

三氯乙烯和四氯乙烯在土壤和地下水中的污染及修复技术

张凤君,王斯佳,马慧,吕聪,王禹博

吉林大学地下水资源与环境教育部重点实验室,长春 130021

摘要 三氯乙烯和四氯乙烯在工农业生产中被广泛使用,由于其不合理的处置和相对持久性特征,使其成为地下水和土壤中分布最为广泛的污染物之一。因其具有挥发性、毒性和致癌性,受到了国内外的广泛关注。通过查阅国内外资料,本文较为系统地总结了三氯乙烯和四氯乙烯污染的来源、危害和污染现状,述评了修复三氯乙烯和四氯乙烯污染的物理方法、化学方法和生物方法,其中物理方法包括曝气法和活性炭吸附法等,化学方法包括化学氧化法和化学还原法等,生物方法包括微生物修复技术和植物修复技术。同时对三氯乙烯和四氯乙烯的污染修复技术的发展趋势进行了展望,认为微生物修复技术、纳米双金属颗粒技术和光催化氧化技术具有很好的应用前景,建议加强这三项技术的研究和应用。

关键词 三氯乙烯;四氯乙烯;污染;修复技术

中图分类号 X-2

文献标识码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2012.18.010

Contaminations and Remediation Technologies of Trichloroethylene and Perchloroethylene in the Soil and Groundwater: A Review

ZHANG Fengjun, WANG Sijia, MA Hui, LV Cong, WANG Yubo

Key Laboratory of Groundwater Resources and Environment, Ministry of Education, Jilin University, Changchun 130021, China

Abstract Due to their widespread use, unreasonable disposal, and their persistency in the subsurface environment, chlorinated ethenes have become one of the most commonly contaminants in groundwater and soils. Since they are volatile, toxic, and carcinogenic, they have been widely concerned. Based on the literature review, the sources, hazards, and pollution of chlorinated ethenes are summarized. Furthermore, the remediation technologies of chlorinated ethenes, such as physical, biological, and chemical methods are concluded. Physical methods include aeration and activated carbon adsorption, chemical methods include chemical oxidation and chemical reduction, and biological methods include bioremediation and phytoremediation. Moreover, the development trends of TCE and PCE remediation technologies are looked ahead, and the microbial remediation, nano-metal particles, and photocatalytic oxidation technology are appreciated, and it is recommended that researches and applications of these three areas should be strengthened.

Keywords trichloroethylene; perchloroethylene; pollution; remediation technology

1 污染现状及危害

1.1 污染来源

随着经济的发展和人民生活水平的提高,三氯乙烯(Trichloroethylene, TCE)和四氯乙烯(Perchloroethylene, PCE)被广泛用作干洗剂^[1-3]、金属脱脂溶剂^[4-6]、有机合成中间体^[7]、脱硫剂^[8]、杀虫剂、化妆品制造、冰箱制冷剂^[9]等。据统计,在中

国三氯乙烯的年使用量达到7万t以上,并且每年以2位数增加^[10];2000年仅美国干洗行业的四氯乙烯总用量就达9.1万t^[11];中国90%的干洗店使用四氯乙烯作为溶剂^[12-13]。

三氯乙烯和四氯乙烯的用途广泛决定了它们的大量生产,而这正为环境污染提供了前提条件。由于生产、使用、储存或处置不当等一些原因,使其通过挥发、泄露、废水排放、

收稿日期:2012-01-05;修回日期:2012-06-01

基金项目:环保公益性行业科研基金重大项目(201009009)

作者简介:张凤君,教授,研究方向为水处理技术,电子邮箱:zhangfengjun@jlu.edu.cn

农药使用及含氯有机物成品的燃烧等途径进入大气、土壤、地下水中,成为环境污染的主要来源之一^[14-18]。

1.2 污染现状

三氯乙烯和四氯乙烯具有较低的溶解度和较高的界面张力,属于重非水相液体(DNAPL)^[19],进入土壤及地下水环境后,更由于其吸附性和稳定性会长期驻留在环境中,造成长期污染^[20]。大气、水体、土壤以及垃圾填埋场等场所均有发生氯代烃污染的报道^[21-23],其中三氯乙烯和四氯乙烯由于使用广泛和毒性较高,受到了环境工作者的广泛关注,均被列入美国国家环保局 1976 年公布的 129 种优先控制污染物及中国环境特征污染物的“黑名单”^[24-25]。

三氯乙烯生物可分解性低,在土壤中的半衰期约为六个月至一年半;在地下水中,视其浓度不同,半衰期长达十一个月至四年半^[26]。因此,三氯乙烯液体渗入土壤及地下水中将长期积存,污染环境。世界卫生组织(WHO)确定的饮用水中三氯乙烯限定质量浓度指导值为不超过 0.07mg/L^[27-28],这与中国地表水环境质量标准(GB3838-2002)相同。1996 年发现,被三氯乙烯污染的水井数量在增加,特别在拥有 30 万人口的盛冈市,15%的自来水来自被三氯乙烯污染的地下水^[29];美国受三氯乙烯污染的 Superfund 场址高达 336 个^[26];20 年前中国台湾桃园美国无线电股份有限公司桃园厂因有机溶剂处置不当,三氯乙烯等污染物渗入土壤和地下水中,致使该地区环境受到严重污染^[17]。

四氯乙烯一旦进入土壤包气带和地下水中,通常以非混溶残余液相、溶解相、气相、吸附相等多种形式存在^[18],在地下水位线附近首先聚集,使其有足够的压力克服油-水界面的毛细张力,继续向下迁移,最终可穿透整个含水层,并且趋向于聚集在含水层底板或低洼处^[30],形成长期的二次污染源^[31]。日本在全国范围内取 5900 个水样,经检测发现,2.3%的样品中四氯乙烯未达到饮用水的标准^[32];在美国,四氯乙烯已成为地下水分布最广泛的 5 种污染物之一^[33-34];美国从 1984—1991 年中收集的有毒垃圾沥滤液样品中,61%的样品检测到了四氯乙烯^[35]。

1.3 污染危害

文献[36]中 Schwartz 等在 1947 年就描述了三氯乙烯引起的全身性剥脱性皮炎,之后国外文献陆续有所报道,中国直至 1994 年才见报道^[37],且报道的病例数逐渐增多。三氯乙烯加热分解时释放有毒氯化物,可通过呼吸道、皮肤接触、食入等途径进入人体,对中枢神经系统有麻醉作用^[5,8],会引起人体皮肤受损^[38]、内脏损害^[39],导致贫血病或晕厥症^[39],严重时危及生命^[40]。动物实验和人口流行病学研究表明,三氯乙烯可能导致肝癌^[41]、肾癌、癌症转移和恶化,削弱神经功能和自身免疫功能^[42],对人体内的枯否氏细胞(KC)具有细胞毒性^[43],对小麦叶绿素和土壤呼吸率有抑制作用^[20]。而且三氯乙烯的降解产物二氯乙烯和氯乙烯也是有毒致癌物质^[44-45]。

四氯乙烯较三氯乙烯毒性小些,但仍不容忽视。四氯乙

烯可通过呼吸道和皮肤侵入人体,导致不孕和高流产^[46]。接触低浓度的四氯乙烯蒸汽对皮肤黏膜、眼、呼吸道有刺激作用^[47],长期低剂量吸入可引起人体神经内分泌以及免疫系统的功能紊乱^[48];高浓度则造成中枢神经系统抑制、肝肾功能损伤^[49],导致晕眩、恶心、头痛及神志不清,严重者可致死亡^[50]。四氯乙烯对接触者糖代谢和脂代谢也会有影响^[51]。1994 年国际癌症研究机构(IARC)和日本产业卫生学会都将四氯乙烯列为“对人体可能有致癌性的第二类特定化学物质”^[52]。美国 Edward A.Laws 也在其编著的书中将四氯乙烯列为在饮用水水井中的有毒化学物质之一^[53]。中国规定车间空气中四氯乙烯时间加权平均容许浓度为 200 mg/m³^[54]。已有学者针对四氯乙烯对一些植物和动物的毒性影响进行了研究,结果表明:四氯乙烯可能造成子鼠神经系统损伤^[55-56];影响小麦发育^[57-58];对土壤呼吸率有抑制作用^[8];对草鱼的毒性为高毒^[59]。

鉴于三氯乙烯和四氯乙烯污染的普遍性、对人类的危害性及其研究治理的复杂性,其在地下环境中的污染修复技术已成为近年来国内外普遍关注的问题,也是广大专家学者积极探索和研究的热点。

2 修复技术

2.1 物理方法

在土壤和地下水中,三氯乙烯和四氯乙烯污染的物理修复方法主要有曝气法和活性炭吸附法。

三氯乙烯和四氯乙烯的污染具有持久性,污染晕的扩散较为缓慢,许多学者认为采用曝气技术对其进行修复可以取得较好的效果^[60]。曝气技术是通过注汽井将压缩空气注入地下水污染区域,利用密度差使空气上升穿透地下水和土壤层,将可挥发的污染物融入空气中,利用空气的运动去除地下环境中的可挥发性有机污染物。

向华等^[61]进行了曝气技术去除三氯乙烯和四氯乙烯的实验研究,结果表明,曝气技术能够在较短时间内有效去除三氯乙烯和四氯乙烯,将初始浓度为国家标准 5 倍的三氯乙烯和四氯乙烯去除到国家标准限值以内。胡顺之^[62]通过实验室装置试修复污染场地水样,发现曝气 30min 后三氯乙烯去除率可达 99.7%,残留浓度低于国家标准限值。

曝气技术所需成本低廉,能够快速有效降低污染物的浓度,所需时间远远小于其他技术,并且可以为地下环境提供氧气,促进有氧生物的降解能力。但是曝气技术对土壤的渗透性要求高,在饱和区域,曝气井的影响半径较小,并且产生的尾气若不进行处理,会对环境造成二次污染。

活性炭吸附法是另一种被广泛使用的处理三氯乙烯和四氯乙烯污染的物理方法^[63-64]。活性炭是一种很细小的炭粒,有很大的表面积,而且炭粒中还有更细小的孔(毛细管),这种毛细管具有很强的吸附能力,由于炭粒的表面积很大,所以能与污染物充分接触,将污染物吸附,起到净化的作用。

克罗地亚萨格勒布工业区采用活性炭作吸附剂处理受

三氯乙烯和四氯乙烯污染的地下水,使得10年内城市居民消费饮用水中三氯乙烯和四氯乙烯的浓度下降约20%^[65-66]。1996年美国在被挥发性有机物(包括三氯乙烯和四氯乙烯)污染的3428地下水井点治理中,有50%的地下水井点采用活性炭处理法。文献[27]中Nakano等采用粒径为1.0—1.4mm的颗粒活性炭吸附三氯乙烯,结果表明,每克颗粒活性炭可吸附3.2mg三氯乙烯。

活性炭吸附法工艺成熟,效果可靠,易于分离回收吸附物。但是活性炭价格较贵,不适合大面积污染修复;活性炭在使用初期吸附效果很高,但随着使用时间的增长,吸附能力会不同程度地减弱,吸附效果也随之下降。目前已经有很多关于活性炭再生方法的研究^[67-68],活性炭再生后重复使用可以有效减轻经济负担。

综上所述,物理方法可以快速有效地移除污染物,可以作为有效去除三氯乙烯和四氯乙烯的应急处理技术。但是只能使三氯乙烯或四氯乙烯从一个地方转移到另一个地方,不能完全使其变成无害产物,常需配合后续处理措施,以便更好更彻底地清除污染。

2.2 化学方法

2.2.1 化学氧化法

化学氧化法是近年来提出的能够有效处理土壤及地下水中三氯乙烯和四氯乙烯的一种技术^[69]。

(1) 化学试剂氧化法:就是通过化学氧化剂(H_2O_2 及Fenton试剂、 $KMnO_4$ 、 O_3 等)与污染物之间的化学反应将地下水或土壤中的污染物转化为无害化学物质的方法^[70]。

H_2O_2 曾作为氧气的来源,用于土壤生物修复以促进微生物的生长,后来又被用作氧化剂处理土壤中的污染物^[71]。近年来则更多地应用于氯代溶剂(如三氯乙烯、四氯乙烯等)的原位氧化处理^[72]。Fenton于1894年发现当 H_2O_2 与 Fe^{2+} 共存时,其分解能力会高于两者单独存在时的分解能力^[73],因此将亚铁离子和过氧化氢组成的体系称作芬顿试剂。有研究表明,利用 Fe^{3+} 盐溶液、可溶性铁以及铁的氧化矿物(如赤铁矿、针铁矿等)同样可以使 H_2O_2 催化分解产生 $HO\cdot$,达到降解有机物的目的^[74]。Teel等^[75]在对比类Fenton试剂和传统Fenton试剂降解三氯乙烯实验中发现,传统Fenton试剂和可溶性铁-Fenton试剂对三氯乙烯的去除率分别为78%和91%,两者都不能完全矿化,最多只能释放三氯乙烯分子中的2个氯;而针铁矿-Fenton试剂在pH=3时对三氯乙烯的去除率达到99%,几乎完全矿化。但由于利用Fenton试剂的反应条件必须控制在pH=3左右,这会破坏土壤生态系统,强化土壤中重金属的溶解而形成复合型污染,同时致使地下水酸化,不利于土壤和地下水中微生物的生长及其对污染物的降解^[76],因此,改性Fenton反应技术目前正处于不断探索和完善中。

$KMnO_4$ 是一种氧化性极强的无机氧化剂,实验证明它能够彻底且较快地降解三氯乙烯和四氯乙烯^[77-78]。与其他氧化剂相比, $KMnO_4$ 在环境中的存在时间更为持久,且适用的pH

值更为广泛^[79]。研究人员已经在野外和室内进行了一系列采用高锰酸盐处理三氯乙烯污染场地的研究^[80]。三氯乙烯在经 $KMnO_4$ 氧化后,可完全脱氯,并且降解产物的毒性低于原物质^[81]。高锰酸盐氧化法的缺点是还原物 MnO_2 会在注射井附近积累,影响污染物的质量转移,并可能堵塞含水层介质。

O_3 主要用于去除低氧化态的氯代烯烃,学者研究发现,臭氧也可以分解三氯乙烯^[82]。Nelson等^[83]在实验室和现场用 O_3 修复地下水中污染物,在实验室中通 O_3 40h后,三氯乙烯降解82%;实地修复6个月后三氯乙烯最高可降解90%。研究指出,当过氧化氢与臭氧结合使用的时候,将形成能与水中有有机氯化物反应并具有较高反应活性的中间氧化剂,其氧化速率能够提高2至3倍^[84]。文献[27]中上杉和也通过实验证实,臭氧加过氧化氢的工艺对三氯乙烯有很高的分解效率。

(2) 光催化氧化法:就是在一定波长光照下,利用催化剂氧化去除污水中污染物的方法。光照一般采用紫外光,催化剂多是固态的 TiO_2 ^[24]。该法对含氯有机物十分有效,是国内外研究领域非常活跃的方向。其优点主要是:氧化较彻底,无中间产物积累,无二次污染;转化率高而且反应迅速;所用催化剂廉价易得,所需光照条件也比较容易实现。

周细红等^[85]研究了紫外光、 H_2O_2 和草酸铁络合物联合作用降解四氯乙烯,结果显示在此联合作用下四氯乙烯能迅速光解脱氯。刘勇弟等^[86]对Fenton试剂、 H_2O_2 +紫外光和Fenton+紫外光三种系统加以比较,发现了紫外光(UV)的引入可以大大提高对有机物的氧化能力。Yamazaki等^[87]利用 TiO_2 半导体颗粒进行光催化降解三氯乙烯,实验证明,在光催化反应器中投加 $S_2O_8^{2-}$ 可提高降解速率,投加浓度适量,可使三氯乙烯完全矿化。

2.2.2 化学还原法

使用还原性较强的物质可以使三氯乙烯和四氯乙烯等氯代有机物脱氯转化为危害性较小的烃类^[88]。20世纪80年代,美国科学家Sweeny^[89]报道了用零价铁还原氯代脂肪烃的稀溶液。1992年,Gillham的研究表明^[90],利用零价铁腐蚀产生的电子可使氯代烃产生还原性脱氯。自此,零价铁脱氯技术以其成本低廉和处理效果好而倍受关注^[91]。刘菲等^[92]进行了零价铁降解水中氯代烃的实验室研究,结果表明,零价铁对氯代烃有明显的脱氯作用。

但实际应用时,铁的氧化产物容易在金属铁表面形成一层保护膜,阻止金属铁表面和有机污染物之间的电子转移。Mallat等^[93]发现在基底金属表面镀上另一种还原电位高的金属后可增强基底金属的活性,以提高基底金属参加还原反应的速度和选择性。在此基础上,国内外学者发现对零价铁进行改良,即在基底金属表面镀上第二种金属,如钯、镍等,形成的双金属系统可提高氯代烃脱氯速率^[94]。何小娟等^[95]用镍/铁和铜/铁双金属对四氯乙烯进行脱氯试验,结果显示,双金属系统在四氯乙烯的脱氯过程中没有三氯乙烯,二氯乙烯和一氯乙烯等中间产物的产生;与零价铁系统相比,双金属系

统对四氯乙烯的去除速率有明显提高。Muftikian 等^[94]利用 Pd-Fe 双金属系统,对水中低分子量氯代烃进行脱氯,三氯乙烯和四氯乙烯可以在几分钟内迅速降解为相应的烃类和氯离子。

为使双金属系统更好的应用于现场修复中,研究者将双金属系统和纳米技术相结合,制成纳米双金属颗粒。纳米材料颗粒尺寸小且反应活性高,金属颗粒不用建立金属墙,可直接注射到受污染的土壤、沉积层和含水层中^[96]。纳米技术的发展给三氯乙烯和四氯乙烯的污染修复带来了一个新的方向。黄园英等^[97-98]以实验室合成的纳米双金属颗粒(Ni/Fe 和 Cu/Fe)为反应材料,对四氯乙烯进行脱氯试验研究,结果表明,纳米 Ni/Fe 和 Cu/Fe 对四氯乙烯有明显的脱氯作用,主要生成无毒的烃类乙烷。Elliott 等^[99]已经开始将纳米铁及其复合金属注入到有机氯污染的地下水中,开展现场实验研究。

化学法是很成熟的处理方法,可以不断地破坏污染物,改变污染物的结构,将其从环境中彻底清除。目前,可选择的化学试剂很多,可以根据不同污染场地和不同处理要求确定所需化学试剂的种类和相应的处理方法。但是三氯乙烯和四氯乙烯的一些转化产物可能比母体的毒性更强,因此选择能彻底矿化三氯乙烯和四氯乙烯的化学方法尤为重要。

2.3 生物方法

2.3.1 微生物修复技术

微生物修复技术主要是利用自然环境中生息的微生物或投加的特定微生物^[100],在人为促进工程化的条件下,分解污染物,修复受污染的环境^[101]。生物降解法最大的优点是易于原位修复、经济无害、无二次污染^[24]。

三氯乙烯和四氯乙烯曾经被认为是生物不可降解的物质^[102]。1985年,Wilson 等^[103]报道了¹⁴C 标示的三氯乙烯在土壤中被甲烷细菌降解为二氧化碳的现象,打破了研究人员的这一看法。接着,许多的室内试验及污染现场观测证明,微生物可将三氯乙烯和四氯乙烯降解为无毒或毒性小的物质^[104]。

生物降解过程可以分为好氧生物降解和厌氧生物降解。好氧生物降解途径通常是通过氧化作用产生,其机理主要分为羟基化作用和环氧化作用。Deane 等^[105]研究了在甲烷单一氧化酶(MMO)的催化作用下,三氯乙烯先被氧化为三氯乙烯环氧化物,然后在水中开环,生成二氯乙酸、醛基乙酸及一个碳原子的产物(CO、HCOOH),再进一步被氧化成 CO₂。Munakata-Marr 等^[106]以苯酚、甲苯和苯为电子供体,在好氧条件下,三氯乙烯完全矿化为 CO₂。Robinson 等^[107]发现两个假单胞菌株, *P.putida* F1 和 *P.putida* TVA8 可以用甲苯共代谢三氯乙烯。Brar 等^[108]做了实验室规模的研究,利用生物降解法去除三氯乙烯,去除率可达 99.89%。陈翠柏等^[109]对三氯乙烯的生物降解做了初步研究,结果表明,葡萄糖可以在好氧条件下作为共代谢基质使三氯乙烯发生生物降解,且其降解三氯乙烯的速率大于三氯乙烯作为单一基质的降解速率。三氯乙烯较四氯乙烯更容易被好氧降解,因为氯原子数越少,好氧

降解效果越好。

厌氧生物降解途径主要是在还原条件下通过还原脱氯作用产生,其机理主要分为氢解作用和二卤消去作用^[110]。厌氧生物降解可以使四氯乙烯等高氯代有机物还原脱氯,但很难使其彻底矿化。杨琦等^[111]利用厌氧污泥,在微生物的作用下将四氯乙烯还原脱氯为三氯乙烯和二氯乙烯。

降解三氯乙烯和四氯乙烯的微生物包括土著微生物和生物强化微生物。土著微生物广泛存在于包气带土壤和含水层中,它们适应环境能力强,种类多,可以降解多种污染物,但降解速率比较慢。生物强化微生物是经过专门筛选培养的微生物,它们代谢活性高、降解速率快,但投放在污染场地后很可能由于不能适应多变的环境而被土著微生物竞争取代。

2.3.2 植物修复技术

植物修复技术通过植物的吸收、挥发、根滤、降解、稳定等作用净化土壤或水体中的污染物。它具有成本低、不破坏土壤和河流生态环境、不引起二次污染等优点。

植物对地下环境中三氯乙烯和四氯乙烯污染的修复主要是通过水力控制污染物的扩散^[112]。植物的表现类似于水泵,当它们的根伸到地下水水面以下并生长茂密时,其根系能吸收大量的地下水。由于地表污染土中的污水被植物消耗掉了,就减少了污染向下转移到地下水的趋势^[69]。迄今的实验已表明,利用白杨属植物修复三氯乙烯污染的地下水是有效果的^[113]。王思羽等^[10]介绍了利用杨树修复三氯乙烯污染地下水的的方法,并对杨树修复三氯乙烯污染的机理进行了阐述。

因此,利用生物方法修复三氯乙烯和四氯乙烯在土壤和地下水中的污染一直是全球研究的热点。微生物可以降解破坏污染物的分子结构,使其最终转化为无毒无害的稳定物质,既安全又能彻底消除污染。并且生物方法所需设备简单,成本低廉,易于原位修复,是极具发展潜能的绿色修复技术。但是生物方法也存在修复时间长、外加菌种环境适应性差等弊端,需要在以后的研究中不断探索完善。

3 展望

由于三氯乙烯和四氯乙烯在土壤和地下水中的普遍污染状态和长期存在性,及其对人类健康和环境造成的较大危害。近年来,国内外学者针对此类污染物,采用不同处理方法进行了大量研究。笔者认为今后三氯乙烯和四氯乙烯污染土壤和地下水的修复技术应该着重于以下几个方面:

(1) 微生物修复具有高效、经济、无害、无二次污染等优点,研究和发掘环境适应能力强的三氯乙烯和四氯乙烯特效降解菌,提高微生物修复的速率和效率,是今后修复污染的重要发展方向;(2) 纳米技术和双金属系统相结合,可以充分发挥双金属系统高效的修复效果和纳米颗粒尺寸小、反应活性高的优点,是三氯乙烯和四氯乙烯污染原位修复的新方向,建议今后增加纳米双金属颗粒技术在实际场地应用的研究,进一步完善该技术;(3) 光催化氧化法具有操作廉价、氧

化彻底、无中间产物积累等优点,在国外已经成为了研究领域非常活跃的方向。国内对光催化氧化方法的研究较少,应大力开发这方面的研究。

参考文献 (References)

- [1] 郝凤桐. 换季衣服干洗带来健康隐患[N]. 北京日报, 2010-10-14(015).
Hao Fengtong. Health risks brought by dry laundry [N]. Beijing Daily, 2010-10-14(015).
- [2] Chowdhury P, Viraraghavan T. Sonochemical degradation of chlorinated organic compounds, Phenolic compounds and organic dyes: A review[J]. *Science of the Total Environment*, 2009, 407(8): 2474-2492.
- [3] 王会彬. 洗衣房中四氯乙烯污染状况调查[J]. 中国辐射卫生, 2007, 16(1): 33-33.
Wang Huibin. *China Radiation Health*, 2007, 16(1): 33-33.
- [4] 史济月, 王桂燕, 王洋, 等. 四氯乙烯对草鱼的急性毒性及其安全浓度评价[J]. 沈阳理工大学学报, 2007, 26(4): 65-67.
Shi Jiyue, Wang Guiyan, Wang Yang, et al. *Transactions of Shenyang Ligong University*, 2007, 26(4): 65-67.
- [5] 黄媛媛, 单爱琴, 李海花, 等. 四氯乙烯污染对大豆幼苗抗氧化特征的影响[J]. 大豆科学, 2010, 29(4): 721-723.
Huang Yuanyuan, Shan Aiqin, Li Haihua, et al. *Soybean Science*, 2010, 29(4): 721-723.
- [6] 吕聪. 粘土冰碛物中有机氯溶剂吸附特性和限制性孔隙对其 ERD 生物修复影响[D]. 长春: 吉林大学, 2011.
Lv Cong. Sorption of chlorinated solvents onto clayey tills and effects of restrictive pore space on the biological enhanced reductive dechlorination (ERD) of chlorinated solvents[D]. Changchun: Jilin University, 2011.
- [7] 韩冰. 地下水有机污染场地健康风险评估[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2006.
Han Bing. Health risk assessment for the groundwater organic contaminated site[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2006.
- [8] 唐冠中, 邹发英. 四氯乙烯混水法在镍阳极泥综合利用上的应用[J]. 江西有色金属, 2000, 14(4): 22-24.
Tang Guanzhong, Zou Faying. *Jiangxi Nonferrous Metals*, 2000, 14(4): 22-24.
- [9] Thomas K G Mohr. Historical use of chlorinated solvents and their stabilizing compounds[M]//Environmental Investigation and Remediation. CRC Press, 2010: 1-73.
- [10] 王思羽, 石自堂. 地下水环境污染及植物修复方法[J]. 中国农村水利水电, 2008(10): 39-41.
Wang Siyu, Shi Zitang. *China Rural Water and Hydropower*, 2008(10): 39-41.
- [11] 刘庆辉, 徐艳青. 四氯乙烯的发展现状和市场预测[J]. 化工开发与设计, 2000(5): 39-43.
Liu Qinghui, Xu Yanqing. *Chemical Development and Design*, 2000(5): 39-43.
- [12] 刘雅梅, 杜立华. 北京市部分洗衣房中四氯乙烯污染现状[J]. 职业与健康, 2005, 21(3): 353-354.
Liu Yamei, Du Lihua. *Occupation and Health*, 2005, 21(3): 353-354.
- [13] 岳峰勤, 苏保军, 关世忠. 郑州市干洗行业空气中四氯乙烯污染状况调查[J]. 职业与健康, 2005, 21(5): 675-677.
Yue Fengqin, Su Baojun, Guan Shizhong. *Occupation and Health*, 2005, 21(5): 675-677.
- [14] 钟宁, 张灵, 曾清如, 等. 过碳酸胺对土壤中三氯甲烷和四氯乙烯的降解作用[J]. 农业环境科学学报, 2009, 28(5): 925-930.
Zhong Ning, Zhang Ling, Zeng Qingru, et al. *Journal of Agriculture Environment Science*, 2009, 28(5): 925-930.
- [15] 章立勇, 林匡飞, 徐圣友, 等. 硫酸盐还原条件下三氯乙烯的降解研究[J]. 环境污染与防治, 2009, 31(2): 1-3.
Zhang Liyong, Lin Kuangfei, Xu Shengyou, et al. *Environmental Pollution and Control*, 2009, 31(2): 1-3.
- [16] Kao C M, Chen Y L, Chen S C, et al. Enhanced PCE dechlorination by biobarrier systems under different redox conditions [J]. *Water Research*, 2003, 37(20): 4885-4894.
- [17] 陈华清, 李义连. 浅层地下水 PCE/TCE 污染原位曝气修复模拟研究[J]. 环境科学与技术, 2009, 32(11): 53-57.
Chen Huaqing, Li Yilian. *Environmental Science and Technology*, 2009, 32(11): 53-57.
- [18] 马长文. 地下水中四氯乙烯迁移归宿与修复技术研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2007.
Ma Changwen. Remediation of perchloroethylene in groundwater [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2007.
- [19] 孙晋方, 朱琨, 张伟. 氯乙烯在地下水和土壤中的厌氧脱氯还原降解[J]. 环境保护科学, 2008, 34(6): 15-18.
Sun Jinfang, Zhu Kun, Zhang Wei. *Environmental Protection Science*, 2008, 34(6): 15-18.
- [20] 王爱宽, 秦勇, 单爱琴, 等. 三氯乙烯、四氯乙烯对小麦叶绿素和土壤呼吸率的影响[J]. 东北农业大学学报, 2009, 40(5): 13-16.
Wang Aikuan, Qin Yong, Shan Aiqin, et al. *Journal of Northeast Agricultural University*, 2009, 40(5): 13-16.
- [21] 邓绍坡, 裴宗平, 韩宝平, 等. 某市南郊水源地土壤四氯化碳污染特征[J]. 环境污染与防治, 2007, 29(1): 78-80, 89.
Deng Shaopo, Pei Zongping, Han Baoping, et al. *Environmental Pollution and Control*, 2007, 29(1): 78-80, 89.
- [22] Jeffrey P J, Ruth F W, Aarne V P. Environmental pollution and control [M]. 4th Ed. Boston: Butterworth Heinemann, 1998.
- [23] 刘银平. 混合表面活性剂修复四氯乙烯土壤污染研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2011.
Liu Yiping. Research on perchloroethylene contaminated soil remediation using mixed surfactant [D]. Beijing: North China Electric Power University, 2011.
- [24] 向夕品. 三氯乙烯和四氯乙烯处理方法研究进展 [J]. 渝州大学学报: 自然科学版, 2002, 19(4): 77-80.
Xiang Xipin. *Journal of Yuzhou University: Nature Science Edition*, 2002, 19(4): 77-80.
- [25] 沈德钟. 污染环境的生物修复[M]. 北京: 化学工业出版社, 2002.
Shen Dezhong. Bioremediation of environmental pollution [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2002.
- [26] 崔英杰. Fenton 技术降解非水相有机污染物的实验研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2008.
Cui Yingjie. Degradation of non-aqueous phase organic pollutants by modified fenton's reagent[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2008.
- [27] 高乃云, 李富生, 汤浅晶, 等. 水中三氯乙烯的去除研究进展[J]. 工业水处理, 2003, 23(9): 14-17.
Gao Naiyun, Li Fusheng, Tang Qianjing, et al. *Industrial Water Treatment*, 2003, 23(9): 14-17.
- [28] 江泉观, 纪云晶, 常元勋. 环境化学毒物防治手册 [M]. 2 版. 北京: 化学工业出版社, 2004: 559.
Jiang Quanguan, Ji Yunjing, Chang Yuanxun. Male reproduction toxicology: Theory and methods[M]. 2nd Ed. Beijing: Chemical Industry

- Press, 2004: 559.
- [29] 徐嵩. 三氯乙烯在天然土壤中的吸附行为及其影响因素[D]. 北京: 北京化工大学, 2006.
Xu He. Adsorption behavior of trichloroethylene on natural soils and relevant influencing factors [D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2006.
- [30] 陶燕, 米生权, 王式功, 等. 活性炭吸附-超临界 CO₂ 解吸附四氯乙烯的特性研究[J]. 环境污染与防治, 2008, 30(9): 1-5.
Tao Yan, Mi Shengquan, Wang Shigong, et al. *Environmental Pollution and Control*, 2008, 30(9): 1-5.
- [31] 汪民, 吴永锋. 地下水微量有机污染 [J]. 地学前缘, 1996, 3 (1-2): 169-175.
Wang Min, Wu Yongfeng. *Earth Science Frontiers*, 1996, 3 (1-2): 169-175.
- [32] Young C C, Masahiro H, Kweon J, et al. Isolation and characterization of a tetrachloroethylene dechlorination bacterium, clostridium bifermens DPH-1 [J]. *Journal of Bioscience and Bioengineering*, 2000, 89(5): 489-491.
- [33] 边炳鑫, 解强, 赵由才. 煤系固体废物资源化技术 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2005: 1-5.
Bian Bingxin, Xie Qiang, Zhao Youcai. Cool resources and technology of solid waste[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2005: 1-5.
- [34] 顾炳伟, 王培铭, 雄少波. 机械粉磨对煤矸石-水泥体系颗粒群特征及力学性能的影响 [J]. 东南大学学报: 自然科学版, 2005 (35): 167-171.
Gu Bingwei, Wang Peiming, Xiong Shaobo. *Journal of Southeast University: Natural Science Edition*, 2005(35): 167-171.
- [35] Vasilios B K, Brebt E S, David M B. Column studies of biodegradation of mixtures of tetrachloroethene and carbon tetrachloride [J]. *Water Research*, 2000, 34(17): 4161-4168.
- [36] 张坤海. 三氯乙烯对人体健康的影响[J]. 职业与健康, 2003, 19(3): 5-6.
Zhang Kunhai. *Occupation and Health*, 2003, 19(3): 5-6.
- [37] 李岳恒, 卫建平, 蔡向挺, 等. 三氯乙烯引起全身皮疹和严重肝功损害的调查[J]. 中华劳动卫生职业病杂志, 1994, 12(1): 40.
Li Yueheng, Wei Jianping, Cai Xiangting, et al. *China Labor Hygiene and Occupational Diseases*, 1994, 12(1): 40.
- [38] 丁锐, 沈彤, 朱启星. 三氯乙烯和四氯乙烯对体外培养皮肤 KC 细胞氧化损伤及维生素 E 的保护作用 [J]. 中华劳动卫生职业病杂志, 2006, 24(11): 662-665.
Ding Rui, Shen Tong, Zhu Qixing. *China Labor Hygiene and Occupational Diseases*, 2006, 24(11): 662-665.
- [39] 周本荣, 陈立春. 从环保角度谈我国 C₂ 氯溶剂的发展[J]. 精细与专用化学品, 1999(18): 3-4.
Zhou Benrong, Chen Lichun. *Fine and Specialty Chemicals*, 1999(18): 3-4.
- [40] 张慧敏. 三氯乙烯生产及应用现状[J]. 中国氯碱, 2004(8): 17.
Zhang Huimin. *China Chlor-Alkali*, 2004(8): 17.
- [41] 刘明柱. 氯代烃在浅层地下水中运移转化的数值模拟研究[D]. 北京: 中国地质大学, 2002.
Liu Mingzhu. Study on numerical simulation of migration and transformation of chlorinated hydrocarbon in shallow groundwater[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2002.
- [42] 胡训军, 卢伟, 陈良, 等. 三氯乙烯致癌性研究进展[J]. 环境与职业医学, 2004, 21(6): 490-492.
Hu Xunjun, Lu Wei, Chen Liang, et al. *Environmental and Occupational Medicine*, 2004, 21(6): 490-492.
- [43] 周承藩, 丁锐, 沈彤, 等. 三种氯代烯烃对人角质形成细胞的细胞毒性作用[J]. 中国工业医学杂志, 2005, 18(2): 76-79.
Zhou Chengfan, Ding Rui, Shen Tong, et al. *Chinese Journal of Industrial Medicine*, 2005, 18(2): 76-79.
- [44] 孙芹菊. 三氯乙烯污染的地下水生物修复技术研究进展 [J]. 环境科学与管理, 2007, 32(6): 42-45.
Sun Qinju. *Environmental Science and Management*, 2007, 32(6): 42-45.
- [45] 孟凡生, 王业耀. 三氯乙烯污染地下水和土壤的修复[J]. 中国给水排水, 2005, 21(4): 34-36.
Meng Fansheng, Wang Yeyao. *China Water and Wastewater*, 2005, 21(4): 34-36.
- [46] 王桂仁. 零价铁技术处理地下水中三氯乙烯及四氯乙烯之研究[D]. 台湾: 逢甲大学, 2003.
Wang Guiren. Study of zero-valent iron technology treat tetrachloroethylene and trichloroethylene in the groundwater[D]. Taiwan: Feng Chia University, 2003.
- [47] 崔国幸, 戴日英. 四氯乙烯作业工人健康状况调查[J]. 中国工业医学杂志, 1998, 11(4): 243-244.
Cui Guoxing, Dai Riyong. *Chinese Journal of Industrial Medicine*, 1998, 11(4): 243-244.
- [48] 李森华, 关细娟, 陈卫波. 四氯乙烯对洗衣工人血清 EB 抗体含量影响的观察[J]. 职业医学, 1998, 25(1): 25-27.
Li Senhua, Guan Xijuan, Chen Weibo. *Occupational Medicine*, 1998, 25(1): 25-27.
- [49] 刘永泉, 王文兰, 李长清, 等. 职业接触四氯乙烯作业工人血清甘油三酯和胆固醇含量的变化[J]. 中国药理学与毒理学杂志, 1997, 11(2): 136.
Liu Rongquan, Wang Wenlan, Li Changqing, et al. *Chinese Journal of Pharmacology and Toxicology*, 1997, 11(2): 136.
- [50] 张志皋, 宋岩, 王秀荣, 等. 四氯乙烯作业工人劳动卫生调查[J]. 化工劳动保护: 工业卫生与职业病分册, 1996, 17(1): 15-16.
Zhang Zhigao, Song Yan, Wang Xiurong, et al. *Chemical Labor Protection: Industrial Hygiene and Occupational Diseases Volume*, 1996, 17(1): 15-16.
- [51] 张开朱, 朱乃燕, 刘大钊, 等. 四氯乙烯作业工人血糖和胆酸含量的变化[J]. 职业医学, 1998, 25(5): 9-10.
Zhang Kaitai, Zhu Naiyan, Liu Dazhao, et al. *Occupational Medicine*, 1998, 25(5): 9-10.
- [52] International Agency for Research on Cancer. IARC monographs on the evaluation of carcinogenic risks to humans. Tetrachloroethylene, vol63 [M]. Lyon: IARC, 1995.
- [53] Edward A. Laws. 水污染导论[M]. 北京: 科学出版社, 2004: 573-603.
Laws E A. Introduction to water pollution [M]. Beijing: Science Press, 2004: 573-603.
- [54] 戴日英, 赵超英, 张志皋, 等. 车间空气中四氯乙烯卫生标准研究[J]. 职业医学, 1994, 21(6): 25-27.
Dai Riyong, Zhao Chaoying, Zhang Zhigao, et al. *Occupational Medicine*, 1994, 21(6): 25-27.
- [55] 王晓军. 四氯乙烯对小鼠的行为畸胎毒性研究[J]. 职业与健康, 1997, 13(6): 38-39.
Wang Xiaojun. *Occupation and Health*, 1997, 13(6): 38-39.
- [56] 郑琳, 蒋琳, 李玉玲, 等. 四氯乙烯对小鼠行为功能的影响[J]. 职业与健康, 1999, 15(8): 20-21.
Zheng Lin, Jiang Lin, Li Yuling, et al. *Occupation and Health*, 1999, 15(8): 20-21.
- [57] 杨秀婧, 单爱琴, 揣小明, 等. 四氯乙烯污染对小麦幼苗抗氧化酶系

- 的影响[J]. 环境污染与防治, 2008, 30(6): 17-19.
Yang Xiujing, Shan Aiqin, Chuai Xiaoming, et al. *Environmental Pollution and Control*, 2008, 30(6): 17-19.
- [58] 黄媛媛, 单爱琴, 李海花, 等. 三氯乙烯污染对植物、土壤生物学指标的影响[J]. 环境科学与技术, 2010, 33(10): 57-59.
Huang Yuanyuan, Shan Aiqin, Li Haihua, et al. *Environmental Science and Technology*, 2010, 33(10): 57-59.
- [59] 王桂燕, 周启星, 胡筱敏, 等. 四氯乙烯和对二氯苯对草鱼的联合毒性[J]. 中国环境科学, 2007, 27(3): 387-390.
Wang Guiyan, Zhou Qixing, Hu Xiaomin, et al. *China Environmental Science*, 2007, 27(3): 387-390.
- [60] Bruce I D, Desmond F L, Gerald E S, et al. Selecting among physical/chemical processes for removing synthetic organics from water[J]. *Water Environment Research*, 1993, 65(7): 827-838.
- [61] 向华, 施俭, 张青, 等. 曝气吹脱法去除水中三氯乙烯等有机污染物[J]. 净水技术, 2011, 30(5): 151-154.
Xiang Hua, Shi Jian, Zhang Qing, et al. *Water Purification Technology*, 2011, 30(5): 151-154.
- [62] 胡顺之. 三氯乙烯污染地下水的吹脱方法研究[D]. 上海: 华东理工大学, 2011.
Hu Shunzhi. Research of air sparging removing trichloroethylene polluted groundwater [D]. Shanghai: East China University of Science and Technology, 2011.
- [63] Kim J O. Gaseous TCE and PCE removal by an activated carbon biofilter[J]. *Bioprocess Engineering*, 1997, 16(6): 331-337.
- [64] Kloos H. Trichloroethylene, tetrachloroethylene, nitrates and other chemicals in well water in the Fresno-Clovis metropolitan area[J]. *Archives of Environmental Health*, 1997, 52(5): 348-354.
- [65] Vedrına D I, Dragojević D. Trichloroethylene and tetra-chloroethylene in ground waters of Zagreb, Croatia [J]. *The Science of Total Environment*, 1997, 203(3): 253-259.
- [66] Von G J, Hürlimann C, Scheringer M, et al. Reduction of occupational exposure to perchloroethylene and trichloroethylene in metal degreasing over the last 30 years: Influences of technology innovation and legislation [J]. *Journal of Exposure Analysis and Environmental Epidemiology*, 2003, 13 (5): 325-340.
- [67] Arthur T A, Robert C A, David S K. Supercritical fluid extraction of aromatic contaminants from a sandy loam soil [J]. *Environment Progress*, 1990, 9 (4): 204-210.
- [68] David L T. Pilot scale study and design of a granular activated carbon regeneration process using supercritical fluids[J]. *Environment Progress*, 1993, 12(3): 208-211.
- [69] 高文燕. 地下水中三氯乙烯污染修复技术研究进展 [J]. 内蒙古水利, 2009(5): 77.
Gao Wenyang. *Inner Mongolia Water*, 2009(5): 77.
- [70] Robert L S, Michael A U, Michelle L C, et al. Genesis and effects of particles produced during in situ chemical oxidation using permanganate[J]. *Journal of Environmental Engineering*, 2002, 128(11): 1068-1079.
- [71] 孟凡生, 王业耀, 汪春香, 等. 三氯乙烯污染地下水的原位修复技术研究及应用现状[J]. 四川环境, 2005, 24(3): 70-73.
Meng Fanzhi, Wang Yeyao, Wang Chunxiang, et al. *Sichuan Environment*, 2005, 24(3): 70-73.
- [72] 高霏, 刘菲, 陈鸿汉. 三氯乙烯污染土壤和地下水污染源区的修复研究进展[J]. 地球科学进展, 2008, 23(8): 821-829.
Gao Fei, Liu Fei, Chen Honghan. *Advances in Earth Science*, 2008, 23 (8): 821-829.
- [73] Fenton H J H. Oxidation of tartaric acid in presence of iron [J]. *Journal of Chemical Society*, 1894, 65: 889-910.
- [74] 崔英杰, 杨世迎, 王萍, 等. Fenton 原位化学氧化法修复有机污染土壤和地下水研究[J]. 化学进展, 2008, 20(7/8): 1196-1201.
Cui Yingjie, Yang Shiyong, Wang Ping, et al. *Progress in Chemistry*, 2008, 20(7/8): 1196-1201.
- [75] Teel A L, Warberg C R, Atkinson D A, et al. Comparison of mineral and soluble iron Fenton's catalysts for the treatment of trichloroethylene [J]. *Water Resource*, 2001, 35(4): 977-984.
- [76] 纪录, 张晖. 原位化学氧化法在土壤和地下水修复中的研究进展[J]. 环境污染治理技术与设备, 2003, 4(6): 37-42.
Ji Lu, Zhang Hui. *Techniques and Equipment for Environmental Pollution Control*, 2003, 4(6): 37-42.
- [77] 田璐, 杨琦, 尚海涛. 高锰酸钾降解地下水中 PCE 的研究 [J]. 环境工程学报, 2009, 3(8): 1355-1359.
Tian Lu, Yang Qi, Shang Haitao. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2009, 3(8): 1355-1359.
- [78] 曹玉彬. 高锰酸钾氧化处理三氯乙烯污染地下水实验研究 [J]. 环境科技, 2010, 23(6): 11-13.
Cao Yubin. *Environmental Science and Technology*, 2010, 23(6): 11-13.
- [79] Yan Y E, Schwartz F W. Kinetics and mechanisms for TCE oxidation by permanganate [J]. *Environmental Science and Technology*, 2000, 34(12): 2535-2541.
- [80] Schnarr M, Truax C, Farquhar G, et al. Laboratory and controlled field experiments using potassium permanganate to remediate trichloroethylene and perchloroethylene DNAPLs in porous media [J]. *Journal of Contaminant Hydrology*, 1998, 29(3): 205-224.
- [81] Eugene Y Y, Frank W S. Oxidative degradation and kinetics of chlorinated ethylenes by potassium permanganate [J]. *Journal of Contaminant Hydrology*, 1999, 37(3-4): 343-365.
- [82] Francis P D. Oxidation by UV and Ozone of organic contaminants dissolved in deionized and raw mains water [J]. *Ozone Science and Engineering*, 1987, 9(4): 369-390.
- [83] Nelson C H, Brown R A. Adapting ozonation for soil and groundwater cleanup [J]. *Chemical Engineering*, 1994, 9(1): EE18-EE24.
- [84] William H G, Joon W K. Advanced oxidation processes for treating groundwater contaminated with TCE and PCE: Laboratory studies [J]. *Journal AWWA*, 1988, 88(5): 57-63.
- [85] 周细红, 曾清如. 紫外光和光氧化剂对水中氯仿及三氯乙烯和四氯乙烯的光降解作用[J]. 湖南农业大学学报: 自然科学版, 2001, 27(2): 130-133.
Zhou Xihong, Zeng Qingru. *Journal of Hunan Agricultural University: Natural Sciences Edition*, 2001, 27(2): 130-133.
- [86] 刘勇弟, 徐寿昌. 紫外-Fenton 试剂的作用机理及在废水处理中的应用[J]. 环境化学, 1994, 13(1): 302-306.
Liu Yongdi, Xu Shouchang. *Environmental Chemistry*, 1994, 13 (1): 302-306.
- [87] Yamazaki S, Matsunaga S, Hori K. Photocatalytic degradation of trichloroethylene in water using TiO₂ pellets [J]. *Water Research*, 2001, 35(4): 1022-1028.
- [88] 米生权, 魏涛. 四氯乙烯污染现状及处理方法的研究进展[J]. 海峡预防医学杂志, 2006, 12(3): 21-23.
Mi Shengquan, Wei Tao. *Strait Journal of Preventive Medicine*, 2006, 12(3): 21-23.
- [89] Sweeny K H. American water works association research foundation [C].

- Denver: Water Reuse Symposium, 1979, 2: 1487.
- [90] Gillham R W, Stephanie F H. Enhanced degradation of halogenated aliphatics by zero-valent iron[J]. *Ground Water*, 1994, 32(6): 958-967.
- [91] 何小娟, 汤鸣皋, 沈照理, 等. Ni/Fe 双金属对 PCE 脱氯影响因素研究[J]. *地球科学-中国地质大学学报*, 2003, 28(3): 337-340.
He Xiaojuan, Tang Minggao, Shen Zhaoli, et al. *Earth Science-Journal of China University of Geosciences*, 2003, 28(3): 337-340.
- [92] 刘菲, 汤鸣皋, 何小娟, 等. 零价铁降解水中氯代烃的实验室研究[J]. *地球科学-中国地质大学学报*, 2002, 27(2): 186-188.
Liu Fei, Tang Minggao, He Xiaojuan, et al. *Earth Science-Journal of China University of Geosciences*, 2002, 27(2): 186-188.
- [93] Mallat T, Bodnar Z S, Petro J. Reduction by dissolving bimetals[J]. *Tetrahedron*, 1991, 47(3): 441-446.
- [94] Mufikian R, Fernando Q, Korte N E. A method of the rapid dechlorination of low molecular weight chlorinated hydrocarbons in water [J]. *Water Research*, 1995, 29(10): 2434-2439.
- [95] 何小娟, 汤鸣皋, 李旭东, 等. 镍/铁和铜/铁双金属降解四氯乙烯的研究[J]. *环境化学*, 2003, 22(4): 334-339.
He Xiaojuan, Tang Minggao, Li Xudong, et al. *Environmental Chemistry*, 2003, 22(4): 334-339.
- [96] Lien H I, Zhang W X. Nanoscale iron particles for complete reduction of chlorinated ethenes [J]. *Colloids and Surfaces*, 2001, 191(1-2): 97-105.
- [97] 黄园英, 刘菲, 汤鸣皋, 等. 纳米镍/铁和铜/铁双金属对四氯乙烯脱氯研究[J]. *环境科学学报*, 2007, 27(1): 80-85.
Huang Yuanying, Liu Fei, Tang Minggao, et al. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2007, 27(1): 80-85.
- [98] 黄园英, 刘菲, 汤鸣皋, 等. 纳米镍/铁对四氯乙烯快速脱氯试验[J]. *岩矿测试*, 2005, 24(2): 93-96.
Huang Yuanying, Liu Fei, Tang Minggao, et al. *Rock and Mineral Analysis*, 2005, 24(2): 93-96.
- [99] Elliott D W, Zhang W X. Field assessment of nanoscale bimetallic particles for groundwater treatment[J]. *Environmental Science Technology*, 2001, 39(24): 4922-4926.
- [100] 杨琦, 尚海涛, 李惠娣. 四氯乙烯(PCE)厌氧生物修复的国外研究进展[J]. *中国沼气*, 2006, 24(2): 16-20.
Yang Qi, Shang Haitao, Li Huidi. *Chian Biogas*, 2006, 24(2): 16-20.
- [101] 李静, 张贾耀, 夏盛林, 等. 污染地下水的生物修复技术 [J]. *农业环境保护*, 1997, 16(6): 283-285.
Li Jing, Zhang Jiayao, Xia Shenglin, et al. *Agriculture Environmental Protection*, 1997, 16(6): 283-285.
- [102] 张锡辉, Bajpai R. 氯代有机溶剂共降解研究进展[J]. *环境污染治理技术与设备*, 2000, 1(1): 72-83.
Zhang Xihui, Bajpai R. *Technique and Equipment for Environmental Pollution Control*, 2000, 1(1): 72-83.
- [103] Wilson J T, Wilson B H. Biotransformation of trichloroethylene in soil [J]. *Applied Environmental Microbiology*, 1985, 49(1): 242-243.
- [104] 卢晓霞, 李广贺, 张旭, 等. 厌氧条件下有机氯代烃污染物的氧化降解[J]. *环境科学*, 2002, 23(4): 37-41.
Lu Xiaoxia, Li Guanghe, Zhang Xu, et al. *Environmental Science*, 2002, 23(4): 37-41.
- [105] Deane L C, Anthony V P, Stephen E H, et al. Trichloroethylene biodegradation by a methane-oxidizing bacterium [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 1998, 56: 951-956.
- [106] Munalata-Marr J, Matheson V G, Forney L J, et al. Long-term biodegradation of trichloroethylene influenced by bioaugmentation and dissolved oxygen in aquifer microcosms [J]. *Environmental Science and Technology*, 1997, 31(3): 786-791.
- [107] Robinson K G, Pieters J G, et al. Microbial oxidation and bioluminescence response for toluene and trichloroethylene[J]. *Water Science and Technology*. 1998, 38(7): 1-8.
- [108] Brar S K, Gupta S K. Biodegradation of trichloroethylene in a rotation biological contactor [J]. *Water Research*, 2000, 34(17): 7-14.
- [109] 陈翠柏, 杨琦, 尚海涛, 等. 三氯乙烯好氧生物降解的初步研究[J]. *环境污染治理技术与设备*, 2004, 5(11): 35-37.
Chen Cuibai, Yang Qi, Shang Haitao, et al. *Technique and Equipment for Environmental Pollution Control*, 2004, 5(11): 35-37.
- [110] 陈翠柏, 杨琦, 沈照理. 地下水三氯乙烯(TCE)生物修复的研究进展[J]. *华东地质学院学报*, 2003, 26(1): 10-14.
Chen Cuibai, Yang Qi, Shen Zhaoli. *Journal of East China Geological Institute*, 2003, 26(1): 10-14.
- [111] 杨琦, 席宏波, 尚海涛, 等. 四氯乙烯的生物吸附和厌氧生物降解研究[J]. *现代地质*, 2007, 21(1): 170-174.
Yang Qi, Xi Hongbo, Shang Haitao, et al. *Geoscience*, 2007, 21(1): 170-174.
- [112] 蓝俊康. 植物修复技术在污染治理中的应用现状[J]. *地质灾害与环境保护*, 2004, 15(1): 46-52.
Lan Junkang. *Journal of Geological Hazards and Environmental Preservation*, 2004, 15(1): 46-52.
- [113] Strycharz S, Newman L. Use of native plants for remediation of trichloroethylene: 1.deciduous trees [J]. *International Journal of Phytoremediation*, 2009, 11(2): 150-170.

(责任编辑 岳臣)

《科技导报》“研究论文”栏目征稿

“研究论文”栏目专门发表自然科学、工程技术领域具有创新性的研究论文,要求学术价值显著、实验数据完整、具有原始性和创造性,同时应重点突出、文字精炼、引证及数据准确、图表清晰,并附中、英文摘要以及作者姓名、所在单位、通信地址、关键词等信息。在线投稿:www.kjdb.org。