

# 壳聚糖及其衍生物在水处理中的应用

## Applications of chitosan and its derivatives to water treatment

郭娟娟<sup>1,2,3</sup>, 唐洪杰<sup>1,2,3</sup>, 单宝田<sup>2,3</sup>, 王悦江<sup>4</sup>

(1.中国海洋大学 化学化工学院, 山东 青岛 266100; 2.中国海洋大学 海洋化学理论与工程技术教育部重点实验室, 山东 青岛 266100; 3.中国海洋大学 海洋污染生态化学实验室, 山东 青岛 266100; 4.潍坊市环境科学研究设计院, 山东 潍坊 261041)

中图分类号: X703

文献标识码: A

文章编号: 1000-3096 (2007) 01-0087-05

壳聚糖(Chitosan)是甲壳素(Chitin)的脱乙酰化产物, 本身为线型分子, 分子链中含有反应性基团羟基(-OH)和氨基(-NH<sub>2</sub>)。在酸性溶液中, 由于-OH和-NH<sub>2</sub>的存在, 壳聚糖可形成高电荷密度的阳离子聚电解质, 能够凝聚溶液中带负电的悬浊液、有机物质, 具有良好的络合性能和絮凝性能; 同时, 其分子中的-OH和-NH<sub>2</sub>具有亲水性, 使得壳聚糖分子还具有较强的吸湿性, 可用做污泥脱水剂。由于壳聚糖本身无毒、生物可降解性好、使用后不产生二次污染, 在废水处理中具有独特优势。但是壳聚糖也存在相对分子质量小、架桥能力差、使用成本高的缺点。近年来, 科研工作者在对壳聚糖进行改性研究, 提高其可利用性, 降低使用成本方面进行了较多的探讨。壳聚糖的改性主要发生在其分子中的羟基和氨基部位, 多通过控制反应条件在壳聚糖上引入其他基团来改变其物化性质, 常用的方法主要有: 羧甲基化、羟乙基化、烷基化、乙酰化、硫酸酯化、缩合、接枝与交联等<sup>[1]</sup>。改性后的壳聚糖及其衍生物在水处理和污泥脱水方面的性能得到显著加强。

### 1 在废水处理中的应用

#### 1.1 印染废水处理

印染、染料废水中含有大量的染料, 在酸性条件下, 结构复杂的染料分子带一定数目的负电荷。在此条件下, 能形成阳离子聚电解质的壳聚糖显示了良好的脱色性能。江玉霆<sup>[2]</sup>的研究表明, 酸性条件下, 壳聚糖对活性染料、直接染料废水的脱色率可达

93.7%以上, COD<sub>cr</sub>去除率为43%~73%。华登封<sup>[3]</sup>进行了类似的研究, 结果表明, 在pH5.7~6.5, 壳聚糖投加量为10~12 mg/L条件下, 印染废水的脱色率为67%, COD<sub>cr</sub>去除率72.6%, 处理结果与投加125~200 mg/L的硫酸铝和聚合氯化铝的(PAC)效果相当。此外, 改性后的壳聚糖对印染废水的脱色效果得到进一步提高。刘秉涛等<sup>[4]</sup>采用羧甲基壳聚糖对4种水溶性染料废水进行脱色处理, 脱色率最高可达99.6%, COD<sub>cr</sub>去除率56%~73%, 影响脱色效果的主要因素依次为pH值、絮凝剂用量、染料种类、反应时间、静置时间等, 脱色效果优于壳聚糖, 适用于染料废水的深度处理。Chiou<sup>[5]</sup>进行了交联壳聚糖对酸性染料MY和活性染料RB15吸附性能的研究, 结果表明, 交联壳聚糖对MY和RB15的吸附效率分别为1334 mg/g和722 mg/g, 吸附量随初始浓度的增加和pH值的降低而增加。

近年来, 壳聚糖对染料去除动力学研究也取得了一定的进展。Atonio等<sup>[6]</sup>采用硅石-壳聚糖组成的混合物对染料废水进行处理, 结果显示, 在pH值为4的缓冲溶液中, 混合物去除染料的性能良好, 染料的化学结构和温度对吸附速率没有明显影响, 吸附速

收稿日期: 2005-12-22; 修回日期: 2006-10-10

作者简介: 郭娟娟(1982-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 壳聚糖及其在废水处理中的应用, 电话: 0532-66785785, E-mail: guojuan90@hotmail.com

率主要取决于扩散速率。这与 Uzun 等<sup>[7]</sup>进行的壳聚糖对活性黄染料(RY2)和活性黑染料(RB5)去除动力学的研究结果一致。

### 1.2 含蛋白质、脂肪等食品废水的处理

食品工业废水中含有大量蛋白质等营养物质,可导致水环境富营养化。朱启忠等<sup>[8]</sup>在对蛋白质浓度、壳聚糖用量、吸附时间、温度及 pH 值条件进行系统研究后,得到了壳聚糖对蛋白质的最佳吸附条件,在此条件下,吸附效率可达 95.6%。Johnson 等<sup>[9]</sup>用壳聚糖处理虾、蟹和鲑鱼加工废水,经旋流池、絮凝和脱水处理,总固态物去除率接近 100%。Ahmad<sup>[10]</sup>将壳聚糖用于棕榈油压榨污水处理,与明矾和 PAC 相比,在相同用量时壳聚糖对悬浮固体和残余油脂的去除率最高,而所需搅拌时间、沉降时间最短,絮凝效果优于传统的絮凝剂。这与 Torgeir 等<sup>[11]</sup>用高聚壳聚糖处理高浓度有机质、低浊度湖水的研究结果一致。

### 1.3 重金属废水处理

壳聚糖分子中的-OH 和-NH<sub>2</sub>对金属离子有一定的络合作用,是一种天然螯合剂。其特殊的多孔结构,巨大的比表面积,使其对金属离子有很大的吸附容量<sup>[12, 13]</sup>。壳聚糖吸附重金属离子后可经洗脱再生。

Cervera 等<sup>[14]</sup>对比了相同质量的壳聚糖和氧化铝在弱酸性条件下对 Cd<sup>2+</sup>和 Cr<sup>3+</sup>的去除作用,结果表明,对于 20 mL Cd<sup>2+</sup>和 Cr<sup>3+</sup>质量浓度为 50 mg/L 的试液,氧化铝可去除 0.6 mg Cr<sup>3+</sup>和 0.2 mg Cd<sup>2+</sup>,而壳聚糖可完全去除。Kang 等<sup>[15]</sup>将表氯醇交联的壳聚糖在硝酸铈胺(CAN)的引发下与苯胺(AN)接枝共聚,再通过羟胺与氰基反应,制得偕胺胍壳聚糖-g-PAN。产物对 Cu<sup>2+</sup>, Pb<sup>2+</sup>, Zn<sup>2+</sup>和 Cd<sup>2+</sup>等都具有很好的吸附性能,吸附能力随 pH 和苯胺接枝率的变化而变化, pH 值增加,解吸能力逐渐增加。该接枝共聚产物还可作为吸附剂从海水和废水中提取金属离子。丁德润等<sup>[16]</sup>研究发现,壳聚糖改性产物 N-羧甲基壳聚糖对 Fe<sup>2+</sup>, Ni<sup>2+</sup>, Cu<sup>2+</sup>, Cr<sup>3+</sup>的配位能力均大于壳聚糖。为了改善壳聚糖对 Hg 的吸附亲和性, Merrifield 等<sup>[17]</sup>制备了壳聚糖-巯基丙氨酸接枝共聚凝胶,在 pH 4 的条件下,对 Hg 的吸附容量约为未接枝物的 2 倍,在 pH 7 时吸附容量达到最大,吸附动力学符合弗伦德利希方程。与壳聚糖相比,其改性产物具有更广泛的 pH 使用范围。

壳聚糖除直接作为水处理剂使用外,也可以制

作成分离膜用于废水处理。于丽青等<sup>[18]</sup>制备了透水速度为 3~4 mL/(cm<sup>2</sup>·h)的壳聚糖超滤膜,并用该膜对低含量重金属废水进行处理。结果表明,调节溶液的 pH 值,使重金属离子在水溶液中形成胶体后,用壳聚糖超滤膜可有效地去除水中 Pb<sup>2+</sup>, Cd<sup>2+</sup>, Zn<sup>2+</sup>, Cu<sup>2+</sup>等金属离子的氢氧化物,去除效率随 pH 值的增加而提高, pH 值达 11 时对 3 种重金属离子的去除效率均在 90%以上。

### 1.4 造纸废水处理

造纸工业废水中含有大量纤维素、木质素及化学品,目前大多采用有机絮凝剂和无机絮凝剂配合使用进行处理。姚淑华等<sup>[19]</sup>考察了 pH 值、壳聚糖用量、搅拌速率及静置时间等对 COD<sub>cr</sub>去除率的影响,得出了 pH 值 6.5~6.7,搅拌速率 120 r/min,静置时间 12h,壳聚糖用量为 0.14g/L 的最佳实验条件。在此条件下的 COD<sub>cr</sub>去除率可达 66%以上,壳聚糖处理效果明显优于硫酸铝。实验结果还表明,当采用壳聚糖与硫酸铝进行配比制得的复合净水剂处理再生纸废水时,发现 COD<sub>cr</sub>的去除率可达 83%以上,明显优于壳聚糖或硫酸铝的单独处理效果。陈鲁生等<sup>[20]</sup>的研究也表明对造纸中段废水来说,壳聚糖及其衍生物的处理效果优于无机絮凝剂,同时也优于阴、阳离子型聚丙烯酰胺(PAM);将壳聚糖及其衍生物与硫酸铝和氧化钙组成复合絮凝剂对废水进行处理时,效果优于单独使用的效果。李静等<sup>[21]</sup>认为,桥联作用、电中和作用、基团反应是壳聚糖处理造纸废水的主要絮凝机理。

壳聚糖化学改性产品应用于造纸废水处理也进行了较多研究。张光华等<sup>[22]</sup>制得壳聚糖与丙烯酰胺的接枝聚合物絮凝剂(CAM), ζ 电位测定表明, CAM 是以阴离子为主的两性接枝共聚物。他们将 CAM 用于处理造纸废水的絮凝实验,结果表明,以丙烯酰胺质量分数为 80%的 CAM 对造纸废水的絮凝效果最好,同时发现 CAM 与 Al<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>有很好的协同絮凝效果,使用 Al<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>可大大降低 CAM 的使用量,而保持处理效果。张亚静<sup>[23]</sup>等研究发现,用氯化三甲壳聚糖季铵盐作絮凝剂处理造纸废水在 pH 值 8~13 时,去除率可达 75%以上,适当提高改性产物的浓度、延长搅拌时间及助凝剂硫酸亚铁或硫酸铝的加入,均可提高絮凝效果。

### 1.5 城市生活污水处理

生活污水中的主要污染物为有机物,同时还含有大量的大肠杆菌、病毒等有害生物体。徐岩等<sup>[24]</sup>

研究了壳聚糖作为絮凝剂对生活污水的处理效果。结果表明,同 PAC 相比,壳聚糖对污水的悬浮固体含量(SS)和浊度去除效果较 PAC 好,而对污水 COD<sub>cr</sub> 的去除效果较 PAC 稍差,但壳聚糖的絮凝速度较快,形成的絮体颗粒较大,整体絮凝效果较优。

周世辉<sup>[25]</sup>对壳聚糖与无机絮凝剂复合使用处理生活污水进行了研究。结果表明,壳聚糖与硫酸铁的复合强化效果最好,对 SS 和浊度的去除率达 85%,其中强化去除率超过 75%;COD<sub>cr</sub> 和 BOD<sub>5</sub> 的去除率分别为 72.5% 和 56.4%,其中强化去除率分别为 63.8% 和 43.5%,强化效果明显。曾德芳<sup>[26]</sup>等做了类似的研究,将壳聚糖与其他絮凝剂和助凝剂按一定配方和工艺制成壳聚糖复合絮凝剂,在最佳使用条件下,与传统絮凝剂 PAC 相比,COD<sub>cr</sub> 去除率提高 7%~13%,SS 去除率提高 3%~10%,Al<sup>3+</sup> 浓度下降 61%~85%,药剂投加量减少 76%~82%。此外,刘维俊<sup>[27]</sup>对壳聚糖衍生物羧甲基壳聚糖应用于生活污水处理进行了研究,并与壳聚糖、PAM 絮凝剂进行了比较。通过测定沉降时间、沉降絮体高度、沉降速度、沉降后溶液透光率等参数,表征了其絮凝能力。结果表明,其处理生活污水的絮凝能力:壳聚糖>羧甲基壳聚糖>PAM。

## 2 用于饮用水净化

Al<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub> 或 PAC 是饮用水净化的传统絮凝剂。随着人们对饮用水质量要求的提高,絮凝剂的投入量也逐渐增加。但过多使用铝盐絮凝剂,将使处理后水中铝离子浓度增加并产生更多污泥。因此,寻找切实有效的低毒絮凝剂一直是研究的热点。

Pan 等<sup>[28]</sup>、Huang 和 Deans 等<sup>[29,30]</sup>研究了将壳聚糖及和少量 PAC 复合来絮凝处理水中的胶体颗粒。壳聚糖用量 0.5~1mg/L 时,原水浊度从 30NTU 降至 1NTU 以下。当壳聚糖与 PAC 复合使用时,效果得到加强,壳聚糖用量为 1~2 mg/L,与 PAC 用量之比为 4:1,能使浊度从原水的 40~90NTU 下降至 2~3NTU。方华丰<sup>[31]</sup>等的研究发现,壳聚糖可有效地去除经氯处理的饮用水中的三氯甲烷,吸附去除率可达 87%。

赵金星<sup>[32]</sup>等研制了一种由壳聚糖、活性炭和沸石制成的高效饮用水净化剂。这种净水剂不但具有净水效果好、杀菌、杀虫和捕集水中重金属的作用,而且可适当保留铁、锌、钙等人体所需矿物质,处理后

的水体中还保持有原水体中残存的适当余氯,利于水的长期储存。徐廷国<sup>[33]</sup>等通过进一步研究,发现活性炭/壳聚糖 1:1 混合物对饮用水中的亚硝酸盐有一定去除作用,平均去除率为 54.5%。该混合物能有效抑制含硝酸盐的水溶液中亚硝酸盐的形成,使亚硝酸盐氮的浓度保持在 0.006 mg/L 以下。此外,Dingilian 等<sup>[34]</sup>研究表明,改性的壳聚糖对水源水中的一些藻类有良好的去除效果,投加 0.5 mg/L 的改性壳聚糖,可使湖泊水中由藻类产生的浊度从 9.2NTU 降到 1NTU。

## 3 用于强化微生物处理

壳聚糖机械性能好,且有较好的刚性和不流失、不溶胀性,安全无毒,易于与带负电的微生物结合,同时保持较高的微生物活性<sup>[35]</sup>。

陈亮<sup>[36]</sup>等证实了壳聚糖和甲壳素对废水生物处理都有强化作用,投加壳聚糖对 COD<sub>Cr</sub> 平均去除率(68%)提高 23%,NH<sub>3</sub>-N 去除率(46%)提高 11%,BOD<sub>5</sub> 和动植物油的去除率分别提高 10.2% 和 3.5%。投加固体甲壳素对 COD<sub>Cr</sub>, NH<sub>3</sub>-N, BOD<sub>5</sub> 和动植物油的去除率也较不投加时有所提高,但是效果略逊于壳聚糖。研究还表明,壳聚糖与甲壳素强化生物处理的作用原理不同,壳聚糖是通过改善污泥的菌胶团结构强化生物处理,而甲壳素则作为微生物的生长载体强化生物处理。秦冰等<sup>[37]</sup>向 SBR 生物反应器投加不同分子质量的壳聚糖处理生活污水,通过比较处理效率、污泥活性、污泥结构等指标来探讨壳聚糖强化生物作用的机理。结果表明,壳聚糖对污泥活性有一定抑制作用,但能很好地改善污泥的絮体结构,从而提高活性污泥的处理效率;并且分子质量越大的壳聚糖强化生物处理的效果越佳。

## 4 用作污泥调理剂

活性污泥含水率高,脱水性能差,其浓缩、脱水多采用 PAM, PAC 等。这些絮凝剂有毒性、难降解,存在二次污染问题。壳聚糖无毒无害易降解,无二次污染,其作为污泥调理剂的应用研究日益深入。

张印堂等<sup>[38]</sup>研究了壳聚糖在活性污泥调理中的应用,结果表明,壳聚糖作为活性污泥调理剂,投加干污泥质量的 0.8%~1.2%,pH 值在 5~8 时,即与相同投加量的 PAM 效果相当,接近于投加 PAC8%~16% 的效果。邹鹏<sup>[39]</sup>等进一步对氯化铝、阳离子聚丙烯酰胺(CPAM)、壳聚糖及复合絮凝剂的絮凝效果

进行比较,结果表明,经壳聚糖调理的污泥最小比阻值较 CPAM 调理污泥小;采用先加氯化铝,而后加壳聚糖的复合使用方式,由于氯化铝-壳聚糖复合使用后,兼具了电荷中和和吸附架桥作用,可大幅度提高污泥的脱水性能。封盛等<sup>[40]</sup>研究了 PAC、壳聚糖和 3 种羧甲基壳聚糖(N-羧甲基壳聚糖、N,O-羧甲基壳聚糖和 O-羧甲基壳聚糖)絮凝剂对污泥的脱水性能。结果表明,羧甲基壳聚糖作为絮凝剂对污泥进行脱水时,形成的絮体强度大,不易破碎,对污泥脱水的效果明显好于普通絮凝剂。在所研究的 3 种羧甲基壳聚糖中,N-羧甲基壳聚糖对污泥的脱水效果最好,污泥比阻最低,与未加絮凝剂时相比,含水率从 99.1% 下降到 73%,污泥的体积减少为原来的 1/30,热值提高为原来的 40 倍,能够更有效地焚烧,节省处理成本。此外,Asano 等<sup>[41]</sup>用壳聚糖对厌氧消化污泥进行脱水处理试验,发现,污泥脱水时若不加入壳聚糖,从污泥中离心分离出来的悬浮固体量不足 60%。壳聚糖加入量(以污泥中悬浮固体含量计,下同)为 0.7%~1.5%,污泥经凝聚和离心分离后,分离出来的悬浮固体量达 96%以上。但 Kathy 等<sup>[42]</sup>的研究结果有所不同,壳聚糖的加入不能明显改善铁(ferric-tip sludge)脱水剂脱水后的污泥的可压缩性及渗透性。

## 5 结语

壳聚糖及其衍生物具有良好的生物可降解性和对环境无毒性等特性,通过物理吸附、化学吸附、离子交换吸附等作用对有机物产生很强的吸附能力。由于其糖残基在 C<sub>2</sub> 上有氨基(或乙酰氨基),在 C<sub>3</sub> 上有一个羟基,使壳聚糖对具有一定离子半径的金属离子有较强的螯合作用;在酸性条件下,壳聚糖分子中的氨基和羟基等活性基团,会形成高电荷密度的聚阳离子型电解质而显示出较好的絮凝性能,在水处理领域得到广泛应用。

但是,与人工合成的高分子有机絮凝剂相比,壳聚糖的絮凝作用相对较弱。离子型絮凝剂的絮凝原理兼有化学架桥与电荷中和两种作用,对于高分子质量絮凝剂而言,则是以化学架桥为主、电荷中和为辅来实现的。壳聚糖虽然在酸性条件下可聚集高密度的阳离子电荷,但由于其相对分子质量小、架桥能力差,直接影响了其絮凝效果。因此,对壳聚糖进行改性,增加其分子质量以改善壳聚糖的架桥絮凝能力、增加其水溶性并降低成本是十分必要的。目前,国内外学

者普遍认为接枝共聚是增加壳聚糖分子质量,提高其絮凝性能的较好方法。

### 参考文献:

- [1] 蒋挺大.甲壳素[M].北京:化学工业出版社,1996.21-38.
- [2] 汪玉霆,完莉莉.甲壳素、壳聚糖及其衍生物在水处理中的应用[J].污染防治技术,2000,13(1):51-53.
- [3] 华登峰.壳聚糖、硫酸铝和聚铝对印染废水脱色处理的对比[J].青岛大学学报(工程技术版),2004,19(3):65-68.
- [4] 刘秉涛,姜安玺.羧甲基壳聚糖处理染料废水的正交试验研究[J].工业水处理,2005,25(2):23-25.
- [5] Chiou M S, Chuang G S. Competitive adsorption of dye metanil yellow and RB15 in acid solutions on chemically cross-linked chitosan beads[J]. *Chemosphere*, 2006, 62(5): 731 - 740.
- [6] Cestari A R, Vieira E F S, Pinto A A, et al. Multistep adsorption of anionic dyes on silica/chitosan hybrid 1. Comparative kinetic data from liquid- and solid-phase models[J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2005, 292:363-372.
- [7] Uzun I. Kinetics of the adsorption of reactive dyes by chitosan[J]. *Dyes and Pigments*, 2006,70(2):76-83.
- [8] 朱启忠,韩晓弟,赵宏,等.壳聚糖对废水中蛋白质的吸附作用[J].资源开发与市场,2005,21(5):387-389.
- [9] Johnson B A, Gong B, Bellamy W, et al. Pilot Plant testing of dissolved air flotation for treating boston's Low - turbidity surface water supply[J]. *Wat Sci Tech*, 1995,31(3):83-92.
- [10] Ahmad A L, Sumathi S, Hameed B H. Coagulation of residue oil and suspended solid in palm oil mill effluent by chitosan, alum and PAC[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2006,118: 99 - 105.
- [11] Saltnes T, Eikebrokk B, Odegaard H. Coagulation optimization for NOM remove by direct filtration in clay aggregate filters[J]. *Journal of Water Supply Research and Technology*, 2002,51:32-36.
- [12] 周永国,齐印阁,杨越冬,等.脱乙酰甲壳质回收处理含铜废水[J].河北大学学报(自然科学版),1994,14(2):30-33.
- [13] 齐印阁,杨越冬,王秀娟,等.用脱乙酰甲壳质富集微量银研究[J].河北农业技术师范学院学报,1994,8(2):6-8
- [14] Cervera M L, Arnal M C, Miguel. Removal of heavy metals by using adsorption on alumina or chitosan[J]. *Guardia Anal Bioanal Chem*, 2003,375:820-825.

- [15] Kang D W, Choi H R, Kweon D K. Adsorptive separation of some metal ions by chemically modified chitosan[J]. **Appl Polym Sci**, 1999, 73:469-476.
- [16] 丁德润. 低分子量壳聚糖及其衍生物与金属离子配合物研究[J]. **无机化学学报**, 2005, 21(8): 1249-1253.
- [17] Merrifield J D, Davids W G, Macrae J D, et al. Uptake of mercury by thiol-grafted chitosan gel beads[J]. **Water Research**, 2004, 38:3 132-3 138.
- [18] 于丽青, 孙建民. 壳聚糖超滤膜的制备及在低含量重金属废水处理中的应用[J]. **化学世界**, 2005, 1:24-26.
- [19] 姚淑华, 石中亮, 宋守志. 壳聚糖复合净水剂处理再生造纸废水的研究[J]. **东北大学学报(自然科学版)**, 2004, 25(12):1 195-1 198.
- [20] 陈鲁生. 几种絮凝剂对造纸厂中段废水处理的效果研究[J]. **山东师范大学学报(自然科学版)**, 1998, 13(2):152-153.
- [21] 李静, 高玉杰, 任继春. 天然高分子絮凝剂壳聚糖[J]. **天津造纸**, 2003, 25(1):33-34.
- [22] 张光华, 谢曙辉, 郭炎, 等. 一类新型壳聚糖改性聚合物絮凝剂的制备与性能[J]. **西安交通大学学报**, 2002, 36(5):541-544.
- [23] 张亚静, 朱瑞芬, 李颖. 壳聚糖季铵盐对造纸废水絮凝效果研究[J]. **宁波高等专科学校学报**, 2001, 13(2):42-45.
- [24] 徐岩. 壳聚糖在生活污水处理中的应用[J]. **连云港职业技术学院学报**, 2004, 1(17):42-44.
- [25] 周世辉, 师绍瑛, 蒋晨鹏, 等. 城市生活污水强化一级处理中絮凝剂的选择研究[J]. **给水排水**, 1999, 25(11):14-16.
- [26] 曾德芳, 沈钢, 余刚, 等. 壳聚糖复合絮凝剂在城市生活污水处理中的应用[J]. **环境化学**, 2002, 5(21):505-507.
- [27] 刘维俊. 羧甲基壳聚糖的制备及絮凝性能探讨[J]. **环境污染与防治**, 2002, 24(4):210-213.
- [28] Pan J R, Huang C, Chen S, et al. Evaluation of a modified chitosan biopolymer for coagulation of colloidal particles[J]. **Critoids and Surfaces A : Physicochemical and Engineering Aspects**, 1999, 147:359-364.
- [29] Huang C. Coagulation of colloidal particles in water by chitosan[J]. **Chemistry Technology Biotech**, 1996, 66: 227-232.
- [30] Deans J R. Removal of Organic Contaminants From Aqueous Media[P]. US 005393435A, 1995.
- [31] 方华丰, 唐爱, 赵国有, 等. 壳聚糖处理水中三氯甲烷的研究[J]. **环境导报**, 2000, 1:19-20.
- [32] 赵金星, 徐昕, 赵丽宁, 等. 饮用水净化剂的制备[J]. **沈阳师范学院学报(自然科学版)**, 2001, 19(3):55-58.
- [33] 徐廷国, 陈忻, 曹国栋, 等. 壳聚糖抑制饮用水中亚硝酸盐形成的研究[J]. **精细化工**, 2003, 20(10):619-621.
- [34] Edward O. N-Halo chitosan, their Preparation and uses [P]. WO 92/08742. CO8B 37/08. CO2F 1/56. 1992.
- [35] 于义松. 一种天然高分子材料——甲壳素及其衍生物[J]. **化学与粘合**, 1992, 1:50-54.
- [36] 陈亮, 朱珺, 陈东辉. 壳聚糖与甲壳素对废水生物处理的强化作用研究[J]. **上海环境科学**, 2003, 22(1):24-28.
- [37] 秦冰, 陈东辉, 陈亮, 等. 壳聚糖强化生物作用的机理研究[J]. **环境污染与防治**, 2004, 26(2):156-158.
- [38] 张印堂, 张东辉, 陈亮. 壳聚糖絮凝剂在活性污泥调理中的应用[J]. **上海环境科学**, 2002, 21(1):49-52.
- [39] 邹鹏, 宋碧玉, 王琼. 壳聚糖絮凝剂的投加量对污泥脱水性能的影响[J]. **工业水处理**, 2005, 25(5):35-37.
- [40] 封盛, 相波, 邵建颖, 等. 改性壳聚糖对处理污泥脱水性能影响的研究[J]. **工业用水与废水**, 2005, 36(4):62-64.
- [41] Asano T, Takashi. Use of Chitosan in Dewatering of Anaerobic sludge[R]. Proceedings of the First International Conference on Chitin and Chitosan, MIT-SG-78-7. R A A Muzzarelli, ER Pariser, Cambridge, USA, MIT Sea Grant Program, 1987.
- [42] Northcotta K A, Snapeb I, Scalesa P J, et al. Dewatering behaviour of water treatment sludges associated with contaminated site remediation in Antarctica[J]. **Chemical Engineering Science**, 2005, 60:6 835-6 843.

( 本文编辑：张培新 )