

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

Acta Ecologica Sinica



第31卷 第20期 Vol.31 No.20 **2011**

中国生态学学会
中国科学院生态环境研究中心
科学出版社

主办
出版



中国科学院科学出版基金资助出版

生态学报

(SHENGTAI XUEBAO)

第 31 卷 第 20 期 2011 年 10 月 (半月刊)

目 次

- 洋山港潮间带大型底栖动物群落结构及多样性..... 王宝强,薛俊增,庄 骅,等 (5865)
- 天津近岸海域夏季大型底栖生物群落结构变化特征..... 冯剑丰,王秀明,孟伟庆,等 (5875)
- 基于景观遗传学的滇金丝猴栖息地连接度分析..... 薛亚东,李 丽,李迪强,等 (5886)
- 三江平原湿地鸟类丰富度的空间格局及热点地区保护..... 刘吉平,吕宪国 (5894)
- 江苏沿海地区耕地景观生态安全格局变化与驱动机制 王 千,金晓斌,周寅康 (5903)
- 广州市主城区树冠覆盖景观格局梯度..... 朱耀军,王 成,贾宝全,等 (5910)
- 景观结构动态变化及其土地利用生态安全——以建三江垦区为例 林 佳,宋 戈,宋思铭 (5918)
- 基于景观安全格局的香格里拉县生态用地规划..... 李 晖,易 娜,姚文璟,等 (5928)
- 苏南典型城镇耕地景观动态变化及其影响因素..... 周 锐,胡远满,苏海龙,等 (5937)
- 放牧干扰下若尔盖高原沼泽湿地植被种类组成及演替模式..... 韩大勇,杨永兴,杨 杨,等 (5946)
- 放牧胁迫下若尔盖高原沼泽退化特征及其影响因子..... 李 珂,杨永兴,杨 杨,等 (5956)
- 近 20 年广西钦州湾有机污染状况变化特征及生态影响..... 蓝文陆 (5970)
- 万仙山油松径向生长与气候因子的关系 彭剑峰,杨爱荣,田沁花 (5977)
- 50 年来山东塔山植被与物种多样性的变化 高 远,陈玉峰,董 恒,等 (5984)
- 热岛效应对植物生长的影响以及叶片形态构成的适应性..... 王亚婷,范连连 (5992)
- 遮荫对濒危植物崖柏光合作用和叶绿素荧光参数的影响..... 刘建锋,杨文娟,江泽平,等 (5999)
- 遮荫对 3 年生东北铁线莲生长特性及品质的影响..... 韩忠明,赵淑杰,刘翠晶,等 (6005)
- 云雾山铁杆蒿茎叶浸提液对封育草地四种优势植物的化感效应..... 王 辉,谢永生,杨亚利,等 (6013)
- 杭州湾滨海滩涂盐基阳离子对植物分布及多样性的影响 吴统贵,吴 明,虞木奎,等 (6022)
- 藏北高寒草原针茅属植物 AM 真菌的物种多样性..... 蔡晓布,彭岳林,杨敏娜,等 (6029)
- 成熟马占相思林的蒸腾耗水及年际变化..... 赵 平,邹绿柳,饶兴权,等 (6038)
- 荆条叶性状对野外不同光环境的表型可塑性..... 杜 宁,张秀茹,王 炜,等 (6049)
- 短期极端干旱事件干扰后退化沙质草地群落恢复力稳定性的测度与比较..... 张继义,赵哈林 (6060)
- 滨海盐碱地土壤质量指标对生态改良的响应..... 单奇华,张建锋,阮伟建,等 (6072)
- 退化草地阿尔泰针茅与狼毒种群的小尺度种间空间关联..... 赵成章,任 珩 (6080)
- 延河流域植物群落功能性状对环境梯度的响应 龚时慧,温仲明,施 宇 (6088)
- 臭氧胁迫使两优培九倒伏风险增加——FACE 研究 王云霞,王晓莹,杨连新,等 (6098)
- 甘蔗//大豆间作和减量施氮对甘蔗产量、植株及土壤氮素的影响 杨文亭,李志贤,舒 磊,等 (6108)
- 湿润持续时间对生物土壤结皮固氮活性的影响..... 张 鹏,李新荣,胡宜刚,等 (6116)
- 锌对两个品种茄子果实品质的效应..... 王小晶,王慧敏,王 菲,等 (6125)
- Cd²⁺ 胁迫对银芽柳 PS II 叶绿素荧光光响应曲线的影响 钱永强,周晓星,韩 蕾,等 (6134)
- 紫茉莉对铅胁迫生理响应的 FTIR 研究 薛生国,朱 锋,叶 晟,等 (6143)

结缕草对重金属镉的生理响应	刘俊祥,孙振元,巨关升,等 (6149)
两种大型真菌子实体对 Cd ²⁺ 的生物吸附特性	李维焕,孟凯,李俊飞,等 (6157)
富营养化山仔水库沉积物微囊藻复苏的受控因子	苏玉萍,林慧,钟厚璋,等 (6167)
一种新型的昆虫诱捕器及其对长足大竹象的诱捕作用	杨瑶君,刘超,汪淑芳,等 (6174)
光周期对梨小食心虫滞育诱导的影响	何超,孟泉科,花蕾,等 (6180)
农林复合生态系统防护林斑块边缘效应对节肢动物的影响	汪洋,王刚,杜瑛琪,等 (6186)
中国超大城市土地利用状况及其生态系统服务动态演变	程琳,李锋,邓华锋 (6194)
城市综合生态风险评价——以淮北市城区为例	张小飞,王如松,李正国,等 (6204)
唐山市域 1993—2009 年热场变化	贾宝全,邱尔发,蔡春菊 (6215)
基于投影寻踪法的武汉市“两型社会”评价模型与实证研究	王茜茜,周敬宣,李湘梅,等 (6224)
长株潭城市群生态屏障研究	夏本安,王福生,侯方舟 (6231)
基于生态绿当量的城市土地利用结构优化——以宁国市为例	赵丹,李锋,王如松 (6242)
基于 ARIMA 模型的生态足迹动态模拟和预测——以甘肃省为例	张勃,刘秀丽 (6251)
专论与综述	
孤立湿地研究进展	田学智,刘吉平 (6261)
甲藻的异养营养型	孙军,郭术津 (6270)
生态工程领域微生物菌剂研究进展	文娅,赵国柱,周传斌,等 (6287)
我国生态文明建设及其评估体系研究进展	白杨,黄宇驰,王敏,等 (6295)
期刊基本参数:CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 440 * zh * P * ¥70.00 * 1510 * 49 * 2011-10	



封面图说: 壶口瀑布是黄河中游流经秦晋大峡谷时形成的一个天然瀑布。此地两岸夹山,河底石岩上冲刷成一巨沟,宽达 30 米,深约 50 米,最大瀑面 3 万平方米。滚滚黄水奔流至此,倒悬倾注,若奔马直入河沟,波浪翻滚,惊涛怒吼,震声数里可闻。其形其声如巨壶沸腾,故名壶口。300 余米宽的滚滚黄河水至此突然收入壶口,有“千里黄河一壶收”之说。

彩图提供: 陈建伟教授 国家林业局 E-mail: cites.chenjw@163.com

李维焕, 孟凯, 李俊飞, 程显好, 图力古尔. 两种大型真菌子实体对 Cd^{2+} 的生物吸附特性. 生态学报, 2011, 31(20): 6157-6166.

Li W H, Meng K, Li J F, Cheng X H, Bau Tolgor. Biosorption of Cd^{2+} using the fruiting bodies of two macrofungi. Acta Ecologica Sinica, 2011, 31(20): 6157-6166.

两种大型真菌子实体对 Cd^{2+} 的生物吸附特性

李维焕, 孟 凯, 李俊飞, 程显好, 图力古尔*

(鲁东大学菌物科学与技术研究院 / 山东省食用菌技术重点实验室, 烟台 264025)

摘要:对两种多孔菌科大型真菌槐栓菌(*Trametes robiniophila*)和木蹄层孔菌(*Fomes fomentarius*)子实体生物吸附 Cd^{2+} 的影响因素(包括吸附剂用量、初始 pH、吸附时间、初始 Cd^{2+} 浓度)和吸附特性进行分析。结果表明,槐栓菌和木蹄层孔菌对低浓度的 Cd^{2+} (10 mg/L) 吸附的最适 pH 为 6; Cd^{2+} 的去除率随吸附剂用量和吸附时间的增加而增大,槐栓菌和木蹄层孔菌均在吸附剂用量为 2g/L 时达到吸附平衡,槐栓菌在吸附时间为 30 min 时达到吸附平衡,而木蹄层孔菌在吸附时间为 60 min 时达到吸附平衡;槐栓菌和木蹄层孔菌对 10 mg/L Cd^{2+} 的最大去除率分别为 98% 和 94%。Langmuir 等温吸附平衡模型比 Freundlich 等温吸附平衡模型能更好的拟合两种大型真菌对 Cd^{2+} 的吸附过程;槐栓菌和木蹄层孔菌对 10 mg/L Cd^{2+} 的最大吸附量分别为 17.40 mg/g 和 8.91 mg/g。对实验数据进行动力学模型拟合可知,两种大型真菌对 Cd^{2+} 的生物吸附过程均符合准二阶动力学模型。槐栓菌和木蹄层孔菌生物吸附低浓度 Cd^{2+} 的化学反应机理可能为离子交换。

关键词:大型真菌; Cd^{2+} ; 生物吸附; 动力学模型; 等温吸附平衡模型; 离子交换模型

Biosorption of Cd^{2+} using the fruiting bodies of two macrofungi

LI Weihuan, MENG Kai, LI Junfei, CHENG Xianhao, BAU Tolgor*

Institute of Mycological Science and Technology/Shandong Key Laboratory of Edible Mushroom Technology, Ludong University, Yantai 264025, China

Abstract: Discharge of heavy metals containing effluents into the water bodies contaminates the aqueous environment. This is one of the most serious environmental issues of the century. The conventional methods used for metal removal become less effective and more expensive when the volumes of wastewater are high, and the metal concentrations are low. Biosorption technology has gained important credibility during recent years because of its eco-friendly nature, excellent performance, and cost-effectiveness. Fruiting bodies of macrofungi are considered ideal for the biosorption of heavy metals, because it has been demonstrated that many fungal species exhibit high biosorptive potentials. Macrofungi grow prolifically and are found in many parts of the world. They are macro in size, tough in texture and have other physical characteristics conducive for their development as biosorbents without the need for immobilization or deployment of sophisticated reactor configuration as in the case of microorganisms. The aim of the present work was to evaluate the biosorption capacity of two different macrofungi, *Trametes robiniophila* and *Fomes fomentarius* in respect of heavy metals, viz. cadmium from aqueous solutions.

The biosorption characteristics of Cd^{2+} from aqueous solution using the fruiting bodies of two macrofungi belonging to Polyporaceae (*T. robiniophila* and *F. fomentarius*) was investigated as a function of initial pH, biosorbent dosage, contact time, and initial Cd^{2+} concentration. The optimum initial pH of the aqueous solution was found to be 6.0 for the removal of low concentrations Cd^{2+} (10 mg/L). The percent removal of Cd^{2+} was found to increase with the increase in biosorbent dosage and contact time, and the biosorption of Cd^{2+} by two macrofungi all achieved equilibrium with biosorbent dosage of 2 g/L. The contact time achieved the biosorption equilibrium was 30 min for *T. robiniophila* and 60 min for *F. fomentarius*.

基金项目:山东省“泰山学者”建设工程专项经费(鲁发[2003]20号);山东省优秀中青年科学家科研奖励基金计划(BS2010NY005)

收稿日期:2011-06-19; **修订日期:**2011-08-01

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: mycologist@126.com

Langmuir and Freundlich models are the most widely used models in the case of the adsorption of metal ions with biosorbents. Langmuir and Freundlich models were applied to describe the biosorption isotherm of Cd^{2+} by *T. robiniophila* and *F. fomentarius*. Langmuir model fitted the equilibrium data all better than the Freundlich isotherm for two macrofungi. The maximum biosorption capacities of *T. robiniophila* and *F. fomentarius* were found to be 17.40 and 8.91 mg/g, respectively, at optimum conditions of pH 6.0, contact time of 60 min and biosorbent dosage of 2 g/L. The prediction of biosorption rate gives important information for designing batch biosorption systems. Information on the kinetics of pollutant uptake is required for selecting optimum operating conditions for full-scale batch process. In order to clarify the biosorption kinetics of Cd^{2+} onto *T. robiniophila* and *F. fomentarius* fruiting bodies, two kinetic models, pseudo-first-order and pseudo-second-order models were applied to the experimental data. The results showed that the biosorption processes of Cd^{2+} by two macrofungi followed well pseudo-second-order kinetics. Chemical ion-exchange may be the main mechanism for the biosorption of Cd^{2+} by two macrofungi.

Based on all results, it can also be concluded that *T. robiniophila* and *F. fomentarius* can be used as alternative biosorbent to treatment wastewater containing Cd^{2+} since they are low-cost biomass and have a considerable high biosorption capacity.

Key Words: macrofungi; Cd^{2+} ; biosorption; kinetic model; adsorption isotherm; ion-exchange model

随着现代工业的迅速发展,采矿、冶炼、造纸、造船、电镀等工业活动产生大量含重金属的废水,对自然水体和土壤造成污染^[1]。重金属不可降解且易通过食物链在生物体内富集,对环境和人类生活构成了很大的威胁^[2-3]。生物吸附法作为一种新兴的处理技术,特别是在处理低浓度的重金属废水方面,有着极为广阔的前景。与传统处理方法(化学沉淀法、离子交换法、化学氧化还原法、反渗透法、超过滤法、活性炭吸附工艺等)相比,生物吸附法成本低、效率高、不产生二次污染^[1,4-6]。部分细菌、真菌、藻类和农林废弃物均可做为生物吸附剂^[7-9]。

生物吸附的研究多集中在细菌、藻类和丝状真菌,对以大型真菌作为生物吸附剂的研究较少。与微生物相比,大型真菌子实体体积大、结构强韧,加之其他的一些物理特性,使其作为生物吸附剂实际应用时,可以不需固定化和复杂的反应装置^[5-6]。另外,大型真菌对重金属有很强的耐受性,细胞壁有很强的重金属吸附能力,细胞内还可累积高浓度的重金属^[10-11]。而且,大型真菌资源丰富,全球约有 150 万种真菌,在地球生物圈中属第二大生物类群,仅次于昆虫^[12]。这些优势都使得大型真菌更适合作为生物吸附剂。近期报道,许多大型真菌的子实体,如血红密孔菌(*Pycnoporus sanguineus*)^[13]平菇(*Pleurotus ostreatus*)^[14]、大孢蘑菇(*Agaricus macrosporus*)^[15]、赭盖捕鹅膏(*Amanita rubescens*)^[10]、粗毛纤孔菌(*Inonotus hispidus*)^[16]、窝柄黄乳菇(*Lactarius scrobiculatus*)^[17]、双孢菇(*Agaricus bisporus*)^[6, 18]、粗柄侧耳(*Pleurotus platypus*)^[6, 19]、Calocybe indica^[6]、毛木耳(*Auricularia polytricha*)和银耳(*Tremella fuciformis*)^[5, 20-21]及香菇(*Lentinus edodes*)^[22-24]和金针菇(*Flammulina velutipes*)^[25]等都能有效的吸附水溶液中的一种或多种重金属离子。

我国真菌资源丰富,已知大型真菌约 4000 种,其中多孔菌类有 1300 余种^[26]。多孔菌类大型真菌绝大多数种类木生,子实体大,革质、木栓质、木质或肉质^[26]。然而,至今未见用多孔菌科大型真菌作为生物吸附剂的报道。

本文研究了两种多孔菌科大型真菌槐栓菌(*Trametes robiniophila*)和木蹄层孔菌(*Fomes fomentarius*)子实体对水溶液中 Cd^{2+} 的生物吸附能力。分析了吸附剂用量、初始 pH、吸附时间、初始 Cd^{2+} 浓度等因素对吸附作用的影响,以确定最佳吸附条件。Langmuir 和 Freundlich 等温吸附平衡模型、准一阶和准二阶动力学模型和离子交换模型分别用来描述两种大型真菌对 Cd^{2+} 的生物吸附,以确定合适的吸附平衡模型和动力学模型,初步确定吸附机制。为今后大规模利用大型真菌处理含重金属废水,防止环境污染,以及对污染环境进行生态修复奠定理论基础。

1 材料与方法

1.1 生物材料

槐栓菌(*Trametes robiniophila*)属于多孔菌目(Polyporales),多孔菌科(Polyporaceae),栓菌属(*Trametes*)^[26],采自鲁东大学校园。木蹄层孔菌(*Fomes fomentarius*)多孔菌目(Polyporales),属于多孔菌科(Polyporaceae),层孔菌属(*Fomes*)^[26],采自长白山自然保护区。

1.2 实验方法

1.2.1 材料处理

将两种大型真菌子实体用自来水清洗3遍除去杂质,再用纯水冲洗3遍,于105℃处理48h,60℃烘至恒重,粉碎成絮状,装于自封袋中保存备用。

1.2.2 重金属母液的配制

准确称取2.744g Cd(NO₃)₂·4H₂O(分析纯,购自天津市科密欧化学试剂开发中心),用纯水定容至1L,得到浓度为1000 mg/L的Cd²⁺母液。

1.2.3 吸附实验

吸附实验采用150 mL三角锥形瓶,盛50 mL Cd²⁺溶液,25℃,120 r/min条件下置于恒温振荡器中振荡吸附。之后,高速离心,取上清液,上清液中Cd²⁺的浓度用原子吸收分光光度计(GBC932-AA)测定。实验所用玻璃器皿均用浓度为10%硝酸溶液浸泡24 h。

吸附剂用量分析实验设计吸附剂用量梯度为0.2—10 g/L,初始Cd²⁺浓度为10 mg/L,初始pH=6,吸附3 h。

pH影响实验设计初始pH梯度为3—8,初始Cd²⁺浓度为10 mg/L,吸附剂用量为根据吸附剂用量分析实验确定的最佳吸附剂用量2 g/L,吸附3 h。

吸附时间影响实验设计吸附时间梯度为5—360 min,初始Cd²⁺浓度为10 mg/L,初始pH为根据pH影响实验确定的最佳初始pH=6,吸附剂用量为根据吸附剂用量分析实验确定的最佳吸附剂用量2 g/L。

初始Cd²⁺浓度影响实验设计初始Cd²⁺浓度梯度为10—200 mg/L,初始pH为根据pH影响实验确定的最佳初始pH=6,吸附剂用量为根据吸附剂用量分析实验确定的最佳吸附剂用量2 g/L,吸附3 h。

Cd²⁺溶液的pH用0.1 mol/L HCl和0.1 mol/L NaOH调节。每个实验重复3次。

1.2.4 数据分析

(1) 两种大型真菌吸附剂对Cd²⁺的去除率 R_e 通过下式计算:

$$R_e = \frac{(C_0 - C_e)}{C_0} \times 100\% \quad (1)$$

式(1)中, R_e 为Cd²⁺的去除率; C_0 (mg/L)为溶液中Cd²⁺的起始浓度; C_e (mg/L)为吸附平衡后溶液中Cd²⁺的浓度。

(2) 两种大型真菌吸附剂对Cd²⁺的吸附量 q 可以用下式来计算:

$$q_t = \frac{(C_0 - C_t)V}{M}, q_e = \frac{(C_0 - C_e)V}{M} \quad (2)$$

式(2)中, q_t (mg/g)为时间 t 时吸附剂的吸附量; q_e (mg/g)为吸附平衡时吸附剂的吸附量; C_t (mg/L)为时间 t 时溶液中Cd²⁺的浓度; V (L)为溶液的体积; M (g)为吸附剂的干重; C_0 和 C_e 含义同(1)式。

采用Excel 2003和SigmaPlot 10.0软件进行数据分析,采用SigmaPlot 10.0软件进行制图。实验数据均以Mean±SD($n=3$)表示。

1.2.5 等温吸附平衡模型

随着生物对重金属吸附研究的逐渐深入,许多学者将数学模型引入其中,建立了一些生物吸附重金属的量化模型。这些模型不仅可以预测吸附行为,而且可以优化吸附过程。最常用的等温吸附平衡模型是

Langmuir 和 Freundlich 模型^[6]。

Langmuir 等温吸附平衡模型的线性方程^[27]：

$$\frac{C_e}{q_e} = \frac{C_e}{q_m} + \frac{1}{K_L q_m} \quad (3)$$

式(3)中, q_m (mg/g) 为吸附剂的最大吸附量; K_L (L/mg) 为 Langmuir 等温吸附平衡模型常数, 可表征吸附剂表面的吸附位点对水中重金属离子的亲和力大小, K_L 越大, 表明吸附位点对重金属离子的亲和力越大; C_e 和 q_e 含义同(1)式和(2)式。

Freundlich 等温吸附平衡模型的线性方程^[28]：

$$\ln q_e = \frac{1}{n} \ln C_e + \ln K_F \quad (4)$$

式(4)中, K_F (mg/g) 和 n (g/L) 均为 Freundlich 等温吸附平衡模型常数, 分别用于表征吸附能力和吸附强度; C_e 和 q_e 含义同(1)式和(2)式。

1.2.6 动力学模型

本实验用准一阶和准二阶动力学模型来描述两种大型真菌子实体对 Cd^{2+} 吸附的动力学过程。

准一阶动力学模型的线性方程^[29]：

$$\ln(q_e - q_t) = \ln q_e - K_1 t \quad (5)$$

准二阶动力学模型的线性方程^[30]：

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{K_2 q_e^2} + \frac{t}{q_e} \quad (6)$$

K_1 (1/min) 为准一阶动力学模型的吸附反应速率常数, K_2 为准二阶动力学模型的吸附反应速率常数 (g/(mg min))。 K_1 和 K_2 数值越大, 表明吸附过程准一阶和准二阶动力学反应的速率越大。

1.2.7 离子交换模型^[31]

本实验采用如下离子交换模型, 对于二价离子, 该离子交换模型应用最广：

$$\ln(1 - F) = - S t \quad (7)$$

式(7)中, $F = q_t/q_e$, S (1/min) 是常数。离子交换反应是快速反应阶段的主要机理, 因此, 在本研究中, 离子交换反应参数拟合仅拟合反应前 25 min 的数据。

2 结果

2.1 吸附剂用量对 Cd^{2+} 吸附的影响

吸附剂用量对吸附体系有显著的影响。吸附剂用量对两种大型真菌吸附 Cd^{2+} 的影响类似(图 1), 当吸附剂用量在 0—2 g/L 范围时, 溶液中 Cd^{2+} 的去除率随着吸附剂用量的增加而迅速升高; 而当吸附剂用量 > 2 g/L 时, 再继续增加吸附剂用量对吸附去除率没有明显作用, 槐栓菌和木蹄层孔菌对 10 mg/L Cd^{2+} 的最大去除率分别为 98% 和 94%。为了保证吸附剂的充分利用和重金属离子的有效去除, 下一步实验最适吸附剂用量选择达到吸附平衡的最小吸附剂用量, 即对两种大型真菌吸附剂来说, 均为 2 g/L。

2.2 初始 pH 对 Cd^{2+} 吸附的影响

溶液的酸度是影响金属离子生物吸附的重要因素, pH 直接影响氢离子和金属离子对吸附剂吸附位点的竞争性吸附。pH 影响实验设计初始 pH 梯度为 3—8, 初始 Cd^{2+} 浓

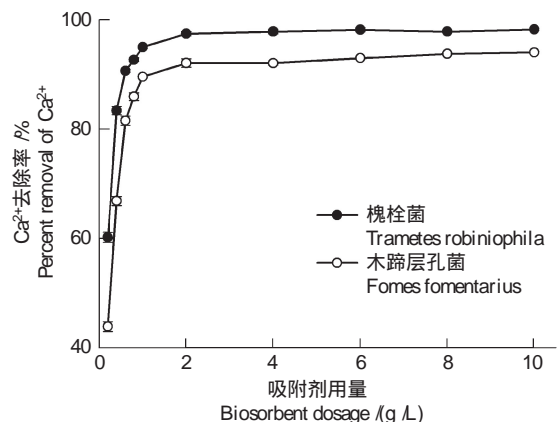


图 1 吸附剂用量对两种大型真菌吸附 Cd^{2+} 的影响 (初始浓度 = 10 mg/L, initial pH=6, 吸附时间 = 3 h)

Fig. 1 Effect of biosorbent dosage on Cd^{2+} biosorption capacity by two macrofungi (initial Cd^{2+} concentration = 10 mg/L, initial pH=6, contact time = 3 h)

度为 10 mg/L。由图 2 可知:当 pH 从 3 增加到 6 时,槐栓菌和木蹄层孔菌对 Cd^{2+} 的去除率随着 pH 的升高而上升;pH 大于 6 时,去除率随 pH 的升高而下降;pH=6 时,去除率达最大值;因此,槐栓菌和木蹄层孔菌对 10 mg/L Cd^{2+} 吸附的最适 pH 为 6。通过测定反应前后重金属溶液的 pH 值发现,溶液起始 pH 值为 2—6 (槐栓菌)或 5.5 (木蹄层孔菌)时,反应后溶液 pH 值升高;之后反应后溶液 pH 值下降(图 3)。

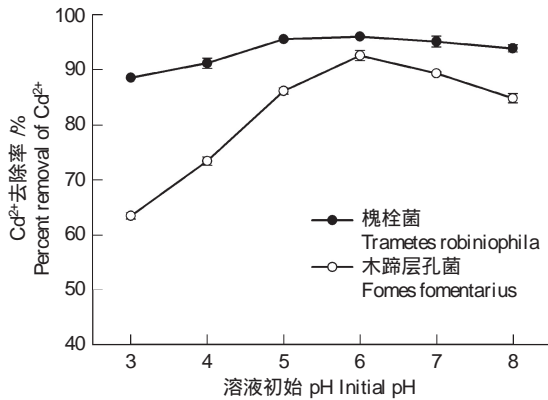


图 2 初始 pH 对两种大型真菌吸附 Cd^{2+} 的影响(初始浓度 = 10 mg/L, 吸附剂用量 = 2 g/L, 吸附时间 = 3 h)

Fig. 2 Effect of initial pH on Cd^{2+} biosorption capacity by two macrofungi (initial Cd^{2+} concentration = 10 mg/L, biosorbent dosage = 2 g/L, contact time = 3h)

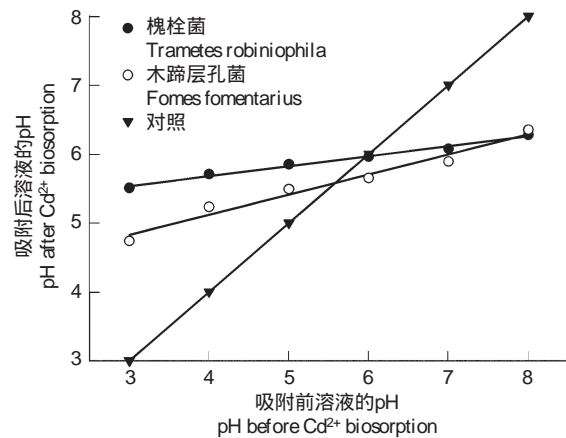


图 3 Cd^{2+} 吸附前后溶液 pH 的变化

Fig. 3 Change of pH before and after Cd^{2+} biosorption

2.3 吸附时间对 Cd^{2+} 吸附的影响

吸附时间是两种大型真菌吸附剂将来实际应用中的一个重要参数^[10, 17]。两种大型真菌吸附剂对 Cd^{2+} 的去除率均随吸附时间的增加而增大(图 4)。但槐栓菌反应速度更快,5 min 时,对 Cd^{2+} 的去除率就已达 93%,此后缓慢增加;而木蹄层孔菌反应 5 min 时对 Cd^{2+} 的去除率仅为 38%,5—60 min 时,迅速增加。二者达到吸附平衡的反应时间也不同,槐栓菌为 30 min,木蹄层孔菌为 60 min。

2.4 初始 Cd^{2+} 浓度对 Cd^{2+} 吸附的影响

两种大型真菌吸附剂对 Cd^{2+} 的平衡吸附量随初始 Cd^{2+} 浓度的增加而增大(图 5)。当初始 Cd^{2+} 浓度在

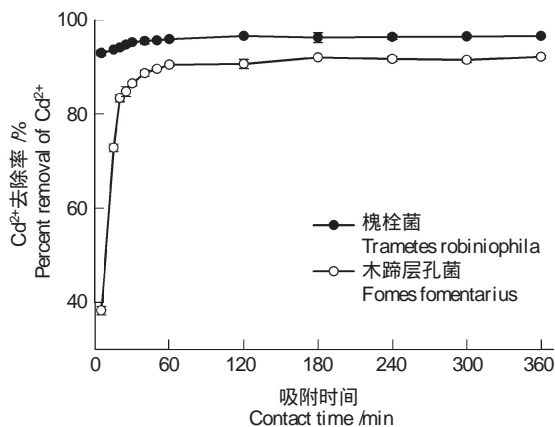


图 4 吸附时间对两种大型真菌吸附 Cd^{2+} 的影响(初始浓度 = 10 mg/L, initial pH = 6, 吸附剂用量 = 2 g/L)

Fig. 4 Effect of contact time on Cd^{2+} biosorption capacity by two macrofungi (initial Cd^{2+} concentration = 10 mg/L, initial pH = 6, biosorbent dosage = 2 g/L)

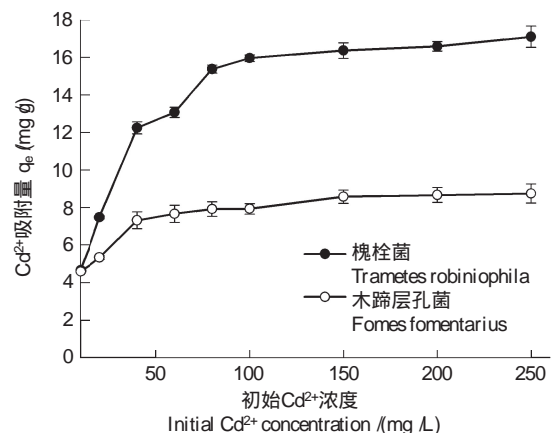


图 5 初始浓度对两种大型真菌吸附 Cd^{2+} 的影响(initial pH = 6, 吸附剂用量 = 2 g/L, 吸附时间 = 3 h)

Fig. 5 Effect of initial Cd^{2+} concentration on Cd^{2+} biosorption capacity by two macrofungi (initial pH = 6, biosorbent dosage = 2 g/L, contact time = 3h)

0—80 mg/L(对槐栓菌而言)或0—40 mg/L(对木蹄层孔菌而言)范围时,吸附剂对 Cd^{2+} 的平衡吸附量增加迅速。之后,再随初始 Cd^{2+} 浓度的增加,两种大型真菌吸附剂对 Cd^{2+} 的平衡吸附量增加缓慢。槐栓菌和木蹄层孔菌对 Cd^{2+} 的最大平衡吸附量分别为 17.12 mg/g 和 8.75 mg/g。

2.5 等温吸附平衡模型

由表 1 和图 6 可知,两种大型真菌吸附剂吸附 Cd^{2+} 的 Langmuir 线性拟合的相关系数(均大于 0.99)均大于 Freundlich 线性拟合的相关系数,说明 Langmuir 模型能更好地描述这两种吸附剂对 Cd^{2+} 的生物吸附过程,也即这两种吸附剂吸附 Cd^{2+} 的过程符合 Langmuir 模型的假设:吸附作用局限于单分子层吸附;吸附剂表面的吸附位点具有同一性;单个吸附点位的吸附作用不受相邻吸附点位的影响;平衡时吸附剂表面的吸附速率与解吸速率相等^[5-6, 27]。由 Langmuir 拟合方程得到的槐栓菌和木蹄层孔菌对 Cd^{2+} 的最大吸附量 q_m 分别为 17.40 mg/g 和 8.91 mg/g(表 1),与从实验获得的槐栓菌和木蹄层孔菌对 Cd^{2+} 的最大吸附量 17.12 mg/g 和 8.75 mg/g 基本吻合。Langmuir 模型常数 K_L 是金属离子与吸附剂结合稳定性的量度, K_L 越大,表明两者结合稳定性越强。由表 1 中数据可知, Cd^{2+} 与两种吸附剂结合的稳定性木蹄层孔菌略大于槐栓菌。

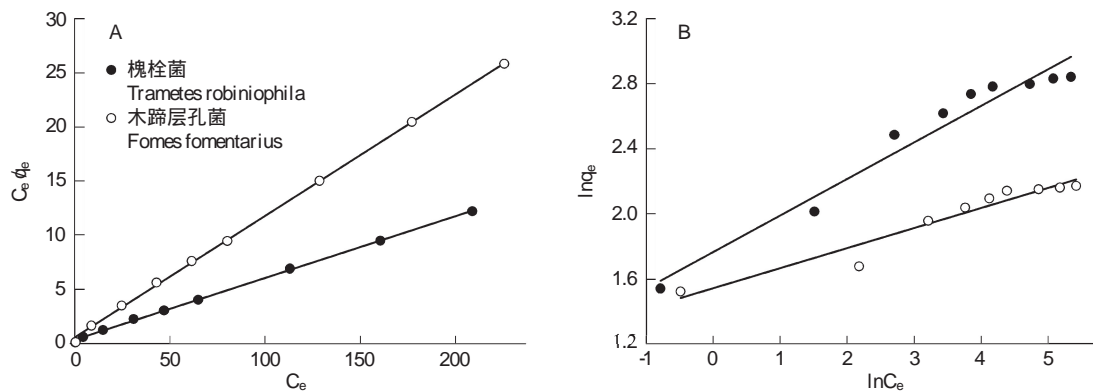


图 6 Cd^{2+} 生物吸附的吸附平衡模型线性拟合

Fig. 6 Linear fitting of isotherms for Cd^{2+} biosorption

A: Langmuir isotherm; B: Freundlich isotherm

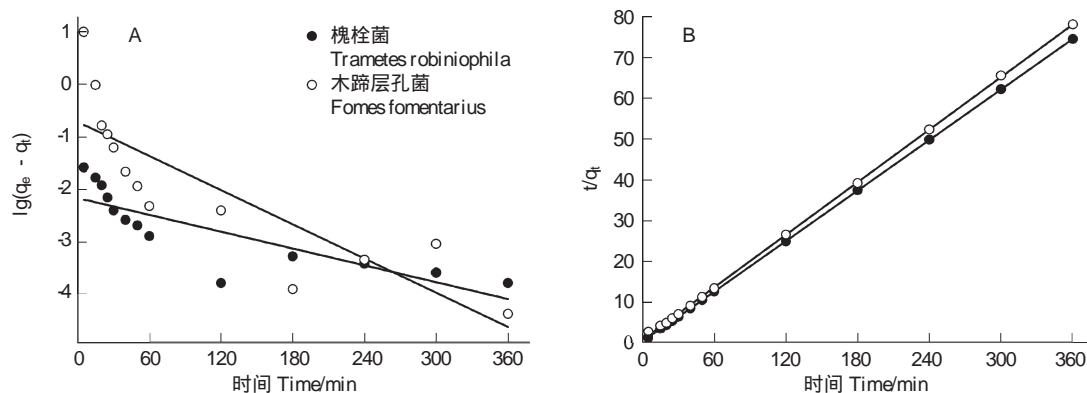
表 1 Cd^{2+} 生物吸附的吸附平衡方程和参数(pH=6, 吸附剂用量=2 g/L, 吸附时间=3 h)

Table 1 Isotherm equations and parameters for Cd^{2+} biosorption (pH=6, biosorbent dosage=2 g/L, contact time=3h)

生物吸附剂 Biosorbent	Langmuir 等温模型 Langmuir isotherm				Freundlich 等温模型 Freundlich isotherm			
	方程式 Equation	q_m	K_L	R^2	方程式 Equation	n	K_F	R^2
槐栓菌 <i>Trametes robiniophila</i>	$y=0.0575x+0.3462$	17.4027	0.1660	0.9987	$y=0.2224x+1.766$	4.4959	5.8474	0.9545
木蹄层孔菌 <i>Fomes fomentarius</i>	$y=0.1123x+0.6318$	8.9081	0.1777	0.9989	$y=0.1204x+1.5454$	8.3041	4.6898	0.9380

2.6 动力学模型

对两种大型真菌吸附剂吸附 Cd^{2+} 的实验数据进行准一阶和准二阶动力学模型线性拟合(图 7),获得的线性方程及参数列于表 2。槐栓菌和木蹄层孔菌吸附 Cd^{2+} 的准二阶动力学模型线性拟合相关系数达 0.999,远大于准一阶动力学模型线性拟合的 R^2 值;由拟合方程获得的槐栓菌和木蹄层孔菌对 Cd^{2+} 的理论平衡吸附量 4.83 mg/g 和 4.64 mg/g,与实验获得的平均平衡吸附量 4.85 mg/g 和 4.62 mg/g 非常吻合。说明这两种吸附剂对 Cd^{2+} 的生物吸附过程均符合准二阶动力学模型。即 Cd^{2+} 与两个吸附位点结合,吸附过程由物理扩散过程及化学吸附过程两部分组成^[5, 30, 32]。由拟合方程获得槐栓菌的 K_2 为 0.47,远大于木蹄层孔菌($K_2=0.07$),说明槐栓菌对 Cd^{2+} 的吸附速率远大于木蹄层孔菌,这也与实验结果一致。

图 7 Cd^{2+} 生物吸附的动力学模型线性拟合Fig. 7 Linear fitting of kinetic models for Cd^{2+} biosorption

A: First-order kinetic model; B: Second-order kinetic model

表 2 Cd^{2+} 生物吸附的动力学方程和参数Table 2 Kinetic equations and parameters for Cd^{2+} biosorption

生物吸附剂 Biosorbent	准一阶动力学模型 First-order kinetic model				准二阶动力学模型 Second-order kinetic model			
	方程式 Equation	K_1	q_e	R^2	方程式 Equation	K_2	q_e	R^2
槐栓菌 <i>Trametes robiniophila</i>	$y = -0.0054x - 2.1698$	0.0054	0.1142	0.7009	$y = 0.207x + 0.0907$	0.4724	4.8309	0.9999
木蹄层孔菌 <i>Fomes fomentarius</i>	$y = -0.0109x - 0.7193$	0.0109	0.4871	0.7139	$y = 0.2154x + 0.6376$	0.0728	4.6425	0.9998

初始浓度 = 10 mg/L, pH=6, 吸附剂用量 = 2 g/L

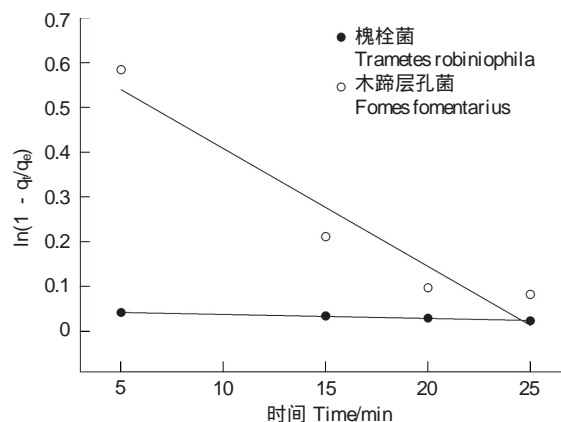
2.7 离子交换模型

应用离子交换模型线性拟合槐栓菌和木蹄层孔菌吸附 Cd^{2+} 的反应前 25 min 的数据, 获得的相关系数 R^2 值分别为 0.9873 和 0.9194, 说明离子交换模型能较好的拟合两种大型真菌子实体对 Cd^{2+} 的吸附过程, 由此推断, 两种大型真菌子实体吸附 Cd^{2+} 的化学机制可能为离子交换反应。

3 讨论

随吸附剂用量的增加, 吸附剂的总表面积及其上面的官能团也增加, 因此去除率随之增加; 但如果吸附剂浓度过大, 吸附剂会在其外围形成屏蔽效应, 阻止金属离子与吸附位点的结合, 同时静电效应和基团之间的斥力也阻止吸附剂对金属离子的吸收^[33], 因此当吸附剂用量达到某一值时, 去除率趋于稳定状态, 此后再继续增加吸附剂用量对吸附去除率没有明显作用。对 10 mg/L 的 Cd^{2+} 溶液, 槐栓菌和木蹄层孔菌的用量均为 2 g/L 时达到吸附平衡, 平衡时的最大去除率分别为 98% 和 94%。

pH 值不仅影响细胞表面吸附基团的带电性, 也影响金属离子的水化性, 从而影响金属离子的吸附。当 pH 值过低时, 溶液中存在大量的 H^+ 和 H_3O^+ , 它们会与 Cd^{2+} 竞争吸附剂表面的结合位点; 另外低 pH 使吸附剂表面质子化, 使得静电吸引力减弱, 静电斥力增加, 影响了两种大型真菌吸附剂对 Cd^{2+} 的吸附。随着 pH 的升高, 尤其当 pH 超过细胞表面的等电点时, 吸附体系中的 H^+ 和 H_3O^+ 大量减少, 竞争性吸附作用减弱; 同时, 吸附剂表面负电荷增多, 降低了表面活性基团与水溶液中 Cd^{2+} 的电荷排斥力, 从而促进了 Cd^{2+} 的吸附^[34], 直至

图 8 Cd^{2+} 生物吸附的离子交换模型线性拟合Fig. 8 Linear fitting of ion-exchange model for Cd^{2+} biosorption

pH=6 时,吸附剂对 Cd^{2+} 的吸附率达最大值。当 $\text{pH}>6$ 时,溶液中的 Cd^{2+} 发生水解反应,形成可溶性 $\text{Cd}(\text{OH})_2$ 和 H^+ ,可溶性 $\text{Cd}(\text{OH})_2$ 会与 Cd^{2+} 竞争吸附位点,而可溶性 $\text{Cd}(\text{OH})_2$ 离子半径大,占据的有效吸附面积较 Cd^{2+} 大,从而降低了 Cd 的吸附效率;可溶性 $\text{Cd}(\text{OH})_2$ 和 H^+ 的形成也使反应后溶液 pH 降低^[5, 10]。

研究发现,当初始 pH 值为 2—6(槐栓菌)或 5.5(木蹄层孔菌)时,反应后溶液 pH 值升高。这与毛木耳子实体对 Cd^{2+} 、 Cu^{2+} 、 Zn^{2+} 吸附的情况一致^[5],当初始 pH 值为 2—5 时,反应后溶液 pH 值升高。但 Ho^[35] 和 Ofomaja 等^[36] 认为以离子交换反应作为化学反应机理的生物吸附过程,反应后溶液 pH 值出现下降,因为氢离子起离子交换的作用,生物吸附材料上的氢离子被释放出来,与水中重金属离子发生离子交换。虽然离子交换模型的拟合说明槐栓菌和木蹄层孔菌对 Cd^{2+} 及毛木耳子实体对 Cd^{2+} 、 Cu^{2+} 、 Zn^{2+} 的吸附以离子交换反应为主,但反应后溶液 pH 值有升高,可能是因为吸附过程中氢离子仅起着竞争吸附作用,这与不同的吸附材料有关^[5]。

吸附时间是影响吸附的重要因素。在吸附的早期阶段,吸附剂表面大量可用的活性吸附位点导致 Cd^{2+} 的去除率迅速增加,反应速度很快;随着反应的进行,活性吸附位点不断被 Cd^{2+} 占据,反应速度逐渐下降,直至达到吸附平衡^[5-6, 10, 17]。动力学模型线性拟合结果表明,槐栓菌和木蹄层孔菌对 Cd^{2+} 的吸附符合准二阶动力学模型。

随初始金属离子浓度的增加,溶液中可用于吸附的金属离子增加;而且,随金属离子浓度的增加,帮助克服金属离子在水相和固相之间的质量转移阻力的驱动力增加,从而增加了金属离子和吸附剂之间的碰撞机率,最终导致金属离子平衡吸附量的增加^[6, 37]。对实验数据进行等温吸附平衡模型拟合发现 Langmuir 模型能更好地描述这两种吸附剂对 Cd^{2+} 的生物吸附过程,Langmuir 拟合方程得到的槐栓菌和木蹄层孔菌对 Cd^{2+} 的最大吸附量 q_m 分别为 17.40 mg/g 和 8.91 mg/g。与其他生物相比,相对较高(表 3)。

表 3 不同生物吸附剂 Cd^{2+} 吸附能力的比较

Table 3 The biosorption capacity of Cd^{2+} in comparison with other biosorbents

生物吸附剂 Biosorbent	Cd^{2+} 吸附量 / (mg/g) Biosorption capacity of Cd^{2+}	溶液 pH pH	Cd^{2+} 浓度 / (mg/L) Cd^{2+} concentration	参考文献 References
槐栓菌 <i>Trametes robiniophila</i>	17.40	6	10—250	This study
木蹄层孔菌 <i>Fomes fomentarius</i>	8.91	6	10—250	This study
木瓜树 papaya wood	17.22	5	5—500	[38]
黑曲霉 <i>Aspergillus niger</i>	4.38	6	—	[39]
仙菜 <i>Ceramium virgatum</i>	39.7	5	10—400	[40]
鲁西(氏)毛霉菌 <i>Mucor rouxii</i>	8.36	5	—	[41]
黄孢原毛平革菌 <i>Phanerochaete chrysosporium</i>	27.79	6	5—500	[42]
酿酒酵母 <i>Saccharomyces cerevisiae</i>	8.17	7.2	8—30	[43]

综上所述,槐栓菌和木蹄层孔菌是较理想的重金属 Cd^{2+} 生物吸附剂。这两种大型真菌资源丰富,可考虑实际应用处理含重金属 Cd^{2+} 的废水,以防止污染环境。

References:

- [1] Yu M G, Chen Y X. Biosorption of heavy metals from solution by tea waste: A review. Chinese Journal of Applied Ecology, 2010, 21(2): 505-513.
- [2] Wang L Q, Luo L, Ma Y B, Wei D P, Hua L. In situ immobilization remediation of heavy metals-contaminated soils: A review. Chinese Journal of Applied Ecology, 2009, 20(5): 1214-1222.
- [3] Li W H, Yu L L, Cheng X H, Chen J D, Dong H X, Bau T. Growth tolerance and accumulation characteristics of the mycelia of two macrofungi species to heavy metals. Acta Ecologica Sinica, 2011, 31(5): 1240-1248.
- [4] Volesky B. Detoxification of metal-bearing effluents: biosorption for the next century. Hydrometallurgy, 2001, 59(2/3): 203-216.
- [5] Jiang X Y, Huang H W, Cao L X, Zhang R D. Kinetics and equilibrium of biosorption of Cd^{2+} , Cu^{2+} , Pb^{2+} , Zn^{2+} by macrofungus (*Auricularia*

- polytricha*) biomass. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2010, 30(7): 1431-1438.
- [6] Vimala R, Das N. Biosorption of cadmium (II) and lead (II) from aqueous solutions using mushrooms: A comparative study. *Journal of Hazardous Materials*, 2009, 168(1): 376-382.
- [7] Vijayaraghavan K, Yun Y S. Bacterial biosorbents and biosorption. *Biotechnology Advances*, 2008, 26(3): 266-291.
- [8] Wang J L, Chen C, Biosorbents for heavy metals removal and their future. *Biotechnology Advances*, 2009, 27(2): 195-226.
- [9] Sud D, Mahajan G, Kaur M P. Agricultural waste material as potential adsorbent for sequestering heavy metal ions from aqueous solutions — a review. *Bioresource Technology*, 2008, 99(14): 6017-6027.
- [10] Sari A, Tuzen M. Kinetic and equilibrium studies of biosorption of Pb(II) and Cd(II) from aqueous solution by macrofungus (*Amanita rubescens*) biomass. *Journal of Hazardous Materials*, 2009, 164(2/3): 1004-1011.
- [11] An X L, Zhou Q X. Bioaccumulation of heavy metals in macrofungi and its application in ecological remediation. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2007, 18(8): 1897-1902.
- [12] Hawksworth D L. The fungal dimension of biodiversity: magnitude, significance, and conservation. *Mycological Research*, 1991, 95(6): 641-655.
- [13] Zufadhly Z, Mashitah M D, Bhatia S. Heavy metals removal in fixed-bed column by the macro fungus *Pycnoporus sanguineus*. *Environmental Pollution*, 2001, 112(3): 463-470.
- [14] Pan X L, Wang J L, Zhang D Y. Biosorption of Pb(II) by *Pleurotus ostreatus* immobilized in alginate gel. *Process Biochemistry*, 2005, 40: 2799-2803.
- [15] Melgar M J, Alonso J, Garcia M A. Removal of toxic metals from aqueous solutions by fungal biomass of *Agaricus macrosporus*. *Science of the Total Environment*, 2007, 385(1/3): 12-19.
- [16] Sari A, Tuzen M. Biosorption of As(III) and As(V) from aqueous solution by macrofungus (*Inonotus hispidus*) biomass: Equilibrium and kinetic studies. *Journal of Hazardous Materials*, 2009, 164(2/3): 1372-1378.
- [17] Anayurt R A, Sari A, Tuzen M. Equilibrium, thermodynamic and kinetic studies on biosorption of Pb(II) and Cd(II) from aqueous solution by macrofungus (*Lactarius scrobiculatus*) biomass. *Chemical Engineering Journal*, 2009, 151(1/3): 255-261.
- [18] Ertugay N, Bayhan Y K. Biosorption of Cr(VI) from aqueous solutions by biomass of *Agaricus bisporus*. *Journal of Hazardous Materials*, 2008, 154(1/3): 432-439.
- [19] Das D, Das N, Mathew L. Kinetics, equilibrium and thermodynamic studies on biosorption of Ag(VIII) from aqueous solution by macrofungus *Pleurotus platypus*. *Journal of Hazardous Materials*, 2010, 184(1/3): 765-774.
- [20] Pan R, Cao L X, Huang H W, Zhang R D, Mo Y. Biosorption of Cd, Cu, Pb, and Zn from aqueous solutions by the fruiting bodies of jelly fungi (*Tremella fuciformis* and *Auricularia polytricha*). *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2010, 88(4): 997-1005.
- [21] Mo Y, Pan R, Huang H W, Cao L X, Zhang R D. Biosorption of Cd(II), Cu(II), Pb(II) and Zn(II) in aqueous solutions by fruiting bodies of macrofungi (*Auricularia polytricha* and *Tremella fuciformis*). *Environmental Science*, 2010, 31(7): 1566-1574.
- [22] Chen G Q, Zeng G M, Tu X, Niu C G, Huang G H, Jiang W. Application of a by-product of *Lentinus edodes* to the bioremediation of chromate contaminated water. *Journal of Hazardous Materials*, 2006, 135(1/3): 249-255.
- [23] Chen G Q, Zeng G M, Tang L, Du C Y, Jiang X Y, Huang G H, Liu H L, Shen G L. Cadmium removal from simulated wastewater to biomass byproduct of *Lentinus edodes*. *Bioresource Technology*, 2008, 99(15): 7034-7040.
- [24] Bayramoğlu G, Arica M Y. Removal of heavy mercury(II), cadmium(II) and zinc(II) metal ions by live and heat inactivated *Lentinus edodes* pellets. *Chemical Engineering Journal*, 2008, 143(1/3): 133-140.
- [25] Gao T Y, Zhang D, Yin Y G, Zhang Y. Study on biosorption of Cd^{2+} by means of testing *flammulina velutipes*. *Journal of Safety and Environment*, 2007, 7(5): 20-23.
- [26] Mao X L. *Economic Fungi of China*. Beijing: Science Press, 1998: 1-624.
- [27] Langmuir I. The adsorption of gases on plane surfaces of glass, mica and platinum. *Journal of the American Chemical Society*, 1918, 40(9): 1361-1403.
- [28] Freundlich H M F. Über die adsorption in lösungen. *Zeitschrift für Physikalische Chemie (Leipzig)*, 1906, 57A: 385-470.
- [29] Lagergren S. Zur theorie der sogenannten adsorption gelöster stoffe. *Kungliga Svenska Vetenskapsakademiens. Handlingar*, 1898, 24(4): 1-39.
- [30] Ho Y S, McKay G. Pseudo-second order model for sorption processes. *Process Biochemistry*, 1999, 34(5): 451-465.
- [31] Boyd G. E, Adamson A W, Myers Jr L S. The exchange adsorption of ions from aqueous solutions by organic zeolites. II. Kinetics. *Journal of the American Chemical Society*, 1947, 69(11): 2836-2848.
- [32] Cheung C W, Porter J F, McKay G. Sorption kinetic analysis for the removal of cadmium ions from effluents using *bone char*. *Water Research*, 2001, 35(3): 605-612.

- [33] Ledin M. Accumulation of metals by microorganisms-processes and importance for soil systems. *Earth-Science Reviews*, 2000, 51(1/4): 1-31.
- [34] Yu L L. Research on heavy metal tolerance and biosorption of some edible mushrooms. Jilin: Jilin Agriculture University, 2010.
- [35] Ho Y S. Effect of pH on lead removal from water using tree fern as the sorbent. *Bioresource Technology*, 2005, 96(11): 1292-1296.
- [36] Ofomaja A E, Ho Y S. Effect of pH on cadmium biosorption by coconut copra meal. *Journal of Hazardous Materials*, 2007, 39(2): 356-362.
- [37] Tewari N, Vasudevan P, Guha B K. Study on biosorption of Cr (VI) by *Mucor hiemalis*. *Biochemical Engineering Journal*, 2005, 23(2): 185-192.
- [38] Saeed A, Akhter M W, Iqbal M. Removal and recovery of heavy metals from aqueous solution using papaya wood as a new biosorbent. *Separation and Purification Technology*, 2005, 45(1): 25-31.
- [39] Kapoor A, Viraraghavan T, Cullimore D R. Removal of heavy metals using the fungus *Aspergillus niger*. *Bioresource Technology*, 1999, 70(1): 95-104.
- [40] Sari A, Tuzen M. Biosorption of cadmium (II) from aqueous solution by red algae (*Ceramium virgatum*): equilibrium, kinetic and thermodynamic studies. *Journal of Hazardous Materials*, 2008, 157(2/3): 448-454.
- [41] Yan G, Viraraghavan T. Heavy-metal removal from aqueous solution by fungus *Mucor rouxii*. *Water Research*, 2003, 37(18): 4486-4496.
- [42] Say R, Denizli A, Arica M Y. Biosorption of cadmium (II), lead (II) and copper (II) with the filamentous fungus *Phanerochaete chrysosporium*. *Bioresource Technology*, 2001, 76(1): 67-70.
- [43] Ghorbani F, Younesi H, Ghasempouri S M, Zinatizadeh A A, Amini M, Daneshi A. Application of response surface methodology for optimization of cadmium biosorption in a aqueous solution by *Saccharomyces cerevisiae*. *Chemical Engineering Journal*, 2008, 145(2): 267-275.

参考文献:

- [1] 于明革, 陈英旭. 茶废弃物对溶液中重金属的生物吸附研究进展. *应用生态学报*, 2010, 21(2): 505-513.
- [2] 王立群, 罗磊, 马义兵, 韦东普, 华珞. 重金属污染土壤原位钝化修复研究进展. *应用生态学报*, 2009, 20(5): 1214-1222.
- [3] 李维焕, 于兰兰, 程显好, 陈敬丹, 董洪新, 图力古尔. 两种大型真菌菌丝体对重金属的耐受和富集特性. *生态学报*, 2011, 31(5): 1240-1248.
- [5] 蒋新宇, 黄海伟, 曹理想, 张仁铎. 毛木耳对 Cd^{2+} 、 Cu^{2+} 、 Pb^{2+} 、 Zn^{2+} 生物吸附的动力学和吸附平衡研究. *环境科学学报*, 2010, 30(7): 1431-1438.
- [11] 安鑫龙, 周启星. 大型真菌对重金属的生物富集作用及生态修复. *应用生态学报*, 2007, 18(8): 1897-1902.
- [20] 莫瑜, 潘蓉, 黄海伟, 曹理想, 张仁铎. 毛木耳和白木耳子实体对 $Cd(II)$ 、 $Cu(II)$ 、 $Pb(II)$ 和 $Zn(II)$ 的吸附特性研究. *环境科学*, 2010, 31(7): 1566-1574.
- [24] 高庭艳, 张丹, 殷义高, 张毅. 金针菇菌柄非食用部分对镉的生物吸附. *安全与环境学报*, 2007, 7(5): 20-23.
- [26] 卯晓岚. 中国经济真菌. 北京: 科学出版社, 1998: 1-624.
- [34] 于兰兰. 几种食用菌对重金属的耐受及吸附特性研究. 吉林: 吉林农业大学, 2010.

ACTA ECOLOGICA SINICA Vol. 31, No. 20 October, 2011 (Semimonthly)

CONTENTS

- Community structure and diversity of macrobenthos in the intertidal zones of Yangshan Port WANG Baoqiang, XUE Junzeng, ZHUANG Hua, et al (5865)
- Variation characteristics of macrobenthic communities structure in tianjin coastal region in summer FENG Jianfeng, WANG Xiuming, MENG Weiqing, et al (5875)
- Analysis of habitat connectivity of the Yunnan snub-nosed monkeys (*Rhinopithecus bieti*) using landscape genetics XUE Yadong, LI Li, LI Diqiang, WU Gongsheng, et al (5886)
- Study on the spatial pattern of wetland bird richness and hotspots in Sanjiang Plain LIU Jiping, LÜ Xianguo (5894)
- Dynamic analysis of coastal region cultivated land landscape ecological security and its driving factors in Jiangsu WANG Qian, JIN Xiaobin, ZHOU Yinkang (5903)
- Landscape pattern gradient on tree canopy in the central city of Guangzhou, China ZHU Yaojun, WANG Cheng, JIA Baoquan, et al (5910)
- Research on dynamic changes of landscape structure and land use eco-security: a case study of Jiansanjiang land reclamation area LIN Jia, SONG Ge, SONG Siming (5918)
- Shangri-La county ecological land use planning based on landscape security pattern LI Hui, YI Na, YAO Wenjing, WANG Siqi, et al (5928)
- Changes of paddy field landscape and its influence factors in a typical town of south Jiangsu Province ZHOU Rui, HU Yuanman, SU Hailong, et al (5937)
- Species composition and succession of swamp vegetation along grazing gradients in the Zoige Plateau, China HAN Dayong, YANG Yongxing, YANG Yang, et al (5946)
- Characteristics and influence factors of the swamp degradation under the stress of grazing in the Zoige Plateau LI Ke, YANG Yongxing, YANG Yang, et al (5956)
- Variation of organic pollution in the last twenty years in the Qinzhou bay and its potential ecological impacts LAN Wenlu (5970)
- Response of radial growth Chinese pine (*Pinus tabulaeformis*) to climate factors in Wanxian Mountain of He'nan Province PENG Jianfeng, YANG Airong, TIAN Qinhua (5977)
- Vegetation and species diversity change analysis in 50 years in Tashan Mountain, Shandong Province, China GAO Yuan, CHEN Yufeng, DONG Heng, et al (5984)
- Effect of urban heat island on plant growth and adaptability of leaf morphology constitute WANG Yating, FAN Lianlian (5992)
- Effects of shading on photosynthetic characteristics and chlorophyll fluorescence parameters in leaves of the endangered plant *Thuja sutchuenensis* LIU Jianfeng, YANG Wenjuan, JIANG Zeping, et al (5999)
- Effects of shading on growth and quality of triennial *Clematis manshurica* Rupr. HAN Zhongming, ZHAO Shujie, LIU Cuijing, et al (6005)
- Allelopathic effect of extracts from *Artemisia sacrorum* leaf and stem on four dominant plants of enclosed grassland on Yunwu Mountain WANG Hui, XIE Yongsheng, YANG Yali, et al (6013)
- Effects of soil base cation composition on plant distribution and diversity in coastal wetlands of Hangzhou Bay, East China WU Tonggui, WU Ming, YU Mukui, et al (6022)
- Species diversity of arbuscular mycorrhizal fungi of *Stipa* L. in alpine grassland in northern Tibet in China CAI Xiaobu, PENG Yuelin, YANG Minna, et al (6029)
- Water consumption and annual variation of transpiration in mature *Acacia mangium* Plantation ZHAO Ping, ZOU Lvliu, RAO Xingquan, et al (6038)
- Foliar phenotypic plasticity of a warm-temperate shrub, *Vitex negundo* var. *heterophylla*, to different light environments in the field DU Ning, ZHANG Xiuru, WANG Wei, et al (6049)

An case study on vegetation stability in sandy desertification land; determination and comparison of the resilience among communities after a short period of extremely aridity disturbanc	ZHANG Jiyi, ZHAO Halin (6060)
Response of soil quality indicators to comprehensive amelioration measures in coastal salt-affected land	SHAN Qihua, ZHANG Jianfeng, RUAN Weijian, et al (6072)
Fine-scale spatial associations of <i>Stipa krylovii</i> and <i>Stellera chamaejasme</i> population in alpine degraded grassland	ZHAO Chengzhang, REN Heng (6080)
The response of community-weighted mean plant functional traits to environmental gradients in Yanhe river catchment	GONG Shihui, WEN Zhongming, SHI Yu (6088)
Ozone stress increases lodging risk of rice cultivar Liangyoupeijiu; a FACE study	WANG Yunxia, WANG Xiaoying, YANG Lianxin, et al (6098)
Effect of sugarcane//soybean intercropping and reduced nitrogen rates on sugarcane yield, plant and soil nitrogen	YANG Wenting, LI Zhixian, SHU Lei, et al (6108)
Effect of wetting duration on nitrogen fixation of biological soil crusts in Shapotou, Northern China	ZHANG Peng, LI Xinrong, HU Yigang, et al (6116)
Effects of zinc on the fruits' quality of two eggplant varieties	WANG Xiaojing, WANG Huimin, WANG Fei, et al (6125)
Rapid light-response curves of PS II chlorophyll fluorescence parameters in leaves of <i>Salix leucopithecia</i> subjected to cadmium-ion stress	QIAN Yongqiang, ZHOU Xiaoxing, HAN Lei, et al (6134)
Physiological Response of <i>Mirabilis jalapa</i> Linn. to Lead Stress by FTIR Spectroscopy	XUE Shengguo, ZHU Feng, YE Sheng, et al (6143)
Physiological response of <i>Zoysia japonica</i> to Cd ²⁺	LIU Junxiang, SUN Zhenyuan, JU Guansheng, et al (6149)
Biosorption of Cd ²⁺ using the fruiting bodies of two macrofungi	LI Weihuan, MENG Kai, LI Junfei, et al (6157)
Factors regulating recruitment of <i>Microcystis</i> from the sediments of the eutrophic Shanzai Reservoir	SU Yuping, LIN Hui, ZHONG Houzhang, et al (6167)
A new type of insect trap and its trapping effect on <i>Cyrtotrachelus buqueti</i>	YANG Yaojun, LIU Chao, WANG Shufang, et al (6174)
Photoperiod influences diapause induction of Oriental Fruit Moth(Lepidoptera: Tortricidae)	HE Chao, MENG Quanke, HUA Lei, et al (6180)
Influence of edge effects on arthropods communities in agroforestry ecological systems	WANG Yang, WANG Gang, DU Yingqi, et al (6186)
Dynamics of land use and its ecosystem services in China's megacities	CHENG Lin, LI Feng, DENG Huafeng (6194)
Comprehensive assessment of urban ecological risks; the case of Huaibei City	CHANG Hsiaoifei, WANG Rusong, LI Zhengguo, et al (6204)
The dynamics of surface heat status of Tangshan City in 1993—2009	JIA Baoquan, QIU Erfa, CAI Chunju (6215)
A projection-pursuit based model for evaluating the resource-saving and environment-friendly society and its application to a case in Wuhan	WANG Qianqian, ZHOU Jingxuan, LI Xiangmei, et al (6224)
Research on ecological barrier to Chang-Zhu-Tan metropolitan area	XIA Benan, WANG Fusheng, HOU Fangzhou (6231)
Optimization of urban land structure based on ecological green equivalent; a case study in Ningguo City, China	ZHAO Dan, LI Feng, WANG Rusong (6242)
Dynamic ecological footprint simulation and prediction based on ARIMA Model; a case study of Gansu Province, China	ZHANG Bo, LIU Xiuli (6251)
Review and Monograph	
A prospect for study on isolated wetland	TIAN Xuezhi, LIU Jiping (6261)
Dinoflagellate heterotrophy	SUN Jun, GUO Shujin (6270)
Research progress of microbial agents in ecological engineering	WEN Ya, ZHAO Guozhu, ZHOU Chuanbin, et al (6287)
The progress of ecological civilization construction and its indicator system in China	BAI Yang, HUANG Yuchi, WANG Min, et al (6295)

2009 年度生物学科总被引频次和影响因子前 10 名期刊*

(源于 2010 年版 CSTPCD 数据库)

排序 Order	期刊 Journal	总被引频次 Total citation	排序 Order	期刊 Journal	影响因子 Impact factor
1	生态学报	11764	1	生态学报	1.812
2	应用生态学报	9430	2	植物生态学报	1.771
3	植物生态学报	4384	3	应用生态学报	1.733
4	西北植物学报	4177	4	生物多样性	1.553
5	生态学杂志	4048	5	生态学杂志	1.396
6	植物生理学通讯	3362	6	西北植物学报	0.986
7	JOURNAL OF INTEGRATIVE PLANT BIOLOGY	3327	7	兽类学报	0.894
8	MOLECULAR PLANT	1788	8	CELL RESEARCH	0.873
9	水生生物学报	1773	9	植物学报	0.841
10	遗传学报	1667	10	植物研究	0.809

★《生态学报》2009 年在核心版的 1964 种科技期刊排序中总被引频次 11764 次,全国排名第 1;影响因子 1.812,全国排名第 14;第 1—9 届连续 9 年入围中国百种杰出学术期刊;中国精品科技期刊

编辑部主任 孔红梅

执行编辑 刘天星 段 靖

生态学报

(SHENGTAI XUEBAO)

(半月刊 1981 年 3 月创刊)

第 31 卷 第 20 期 (2011 年 10 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 31 No. 20 2011

编 辑 《生态学报》编辑部
地址:北京海淀区双清路 18 号
邮政编码:100085
电话:(010)62941099
www.ecologica.cn
shengtaixuebao@rcees.ac.cn

主 编 冯宗炜
主 管 中国科学技术协会
主 办 中国生态学会
中国科学院生态环境研究中心
地址:北京海淀区双清路 18 号
邮政编码:100085

出 版 科 学 出 版 社
地址:北京东黄城根北街 16 号
邮政编码:100717

印 刷 北京北林印刷厂
发 行 科 学 出 版 社
地址:东黄城根北街 16 号
邮政编码:100717
电话:(010)64034563
E-mail:journal@espg.net

订 购 全国各地邮局
国外发行 中国国际图书贸易总公司
地址:北京 399 信箱
邮政编码:100044

广告经营
许 可 证 京海工商广字第 8013 号

Edited by Editorial board of
ACTA ECOLOGICA SINICA
Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China
Tel:(010)62941099
www.ecologica.cn
Shengtaixuebao@rcees.ac.cn

Editor-in-chief FENG Zong-Wei
Supervised by China Association for Science and Technology
Sponsored by Ecological Society of China
Research Center for Eco-environmental Sciences, CAS
Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China

Published by Science Press
Add:16 Donghuangchenggen North Street,
Beijing 100717, China

Printed by Beijing Bei Lin Printing House,
Beijing 100083, China

Distributed by Science Press
Add:16 Donghuangchenggen North
Street, Beijing 100717, China
Tel:(010)64034563
E-mail:journal@espg.net

Domestic All Local Post Offices in China
Foreign China International Book Trading
Corporation
Add:P. O. Box 399 Beijing 100044, China



ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

国内外公开发行

国内邮发代号 82-7

国外发行代号 M670

定价 70.00 元