

地下水除铁除锰技术研究进展*

陈蒙亮, 王鹤立

(中国地质大学(北京)水资源与环境学院, 北京 100083)

摘要 我国地下水铁锰超标现象日趋严重, 铁锰离子的大量存在降低了地下水的使用价值。地下水铁锰去除技术主要有自然氧化法、接触氧化法、生物氧化法等。近两年来, 学者们对生物氧化法的研究较多, 但目前多停留在实验研究阶段, 用于适合村镇地区的实际工程仍需对不同情况进行中试研究, 如何构建合理的处理工艺模型, 获得可靠运行参数以保证出水满足需求是该研究方向的重点。

关键词 地下水 铁锰 生物法 氧化法

0 引言

地下水清澈透明, 常年水温低而稳定, 古往今来一直是人们重要的饮用水源和理想的工业水源。我国目前地下水开采量约占全国城市总用水量的30%, 饮用地下水的城镇居民达1亿人以上^[1]。在我国, 虽然具有丰富的地下水资源, 但是在很多地区的地下水含有过量的铁、锰等矿物质, 不符合人民的生产和生活的要求。本文对地下水铁锰污染现状、危害以及去除方法进行概述, 同时介绍当前地下铁锰去除技术的研究进展。

1 地下水铁锰污染现状及危害

1.1 地下水铁锰污染的现状

地下水是我国城镇和工矿企业的重要水源, 主要分布在东北、华北、西北地区^[2], 尽管地下水水质很好, 却常含较高浓度的铁锰元素。根据《地下水水质标准》(GB14848-93), 三类水体中铁的含量 $<0.3\text{mg/L}$, 锰的含量 $<0.1\text{mg/L}$, 但调查显示, 内蒙古和宁夏的大部, 青海、甘肃、陕西的中北部, 河北的南部和山东西北部以及吉林和黑龙江的西部等地区的铁锰浓度都超标^[3]。这样, 就形成了以内蒙古东北部和东北地区分布, 以山东西北部, 湖

北, 贵州为中心的点状分布两大区域。

1.2 地下水铁锰污染的危害

对人类自身而言, 铁锰离子是人体所需的微量元素, 但摄入过量会导致中毒, 诱发多种疾病。人体内铁的含量累积到一定程度会患有血色病, 表现为糖尿病、心肌炎等。锰离子摄入过量会导致慢性中毒, 同时诱发肺炎、记忆力减退等病症。

在生活方面, 地下水中二价铁离子被空气氧化还原成三价铁并形成沉淀, 使水体浑浊, 伴有铁腥味, 同时附着在衣物、洁具等需要水洗或冲刷的物体表面, 形成棕黄色斑点, 不易清除。

在工业生产方面, 含有铁锰离子的地下水不宜作为锅炉用水, 因为铁锰离子的存在会形成水垢和泥渣, 影响能量传递和降低效率。在冷却水中, 铁、锰能附着于加热管壁上, 降低管壁的传热性能; 甚至堵塞冷却管。在纺织工业中, 水中的铁和锰能固着于纤维上, 并在纺织品上留下锈色斑点; 染色时, 铁和锰能与染料结合, 使色调不鲜艳; 铁、锰还对漂白剂的分解有催化作用, 使漂白作业发生困难^[4]。

2 地下水铁锰污染的来源及成因

*基金项目: 教育部广东省产学研结合项目 (2007A090302101); 小城镇饮用水安全保障关键技术

地下水中铁锰的来源一般分为人为来源和自然来源。人为来源一般是人类活动产生的铁锰通过各种方式进入地下水。进入地下水的途径有铁锰矿的开采、含铁锰的垃圾渗滤液通过雨水的淋滤作用、输水管道中老化以及含铁锰的污水未经处理的排放等。

地下水中的铁锰自然来源通常是由于岩石和矿物中难溶化合物中铁锰质的溶解而致,含碳酸的地下水可将二价铁氧化物溶解生成碳酸亚铁,当岩层中有碳酸亚铁存在时碳酸亚铁在碳酸作用下也能生成溶解于水的重碳酸亚铁。在含有有机物的地层中,微生物消耗溶解氧分解有机物产生一定数量的硫化氢和二氧化碳,硫化氢与三价铁氧化物作用生成 FeS 沉淀,再与碳酸作用生成溶于水的 $\text{Fe}(\text{HCO}_3)_2$ 。另外,一些有机酸也能够溶解岩层中的三价铁氧化物。因锰为铁元素的同族元素,具有类似的性质,地下水中锰元素的来源方式与铁元素近似相同。

3 典型的地下水除铁除锰技术

在地下水中普遍存在铁锰共存的现象,铁离子在地下水中成+2价,能够被水中溶解氧和还原态物质氧化成高价态物质形成絮状沉淀。地下水中的锰离子价态由+2价到+7价,但除了+2价和+4价的锰以外,其他价态锰离子在水中不能够稳定存在。+2价锰溶于水是要去除的主要对象,+4价锰则常以固体物质 MnO_2 及水合物的悬浮粒子形式存在于水中,其溶解度甚低,不足为害^[5]。考虑到铁锰属于过渡金属元素,具有类似的性质,采用同步去除地下水中铁锰的技术可达到一举两得目的,目前已经采用的方法有以下几种:

3.1 混凝沉淀过滤

基本原理是利用混凝剂的吸附性,将水中悬浮态的含铁含锰化合物去除。选用的混凝剂为普通的PAM即可,但要参照除铁锰的特点来设计混凝沉淀系统。此方法去除悬浮态的含铁化合物效率很高,但由于地下水中铁存在的状态主要是二价铁,在稳定的状态下,不易形成大量沉淀,因此此方法难以将水中的二价铁去除,另外,投加大量药剂容易造成二次污染,同时提高了工程造价。

3.2 离子交换法

离子交换法是去除水中金属离子的常用方法,原理是水中的金属离子经过离子交换树脂时在库伦力的作用下会将树脂上带有同种电荷的离子替换,附着在离子交换树脂上,从而达到去除水中金属离子的作用。这种方法只适用于水同时还需要软化的时候,并且要求水中无溶解氧,防止 Fe^{2+} 氧化成 Fe^{3+} 。此种方法的优点是去除率高,方法简单,效果明显,缺点是离子交换树脂需要再生,再生时需要更换树脂,操作繁琐,而且进水需要预处理。

3.3 化学沉淀

这种方法类似加石灰软化产生碳酸钙沉淀的方法。在石灰或石灰-苏打软化体系中,pH值往往很高,足以把水中的铁以 $\text{Fe}(\text{OH})_3$ 形式沉淀下来。含铁量较高的水可以先进行氧化预处理,然后再过滤,过滤后的水含铁可减少到 0.1mg/L 或 0.1mg/L 以下;向含锰的水中投加石灰、氢氧化钠或碳酸氢钠等碱性物质,将pH值提高到9.5之上,溶解氧很迅速的把 Mn^{2+} 氧化成 MnO_2 而析出,但是处理水中的pH值太高需要酸化后才能供生活饮用水使用。

3.4 膜过滤

膜过滤法的原理是利用膜的孔径大小选择性地过滤水中污染物,达到水净化的目的。在除铁除锰方面,膜过滤技术常与氧化技术结合,Kwang-Ho Choo^[25]考查了超滤系统联合预氯化去除铁锰离子的效果并分析了造成膜堵塞的原因。通过研究发现,当氯的浓度为 3mg/L 时,锰的去除率达到80%以上(锰的浓度降低到 0.1mg/L)。当氯的剂量增加时(如提高到 5mg/L),金属离子的去除率没有明显增加,但是各种不同膜的堵塞情况发生。在UF联用氯过程中,造成膜堵塞组要是锰氧化物。这种现象与锰的氧化动力学密切相关。另外,Donald Ellis^[26]等人研究了氧化联用微滤(MF)技术能够去除地下水铁锰的情况。研究发现,直径在 1.5 到 $50\mu\text{m}$ 的金属氧化颗粒在很高浓度下也能有效的被微滤膜拦截。在实验研究范围内,操作渗透压对除铁锰效果的影响要大于切向流速和进水金属浓度。

在 10kPa 下可获得相对高且稳定的渗透速率。

尽管膜过滤法具有去除效果好、效率高等特点,但因材料昂贵和易堵塞以及进水需要预处理而未能推广使用。

3.5 吸附法

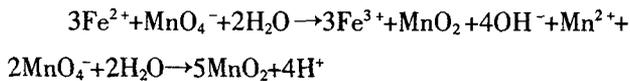
此法采用一些比表面积大吸附性能强的天然或者人工合成的吸附材料,对地下水的铁锰离子有很好的吸附作用。Ahmad bin Jusoh^[27]以活性炭作为吸附剂,通过批实验确定活性炭对地下水中铁锰离子的吸附能力和效率。实验结果显示,实验数据更符合朗格缪尔吸附等温线,相对高环境的室温能只发生单层吸附;实验采用的常规活性炭对铁锰离子的吸附容量分别为 3.6010mg/g 和 2.5451mg/g。

3.6 氧化法

此法利用氧化剂或者空气将 Fe^{2+} 和 Mn^{2+} 氧化成高价离子,再与水中氢氧根作用形成沉淀,然后析出被过滤去除。该方法应用广泛,有许多不同体现方式,主要有以下几种^[6]:

(1) 高锰酸钾氧化法

高锰酸钾是比氧和氯都更强的氧化剂,对铁和锰的氧化都很有效。



理论上每氧化 1 mg/L Fe^{2+} 离子需 0.94 mg/L 的 KMnO_4 ,但有人发现实际上比理论量小时就有较好的除铁效果,这可能是因为 MnO_2 具有接触催化作用的缘故^[7]。

(2) 自然氧化法

自然氧化法是 20 世纪 50 年代初期从国外引进的一套除铁工艺技术,包括曝气、氧化反应、沉淀、过滤等一系列复杂的流程^[8]。曝气的效果是增加了水中溶解氧,同时散去水中的 CO_2 ,提高了 pH 值。一般 pH 多在 6.0-7.5 之间, Fe^{2+} 被氧化成 Fe^{3+} 并与水中 OH^- 结合形成沉淀,通过过滤方式将其去除。但除锰的 pH 值需大于 9.5,此时需投加大量的碱石灰以保证锰的去除率。

经实际运行发现此法存在诸多问题,首先该工

艺流程复杂,增加基建费用,为了达到高碱度需投加大量碱石灰,同时通过曝气散除水中 CO_2 ,这样增加投药量和电耗。另外,由于三价铁絮体颗粒细小,容易穿透滤层,有时除铁效果达不到饮用水要求。水中若存在硅酸易与三价氢氧化铁形成硅铁络合物,影响氢氧化铁絮凝,难以从水中分离。

(3) 接触氧化法

接触氧化法是李圭白院士等人在 20 世纪 60 年代研制开发的地下水除铁除锰技术^[9]。机理是催化氧化反应,起催化作用的是滤料表面的铁质、锰质活性氧化膜,水中 Fe^{2+} 、 Mn^{2+} 被其吸附,在氧气的参与下被催化氧化成高价态物质并截留于滤层中,同时更新了活性氧化膜。该技术有不投药、简单曝气、流程短出水水质良好稳定的优点。

经过工艺运行发现,该方法仍存在一些问题^[9]:当铁锰同时存在于地下水中时,铁的存在会干扰锰的去除效果。只有铁先去除后,锰的去除效果才会显著。李圭白院士认为,要获得稳定的除锰效果, Fe^{2+} 的界限质量浓度约为 2mg/L。由此可见,对锰的去除要难于铁。另外,采用一级曝气、过滤操作时,原水含铁量增大和滤速提高,都将导致滤床上层接触氧化除铁滤层厚度增加,下层接触氧化除锰滤层厚度相对减少,对除锰效果将产生不利影响。此外,由于 Mn^{2+} 氧化为 MnO_2 的速度较慢,锰质活性滤膜的成熟期较长,因此,除锰能力的形成周期较长,且由于经常性的反冲洗等外界因素的干扰,锰质活性滤膜有时无法形成,除锰效果不稳定^[10]。

(4) 臭氧氧化法

此法以臭氧作为氧化剂,经过气液两相充分接触,铁锰离子被臭氧氧化成高价氧化物并通过絮凝沉淀作用从水中去除。R. El Araby^[28]等人通过研究发现,温度和 pH 值会影响铁锰的去除效果:当臭氧浓度为 3mg/L,温度为 20 摄氏度时,铁锰的最佳去除率分别在 96% 和 83% 以上; pH 值在 9-10 时铁锰去除率最大。

3.7 微生物氧化法

以上所述除铁除锰方法存在工艺复杂、可控性

差、造价高等问题,为了解决以上问题,张杰等^[11]于20世纪90年代首次进行地下水生物法除锰的技术研究,并在提高除锰效率及降低工程造价等方面取得了一定的成果。研究表明,微生物去除铁锰的机理主要是附着在滤料上的铁锰氧化细菌在胞外酶的催化作用下将 Fe^{2+} 和 Mn^{2+} 氧化,形成絮状沉淀被滤料截留得以去除。Virginia Alejandra Pacini^[29]利用自制的实验装置对比生物氧化法和自然氧化法除铁除锰的效果。采用以下运行条件运行两个不同自然地下水的实验装置:曝气,上流粗过滤和终极过滤(或者快或者慢)。研究发现铁锰的去除效率分别是85%和95%,但生物法具有成本低、操作简单等优点更适合小型自来水厂。

生物法作为一种同时去除铁锰的新技术^[13],目前在除铁除锰领域已经成为重点研究方向,许多学者们从不同角度对其进行了深入研究,重点分为以下几个方面:

3.7.1 铁锰氧化细菌的研究

铁锰氧化细菌是除铁除锰的核心,近几年的研究主要是对其进行分离、纯化和鉴定,或者驯化高效的工程菌种以提高除铁除锰的效率。杨玉楠^[14]等人在 O_3 -BAC联用工艺上进行富集培养后,分离鉴定出三个属(亚铁杆菌属、嘉氏铁柄杆菌属和缠绕纤发菌属)的铁氧化细菌,其中嘉氏杆菌为除铁的优势菌种,缠绕纤发菌为除锰的优势菌种;李惠珍^[15]等人利用特性培养基在水库水样和管道堵塞物中分离筛选出具有高效除铁除锰能力的铁锰氧化鞘细菌,得到了该菌种的生长适宜条件,通过纯化培养得到两种菌株,并对其菌落进行了描述对比。通过鉴定得出两种菌株各自属于球衣菌属和纤发菌属。Seong-Jin Joe^[30]等人利用含有硫酸亚铁的琼脂糖培养基富集培养出一种名为HIB4的嗜酸异养型细菌,该菌属于革兰氏阳性菌,具有氧化铁锰离子的能力。通过16S rDNA检测发现HIB4与脂环酸芽孢杆菌SD-11的同源性达到99.7%。

高效工程菌的培养有利于促进生物法除铁除锰技术的工程应用。赵焱^[16]等人利用贫营养基在除铁

除锰水厂的曝气池内分离筛选获得高效除铁除锰菌株MSB-4。通过16S rDNA测序确定该菌株属于金黄

(1) MSB-4对铁锰的去除率分别高达94.44%和90%。

3.7.2 生物法氧化铁锰技术的影响因素

根据铁锰氧化细菌去除铁锰的机理,生物所需的营养物质、pH值、温度及溶解氧都会影响铁锰的去除效果。地下水分离出的铁锰氧化细菌多为兼性贫营养微生物^[17],微生物所需要的最基本营养元素应有碳、氮、磷。另外,钙镁离子也是微生物所需的重要的元素,钙具有调节pH值、降低细胞膜透性的作用,镁是一些酶的重要辅因子^[18]。pH值、温度和溶解氧直接影响微生物的活跃性和酶的活性,是微生物繁殖生长的关键指标。薛罡^[19]等人取深井水利用自制的生物滤柱进行生物法去除铁氧化试验,通过改变pH溶解氧等参数,得出DO在1.26~1.64mg/L和6.64~6.69mg/L范围内,pH值在7.12~1.24范围内,铁锰去除效果稳定性差,DO、pH值分别在7.02~7.5mg/L、6.85~6.98范围内,铁锰的去除效果稳定。沈阳建筑大学的张吉库^[20]研究影响锰砂滤层去除铁锰效果的温度、溶解氧两个因素,得出DO在一定范围内变化对生物除铁除锰效果影响不大,考虑经济因素,DO维持在3mg/L左右即可,采用跌水曝气就可以满足要求。低温会降低铁锰的去除效果,微生物最适宜的温度在20℃。

3.7.3 滤料的研究

近几年关于滤料的研究都围绕滤料的选择和滤料的改性两个方面,滤料种类分为天然地质材料和人工合成材料,目前已被研究的滤料多为第一类。李冬^[21]等通过对比锰砂、石英砂、无烟煤去除铁锰的效果,发现锰砂好于无烟煤和石英砂,但锰砂价格偏高,无烟煤为轻质滤料,反冲洗时可缩短时间,降低反冲洗强度,采用无烟煤是除铁除锰的最佳滤料。另外,轻质页岩比表面积大、吸附能力强、易开采、价格便宜等特点,是除铁除锰的优良滤料^[22]。Hamidi A. Aziz^[31]等人利用石灰石作滤料去除地下水锰离子,同时通过与砂砾和砖块进行对

比发现,当进水 pH 为 7,锰浓度为 1mg/L 时,石灰石比砂砾有更好的去除效果,更小的粒径、更大的滤料深度和低滤速能够提高去除效果。为了强化除铁除锰效果,研究者们对天然材料进行改性处理,提高其吸附作用。叶春松^[23]通过将沸石浸泡在盐酸或者氢氧化钠溶液中,改变结构中的元素,提高吸附性。胡建龙^[24]等人将火山岩放入 Fe(NO₃)₃ 溶液浸泡,然后加入 3mol/L KOH 溶液,搅匀后静置一段时间,取出烘干检测其去除铁锰的效果,通过试验发现对锰的去除效果达到 100% 并且时间缩短。

生物法除铁除锰较接触氧化法具有许多优点,在生物滤层中,铁锰可同时去除,不需要提供多级构筑物;对于铁锰共存的地下水,通过一级曝气、一级过滤就能达到同时去除地下水中铁锰的目的。

4 展望

地下水除铁除锰技术研究发展至今,已得到了许多成熟的结论,但用于实际工程的技术方法不多,以接触氧化法为理论的工艺已经用于铁锰超标的地区,但该工艺流程复杂、运行成本高、除锰效果不理想等原因限制其在村镇地区的推广。尽管生物法除铁除锰技术较传统技术存在诸多优点,但这种方法仍有许多问题需要研究解决,例如生物法菌种培养费用较高,菌种培养、驯化需要较长时间,操作复杂,Fe²⁺存在是维系除锰效果不可缺少的因素^[12]等。若想达到工程应用还需要对实验获得的运行参数进行实际验证。另外,动力学基本特征的研究仍需深入。研究如何将生物法除铁除锰技术应用于实际工程,降低工程造价以适合推广使用,是该研究领域的一个重点方向。

参考文献

- 1 Li Dong (李冬), ZHANG Jie (张杰), YANG Hong (杨宏), et al. Application of biological removal of iron and manganese from groundwater treatment plant [J]. China Water & Wastewater (中国给水排水), 2004, 20 (12): 85-88.
- 2 张建锋, 罗宁, 王晓昌. 地下水除铁除锰与同步降氟技术. 中国农村水利水电, 2009, 5: 10-11.
- 3 丁开宁, 郝爱兵, 王孟科. 石家庄市地下水污染特征及机理 [J].

- 水文地质工程地质, 1996, (6): 29.
- 4 栾岚, 詹健, 贾俊松. 地下水除铁除锰技术的分析及其发展方向初探. 江西化工, 2006, (1): 40-43.
- 5 朱秀芹, 李灿波. 地下水除铁除锰技术发展历程及展望. 黑龙江水利科技. 2008, 6, (6): 121-122.
- 6 国家环境保护总局《水和废水监测分析方法》编委会. 水和废水监测分析方法 [M]. 第四版. 北京: 中国环境科学出版社, 2002, 1.
- 7 张杰, 戴镇生. 地下水除铁除锰现代观. 给水排水, 1996, 11, 22 (10): 13-16.
- 8 马恩, 王刚. 地下水除铁除锰技术的研究进展. 环境保护与循环经济: 36-39.
- 9 陈宇辉, 余健, 谢水波. 地下水出铁除锰研究的问题与发展. 工业用水与废水, 2003, 12 (3): 1-4.
- 10 刘国平, 王志军. 接触氧化法除铁除锰效果的影响因素 [J]. 黑龙江水专报, 2005, 32 (1): 77-79.
- 11 陈宇辉, 陶涛等. pH 值对地下水除铁除锰影响机理的研究. 工业用水与废水, 2005, 36 (5): 12-14.
- 12 童桂华. 去除地下水硝酸盐 PRB 介质试验研究-离子交换树脂的选择与电再生 [R]. 2008, 中国海洋大学硕士学位论文.
- 13 唐文伟, 肖耀明, 郝西平等. 生物法去除地下水中铁锰的研究和发展. 工业用水与废水. 2009, 9, 6 (40): 14-17.
- 14 杨玉楠, 王宝贞, 余敏等. BAC 上高效除铁除锰菌的分离和筛选实验研究. 哈尔滨建筑大学学报. 2002, 4, 2 (35): 54-56.
- 15 李惠珍, 许旭萍等. 铁-锰氧化鞘细菌的生境条件及分离鉴定. 水生生物学报, 1999, 23 (4): 311-315.
- 16 赵焱, 李冬, 李相昆. 高效生物除铁除锰工程菌 MSB-4 的特性研究 [J]. 中国给水排水 2009, 25 (1): 40-44.
- 17 李冬, 张杰, 王洪涛等. 除铁除锰生物滤层内铁的氧化去除机制探讨 [J]. 哈尔滨工业大学学报, 2007, 39 (8): 1323-1326 (8): 1323-1326.
- 18 杨宏, 贾运智, 杨佳丽. 生物除铁除锰滤层营养条件的研究 [J]. 安全与环境学报, 2007, 7 (1): 88-91.
- 19 薛昱, 何圣兵, 王欣泽. 生物法去除地下水中铁锰的影响因素. 环境科学, 2006, 1, 27 (1): 95-100.
- 20 张吉库, 刘明秀. 溶解氧和温度对地下水除铁、除锰效果的影响. 安全与环境工程, 2006, 3, 13 (1): 52-54.
- 21 李冬, 杨昊, 李相昆等. 无烟煤滤料在生物除铁除锰水厂中的应用 [J]. 沈阳建筑大学学报, 2007, 23 (5): 818-821.
- 22 叶春松, 曾惠明等. 改性沸石去除地下水中铁锰实验研究. 环境工程学报. 2009, 7, 3 (7): 1237-1240.
- 23 Stembal T, Markic M, Ribicic N. Removal of ammonia iron and manganese from groundwater of northern Croatia-pilot plant studies J. Process Biochemistry, 2005, 40 (3): 327-335.

工业给排水

混凝气浮/UASB/生物移动床工艺处理树脂废水的研究

陈存彩¹, 王金洲², 范红举³, 陈明⁴

(1.江苏省大丰市港丰置业有限公司, 江苏 大丰 224100;

2.江苏省响水城市污水处理厂, 江苏 响水 223001;

3.浙江清华长三角研究院生态环境所, 浙江 嘉兴 314006;

4.江苏省大丰市自来水有限公司城北污水处理厂, 江苏 大丰 224100)

摘要 针对某树脂生产企业废水的特点, 采用了混凝气浮/UASB/生物移动床组合处理工艺。工艺运行结果表明: 在进水 COD 为 20000~30000mg/L 时, 处理后出水 COD<500mg/L, 平均去除率达到 95%以上, 系统出水水质达到《污水综合排放标准》(GB8978-1996) 的三级标准。

关键词 混凝气浮 UASB 生物移动床 树脂废水

江苏某树脂有限公司是生产各类不饱和聚酯树脂的企业, 在生产过程中排放出一定量的高浓度有机废水和树脂桶清洗废水, 并带有刺激性气味。根据其水质、水量特点, 结合企业原有水处理设施,

开发了一套高效、低耗的组合工艺, 并成功应用。

1 废水水质、水量及处理要求

高浓度有机废水主要为树脂车间的缩聚生成水, 该股废水分为两类: ①真空前废水, COD 浓度

- 24 Katsoyiannis I A Zouboulis A I. Biological treatment of Mn II and Fe II containing groundwater kinetic considerations and product characterization. *J. Water Res.*, 2004, 38 (2): 1922-1932.
- 25 Kwang -Ho Choo?, Haebum Lee, Sang -June Choi. Iron and manganese removal and membrane fouling during UF in conjunction with prechlorination for drinking water treatment. *Journal of Membrane Science*. 2005, 5 (267): 18-26.
- 26 Donald Ellis, Christian Bouchard, Gaetan Lantagne. Removal of iron and manganese from groundwater by oxidation and microfiltration. *Desalination*. 2000, 3 (130): 255-264.
- 27 Ahmad bin Jusoh. Study on the removal of iron and manganese in groundwater by granular activated carbon. *Desalination*, 2005, 22 (182): 347-353.
- 28 R. El Araby, S. Hawash, G. El Diwani. Treatment of iron and manganese in simulated groundwater via ozone technology.

Desalination, 2009, 12 (249) :1345-1349.

- 29 Virginia Alejandra Pacini, Ana Mar? a Ingallinella, Removal of iron and manganese using biological roughing up flow filtration technology. *Water Research*, 2005, 22 (39) : 4463-4475.
- 30 Seong -Jin Joe, Koichi Suto, Chihiro Inoie, Tadashi Chida. Isolation and characterization of acidophilic heterotrophic iron - oxidizing bacterium from enrichment culture obtained from acid mine drainage treatment plant. *Journal of Bioscience and Bioengineering*. 2007, 2 (104) :107-123.
- 31 Hamidi A. Aziz, Paul G. Smith. Removal of manganese from water using crushed dolomite filtration technique. *Water Research*, 1996, 2 (30) : 489-492.

△作者通讯处: 100083 北京市海淀区学院路 29 号中国地质大学(北京)水资源与环境学院