

# 壳聚糖及其衍生物脱除贝类中重金属的机理及应用研究进展

Research progress of chitosan and its derivatives on removal of heavy metals from shellfish

李子琪 孟倩 孙凤清 王英文

LI Zi-qi MENG Qian SUN Feng-qing WANG Ying-wen

丁美玉 邱咏梅 解万翠

DING Mei-yu QIU Yong-mei XIE Wan-cui

(青岛科技大学化工学院, 山东 青岛 266042)

(College of Chemical Engineering, Qingdao University of Science & Technology, Qingdao, Shandong 266042, China)

**摘要:**海洋重金属污染问题已成为全球关注的热点。因具有较强的重金属富集能力,水产贝类鲜食及其加工产品的重金属超标问题亟待解决。壳聚糖是天然的碱性多糖,具有很强的重金属螯合能力,蕴含量也非常丰富。文章分析壳聚糖及其衍生物用于吸附及脱除重金属的分子结构特征与吸附作用机制;综述其在牡蛎、扇贝等主要经济贝类中的相关研究及应用,强调以生物吸附剂脱除并净化贝类重金属的重要性;对贝类重金属脱除研究提出建议,并展望其应用前景。

**关键词:**壳聚糖;贝类;重金属;脱除

**Abstract:** Recently, the problem of heavy metal pollution has attracted many attentions in global scale. The problem of heavy metal contamination in fresh and processing shellfish products is urgently to be solved due to their strong ability of heavy metal enrichment. As the only existing natural alkaline polysaccharide, chitosan has strong ability of heavy metal chelating. In this paper, the molecular structure characteristics and adsorbent mechanism of chitosan in absorbing and removing heavy metals are analyzed. The importance of biological adsorbent on the removal of heavy metals was discussed in this paper. It was investigated of chitosan on heavy metals removal for economic shellfish products, such as oysters and scallop. Finally, considering the industry and cost requirements, suggestions for the future research on the topic of heavy metal removal from shellfish are pro-

posed.

**Keywords:** chitosan; adsorption; shellfish; heavy metals

食用贝类味道鲜美、营养丰富,深受消费者喜爱。随着海洋重金属污染形势越来越严峻,贝类作为滤食性动物,生活环境处于海陆交界,移动能力差,极易蓄积重金属<sup>[1]</sup>。销量领先的贝类更易将体内的重金属通过食物链传递给人体<sup>[2-3]</sup>。若食用的贝类重金属超标会对人体造成暂时或持久损伤<sup>[4-7]</sup>。降低重金属离子含量的 3 条主要途径是离子交换、化学沉淀以及吸附。离子交换可分离重金属离子,同时会螯合有益元素,降低贝类营养价值;化学沉淀法存在成本高、产生新污染物的缺点;吸附法则具有成本低、效果好和二次污染小的优点,在重金属脱除方面应用广泛<sup>[8-13]</sup>。

吸附法是指利用吸附剂将样品中的一种或数种组分吸附于表面,再用适宜方法解吸被吸附物质,从而实现某种组分的分离与富集。目前研究和应用较多的吸附性物质是活性炭、粘土、海藻、壳聚糖等<sup>[14]</sup>。天然吸附剂很难同时满足上述条件,但自然界唯一的碱性多糖——壳聚糖具有吸附能力强、成本低廉、来源广泛的特点,并可通过改性形成不同的壳聚糖类衍生物,增强吸附效果。近年来,中国贝类养殖生产发展迅速,仅 2012 年海洋贝类产量就达到了 1 265 万 t,同比增长 4.29%,活体贝类消费量也在日益增长<sup>[15]</sup>。目前壳聚糖吸附贝类重金属的研究日趋增多。若针对壳聚糖及其衍生物脱除重金属机理,对比应用不同种类吸附剂脱除贝类重金属作用的效果,可设计出有产业化前景和应用价值的新型重金属壳聚糖吸附剂。文章拟综述壳聚糖吸附重金属的机理,比较及分析不同吸附剂的应用研究,并对壳聚糖及其

**基金项目:**国家自然科学基金资助项目(编号:31271938);现代农业产业技术体系专项(编号:GARS-48);2015 年国家大学生创新创业训练计划项目(编号:201510426027)

**作者简介:**李子琪,女,青岛科技大学在读本科生。

**通讯作者:**解万翠(1969—),女,青岛科技大学教授,博士。

E-mail: xiewancui@163.com

**收稿日期:**2015-12-06

衍生物脱除贝类重金属的相关研究进行探讨及展望。

## 1 壳聚糖及其衍生物吸附及脱除重金属机理

### 1.1 壳聚糖

壳聚糖是由天然存在的甲壳素经脱乙酰作用后得到的多糖类物质。从构象看,它所含的羟基和氨基是平伏键,该结构使其在相应 pH 下对特定重金属离子有螯合作用,故可将其应用于贝类重金属离子的脱除<sup>[16]285-289</sup>。

脱乙酰度、相对分子量是影响壳聚糖吸附效果的内在因素。壳聚糖螯合重金属离子的能力随脱乙酰度的增大而加强<sup>[17-18]</sup>。减小相对分子量可使其分子间粘性降低,溶解度

便相应增大,从而可增效螯合作用。该吸附作用也随多种外在因素而改变。其中 pH、温度、吸附时间的影响较大。酸性环境中氢离子与壳聚糖的氨基作用形成铵根离子,氨基减少,结合金属离子能力下降<sup>[19]</sup>。在 pH 升高后,氨基吸附能力上升,但过多的氢氧根会使重金属离子出现沉淀现象,使吸附能力下降,具体历程见图 1。壳聚糖对金属离子的吸附是放热反应,在低温化学吸附未达平衡时,吸附的速率、吸附量均随温度的升高而增加。达吸附平衡后,升温则使平衡时的吸附量降低。延长吸附时间,吸附效率会呈现先增加随后不变的趋势<sup>[20]</sup>。

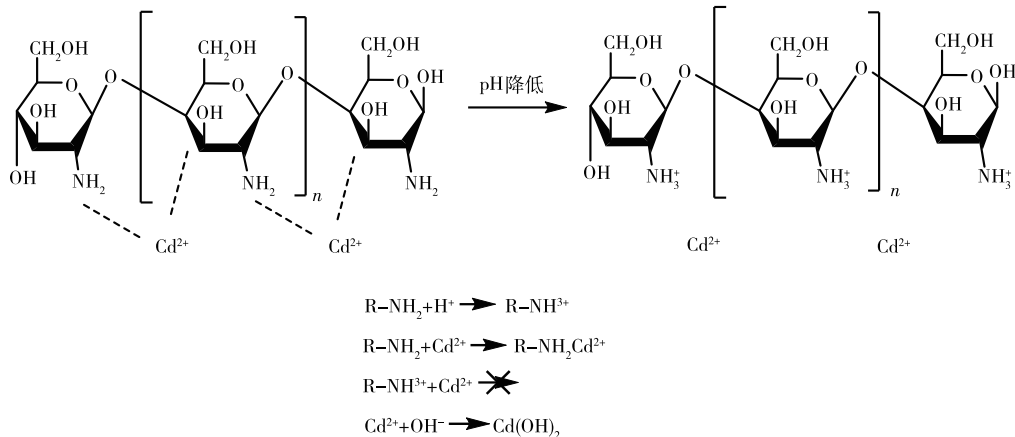


图 1 pH 对壳聚糖吸附重金属离子的影响<sup>[17]</sup>

Figure 1 The effect of pH on the adsorption of heavy metal ions by chitosan

### 1.2 壳聚糖衍生物

交联壳聚糖吸附金属离子的机理见图 2。金属离子所带有的正电荷与壳聚糖上氨基和羟基的孤电子对发生静电吸引作用而形成配位键。但分子中氨基、羟基发生过交联反应之后,壳聚糖相应吸附活性部位减少,导致其对金属离子的吸附能力下降<sup>[21]</sup>。因此,合成一种既有较高机械强度,又有良好吸附性能 of 交联壳聚糖吸附剂具有非常重要的意义。

壳聚糖也可通过在分子中的氨基和羟基上引入电负性强的基团提高吸附量。氨基形成 Schiff 碱物质,尽管增强了稳定性,但一般对壳聚糖吸附量的提升并不明显。而通过在 O-位引入外来基团,不仅保留了氨基,使氮的孤对电子能与

更多重金属离子形成配位键,且引入的基团又可进一步增强壳聚糖的吸附能力<sup>[22]</sup>。壳聚糖微球可增加壳聚糖的表面极性,有利于对金属离子的吸附<sup>[23-24]</sup>。

壳聚糖衍生物在重金属螯合过程中具有比壳聚糖本身更优越的性能,但不同的壳聚糖衍生物在其实际的作用效果中又有着明显的优缺点,距产业化应用有一定差距。

由表 1 可知,N-壳聚糖衍生物和 O-壳聚糖衍生物具有水溶性高、受其他因素影响较小等显著特点。通过适当改变其结构、优化工艺流程等方法,有望促进其产业化脱除贝类重金属进程。

### 1.3 动力学与热力学研究

#### 1.3.1 壳聚糖及其衍生物吸附重金属的动力学

吸附动力学主要考察对吸附速度的影响问题,现代产业化应用中吸附速率是需要考虑的方面<sup>[25]</sup>。吸附过程的反应机理十分复杂,影响因素有反应温度、体系 pH 值、物质初始浓度等。一般几个反应形成的吸附过程中最慢的反应即为速控步骤。研究吸附动力学并提出缩短速控步骤反应应用时的方法,可以提高整个吸附反应的速度。在反应达到平衡前,用 Lagergren 速率方程<sup>[26]</sup>拟合吸附的速率后显示饱和吸附量 Q 与时间 t 的关系,是满足二级吸附速率线性方程的。此方程表明两者以配位共价键相互结合。反应过程中,吸附未达平衡前吸附量随时间的延长不断升高,平衡后,饱和吸附量趋于不变。

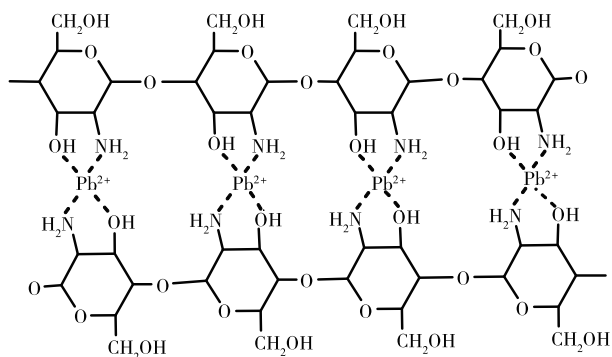


图 2 交联壳聚糖吸附 Pb<sup>2+</sup>

Figure 2 Crosslinked chitosan adsorbent Pb<sup>2+</sup>

表 1 部分壳聚糖衍生物脱除重金属效果比较<sup>[16]285-289</sup>

Table 1 The effect of some chitosan derivatives used in removal of heavy metals

名称	举例	优点	缺点
交联壳聚糖	戊二醛交联壳聚糖	pH 应用范围较广有利于回收利用	吸附能力弱
壳寡糖金属配合物	COS-Mg、COS-Zn、COS-Ca、COS-Ree 等	提高了水溶性,改善了吸附效果	影响了贝类中 Ca、Fe 等元素的含量
N-壳聚糖衍生物	水杨酰基壳聚糖、N-羧甲基壳聚糖	水杨酰基壳聚糖水溶性高;N-羧甲基壳聚糖水溶性很高	水杨酰基壳聚糖吸附能力低;N-羧甲基壳聚糖定向性较低,吸附量提升不明显
O-壳聚糖衍生物	黄原酸羧甲基壳聚糖、CMC	黄原酸羧甲基壳聚糖水溶性提高,饱和吸附量显著增加;CMC 受温度、时间、浓度等影响较小	黄原酸羧甲基壳聚糖定向性低;CMC 定向性较低
N, O-壳聚糖衍生物	N, O-羧甲基壳聚糖树脂	吸附能力强	受取代度、温度、时间、浓度等影响较大,定向性低
含杂原子壳聚糖衍生物	N-黄原酸化壳聚糖钠盐	吸附性能高,对部分金属离子选择性强,有利于回收利用	工艺复杂,成本较高
特殊结构壳聚糖衍生物	冠醚壳聚糖衍生物、环糊精壳聚糖衍生物、杯芳烃壳聚糖衍生物	选择吸附性强,吸附性能高	研究较少,总体性能不明确

$$\frac{t}{Q} = \frac{1}{k_2 Q_e^2} + \frac{t}{Q_e} \quad (1)$$

式中:

$t$ ——吸附时间, min;

$Q$ ——吸附时间  $t$  时的吸附量, mg/g;

$Q_e$ ——吸附平衡时的吸附量, mg/g;

$k_2$ ——二级反应速率常数, g/(mg·min)。

1.3.2 壳聚糖及其衍生物吸附重金属的吸附热力学 吸附热力学研究吸附能力和容量问题,其影响因素包括壳聚糖结构、初始浓度等<sup>[27]</sup>。根据吸附等温线对被吸附离子摆脱束缚的温度进行初步计算,对研究壳聚糖吸附重金属离子的最优条件有重要意义。程珊珊等<sup>[28]</sup>以 Langmuir 等温式为理论依据对壳聚糖的吸附热力学进行研究,发现随着吸附平衡时浓度  $C_e$  的增加,平衡吸附量  $Q_e$  也增加。此过程是 Langmuir 型吸附,印证了吸附方式为单分子层吸附。

## 2 贝类中重金属的吸附及脱除

### 2.1 贝类原料中重金属的脱除及其对营养成分的影响

Topcuoglu 等<sup>[29]</sup>结合中国水域镉污染较为严重的情况,就产量较大的贝类原料脱镉问题进行了研究,结果表明,贝类重金属含量递减顺序为 Pb>Co>Cd>Cr>Cu>Mn>Ni>Zn>Fe。为降低牡蛎体内的镉含量,梁鹏等<sup>[30]</sup>采用壳聚糖来脱除贝肉中的镉离子,在 pH 8.5 g 牡蛎提取液中加入 0.5 g 壳聚糖的条件下,镉脱除率超过 98%。郭妍妍等<sup>[31]</sup>将壳聚糖负载于凹土,在 pH 7.2、吸附剂添加量 6.4 mg/mL、振荡时间 30 min、振荡速率 170 r/min 的条件下,凹土—壳聚糖脱除牡蛎中镉的效率为 73.7%。但壳聚糖分子量、脱乙酰度、分子上基团种类和凹土的颗粒大小影响负载率的机制有

待深入研究。

在脱除贝类重金属的研究中,既要考虑吸附剂脱除不同重金属的效果,也要关注脱除过程是否会造成营养流失。刘炳杰等<sup>[32]</sup>研究显示扇贝裙边酶解液经壳聚糖—锌脱镉后,脱镉率可达 80%以上。脱除马氏珠母贝中的重金属可提高其食用价值,衣美艳等<sup>[33]</sup>的研究采用 Schiff 法制得 L-半胱氨酸交联壳聚糖,该壳聚糖对合浦珠母贝镉提取液、酶解液的镉脱除率分别为 47.2%和 48.6%。脱镉后溶液富含必需氨基酸,且有良好的对人体必需氨基酸比例均衡度,可用于开发保健产品。

由表 2 可知,将壳聚糖作用于贝肉匀浆或酶解液时,均会造成氨基酸和蛋白质的损失。但综合考虑吸附剂的脱除率和营养物质保存率,改性后的壳聚糖吸附剂仍可用于脱除贝类原料中的重金属。改性壳聚糖处理活体牡蛎后,活体牡蛎体内的金属硫蛋白含量增多,且改性壳聚糖对镉的脱除率高于未改性的<sup>[35]</sup>,所以改性壳聚糖吸附剂也可用于活体脱除。

### 2.2 贝类净化中脱除重金属

2.2.1 重金属污染模型研究 将贝类放在一定浓度重金属的养殖环境中使其人为污染,可达到探究贝类重金属蓄积规律、考察贝类重金属吸附机制的目的。从而在该模型的基础上制备出相应的高效壳聚糖类吸附剂。

孙继鹏<sup>[36]</sup>选择栉孔扇贝进行研究,结果表明,壳聚糖发挥抗氧化作用影响贝类,通过维持自由基的动态平衡来清除镉。并发现贝类重金属富集强弱的顺序为肾>胃>鳃>裙边>生殖腺。这为分析壳聚糖对水产中重金属吸附效果提供了理论依据。

表2 壳聚糖材料对海洋贝类中几种重金属和营养物质的影响<sup>[34]</sup>  
Table 2 Effect of Chitosan on the heavy metal and nutrients in marine shellfish

重金属	脱除对象	吸附剂	最佳脱除率/%	营养物质保存率
Cd <sup>2+</sup>	贻贝蒸煮液	壳聚糖	89.0	蛋白质 61.2%~87.6%, 总糖 63.7%~88.5%
	活体牡蛎	壳聚糖	30.0	金属硫蛋白约 180%
	扇贝裙边酶解液	壳聚糖	70.0	蛋白质 90%, 氨基酸 89%
	活体牡蛎	N,O-羧甲基壳聚糖	43.8	金属硫蛋白约 200%
	马氏珠母贝全脏器酶解液	凹土负载壳聚糖	75.4	糖胺聚糖 43%
	牡蛎全脏器酶解液	凹土负载壳聚糖	73.5	糖胺聚糖 44.1%
Cr <sup>2+</sup>	贻贝蒸煮液	壳聚糖	24.0	蛋白质 61.2%~87.6%, 总糖 63.7%~88.5%
Pb <sup>2+</sup>	活体牡蛎	壳聚糖	64.8	金属硫蛋白约 200%
	活体牡蛎	N,O-羧甲基壳聚糖	95.3	金属硫蛋白约 220%

2.2.2 活体牡蛎中重金属的脱除 活体脱除方法一般是将贝类暂养于无重金属污染水区,通过贝类自身的代谢将重金属排出。镉为典型重金属<sup>[37]</sup>,但由于贝类没有强有力的脱除重金属的机制,靠此方法很难达到脱除要求。故可在洁净海水里加入小颗粒且对贝类存活无伤害的吸附剂,贝类滤食进入体内后该吸附剂螯合重金属离子促进其排出。

朱常龙<sup>[38]</sup>将被镉污染的 30 只牡蛎培养在若干个装有天然海水的 30 L 饲养箱中,将不同壳寡糖金属配合物添加到各个饲养箱中。同时做空白对照试验,连续脱除 3 d 后的结果显示,海水中加配合物的贝类体内重金属含量明显低于对照组,表明壳聚糖镁的脱除效果最优。确定的吸附最优条件为温度 30 ℃,pH 值为 9。

黄国清等<sup>[39]</sup>研究了壳寡糖的脱乙酰度和分子量对脱镉效果的影响。结果表明,壳聚糖镁复合物在脱乙酰度 90%,浓度 100 mg/L 时,脱除率最佳(对比壳聚糖钙、壳聚糖锌和壳聚糖 Ree 3 种配合物)且对牡蛎体内营养成分及其他有益金属元素的含量无影响。

壳聚糖—金属离子配合物吸附牡蛎体内的镉效果明显,作为贝类重金属吸附剂发展前景良好。但目前还无法实现同时满足各类净化要求。因此贝类净化距离产业化尚有距离,这也是今后科研工作者努力的重要方向。

### 3 展望

已有大量研究,对壳聚糖及其衍生物、凹土—壳聚糖等改性壳聚糖应用于贝类重金属脱除,脱除效果均有提高,营养流失问题也得到了相应解决。但均因制备费用高、回收率低等问题尚未实现产业化。要实现壳聚糖吸附剂产业化仍需在下方面继续深入研究:

(1) 探究改性壳聚糖产业化。仍需开发同时具备机械强度与良好吸附性能的交联壳聚糖吸附剂。N-壳聚糖衍生物和 O-壳聚糖衍生物经适当优化工艺流程等方法,有望实现产业化脱除贝类重金属。

(2) 复合型壳聚糖吸附剂有待发展。壳聚糖虽可改性为网状吸附剂,但增加的吸附面积终究有限。而复合吸附剂

可通过增强壳聚糖的负载,达到明显提升吸附面积的效果。相关研究机制仍需进一步的探究。

(3) 吸附重金属离子后的壳聚糖类吸附剂解析效果有待提高。

对于水产重金属吸附,若制备的吸附剂达饱和和吸附时间较短且具有定向性,脱重金属效率与效果才可满足产业化要求。并且经处理的贝类产品营养成分损失应较小,如此才符合当下消费者的科学膳食需求。未来的研究,需要进一步完善壳聚糖及其衍生物吸附重金属离子的基础数据,结合理论设计出更符合产业化需求的新型吸附材料。

### 参考文献

- [1] Li Xue-peng, Li Jian-rong, Wang Yan-bo, et al. Kinetic study of the bioaccumulation of heavy metals (Cu, Pb and Cd) in Chinese domestic oyster *Ostrea ylicatula*[J]. Journal of Environmental Science and Health, Part A, 2010, 45(7): 836-845.
- [2] 但德忠. 环境样品分析[J]. 分析试验室, 2000(3): 163-172.
- [3] Jarup L. Hazards of heavy metal contamination[J]. Journal of British Medical Bulletin, 2003, 68: 167-182.
- [4] 郑长春, 詹秀美, 唐文兴, 等. 长江口以南我国沿岸海域经济贝类中的重金属[J]. 台湾海峡, 1995, 14(3): 262-268.
- [5] Castelli M, Rossi B, Corsetti F, et al. Levels of cadmium and lead in blood: an application of validated methods in a group of patients with endocrine/metabolic disorders from the Rome area [J]. Microchemical Journal, 2005, 79(2): 349-355.
- [6] Robson M. Methodologies for assessing exposures to metals human host factors[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2003, 56(1): 104-109.
- [7] Storelli M. Potential human health risks from metals (Hg, Cd, and Pb) and polychlorinated biphenyls (PCBs) via seafood consumption: Estimation of target hazard quotients (THQs) and toxic equivalents (TEQs) [J]. Journal of Food and Chemical Toxicology, 2008, 46(8): 2782-2788.
- [8] 周绍箕. 离子交换纤维在重金属离子分离、提取中的应用研究[J]. 新疆有色金属, 2012(2): 49-52.

- [9] 朱蓓薇, 杨静峰, 董秀萍, 等. 海洋贝类多糖脱除重金属离子的方法: 中国, CN200910012667. 2[P]. 2009-12-23.
- [10] 王雅静, 戴惠新. 生物吸附法分离废水中重金属离子的研究进展[J]. 冶金分析, 2006, 26(1): 17-21.
- [11] 蒋仙玮, 钟红茂, 许秀娟, 等. 脱除重金属的技术方法[J]. 食品工业科技, 2010, 31(12): 393-397.
- [12] 吴强, 方旭波, 余辉, 等. 凹凸棒土负载壳聚糖去除鱼油重金属的实验研究[J]. 粮油食品科技, 2012, 20(3): 26-30.
- [13] 李建珍, 郝继弟. 高效脱除水中重金属离子吸附剂新体系研究进展[J]. 食品研究与开发, 2010, 31(9): 215-218.
- [14] Li Jian-zhen, Hao Ling-di. Study on the cheap renewable absorbent of the new system for efficient removal of heavy metal ions in water[J]. Journal Food Research and Development, 2010, 31(9): 19-21.
- [15] 陈兰荪. 我国水产养殖业可持续发展论述[J]. 科学养鱼, 2008(6): 1-3.
- [16] 蒋挺大. 壳聚糖[M]. 2版. 北京: 化学工业出版社, 2007.
- [17] 刘新, 陈卫中, 李茂全, 等. 响应面法优化壳聚糖对混合液镉铬离子吸附条件的研究[J]. 食品工业科技, 2013, 34(11): 238-242.
- [18] 田冶, 焦延鹏, 陈义康, 等. 不同脱乙酰度对壳聚糖表面物理及吸附性能的研究[J]. 广州化学, 2005, 17(2): 28-45.
- [19] Li Jin, Ren Bi-bai. Mechanisms of lead adsorption on chitosan / PVA hydrogel beads[J]. Langmuir, 2002, 18(25): 9 765-9 770.
- [20] 毕韶丹, 安向艳, 党明岩, 等. 香草醛改性壳聚糖对镉离子的吸附热力学和动力学[J]. 功能材料, 2012, 43(8): 358-372.
- [21] 邢云, 李素娟, 李步海, 等. 交联壳聚糖对常见金属离子的吸附性能及机理探讨[J]. 冶金分析, 2014, 9(2): 73-92.
- [22] 汪源浩, 隋卫平, 王恩峰, 等. 壳聚糖的化学改性及应用研究进展[J]. 济南大学学报: 自然科学版, 2007, 21(2): 140-144.
- [23] Arrascue M L, Garcia H M, Horna O, et al. Gold sorption on chitosan derivatives [J]. Hydrometallurgy, 2003, 71(1): 191-200.
- [24] Guibal E, Vincent T, Navarro M R. Synthesis and characterization of a thiourea derivative of chitosan for platinum recovery [J]. J. Appl Polym. Sci., 2000, 75(1): 119-134.
- [25] 彭军, 周美华. 壳聚糖为基质的染料亲和吸附剂对重金属离子的吸附平衡及动力学研究[J]. 上海化工, 2007, 32(11): 19-37.
- [26] Schmuhl R, Kriegh M, Keizer K. Adsorption of Cu(II) and Cr(VI) ions by chitosan; Kinetics and equilibrium studies[J]. School for Chemistry and Biochemistry, 2001, 27(1): 1-7.
- [27] 于丽娜, 汪东风, 胡维胜, 等. 球状壳聚糖树脂的制备及其吸附热力学研究[J]. 中国海洋大学学报: 自然科学版, 2008, 38(1): 117-135.
- [28] 程珊珊, 杨锡洪, 章超桦, 等. 壳聚糖对  $Cd^{2+}$  和  $Pd^{2+}$  的吸附作用[J]. 水产学报, 2011, 35(3): 410-415.
- [29] Topcuoglus, KlrbasoluC, Gtingr N. Heavy metal sin-organisms and sediments form Turkish Coast of the Black Sea, 1997-1998[J]. Environment International, 2002, 27(7): 521-526.
- [30] 梁鹏, 吴晓萍, 徐慧, 等. 壳聚糖脱除牡蛎匀浆液中重金属 Cd 的初步研究[J]. 食品工业科技, 2010(7): 107-109.
- [31] 郭妍妍, 吴红绵, 衣美艳, 等. 壳聚糖复合物对近江牡蛎糖胺聚糖中 Cd 的脱除[J]. 食品科学, 2014, 35(12): 279-301.
- [32] 刘炳杰, 汪东风, 孙继鹏, 等. 交联壳聚糖树脂对扇贝裙边酶解液中镉的脱除研究[J]. 安徽农业大学学报, 2010, 37(1): 11-14.
- [33] 衣美艳. 凹凸土负载壳聚糖对两种贝类糖胺聚糖中镉的吸附作用研究[D]. 广东: 广东海洋大学, 2010: 48-57.
- [34] 李佰磊, 任丹丹, 汪秋宽, 等. 改性壳聚糖及其对贝类提取液重金属脱除的研究进展[J]. 食品工业科技, 2014, 35(14): 306-370.
- [35] 周湖明, 李长玲, 陈康, 等. 近江牡蛎富集、排出 Pb、Cd 的动力学及其与体内金属硫蛋白的相关性研究[J]. 广东海洋大学学报, 2012(6): 57-65.
- [36] 孙继鹏. 壳寡糖金属配合物对扇贝体内重金属镉的影响[D]. 山东: 中国海洋大学, 2012: 72-89.
- [37] Joint Group of Experts on Scientific Aspects of Marine Pollution (GESAMP). Land boundary flux of contaminants contributions from river[J]. GESAMP Studies, 1987, 32(12): 167-182.
- [38] 朱常龙. 壳寡糖衍生物对太平洋牡蛎体内重金属镉的影响[D]. 山东: 中国海洋大学, 2009: 35-50.
- [39] 黄国清, 朱常龙, 李志茹, 等. 壳寡糖-金属配合物对太平洋牡蛎体内的镉脱除效果的研究[J]. 中国食品学报, 2012, 12(4): 121-126.

## 信息窗

### 如何让健康食品更诱人?

许多不健康食品比健康食品更令人垂涎,如何才能让健康食品更诱人呢? 美国明尼苏达大学研究人员发现,在健康食品包装上印上表示有益健康的图标,比印上“健康”这个词更能吸引消费者选购。

心理学家特蕾西·曼领导的研究小组邀请 400 名成年人在苹果和糖果之间选一样,发现如果在苹果包装上使用表示有益健康的图标,65% 志愿者会选择苹果,而如果包装上印的是“健康”这个词,这一比例为 45%。

研究人员又邀请 300 名成年人在胡萝卜和薯片之间选择,发现如果胡萝卜包装印的是健康图标,30% 志愿者选择它们,如果印的是健康这个单词,选择它们的比例为 20%。

研究人员在人格与社会心理学学会第 17 届年会上介绍了上述发现。他们说,人们为什么更容易接受图标传达的健康信息还有待研究。

(来源:www.foodmate.net)