

述评与讨论

磁性离子交换(MIEX)树脂的研究与应用现状

焦茹媛¹, 许志珍², 王东升¹

(1. 中国科学院生态环境研究中心 环境水质学国家重点实验室, 北京 100085; 2. 北京市劳动保护科学研究所 职业安全健康重点实验室, 北京 100054)

摘要: 磁性离子交换(MIEX)树脂通常作为一种吸附剂去除水体中的污染物,较小的尺寸、带有磁性的性质以及简单的再生过程使其有别于传统的离子交换型树脂。在之前的研究中,MIEX树脂可高效去除DOC及溴离子,因此可以有效控制消毒副产物的生成。同时,MIEX树脂对常见微污染物和金属离子也有一定的去除。MIEX树脂与常规工艺结合,不仅可以提高对有机物的去除率,还减少了后续混凝剂或氧化剂的投加量。此外,MIEX树脂还可与混凝或活性炭工艺相结合解决制约膜工艺发展的膜污染问题。主要介绍了MIEX水处理技术的原理及其对消毒副产物前驱物、无机离子和微污染物的去除特性,并对其与常规工艺相结合做了简要介绍,对未来MIEX水处理技术的研究起到一定参考作用。

关键词: 水处理技术; MIEX树脂; 污染物的去除

中图分类号: TU991 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2015)04-0001-06

Study and Application of Magnetic Ion Exchange (MIEX) Resin

JIAO Ru-yuan¹, XU Zhi-zhen², WANG Dong-sheng¹

(1. State Key Laboratory of Environmental Aquatic Chemistry, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China; 2. Key Laboratory of Occupational Safety and Health, Beijing Municipal Institute of Labour Protection, Beijing 100054, China)

Abstract: Magnetic ion exchange (MIEX) is an ion exchange resin developed as an adsorbent to remove the pollutants in water. The smaller size, magnetic properties and simple regeneration process distinguishes MIEX from conventional ion exchange resins. In the previous works, it is well known to remove DOC and bromide ion, thus, it can effectively control disinfection by-products. Meanwhile, MIEX resin also has a certain removal of common micro-pollutants and metal ions. MIEX resin combined with the conventional process, not only can improve the removal rate of organic matter, but also reduce the dosage of coagulant or oxidizing agents in the following process. In addition, MIEX resin can be used with a combination of coagulation or activated carbon process to solve the membrane fouling problems which constraints the development of membrane technology. The mechanism of MIEX resin treatment and the removal of disinfection by-products precursors, inorganic ions and micro-pollutants were described. The combination of MIEX resin with the conventional processes was introduced.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51308008)

通信作者: 王东升 E-mail: wgds@rcees.ac.cn

Key words: water treatment; MIEX resin; removal of pollutants

磁性离子交换(Magnetic ion exchange, MIEX)树脂作为一种新型水处理剂应用于给水处理,能有效去除水体中溶解性有机物(DOM)、消毒副产物前驱物(DBPFP)、无机阴离子和其他微污染物等,受到国内外的广泛关注。MIEX树脂是一种强碱性以聚丙烯为母体的季铵型阴离子交换树脂,氯离子(Cl^-)或碳酸氢根(HCO_3^-)作为可交换离子与水中带负电的物质进行离子交换。与一般树脂相比,MIEX的一个显著特点是其结构中有一定的磁性成分(磁性氧化铁),使其具有弱磁性。这种磁性特质使MIEX树脂更容易团聚沉降,其沉降速度可达到 $10\sim 20\text{ m/h}^{[1,2]}$,有利于树脂的分离回收,减少流失,回收率可达到99.9%^[3]。另外,MIEX树脂粒径很小,仅为 $10\sim 200\ \mu\text{m}$,比一般的树脂要小2~5倍,比表面积较大,可以增强污染物与其离子交换位点的接触,减少离子内部孔道扩散的距离,提高污染物的去除效率^[4,5]。由于MIEX树脂不能去除浊度、悬浮物和病原体等,因此许多研究将MIEX作为预处理与其他传统工艺如混凝工艺相结合,达到了更好的水处理效果,同时还能减少后续混凝剂的投加量,节省成本。

1 MIEX 技术原理

MIEX树脂颗粒细小,离子交换面积较大,可与水中溶质充分接触达到去除效果。作为阴离子交换性树脂,MIEX的主要工作原理是通过树脂表面反应位点上氯离子或碳酸氢根($\text{Cl}^-/\text{HCO}_3^-$)与污染物进行离子交换以达到对污染物的去除效果。以处理DOM为例,当树脂与微污染原水接触时,水中含有带负电的羧基、羟基等弱酸性基团的DOM,与树脂表面的 $\text{Cl}^-/\text{HCO}_3^-$ 发生离子交换反应。树脂的磁性作用使其很快聚集成团,并在重力沉降的作用下,吸附污染物的树脂快速沉降并进行分离。当树脂达到一定的吸附饱和度后,可通过解吸过程进行再生:将吸附有DOM的MIEX树脂置于一定浓度的氯离子溶液(10%的氯化钠)中,氯离子与DOM进行置换,成为新鲜树脂,DOM进入卤水中被分离^[6]。MIEX树脂的再生过程简单易行,无温度要求,同时pH值适用范围广泛。当pH偏酸性时,再生过程更有利于置换MIEX表面的无机金属离子;当pH偏碱性时,大分子质量的有机物更容易溶解置换。许多

研究在去除大分子质量有机污染物时,在再生过程中加入一定浓度的氢氧化钠辅助再生^[7]。

2 MIEX 工艺流程

MIEX工艺主要包括接触反应池-泥水分离池-树脂再生池三部分(见图1)^[8]。MIEX树脂连续并定量投加到接触池中,与池中原水搅拌充分反应后,挟带部分树脂的处理水进入泥水分离池,处理后的干净水由上部流出,而树脂在重力沉降的作用下流回接触池循环再利用,剩下的则进入再生池进行再生。再生后的树脂重新流回新鲜树脂池作为补充,再生池中包含污染物的卤水被排出^[9]。

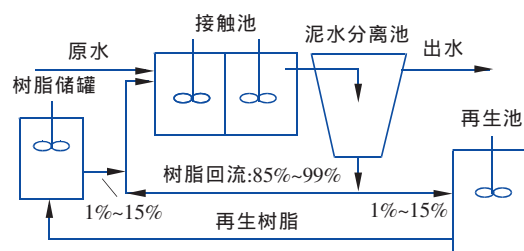


图1 MIEX离子交换工艺流程^[8]

Fig.1 Flow chart of MIEX ion exchange technology^[8]

MIEX的再生过程中约有0.1%的损失,一些微小颗粒物会残留,造成轻微的二次污染^[10]。同时,再生过程形成的卤水中含有解吸下来的污染物质,需要进一步处理,否则经浓缩的高浓度污染物释放会造成更加严重的水污染。这也成为MIEX工艺的不足,卤水的处理成为MIEX工艺未来发展所需要解决的重要问题。

3 MIEX 树脂对污染物的去除

针对饮用水中出现的微污染物,使用常规水处理方法已很难将其彻底去除。例如,混凝可以高效去除浊度、悬浮物及一些大分子疏水性有机物,但对小分子质量亲水性有机污染物却很难去除。这些亲水性或两性微污染物在环境中存在的浓度非常低,亦成为常规工艺应用的瓶颈。MIEX树脂的应用范围较为广泛,对于消毒副产物前驱物(DOM和溴离子等)以及饮用水中可能出现的微污染物(农药、内分泌干扰素等)均具有较好的处理效果。

3.1 对消毒副产物前驱物的去除

目前,国内外针对MIEX的应用研究主要集中在控制消毒副产物上。许多研究表明,MIEX对消

毒副产物前驱物去除效果显著^[3,11]。MIEX 通过对消毒副产物前驱物的降低,减少消毒剂的用量,从而达到对消毒副产物的有效控制。Boyer 等^[12]将 MIEX 单独处理和 MIEX 预处理与混凝结合处理进行对比发现,两者对 UV_{254} 和 DOC 的去除率相近,说明后续混凝工艺并不能进一步提高对 UV_{254} 和 DOC 的去除。经 MIEX 树脂处理后,四种水样的三卤甲烷生成势(THMFP) 和卤乙酸生成势(HAAFP) 分别降低了 26% ~ 69% 和 50% ~ 70%,而混凝对四种水样 THMFP 和 HAAFP 的去除率仅为 8% ~ 40% 和 17% ~ 35%,MIEX 去除消毒副产物以及 UV_{254} 和 DOC 的效果明显好于混凝,去除顺序为 $UV_{254} > HAAFP > DOC \approx HMFP$ 。Singer and Bilyk^[4] 通过对比 MIEX 和混凝工艺对 9 个不同地点的地表水进行处理,得到了相同的结果。通过 MIEX 处理 9 个水样的 THMFP 降低了 60% ~ 90%,而 UV_{254} 去除率达 90% 以上。MIEX 工艺对 THMs 和 HAAs 的去除效果明显优于混凝工艺。同时,MIEX 作为前处理与混凝工艺相结合,有效地降低了混凝剂的使用量。

MIEX 对小分子质量和中等分子质量(1 000 ~ 5 000 u) 的有机物有较好的去除效果^[12,13]。Humbert 等^[13] 研究表明,MIEX 可有效地去除 200 ~ 4 500 u 范围内对 UV_{254} 有吸收的有机物。Boyer 等^[8] 研究认为常规混凝对分子质量为 1 ~ 10 ku 的有机物的去除率达 60%,而 MIEX 的去除率接近 80%; 混凝对小分子质量的有机物去除甚微,而 MIEX 对分子质量 < 1 ku 的有机物的去除率近 60%。

此外,不同于常规混凝处理工艺适用于去除疏水性有机物,MIEX 对亲水性有机物也有较好的去除效果。刘成等^[14] 将长江原水进行化学分级,有机物分为强疏水性、弱疏水性和亲水性三种类型,其中亲水性有机物占 63.6%,单独使用混凝工艺很难达到较好的处理效果。MIEX 预处理可有效强化对水中有机物的去除效果,DBPs 生成量明显降低。Boyer 和 Singer^[12] 同样对 MIEX 处理前的水样进行化学分级,表明 MIEX 树脂对 HPOA (hydrophobic acid)、TPHA (transphilic acid)、HPIA (hydrophilic acid) 具有相近的去除效果,去除率可达 70% 左右,说明 MIEX 树脂不仅能去除疏水性有机物,而且能有效去除亲水性有机物。

3.2 对微污染物的去除

随着人工合成化学物质的增多,微污染物普遍

存在于自然界中,且浓度较低,一般是纳克到微克级,此类污染物质很难使用常规方法去除。Humbert 等^[7] 通过 MIEX 树脂与活性炭相结合的工艺去除 DOM 及杀虫剂阿特拉津和异丙隆,结果表明对于不同浓度的杀虫剂(1 $\mu\text{g/L}$ 和 200 $\mu\text{g/L}$),MIEX 树脂与活性炭结合工艺均比单独使用活性炭工艺的去除效率要高。Liu 等^[15] 考察了 MIEX 工艺对灭草松、甘草膦和甲基对硫磷三种农药的去除效果,发现 MIEX 树脂去除农药的主要机理是离子交换,当树脂投加量为 10 mL/L、反应时间为 60 min 时,初始浓度为 5 mg/L 的灭草松去除率可达 79%。MIEX 树脂对苯环结构灭草松的高效去除表明,MIEX 对憎水离子型有机化合物具有较好的去除能力。Neale 等^[16] 研究 MIEX 去除内分泌干扰素雌酮的效果发现,当 pH 值 > 10.4 时,雌酮主要带负电荷,去除率可达 70%。目前,MIEX 树脂处理微污染物的报道还不多。以上研究表明,MIEX 树脂具有去除微污染物的潜力,对微污染物的去除主要通过离子交换机理,对阴离子疏水性微污染物的去除效果较好。

3.3 对无机离子的去除

工业废水中含有多种重金属,砷和铬是两种典型的致癌物质,对人类健康和环境都会造成不良影响。使用沉淀法来去除溶液中的金属离子,会引入其他污染物。同时,不同金属离子的最小溶解度对 pH 值的要求不同,增加了同时去除多种金属离子的难度。Jha 等^[17] 研究了 MIEX 对 As(V) 和 Cr(VI) 混合连续流的去除效果,结果表明,MIEX 对两种金属离子同时作用的去除率虽低于单独作用时的去除率,但相比其他工艺具有较高的去除率。

MIEX 也可有效去除水体中的溴离子,从而降低 DBPs 的生成。当原水中溴离子初始浓度约为 500 $\mu\text{g/L}$ 时,8 mL/L 的 MIEX 对溴离子的去除率可达 91%^[18]。当水样中溴离子初始浓度为 300 $\mu\text{g/L}$ 、DOC 初始浓度为 0 ~ 3.6 mg/L、碱度为 24 mg/L 时,6 mL/L 的 MIEX 对溴离子的去除率是 58% ~ 63%^[19]。当溴离子初始浓度为 500 $\mu\text{g/L}$ 、DOC 初始浓度为 25 mg/L,10 mL/L 的 MIEX 对溴离子的去除率是 50%^[20]。MIEX 对溴离子的去除率与溴离子的初始浓度和 MIEX 的投加量有关。溴离子初始浓度越高,MIEX 对其去除效果越好。当溴离子初始浓度由 20 $\mu\text{g/L}$ 增加至 200 $\mu\text{g/L}$ 时,MIEX 对溴离子的去除率增加了 20%。当 MIEX 投加量降为

0.8 mL/L时,溴离子的去除率为8%,MIEX的投加量增至8 mL/L时,溴离子的去除率为65%^[11]。MIEX对溴离子的去除还受pH值的影响。pH值较大,水体中碳酸盐含量较高,碳酸根离子与溴离子竞争,使溴离子的去除率下降^[19]。同样,当水体中存在大量 SO_4^{2-} 、 Cl^- 和 NO_3^- 等阴离子时,由于对离子交换位点的竞争也会影响MIEX对溴离子和其他污染物的去除。

4 MIEX与其他工艺相结合

MIEX工艺因其无法去除水体的浊度、悬浮物等而不能单独用于水处理。因此,在实际应用中需要结合其他的水处理工艺。MIEX树脂预处理与混凝结合可起到互补作用,可大大提高后续混凝对浊度的去除效率,提高了对不同分子质量DOM以及溴离子的去除效果,降低DBPs的生成,且后续混凝剂用量至少可降低59%~94%^[3,4,21]。

臭氧作为消毒剂和氧化剂在给水处理中可有效降低卤代消毒副产物的生成,受到越来越多的重视。但是臭氧消毒亦存在许多不足,如臭氧会与水中的溴离子发生反应生成致癌物质溴酸根,威胁人类健康;受传质效率的影响,臭氧的利用率非常低,消毒费用昂贵。Wert等^[22]研究发现通过MIEX树脂预处理,臭氧对水样中微生物的去除率由40%升至65%,同时臭氧降解率下降,所需投加量降低15%~25%,生成的溴酸盐也相应减少20%~30%。在保证水中臭氧浓度的前提下,使用MIEX树脂预处理可显著降低臭氧的投量,减少成本^[23]。

膜分离技术具有去除污染物范围广泛、无需化学药品添加、无二次污染等优点而被广泛应用于水处理。然而膜污染问题极大地影响了膜的使用寿命,降低了出水率,增加了反冲洗的成本,制约其在水处理中的应用。MIEX与膜工艺的结合可以减少膜污染现象的发生^[24]。Zhang等^[25,26]研究MIEX作为前处理对膜污染的影响,发现MIEX树脂可以去超滤及纳滤工艺中不易去除的小分子质量(500~1000 u)有机物,这些小分子质量有机物也是造成膜污染的主要原因。但也有研究发现,MIEX处理并不能从根本上缓解膜污染问题^[5]。Kaewsuk等^[27]研究发现造成膜污染的主要物质是小分子质量有机物(100~1000 u)和大分子质量的有机物(20000~50000 u),而MIEX适合处理小分子质量(500~1000 u)以及亲水性有机物,MIEX对膜污染

起到一定的缓解作用。MIEX与无机混凝剂的预处理和超滤及微滤膜联用,可有效降低膜污染。Zhang等^[26]研究表明MIEX与混凝联用,高效地去除了导致膜污染的有机物,使混合系统运行8 h仍保持跨膜压差低于8 kPa。Fabris等^[28]分别考察了MIEX、活性炭吸附和混凝工艺的不同预处理组合方式对膜污染的影响,发现MIEX与活性炭吸附处理不能去除造成膜污染的分子质量>50000 u的胶体物质,不能从根本上解决微滤膜污染的问题。将MIEX、活性炭吸附与混凝结合后,可有效减小膜污染,延长膜的使用寿命。

5 MIEX技术成本估算

卢宁和李为兵等^[29,30]应用MIEX处理黄浦江水和南方湖泊水,对MIEX技术处理的运行成本进行了初步估算。MIEX技术的成本包括树脂和设备的成本,设备投资与处理规模及通水倍数有关,通水倍数由水质情况决定,约为200~300元/t。直接运行费用主要包括树脂流失、再生用盐以及耗电。采用MIEX技术每处理1000 m³水:树脂损耗需1.5 L,树脂单价为85元/L;耗盐量为50 kg(通水倍数为800时),盐价格为500~650元/t;耗电量为12 kW·h,电价为0.70~1.0元/(kW·h);即MIEX树脂添加费需0.127~0.21元/m³水,耗盐费需0.025~0.033元/m³,电费需0.007~0.0084元/m³。单位水处理运行费用初步估计为0.16~0.25元/m³,且在大规模推广应用之后,MIEX的运行成本仍然有下降的空间。表1列出了给水处理技术单元的技术经济比较^[31]。

表1 给水处理技术单元技术经济比较

Tab.1 Comparison among different treatment processes

工艺	作用机理	功能	费用/(元·m ⁻³)	
			基建	运行
常规工艺	混凝	除油、消毒		
活性炭吸附	物理吸附	去除有机物	80~100	0.12~0.15
臭氧-活性炭	化学氧化 物理吸附	去除有机物	200~300 (O ₃ :40~50)	0.2~0.3 (O ₃ :0.05~0.1)
生物预处理	生物吸附 降解	去除氨氮、 亚硝酸盐 氮、有机物	80~120	0.1
强化混凝	吸附架桥	充分发挥 混凝作用	5	0.02~0.05

从成本上看,强化混凝工艺所需成本最低,但是其去除水体中有机物的范围有限;生物预处理和活

性炭吸附的成本相差不大,但是生物预处理可能会增加水体中微生物代谢产物类物质;臭氧-活性炭工艺成本较高,且活性炭会增加后续工艺对颗粒物去除的负担,其对阴离子没有去除效果。活性炭吸附与 MIEX 树脂均对有机物具有较好的去除效果,但活性炭不能回收,使其长期运行的成本较高。图 2 表示 MIEX 预处理与活性炭技术每年的运行费用、材料费用和运行 20 年的费用比较^[32],可以看出,虽然 MIEX 本身的费用比活性炭要高,但是从长期运行来看,MIEX 的费用要明显低于活性炭,这也表明了 MIEX 作为一种新兴的水处理剂具有较好的应用前景。

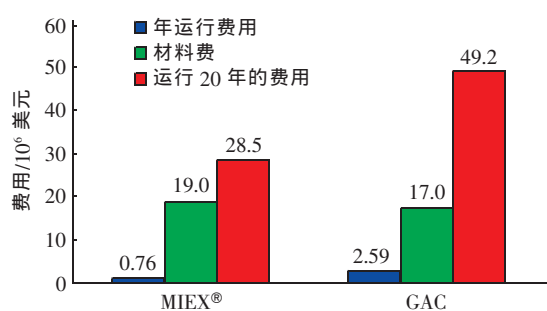


图 2 MIEX 预处理与活性炭技术费用的比较

Fig. 2 Cost comparison between MIEX resin and activated carbon

6 建议

MIEX 树脂作为一种新型的磁性阴离子交换树脂,在水处理中具有良好的应用前景。对于 MIEX 今后的研究,还应关注以下几个方面:

① 目前环境微污染物越来越受到人们关注,而 MIEX 树脂去除微污染物的研究报道还较少,只集中于阴离子疏水性有机物的研究,而对亲水性/两性有机污染物及非离子型有机物的研究甚少,例如表面活性剂等。

② 硫酸根离子是天然水中的常见离子,当 MIEX 树脂应用于饮用水处理过程时,MIEX 树脂可能释放氯离子而吸附硫酸根离子,而氯离子与硫酸根离子的比值是衡量管网腐蚀的重要参数之一,因此增大了造成管网腐蚀的可能性。关于 MIEX 树脂可能的次生效应几乎没有报道,有待进一步研究。

③ 在 MIEX 树脂的再生过程中会产生废弃的卤水,其中包含了大量处理下来的有机污染物,若直接排入环境中,会对环境造成更加严重的污染后果,因此,对于 MIEX 树脂再生废水的处理也是今后需

要思考的问题。

参考文献:

- [1] Kitis M, İler Harman B, Yigit N O *et al.* The removal of natural organic matter from selected Turkish source waters using magnetic ion exchange resin (MIEX) [J]. *React Funct Polym* 2007 67(12): 1495-1504.
- [2] Nguyen T V, Zhang R, Vigneswaran S *et al.* Removal of organic matter from effluents by Magnetic Ion Exchange (MIEX) [J]. *Desalination* 2011 276(1/3): 96-102.
- [3] Fearing D A, Banks J, Guyetand S *et al.* Combination of ferric and MIEX[®] for the treatment of a humic rich water [J]. *Water Res* 2004 38(10): 2551-2558.
- [4] Singer P C, Bilyk K. Enhanced coagulation using a magnetic ion exchange resin [J]. *Water Res* 2002 36(16): 4009-4022.
- [5] Huang H, Cho H H, Schwab K J *et al.* Effects of magnetic ion exchange pretreatment on low pressure membrane filtration of natural surface water [J]. *Water Res*, 2012 46(17): 5483-5490.
- [6] Neale P, Schafer A. Magnetic ion exchange: is there potential for international development? [J]. *Desalination* 2009 248(1/3): 160-168.
- [7] Humbert H, Gallard H, Suty H *et al.* Natural organic matter (NOM) and pesticides removal using a combination of ion exchange resin and powdered activated carbon (PAC) [J]. *Water Res* 2008 42(6/7): 1635-1643.
- [8] Boyer T H, Singer P C. A pilot-scale evaluation of magnetic ion exchange treatment for removal of natural organic material and inorganic anions [J]. *Water Res*, 2006 40(15): 2865-2876.
- [9] Shorrock K, Drage B. A pilot plant evaluation of the Magnetic Ion Exchange[®] process for the removal of dissolved organic carbon at Draycote water treatment works [J]. *Water Environ J* 2006 20(2): 65-70.
- [10] Kabsch-Korbutowicz M, Majewska-Nowak K, Winnicki T. Water treatment using MIEX[®] DOC/ultrafiltration process [J]. *Desalination* 2008 221(1/3): 338-344.
- [11] Humbert H, Gallard H, Suty H *et al.* Performance of selected anion exchange resins for the treatment of a high DOC content surface water [J]. *Water Res*, 2005 39(9): 1699-1708.
- [12] Boyer T H, Singer P C. Bench-scale testing of a magnetic ion exchange resin for removal of disinfection by-product precursors [J]. *Water Res*, 2005 39(7): 1265-1276.

- [13] Humbert H ,Gallard H ,Jacquemet V *et al.* Combination of coagulation and ion exchange for the reduction of UF fouling properties of a high DOC content surface water [J]. *Water Res* 2007 41(17) :3803 –3811.
- [14] 刘成 ,陈卫 ,李磊 ,等. MIEX 预处理技术对长江原水中有机物的去除效能 [J]. *给水排水* 2009 35(6) : 119 –223.
- [15] Liu Z ,Yan X ,Drikas M *et al.* Removal of bentazone from micro-polluted water using MIEX resin: kinetics , μ -equilibrium and mechanism [J]. *J Environ Sci* 2011 23 (3) : 381 –387.
- [16] Neale P A ,Mastrup M ,Borgmann T *et al.* Sorption of micropollutant estrone to a water treatment ion exchange resin [J]. *J Environ Monitor* 2010 12(1) : 311 –317.
- [17] Jha A K ,Bose A ,Downey J P. Removal of As(V) and Cr(VI) ions from aqueous solution using a continuous , hybrid field-gradient magnetic separation device [J]. *Sep Sci Technol* 2006 41: 3297 –3312.
- [18] Xu Z ,Jiao R ,Liu H *et al.* Hybrid treatment process of using MIEX and high performance composite coagulant for DOM and bromide removal [J]. *J Environ Eng* , 2013 139(1) : 79 –85.
- [19] Hsu S ,Singer P C. Removal of bromide and natural organic matter by anion exchange [J]. *Water Res* 2010 , 44(7) : 2133 –2140.
- [20] Walker K M ,Boyer T H. Long-term performance of bicarbonate-form anion exchange: removal of dissolved organic matter and bromide from the St. Johns River ,FL , USA [J]. *Water Res* 2011 45(9) : 2875 –2886.
- [21] 严敏 ,高乃云 ,李富生. MIEX 在水处理中的应用 [J]. *给水排水* 2010 36(7) : 30 –33.
- [22] Wert E C ,Edwards-Brandt J C ,Singer P C *et al.* Evaluating magnetic ion exchange resin (MIEX[®]) pretreatment to increase ozone disinfection and reduce bromate formation [J]. *Ozone Sci Eng* 2005 27(5) : 371 –379.
- [23] Johnson C J ,Singer P C. Impact of a magnetic ion exchange resin on ozone demand and bromate formation during drinking water treatment [J]. *Water Res* 2004 , 38(17) : 3738 –3750.
- [24] Choi Y H ,Kweon J H ,Jeong Y M *et al.* Effects of magnetic ion-exchange resin addition during coagulation on floc properties and membrane filtration [J]. *Water Environ Res* 2010 82(3) : 259 –266.
- [25] Zhang R ,Vigneswaran S ,Ngo H H *et al.* Magnetic ion exchange (MIEX[®]) resin as a pre-treatment to a submerged membrane system in the treatment of biologically treated wastewater [J]. *Desalination* 2006 ,192(1/3) : 296 –302.
- [26] Zhang R ,Vigneswaran S ,Ngo H *et al.* A submerged membrane hybrid system coupled with magnetic ion exchange (MIEX[®]) and flocculation in wastewater treatment [J]. *Desalination* 2007 216(1/3) : 325 –333.
- [27] Kaewsuk J ,Seo G T. Verification of DOM removal in MIEX – NF system for advanced water treatment [J]. *Sep Purif Technol* 2008 80(1) : 11 –19.
- [28] Fabris R ,Lee E K ,Chow C W K *et al.* Pre-treatments to reduce fouling of low pressure micro-filtration (MF) membranes [J]. *J Membr Sci* 2007 289(1/2) : 231 –240.
- [29] 卢宁 ,张东 ,潘为平 ,等. 磁性离子交换树脂(MIEX) 去除黄浦江原水中有机物 [J]. *净水技术* 2011 30 (1) : 25 –28.
- [30] 李为兵 ,陈卫 ,袁哲 ,等. 磁性离子交换树脂处理南方湖泊水的中试研究 [J]. *中国给水排水* 2011 27 (1) : 5 –7.
- [31] 王占生 ,刘文君. 我国给水深度处理应用状况与发展趋势 [J]. *中国给水排水* 2005 21(9) : 29 –33.
- [32] Orica Watercare Technical Notes. MIEX[®] treatment versus GAC for TOC removal [EB/OL]. <http://miexresin.com/index.asp?page=77> 2008 –10 –21.



作者简介: 焦茹媛(1987 –) , 女, 山西晋城人, 博士研究生, 研究方向为饮用水处理技术。
E – mail: ryjiao_st@rcees. ac. cn
收稿日期: 2014 –07 –10