙及铅<sup>[32]</sup> 的原因。

### 2.2 离子交换作用

微生物和植物细胞壁的主要成分是多糖, 多糖中的离子能

与溶液中的二价金属离子交换,例如海洋藻类中的褐藻细胞壁中的藻酸盐,含有  $K^+$ 、 $Na^+$ 、 $Ca^{2+}$  或  $Mg^{2+}$ , 这些离子能与溶液中的  $Co^{2+}$ 、 $Cu^{2+}$ 、 $Cd^{2+}$ 、 $Zn^{2+}$  交换, 结果溶液中的金属离子被吸附到细胞壁上<sup>[28]</sup>. 离子交换作用也被发现是真菌透明灵芝 (*Ganoderma lucidum*)<sup>[33]</sup> 和黑曲霉 (*Aspergillus niger*)<sup>[30]</sup> 吸附  $Cu^{2+}$  的原因. 啤酒酵母菌<sup>[13]</sup> 和乳酸杆菌<sup>[7]</sup> 吸附  $Ag^+$ , 金霉素链霉菌废菌丝体<sup>[8]</sup> 吸附  $Au^{3+}$  的过程中, 都呈现溶液的 pH 值下降的现象, 说明在这些微生物吸附金属过程中, 菌体上的功能基团的  $H^+$  被金属离子取代, 即发生了离子交换作用.

### 2.3 络合作用

微生物和植物细胞壁含有巯基、羟基、羧基、咪唑基、胺基、胍基、亚胺基等活性基团, 这些基团中的 N、O、P、S 等均可提供孤对电子与贵、重金属离子在细胞表面形成络合物或螯合物, 使溶液中的金属离子被吸附. Aksu<sup>[29]</sup> 研究发现, 普通小球藻对铜的吸附是金属与细胞壁多糖中的氨基和羧基的吸附络合. 无根根霉吸附钍和铀的吸附机制中包括静电吸附和络合作用<sup>[27]</sup>. 但丁酸假单胞菌 (*Pseudomonas syringae*) 吸附钙、镁、镉、锌、铜、汞, 只存在络合作用<sup>[27]</sup>.

### 2.4 氧化还原作用

一般来说, 生物吸附中的氧化还原反应需要有代谢活性的细胞参与, 但已发现死的微生物菌体也能将金属离子还原成金属元素. 例如, 静息的巨大芽孢杆菌(活细胞)<sup>[1]</sup>、啤酒酿造工业的啤酒酵母废菌体(死的细胞)<sup>[13]</sup> 和金霉素发酵的金霉素链霉菌废菌丝体(死的细胞)<sup>[8]</sup> 不仅能吸附  $Au^{3+}$ , 而且能使  $Au^{3+}$  还原, 并形成不同性状和大小的金晶体. 死的巨大芽孢杆菌吸附铂<sup>[2]</sup> 和死的地衣芽孢杆菌吸附钼<sup>[4]</sup> 都存在着氧化还原作用. 苜蓿的茎和叶经 90 °C 烘干, 研磨, 制得的苜蓿颗粒也能使  $Au^{3+}$  还原成  $Au^0$  胶体金, 溶液的起始 pH 不同, 所得到的金晶体的半径不同, pH 5.0 时, 晶体的半径为 0.621, pH 2.0 时为 0.901<sup>[20]</sup>.

## 3 结束语

许多研究表明, 来源于微生物, 包括死的和活的细菌、霉菌、酵母和藻类, 以及植物和动物的生物物质都具有吸附金属的能力, 可用于制备吸附金属的生物吸附剂. 但目前研究仍主要集中于用微生物菌体作为生物吸附剂的研究. 因此, 拓宽生物吸附剂的原料范围, 寻找更多吸附量大、选择性高或能同时吸附多种金属的生物材料, 以及降低生产成本仍是促进生物吸附技术实用化的努力方向.

目前, 生物吸附金属的机理尚未完全被了解, 深入探索和研究生物吸附金属的机理, 对于充分利用生物物质吸附金属的能力, 开发更多有效的生物吸附剂, 用于去除或回收贵、重金属具有重要的经济和社会意义.

### References

- Liu YY(刘月英), Fu JK(傅锦坤), Chen P(陈平), Yu XS(于新生), Yang PC(阳鹏程). Studies on biosorption of  $Au^{3+}$  by *Bacillus Megaterium*. *Acta Microbiol Sin* (微生物学报), 2000, **40**(4): 425 ~ 429
- Liu YY, Fu JK, Zhou ZH, Yu XS, Yao BX. A study of  $Pt^{4+}$ -adsorption and its reduction by *Bacillus megaterium* D01. *Chem Res Chin Univ*, 2000, **16**(3): 1 ~ 4
- Niu H, Volesky B. Characteristics of gold biosorption from cyanide solution. *J Chem Technol & Biotechnol*, 1999, **74**(8): 778 ~ 784
- Liu YY(刘月英), Fu JK(傅锦坤), Li RZ(李仁忠), Zhang XL(张秀丽), Hu ZY(胡志钰). Studies on biosorption of  $Pd^{2+}$  by bacteria. *Acta Microbiol Sin* (微生物学报), 2000, **40**(5): 536 ~ 539
- Texier AC, Andres Y, Leclourec P. Selecting biosorption of lanthanide (La, Eu, Yb) ions by *Pseudomonas aeruginosa*. *Environ Sci & Technol*, 1999, **33**(3): 489 ~ 495
- Mauricio CP, Oswald GJ, Petr M. Neodymium biosorption from acidic solutions in batch system. *Process Biochem*, 2000, **36**: 441 ~ 444
- Fu JK(傅锦坤), Liu YY(刘月英), Gu PY(古萍英), Tang DL(汤丁亮), Lin ZY(林种玉), Yao BX(姚炳新), Weng SZ(翁绳周). Spectroscopic characterization on the biosorption and bioreduction of Ag(I) by *Lactobacillus* sp. A09. *Acta Physico-Chim Sin* (物理化学学报), 2000, **16**(9): 779 ~ 781
- Liu YY, Fu JK, Hu HB, Tang DL, Ni ZM, Yu XS. Properties and characterization of  $Au^{3+}$ -adsorption by mycelial waste of *Streptomyces aureofaciens*. *Chin Sci Bulletin*, 2001, **46**(20): 1709 ~ 1712
- Yin PH, Yu QM, Jin B, Ling Z. Biosorption removal of cadmium from aqueous solution by using pretreated fungal biomass cultured from starch wastewater. *Wat Res*, 1999, **33**(8): 1960 ~ 1963
- Puranik PR, Pakinikar KM. Influence of co-cations on biosorption of lead and zinc comparative evaluation in binary and multimetal systems. *Bioresour Technol*, 1999, **70**: 269 ~ 276
- Pethkar AV, Pakinikar KM. Recovery of gold from solutions using *Cladosporium cladosporioides* biomass beads. *J Biotechnol*, 1998, **63**: 121 ~ 136
- Korenevskii AA, Khamidova K, Avakyan ZA, Karavaiiko GI. Silver biosorption by *micromyces*. *Microbiol*, 1999, **68**(2): 139 ~ 145
- Liu YY, Fu JK, Luo XF, Ni ZM, Chen P, Yu XS. Transmission electron microscopic observation of  $Au^{3+}$  biosorption by *Saccharomyces cerevisiae* waste biomass. *J Chin Elec Micro Society*, 2000, **19**(5): 695 ~ 698
- Figueira MM, Volesky B, Ciminli VST, Felicity AR. Biosorption of metals in brown seaweed biomass. *Wat Res*, 2000, **34**(1): 196 ~ 204
- Zhang XZ(张小枝), Luo SG(罗上庚), Yang Q(杨群), Zhang HL(张怀礼), Li JY(李金英), Shi DJ(施定基), Wang WQ(王文清). Biosorption of uranium at low concentration by *anabaena zoellae*. *J Nuclear & Radiochem* (核化学与放射化学), 1998, **20**(2): 114 ~ 118
- Ahuja P, Gupta R, Szxena RK.  $Zn^{2+}$  biosorption by *Oscillatoria angustissima*. *Process Biochem*, 1999, **34**: 77 ~ 85
- Yu QM, Matheikal JT, Yin PH, Kaewsam P. Heavy metal uptake capacities of common marine macro algal biomass. *Wat Res*, 1999, **33**(6): 1534 ~ 1537
- Spinti M. Evaluation of immobilized biomass beads for removing heavy metals from waste water. *Wat Environ Res*, 1995, **67**(6): 943 ~ 952
- Schneider IAH, Smith RW, Rubio J. Effect of mining chemicals on

- biosorption of Cu(II) by the non-living biomass of the macrophyte *potamogeton lucens*. *Minerals Eng*, 1999, **12**(3): 255 ~ 260
- 20 Gardea-Torresdey JL, Tiemann KJ, Gamez G, Dokken K, Cano-Aguilera F, Furenlid LR. Reduction and accumulation of gold(III) by *Medicago sativa* alfalfa biomass X-ray adsorption spectroscopy, pH and temperature dependence. *Environ Sci & Technol*, 2000, **34**(20): 4392 ~ 4396
- 21 Gardea-Torresdey JL, Tiemann KJ, Gamez G, Dokken K. Effects of chemical competition for multi-metal binding by *Medicago sativa* (alfalfa). *J Hazardous Materials*, 1999, **B69**: 41 ~ 51
- 22 Gardea-Torresdey JL, Tiemann KJ, Parsons JG. Determination of trace level copper(II) binding to *Medicago sativa* (alfalfa) by graphite furnace atomic absorption spectroscopy with Zeeman background correction. *J Microchem*, 2001, **69**: 133 ~ 142
- 23 Gardea-Torresdey JL, Tiemann KJ, Amendaniz V, Bess-Oberto L, Chianelli RR, Rios J, Parsons JG, Gamez G. Characterization of Cr(VI) binding and reduction to Cr(III) by the agricultural byproducts of *Avena monida* (Oat) biomass. *J Hazardous Materials*, 2000, **B80**: 175 ~ 188
- 24 Zheng FZ(郑逢中), Hong LY(洪丽玉), Zheng WJ(郑文教). A primary study on adsorption of certain heavy metals on the litter leaf detritus of some Mangrove species. *J xiamen Univ(Nat Sci)* [厦门大学学报(自然科学版)], 1998, **37**(1): 137 ~ 141
- 25 Suyama K, Fakazawa Y, Suzumura H. Biosorption of precious metal ions by chicken feather. *Appl Biochem & Biotechnol*, 1996, **57**(8): 67 ~ 74
- 26 Ishikawa S, Suyama K. Recovery and refining of Au by gold-cyanide ion biosorption using animal fibrous proteins. *Appl Biochem & Biotechnol*, 1998, **70**(2): 719 ~ 728
- 27 Veglio F, Beolchini F. Removal of metals by biosorption: a review. *Hydrometallurgy*, 1997, **44**: 301 ~ 307
- 28 Kuyucak N, Volesky B. Biosorbents for recovery of metals from industrial solutions. *Biotechnol Lett*, 1988, **10**(2): 137 ~ 142
- 29 Aksu Z. Investigation of biosorption of copper(II) by *C. vulgaris* and *Z. ramigera*. *Environ Technol*, 1992, **13**: 579 ~ 586
- 30 Venkobachar C. Metal removal by waste biomass to upgrade wastewater treatment plants. *Wat Sci Technol*, 1990, **22**: 319 ~ 320
- 31 Zhou JL, Kiff RJ. The uptake of copper from aqueous solution by immobilized fungal biomass. *J Chem Technol Biotechnol*, 1991, **52**: 317 ~ 330
- 32 Fourest E, Roux JC. Heavy metal biosorption by fungal mycelial by-products: mechanism and influence of pH. *Appl Microbiol Biotechnol*, 1992, **37**: 399 ~ 403
- 33 Muraleedharan TR, Venkobachar C. Mechanism of biosorption of copper(II) by *Ganoderma Lucidum*. *Biotechnol Bioeng*, 1990, **35**: 320 ~ 325

## 邓 雄、任安芝等获我刊优秀论文奖

根据我部决定(见本刊 1999 年第 2 期第 159 页)和有关专家推选评定, 邓 雄、李小明、张希明、叶万辉、赵 强的论文《塔克拉玛干 4 种荒漠植物气体交换与环境因子的关系初探》[2002, **8**(5): 445 ~ 452] 和任安芝、高玉葆、李 侠的论文《内生真菌感染对黑麦草若干抗旱生理特征的影响》[2002, **8**(5): 535 ~ 539] 获本刊 2002 年第 5 期优秀论文奖。本刊将授予两篇论文奖金各 500 元人民币, 授予两篇论文的每位作者获奖证书。