

DOI:10.3969/j.issn.1004-6933.2012.05.014

环保型水处理药剂应用现状及发展趋势

姜 琦¹, 辛丽花², 田秉晖²

(1. 环境保护部水专项实施管理办公室, 北京 100029;
2. 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)

摘要:分析我国水处理药剂发展面临的机遇, 阐述环保型水处理药剂的应用现状, 认为水处理药剂在混凝理论不断创新的坚实基础上, 将向绿色水处理药剂、多元复合水处理药剂和纳米材料、微生物絮凝剂等新型高效水处理药剂的方向高速发展。

关键词:水处理药剂; 应用现状; 发展趋势

中图分类号: X703.5 文献标识码: A 文章编号: 1004-6933(2012)05-0066-05

Application and development trend of environmentally friendly water treatment reagents

JIANG Qi¹, XIN Li-hua², TIAN Bing-hui²

(1. National Major Science and Technology Program Management Office for Water Pollution Control and Treatment, Beijing 100029, China;

2. State Key Laboratory of Environmental Aquatic Chemistry, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China)

Abstract: This article analyzes the development opportunities for water treatment reagents, expounds on the application status of environmentally friendly water treatment reagents, and points out that the water treatment reagents in the future will be green water treatment reagents, multiple compound water treatment reagents, and highly effective water treatment reagents made of nano materials and microbial materials, based on innovative coagulation theories.

Key words: water treatment reagent; application status; development trend

目前,我国面临着水资源短缺、饮水安全得不到保障、水污染形势依然严峻等多重难题,影响了社会的健康发展和全面建设小康社会目标的实现。因此,节约用水、提高废水的处理和再生利用率十分重要,而大力发展水处理药剂起着至关重要的作用。

水处理药剂是处理工业用水、生活用水和废水过程中使用的化学药剂,主要包括缓蚀剂、混凝剂和絮凝剂、杀菌剂、阻垢剂、pH 值调节剂和软化剂、含氟化合物、活性炭、消泡剂和其他性能化学品,其主要作用是控制水垢、污泥的形成,减少泡沫,减少对与水接触材料的腐蚀,除去水中悬浮固体和有毒物

质,产生除臭、脱色、软化和稳定水质等效果。

1 我国水处理药剂发展面临的机遇

文献[1]指出,当前我国环境状况是“局部有所改善、总体尚未遏制、形势依然严峻、压力继续加大”,中国的环境保护发展道路要避免走发达国家走过的先污染后治理、牺牲环境换取经济增长的老路,要积极探索代价小、效益好、排放低、可持续的中国环境保护新道路。我国当前的环境保护形势和对环境保护新道路的探索为水处理药剂的发展带来了重大的机遇。

基金项目:国家高技术研究发展计划(863)项目(2008AA06Z301);国家水体污染控制与治理科技重大专项(2009ZX07212-005)
作者简介:姜琦(1971—),女,硕士,主要从事工业水处理方面的技术和管理工。E-mail:mjiangqi@sina.com

1.1 节能减排、清洁生产和水循环利用的需求

水资源贫乏且重复利用率低一直是我国面临的一大难题,尤其是近年来随着国民经济的迅速发展,用水量急剧上升,水污染加剧,水资源短缺问题日益突出。据有关资料显示,2010 年,我国工业用水量约 1400 亿 m³,其中约 70% 的工业用水为工业冷却用水。为了节约冷却水,工业上普遍采用循环冷却水系统,使冷却水重复使用。但在循环冷却过程中,由于溶解盐类的浓缩及大量溶解氧、尘土、孢子和细菌,循环水质恶化。此外,冷却水在不断循环使用过程中,使循环水系统容易产生腐蚀、结垢、菌藻以及微生物黏泥等问题^[2]。为了有效地控制上述危害,需要对工业冷却水进行高浊度、高硬度、高碱度处理,而利用水处理药剂处理冷却水是目前广泛使用的方法。

加强城镇污水处理,提高再生水利用率也是解决水资源短缺问题的重要途径。截至 2010 年 6 月,全国设市城市、县及部分重点建制镇累计建成城镇污水处理厂 2 389 座,总污水处理能力达到 1.15 亿 m³/d,分别是“十五”期末的 3 倍和 2 倍。“十二五”期间,全国将至少新建 1 184 座城镇污水处理厂,日处理能力达 4 570 万 t。

建设资源节约型和环境友好型社会,要提高工业用水循环利用,提升城镇污水处理能力,而这将极大带动水处理药剂市场的发展。

1.2 环境标准不断提高带来的新需求

为改善我国流域水环境质量,必须根本扭转“有河皆干、有水皆污”、湖泊富营养化严重、水华暴发等局面。近年来,我国重点污染防治区的地方政府相继大幅提高了地方水污染排放标准。“十二五”期间,滇池、巢湖、太湖等重点流域城镇污水处理厂进一步提高脱氮除磷水平。环境标准的不断提高为新型环保水处理药剂的研发指明了方向,为水处理药剂的再次飞跃提供了新的契机。

1.3 水环境质量改善的需求

《国家环境保护“十二五”规划》提出,“十二五”期间,将在控制 COD 的基础上,将 NH₃-N 作为水污染物总量控制的约束性指标,这对流域水污染防治提出更高的要求。太湖、滇池和巢湖等重点流域在加强对主要污染物排放量进行控制的同时,降低入湖 TN、TP 等污染负荷,改善流域水质。但目前我国工业中常用的缓释阻垢剂仍以磷系为主,主要品种有:聚磷酸盐、磷酸酯、有机多元膦酸等,全国每年用于缓释阻垢剂生产的磷有 10 万 t。这些磷化合物最终进入水体,造成湖泊水体富营养化,水华暴发,发生海水赤潮等,严重破坏生态环境^[3]。因此,

研究开发新型的低磷或无磷、无毒、可生物降解的绿色环保水处理剂势在必行。

1.4 国家水体污染控制与治理科技重大专项的实施带来巨大机遇

根据我国流域水环境质量管理演变的规律和研究成果,现阶段我国水环境管理正经历从总量控制向流域水质目标管理全面转变。国家水体污染控制与治理科技重大专项的实施,将构建我国流域水污染控制与治理技术体系和流域水环境综合管理技术体系,这为新型高效环保水处理药剂的研发提供了前所未有的科技支撑条件,为水处理药剂发展的再次飞跃搭建了科技平台。

2 环保型水处理药剂的应用现状

2.1 环保型缓蚀剂

环保型缓蚀剂主要包括钼酸盐类缓蚀剂、硅酸盐类缓蚀剂、钨系缓蚀剂、天然型缓蚀剂、微生物缓蚀剂等。缓蚀剂技术作为一种经济、有效而通用性强的金属防腐蚀方法,已在石油、化工、电力、能源等工业部门获得广泛的应用。自从 1860 年英国宣布了第一个缓蚀剂专利,缓蚀剂经历了从无机共聚物到有机共聚物,从高磷、低磷到无磷,由单一使用到复配使用的发展历程。为了减轻缓蚀剂对环境的危害,国内外对环保型缓蚀剂进行了广泛的研究^[46]。李国敏等^[4]研究了松香胺类 RA 缓蚀剂对碳钢在高压 CO₂ 体系中缓蚀机理,发现 RA 缓蚀剂对 N80 钢在高压 CO₂ 体系中有良好的缓蚀作用,缓蚀效应是负催化效应,在碳钢表面的吸附服从 Langmuir 吸附等温式,电位正移到脱附电位以上是 RA 阳极脱附的主要原因,这时它使表面电容 Cd 显著增加,传递电阻明显减小。祝剑英等^[5]研究了松香胺咪唑啉对 N80 钢 CO₂ 腐蚀的抑制作用,结果表明,松香胺咪唑啉对 N80 钢在 CO₂ 饱和模拟水溶液中具有有良好的缓蚀作用,属于混合型缓蚀剂。

2.2 环保型阻垢剂

环保型阻垢剂主要包括天然阻垢剂、有机磷酸酯类阻垢剂、有机膦酸类阻垢剂、马来酸酐类共聚物、烷基环氧羧酸类阻垢剂、聚环氧琥珀酸(PESA)、聚天冬氨酸(PASP)。阻垢剂通过对水中金属离子的螯合、对微晶的吸附分散和晶格畸变等作用,阻止水中致垢盐类在设备表面沉积。阻垢剂正向应用药剂的复合化(既能充分发挥单一药剂突出的性能,又能弥补单一药剂结构上的缺憾,可适当降低有效药剂的含磷量),单一药剂的无磷或低磷化、非氮和可生物降解的方向发展。王新事等^[7]研究了以有机磷酸酯为主剂,复配多种表面活性剂的 HZ-1 阻

垢剂,既可阻止碳酸盐垢,又可阻止硫酸盐垢,且在小试和中试中,阻垢剂质量浓度为 20 mg/L 时,阻垢率高达 90% 以上;刘国华等^[8]进行了聚天冬氨酸与钨酸盐的复配研究,筛选出了无磷的钨系阻垢剂,阻垢率高达 91.67%。

2.3 环保型杀菌剂

环保型杀菌剂主要包括二氧化氯、溴类杀菌剂等氧化性杀菌剂,异噻唑啉酮、戊二醛戊二醛等非氧化性杀菌剂,季铵盐,复合非氧化性杀菌剂等。水处理杀菌剂是能抑制水中菌藻和微生物的滋长,防止形成微生物粘泥而对系统造成危害的化学药品。杀菌剂正向无氯或低氯化、安全低残留、低至突变、复合效率高等的方向发展。李建芬^[9]研究了环保型杀菌剂二溴次氨基两酰胺 (DBNPA) 的绿色合成,找到了最佳反应条件,同时控制了污染问题;陈霞等^[10]研究了自制的二溴海因水溶液杀菌剂 (FDBH) 对油田回注水中 SRB 的杀菌效果,在 40℃、作用时间 1 h 的条件下,50 mg/L 的 FDBH 对 SRB 的杀灭率达 100%,杀菌效果与双季铵盐相当,而优于 1227 杀菌剂。

2.4 环保型絮凝剂

环保型絮凝剂主要包括聚合氯化铝、聚合硫酸铁^[11]、聚合硅酸铝等无机高分子^[12],聚丙烯酰胺、聚胺、聚合季铵盐等有机高分子絮凝剂,微生物絮凝剂^[13-14],多元复合絮凝剂^[15-16]等。絮凝剂主要包括无机絮凝剂、有机絮凝剂和微生物絮凝剂等,经历了原始天然产物絮凝剂→传统无机絮凝剂→无机高分子絮凝剂→合成有机高分子絮凝剂→天然有机高分子絮凝剂→微生物絮凝剂的发展历程。万俊杰等^[17]研究出 A3 菌产絮凝剂处理靛蓝废水在最佳公益条件下的脱色率达 80%;贾大伟等^[16]研究了 3 种复合絮凝剂的处理效果,其中,PAC+PDADMAC 复合投加对册田水库水的浊度、色度、TOC 具有很好的去除效果,去除率分别高达 93%,90% 和 71%。

3 新型环保型水处理药剂的发展方向

创新是水处理药剂可持续发展的原动力,绿色化是未来水处理药剂发展的方向,开发研制适合我国环境保护要求的低磷、非氮、可生物降解、无毒无害、低成本的绿色水处理药剂,将成为我国未来水处理药剂发展的方向。

3.1 有机高分子絮凝剂及多元复合絮凝剂

近代混凝理论创新可划分为 3 个主要发展阶段:继早期 Schuldz-Hardy 规则根据经典胶体化学的 Guoy-Chapman 双电层模型建立的 DLVO 理论、网扫絮凝模式 (sweep coagulation)、吸附架桥模型 (bridge model)。混凝理论认为混凝过程中主要存在压缩双

电层、吸附电中和、黏结架桥和卷扫絮凝 4 种机理,这为絮凝剂由传统无机絮凝剂发展为环保型无机高分子絮凝剂奠定了理论基础。不同理论所对应的药剂分类详见表 1。

表 1 混凝过程中不同理论所对应的药剂分类

理 论	药剂分类	药剂名称
压缩双电层	无机	铝盐、铁盐
吸附电中和	无机	铝、铁
黏结架桥	有机高分子	聚丙烯酰胺、聚胺、聚合季铵盐
卷扫絮凝	无机高分子	聚合氯化铝、聚合硫酸铁、聚合硅酸铝

近年来,随着有机高分子絮凝剂的吸附架桥、吸附电中和、聚合物-颗粒物表面络合物形成的耗散絮凝 (depletion flocculation) 等机理的形成,以及对聚电解质络合絮凝机理和吸附胶束絮凝等难降解有机物强化絮凝机理的研究,为有机高分子絮凝剂及多元复合絮凝剂的研制和应用提供了理论基础,一批新型高效环保型有机高分子絮凝剂及多元复合絮凝剂得以研制,实现了水处理药剂的新突破。

3.2 绿色水处理药剂

1992 年,里约热内卢联合国环境与发展大会提出了“绿色科技”的概念。1995 年 3 月 16 日,美国总统克林顿宣布设立“总统绿色化学挑战奖”,首先提出了“绿色化学”的概念。随后,Anastas 等^[18]提出了绿色化学的 12 条基本原则,即①防止废物的生成,比让其生成后再处理更好;②设计的合成方法应使生产过程中所采用的原料最大量地进入产品中;③设计的合成方法中,原料、中间产物和最终产品均应尽可能对人体健康和环境无毒、无害 (包括极小毒性和无毒);④设计的化工产品必须具有高效的功能,同时也要减少其毒性;⑤应尽可能避免使用溶剂、分离试剂等助剂,如不可避免,也要选用无毒无害的助剂;⑥设计的合成方法应适应常温常压;⑦在技术可行和经济合理的前提下,采用可再生资源代替消耗性资源;⑧尽量不用不必要的衍生物 (derivatization),如限制性基团、保护/去保护作用、临时调变物理/化学工艺;⑨合成方法中要采用比使用化学计量 (stoichiometric) 助剂更优越的高选择性催化剂;⑩化工产品要设计成其使用功能终结后不会永存于环境中,而能分解成可降解的无害产物;⑪进一步研究分析方法,对危险物质实行生成前在线监测和控制;⑫保证化学生产过程中产生的物质所导致的化学意外事故 (包括渗透、爆炸、火灾等) 的危险最小。

绿色水处理药剂具有上述绿色化学品的特点,即制造过程是清洁的,使用过程中对人体健康和环境没有毒性,并可生物降解为对环境无害的生物处

理药剂^[19]。绿色水处理药剂的发展经历了由天然高分子绿色水处理剂到人工合成型高分子绿色水处理药剂的过程。常见的天然高分子绿色水处理剂有木质素、淀粉、丹宁及衍生物等。人工合成型高分子绿色水处理药剂主要有烷基环氧羧酸盐、聚天冬氨酸和聚环氧琥珀酸类。研制具有高阻垢性能、良好生物降解性、无毒、无磷或低磷的新型绿色水处理药剂是 21 世纪水处理药剂发展的方向。

3.3 多元复合水处理药剂

多元复合水处理药剂是一类具有一剂多效的水处理药剂,如聚硅酸与铝盐复合絮凝剂,就是一类新型无机高分子混凝剂,是在活化硅酸(即聚硅酸)及铝盐混凝剂的基础上发展起来的聚硅酸与铝盐的复合产物,同时具有电中和作用和吸附架桥作用。该类混凝剂具有混凝效果好、价格便宜、处理后水中的残留铝量低等优点。又如聚卤代醇噻啉季铵盐絮凝剂,具有絮凝能力强的特点,特别适用于选矿作业中矿石与水的分离,同时还具有一定的杀菌和缓释作用。多元复合水处理药剂一剂多效的特点,吸引越来越多的研究者从事其制备工艺的研究及应用开发^[15-16]。张春菊等^[15]采用 CaO 溶液和 FeCl₃ 溶液的复合絮凝剂处理白钨选矿废水,能有效去除废水中的水玻璃、重金属离子等杂质,且出水水质良好;金一萍^[20]采用聚硅酸铝铁和聚丙烯酰胺(PAFSS-PAM)共同处理造纸废水,达到了较好的絮凝效果,其中,浊度去除率达 96.2%,色度去除率达 87.6%,COD 去除率达 79.3%;谢娟等^[21]研究了采用聚硅酸铝铁絮凝剂处理造纸黑液的效果;在最佳投加量下,COD、木质素和色度的去除率分别达到 62.4%,90%和 72%;董君英等^[22]进行了联合投加絮凝剂 PFS 和铁粉对含铅废水的吸附研究,主要是通过铁粉电化学反应的氧化还原以及絮凝剂 PFS 的絮凝作用的综合效应使重金属得以从废水中除去。

3.4 纳米材料、微生物絮凝剂等新型高效水处理药剂

纳米材料具有小尺寸效应、表面效应、量子尺寸效应、宏观量子隧道效应等,作为一种新型高效水处理药剂而被寄予厚望。目前,采用纳米 TiO₂ 光催化降解毒害有机物^[23-24]、碳纳米管改性去除重金属等的研究已取得突破性进展,为纳米材料水处理药剂的研发开创了先例。蔡河山等^[23]进行了纳米 TiO₂ 光催化剂可见光响应的改性的研究;刘泊良等^[25]采用次氯酸钠氧化法研究了改性碳纳米管对水中铜离子的去除效果,结果表明,改性碳纳米管对水中铜离子的去除效果明显高于未改性的碳纳米管。

微生物絮凝剂^[26]是一种无毒的生物高分子化

合物,包括机能蛋白质或机能多糖类物质,具有生物降解的独特性质。与其他絮凝剂相比,微生物絮凝剂具有易于固液分离、形成沉淀物少、易被微生物降解、无毒无害、实用性强等优点。目前,对微生物絮凝剂的研究^[13-14]比较多,而且也有一些研究者^[27]将无机-有机高分子絮凝剂复配使用,取得了很好的效果。武春艳等^[28]采用复合型微生物絮凝剂处理六硝基芪废水,在最佳絮凝条件下,六硝基芪生产废水的色度、浊度、COD 去除率分别为 93.33%、51.13%、73.08%;郭旭辉等^[29]采用筛选出的 1 株产絮凝剂的棉生枝孢菌株处理废水,絮凝试验显示,该菌对废水中悬浮物去除能力强,对色度类废水脱色能力也达 50%。

总之,在混凝理论不断创新的坚实基础上,水处理药剂将向绿色水处理药剂、多元复合水处理药剂和纳米材料、微生物絮凝剂等新型高效水处理药剂的方向高速发展。

参考文献:

[1] 中国工程院,环境保护部. 中国环境宏观战略研究[R]. 北京:中国环境科学出版社,2012.

[2] 吴兵,徐瑞银,何绪文,等. 用于循环冷却水处理的新型阻垢剂的合成及性能研究[J]. 环境工程,2003,21(5):13-15.

[3] 吴宇峰,曾凡亮. 绿色化学品与无磷阻垢缓释剂[J]. 化工时刊,2005,19(7):44-48.

[4] 李国敏,李爱魁,郭兴莲,等. 松香胺类 RA 缓蚀剂对碳钢在高压 CO₂ 体系中缓蚀机理研究[J]. 腐蚀科学与防护技术,2004,16(3):125-129.

[5] 祝英剑,牛聪,刘春波,等. 环保型缓蚀剂松香胺咪唑啉对 N80 钢 CO₂ 腐蚀的抑制作用[J]. 腐蚀与防护,2010,31(S1):128-130.

[6] MINHA A. The effect aqueous extracts of some leaves & fruitpeels on the corrosion of steel in acid[J]. Corrosion Prevention & Control,1999(4):32-38.

[7] 王新事,薛爱琴,郑海英,等. 阻垢剂 HZ-1 的研制与应用[J]. 油田化学,2001,18(3):244-245.

[8] 刘国华,奚旦立,李燕,等. 环保型无磷复合水处理剂的研制[J]. 腐蚀与保护,2001,24(11):480-482.

[9] 李建芬. 环保型杀菌剂(DBNPA)的绿色合成[J]. 化工时刊,2003,17(6):25-27.

[10] 陈霞,秦娟,崔群,等. 环保型杀菌剂对油田回注水中 SRB 的杀灭性能[J]. 油气田地地面工程,2008,27(11):16-17.

[11] 刘晨俊,过世东. 絮凝法处理斑点叉尾鱼回鱼宰杀废水的研究[J]. 水资源保护,2007,23(5):44-46.

[12] 高秀美,衣守志,王青臣. 聚硅酸氯化铝铁絮凝剂的合成及其特性[J]. 水资源保护,2007,23(3):77-79.

[13] 张永奎,周礼,董丹,等. 微生物絮凝剂评价体系实验研

- 究[J]. 水资源保护,2007,23(2):81-83.
- [14] 罗德芳,邵孝侯. 微生物絮凝剂及其在水处理中的应用[J]. 水资源保护,2009,25(S1):130-133.
- [15] 张春菊,邱廷省,匡敬忠,等. 白钨选矿废水的处理工艺及回用技术研究[J]. 水资源保护,2009,25(S1):137-139.
- [16] 贾大伟,张国珍,田秉晖. 复合絮凝剂去除册田水库污染物实验[J]. 水资源保护,2011,27(3):58-60.
- [17] 万俊杰,梁耀开,邓毛程. A3 菌产絮凝剂培养动力学及靛蓝废水脱色研究[J]. 水资源保护,2011,27(2):67-69.
- [18] ANASTAS P T, WARNER J C. Green chemistry: theory and practice [M]. New York: Oxford University Press, 1998.
- [19] 朱洪涛. 绿色水处理剂的研究进展[J]. 工业安全与环保,2009,35(6):26-27.
- [20] 金一萍. PAFSS-PAM 复合絮凝剂处理造纸废液的研究[J]. 安徽农业科学,2008,36(23):10159-10160.
- [21] 谢娟,王新强. 聚硅酸铝铁絮凝剂处理造纸黑液研究[J]. 工业用水与废水,2005,36(4):24-28.
- [22] 董君英,李丽峰,黄灵芝. 絮凝剂 PFS 和铁粉联合投加对含铅废水的吸附研究[J]. 安徽农业科学,2007,35(33):10804-10805.
- [23] 蔡河山,刘国光,吕文英. 纳米 TiO_2 光催化剂可见光响应的改性研究[J]. 水资源保护,2008,24(2):86-88.
- [24] 胡涛,吴洁,何其中. 纳米 TiO_2 光催化在废水治理中的研究与应用[J]. 水资源保护,2007,23(4):77-81.
- [25] 刘泊良,张玉军,王蒲芳,等. 改性碳纳米管对水中铜离子的去除作用[J]. 应用化工,2011,40(1):68-70.
- [26] 韩晶,张小燕,余中. 我国水处理剂的研究与应用现状展望[J]. 精细石油化工,2001(3):38-42.
- [27] 葛胜祥,尹先清. 油田水处理药剂研究进展[J]. 内蒙古石油化工,2007(12):154-156.
- [28] 武春艳,柴涛,林凡聪,等. 降解六硝基芪废水用复合型微生物絮凝剂产生菌的筛选及应用[J]. 水处理技术,2011,37(1):58-61.
- [29] 郭旭辉,梁宗琦,周文霞. 1 株产絮凝剂的棉生枝孢菌株的筛选及絮凝效果研究[J]. 安徽农业科学,2010,38(7):3336-3337.

(收稿日期:2011-08-01 编辑:彭桃英)

(上接第 42 页)

- [2] 张薇,蔺文静,王贵玲. 基于遥感反演河套平原区域蒸散发量研究[J]. 遥感应用,2009(6):28-31.
- [3] 康燕霞,蔡焕杰,王健,等. 夏日玉米蒸散发量计算方法的实验研究[J]. 干旱地区农业研究,2006,24(2):10-15.
- [4] LI Fu-qin, LYONS T J. Estimation of regional evapotranspiration through remote sensing[J]. Journal of Applied Meteorology,1999,38:1644-1654.
- [5] 张晓涛. 区域蒸发蒸腾量的遥感估算:以民勤绿洲为例[D]. 陕西:西北农林科技大学,2006.
- [6] JACKSON R D, REGINATO R J, IDSO S B. Wheat canopy temperature: a practical requirements [J]. Water Resour Res,1997,13(3):651-656.
- [7] SEGUIN B, ITIER B. Using midday surface temperature to estimate daily evapor IR data[J]. International Journal of Remote sensing,1983(4):371-383.
- [8] HURTADO E, CASELLES V, ARTIGAO M. Estimating corn evapotranspiration from N Albacetearea [J]. International Journal of Remote Sensing,1995(10):202-207.
- [9] 天津市地方志编修委员会办公室,天津市蓟县盘山志编修委员会. 天津市盘山志[M]. 天津:天津社会科学院出版社,2006.
- [10] 蓟县志编修委员会. 蓟县志[M]. 天津:南开大学出版社,天津社会科学院出版社,1999.
- [11] 邱庆伦,赵鸿燕,郭剑,等. 遥感植被指数在农业生态环境监测中的应用[J]. 农机化研究,2004(7):215-217.
- [12] 马广杰. 天津蓟县山前地区采砂坑对生态环境影响调

查研究[D]. 北京:中国地质大学,2007.

- [13] 张连会,王茂悦,朱小兵,等. 蓟县地下水资源综合利用问题研究[J]. 中国水运,2009,9(5):35-36.
- [14] 李学美,赵子军,崔亚莉,等. 盘山山前地下水与矿泉水污染成因分析[J]. 水文地质工程地质,2008(1):112-116.

(收稿日期:2011-11-28 编辑:徐娟)

