

土壤及地下水有机污染原位电动力学修复技术进展

谢丽娅¹, 朱 亮², 段祥宝³

(1. 山东电力工程咨询院有限公司, 山东 济南 250013; 2. 河海大学环境科学与工程学院, 江苏 南京 210098; 3. 南京水利科学研究所, 江苏 南京 210029)

摘要 综述了土壤-地下水系统中有机物污染的原位电动力学修复技术的研究与应用进展。原位电动力学修复技术利用电渗析、电迁移和电泳使土壤孔隙中的水和荷电离子或粒子发生迁移运动。土壤 pH、土壤类型、电流和电压以及电极性质等因素影响电动修复效果。大量研究表明, 原位电动力学修复技术能够有效地去除土壤-地下水系统中的有机污染物, 是一门具有发展潜力的有机物污染土壤修复技术。

关键词 土壤-地下水; 有机物污染; 电动力学修复技术

中图分类号: X522 文献标识码: A 文章编号: 1004-693X(2009)04-0023-05

Advances in in-situ electrochemistry-kinetic remediation technique for organic pollutants in soil-groundwater

XIE Li-ya¹, ZHU Liang², DUAN Xiang-bao³

(1. Shandong Electric Power Engineering Consulting Institute Co. Ltd, Jinan 250013, China; 2. College of Environmental Science and Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 3. Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China)

Abstract: Advances in the in-situ electrochemistry-kinetic remediation technique for organic pollutants in the soil-groundwater system are summarized. The in-situ electrochemistry-kinetic remediation technique is based on the principle that the water and charged ions and particles in the soil pores are moved by electro dialysis, electromigration and electrophoresis. The effectiveness of electrochemistry-kinetic remediation can be affected by the factors of the pH value of the soil, soil type, electric current, voltage and electrode characteristics. The large amount of research results show that the in-situ electrochemistry-kinetic remediation technique can remove the organic pollutants in the soil-groundwater system effectively. It is a remediation technique for organic polluted soil with great development potential.

Key words: soil-groundwater; organic pollution; electrochemistry-kinetic remediation technique

由于工农业生产的污染和人类活动强度的不断增加, 大量化肥、农药的施用, 石化产品的泄漏及故障性排放, 有毒、有害固体废物填埋引起的有毒物质泄漏, 均造成土壤污染面积扩大, 污染程度加深。同时, 由于雨水的淋滤和地下水位的波动, 使有机污染物进入地下水体造成次生污染。大部分有机污染物具有低水溶性、半挥发性和难降解性、污染范围大、持续时间长等特点。因此, 20 世纪 90 年代以来, 有机污染土壤及地下水的修复问题在国际上的重视程度已经超过重金属。寻找一种既能经济、有效、快速

去除土壤及地下水中的有机污染物, 又不破坏生态环境的修复技术成为国际环境科学与工程热点问题之一。

针对土壤和地下水有机污染的现状, 人们已经开发了多种修复技术, 其中包括原位生物修复、物理修复、化学修复, 但这几种方法都有一定的适用范围。例如, 微生物对有机污染物的自然净化速度很慢, 受污染种类限制; 物理修复受土壤异质性、渗透性等因素的影响; 化学修复可能产生毒性更大的副产物。原位电动力学修复技术综合了土壤化学、

环境化学、电化学和水分析化学等学科,具有环境相容性、高选择性、投资低、效益好、适于自动化控制等特点,成为一种具有很大发展潜力的进行有机污染土壤及地下水原位修复的新兴绿色修复技术,受到人们广泛的关注。本文分析了原位电动力学修复技术的优势及影响土壤-地下水系统中有机污染修复的因素,介绍了该技术的基本原理、工程应用及国内外研究现状。

1 原位电动力学修复的概念及优势

原位电动力学修复技术的基本原理与电池类似,是将电极插入受污染土壤和地下水区域,施加直流电压形成电场梯度,利用直流电场产生的电渗析、电迁移和电泳等电动力学效应,使土壤孔隙水中的离子和颗粒物沿电力场方向定向移动,迁移至设定的处理区再进行集中处理^[1]。电迁移指带电离子或络合离子在土壤溶液中向带相反电荷电极方向的运动。电迁移速度与土壤-水体系统中电流的大小和离子电荷数等有关,与土壤孔隙大小及土壤导水性无关,在细粒和粗粒土壤中都能发生。电渗析指土壤微孔中的液体在电场作用下,由于其带电双电层与电场的作用而做相对于带电土壤表层的移动。由于土壤孔隙表面带负电荷,引起孔隙水向阴极流动,高水分土壤中电渗析较明显,在水分较少的沙土中可能消失。电泳指带电粒子或胶体相对于稳定液体的运动。

对于不同的土壤介质中存在的不同污染物,其主导作用机制是不同的^[2]。由于溶于地下水中的离子型污染物同时受电渗析和电迁移的作用,其实际迁移速度等于这两种速度的矢量和^[3],但主要通过电迁移迁移和去除;对非离子态污染物,不受电迁移影响,电渗析占主导作用^[4],牢固地吸附在可移动颗粒上的污染物可通过电泳方式去除,但由于电动力学修复过程中带电土壤颗粒的移动性小,电泳作用常常可以忽略。

原位电动力学修复技术是利用电动力学性质对环境进行修复的新技术,非常适合作为一种现场修复技术,安装和操作简单,既可用于饱和土壤水层,也可用于含气层土壤,不受深度限制。由于水力传导性问题,传统修复技术的应用受到限制。而原位电动力学修复技术可以处理其他方法不能处理的低渗透性黏土、淤泥土壤或异质土壤的修复,适于处理多相不均匀介质和粒径不同的土壤,且后处理方便、二次污染少,克服了传统技术严重影响土壤的结构和地下的生态环境,以及现场生物修复过程非常缓慢、效率低等缺点,而且投资比较少,快速有效^[5]。

2 土壤及地下水原位电动力学修复的要素

电动力学修复技术虽然原理比较简单,但是其中涉及的物理和化学过程以及土壤组分的性质却使问题变得非常复杂。污染物的迁移量和迁移速度受污染物浓度、土壤粒径、含水量、污染物离子的活性和电流强度的影响,此外,还与土壤孔隙水的界面化学性质及导水率有关^[6]。

2.1 pH 值

电动力学技术的主要不足之处是,阴阳极电解液电解后引起土壤 pH 值的变化以及实际工程治理成本高等。土壤中的电极施加直流电后,电极表面主要发生电解反应,阳极电解产生氢气和氢氧根离子,阴极电解产生氢离子和氧气。在电场作用下, H^+ 和 OH^- 通过电迁移、电渗析、扩散、水平对流等方式向阴阳两极移动,在两者相遇区域产生 pH 值突变,形成酸性和碱性区域。pH 值控制着土壤溶液中离子的吸附与解吸、沉淀与溶解等,而且酸度对电渗析速度有明显的影响,还可能改变土壤表面电动电位(Zeta 电位)。对高岭土而言,在靠近阳极区,Zeta 电位升高至 10 mV,电渗析减小甚至方向相反,必须增大电压以保持一定的电渗析方向,从而能耗加大,成本增加。在靠近阴极区,Zeta 电位降低至 -54 mV,电渗析增大,这种现象导致了土壤中形成不均匀的流线,甚至是流量的中断,对土壤修复效果造成负面影响^[7]。所以如何控制土壤 pH 值是电动修复技术的关键。

针对不同类型土壤和污染物的增强修复技术,可以有效地控制电极附近 pH 值和土壤水分的变化,增加系统运行稳定性的方法主要有酸碱中和法、阳离子选择膜法、电渗析法、络合剂法、表面活性剂法、氧化-还原法、EK-生物联用和 Lasagna™ 法^[8]。增强技术的发展克服了不同污染物和土壤对电动修复的限制,拓展了电动力学技术在土壤修复中的应用。

2.2 土壤类型

土壤的性质,包括吸附、离子交换、缓冲能力等与土壤的类型有关,是影响污染物的迁移速度及去除效率的主要因素。细颗粒的土壤表面,土壤与污染物之间的相互作用非常剧烈。钠基蒙脱土吸附量最大,高岭土次之,冰碛土最小^[9]。Livermore 国家实验室的试验研究表明,非水溶性液态稠密有机物(DNAPLs)的处理效果经常会发生系统阻塞。高水分、高饱和度、高阳离子交换容量、高黏性、低渗透性、低氧化还原电位和低反应活性的土壤适合原位电动力学修复技术。这类土壤中污染物的迁移速

率非常低,使用常规修复方法的修复效果差,而电动技术有效促进了污染物的迁移。

2.3 电流和电压

电压和电流是电动力学过程操作的主要参数。实验室中一般采用2种方式,即控制电流法和控制电压法。即使用工业直流稳压电源,利用导线将反应器电极与电源相连,电场电压、电流等参数也恒定不变。尽管较高的电流强度能够加快污染物的迁移速度,但是能耗也迅速升高。一般采用的电流强度范围为 $10 \sim 100 \text{ mA/cm}$,电压梯度在 $0.4 \sim 2 \text{ V/cm}$ 。

尽管均匀电场工艺处理效率较高,但它容易使修复场址固化和酸化,产生电极极化现象^[10]。罗启仕等^[11]把非均匀电动力学应用于苯酚、2,4-二氯酚^[12]和无机离子硝酸根、硫酸根离子^[13-14]的迁移试验,表明非均匀电场能够克服三极现象,方便控制土壤中离子运移,增加系统的运行稳定性。

2.4 电极

电极的材料、结构、形状、安装位置和安装方式都在一定程度上影响电化学动力修复的修复效果。电极应导电性好、耐腐蚀、不引入二次污染物和易加工安装,一般选用的材料是石墨、钛、铂、金和不锈钢等^[15]。电极一般采用竖直安装,安装方式有2种:一种是直接将中空的电极置入潮湿的土壤中,电极中空的部分为电极井,即内置电极井,污染溶液从极井壁的孔隙进入电极井,定时从电极井中抽取污染溶液^[16],如图1(a)所示。另一种是将电极置入和土壤直接接触的电极井中,即外置电极井,通过向电极井中加入促进液或清洗水置换进入极室的污染溶液^[17],如图1(b)所示。电极构型直接影响修复单元内有效作用的面积和修复效率。“中”字形和六边形分别是不同旋转方式下最优的电极构型,采用这两种电极构型,可节省电极材料费,同时保持系统的稳定性和污染物去除的均匀性^[18]。

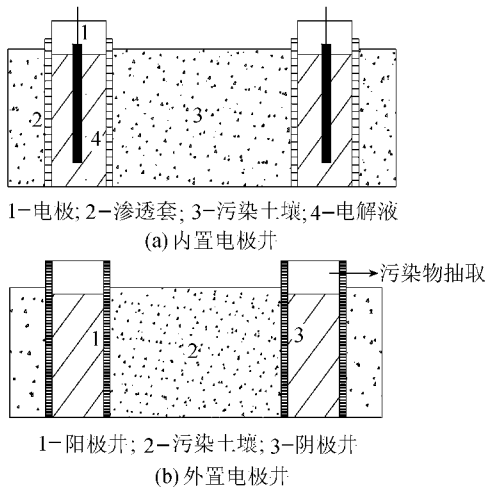


图1 电化学动力修复实验装置构造

3 原位电化学动力修复技术应用研究现状

原位电化学动力修复技术多应用于受有机污染的土壤,也可用清洁的液体置换受有机物污染的土壤。到目前为止,已有美国、加拿大、德国、荷兰、英国、法国、日本、韩国、中国台湾等近10个国家和地区相继开展了室内或现场的研究工作^[19-24]。其中德国 Karlsruhe 大学应用地理系的电动修复小组、美国环保署和美国军队环境中心都开展了污染土壤的现场电动修复研究,取得了很好的研究成果。Shapiro 等^[25]研究了电化学动力修复去除高岭土中苯酚和乙酸的可行性,实验证明电压梯度为 60 V/m 时,使用土壤孔隙体积1.5倍的水置换,对于 450 mg/L 的苯酚去除率大于94%,对于 0.5 mol/L 的乙酸去除率大于95%。Bruell 等^[26]研究了电动去除土壤和地下水中的石油类(BTEX)和氯代烃的可行性,实验证明这类物质可以被去除至溶解度以下,稠环芳香化合物的去除效率高,六氯苯和三氯乙烯的去除率可达60%~70%。Acar 等^[27]电动修复苯酚污染的高岭土,去除效率可达85%~95%,能耗是 $18 \sim 39 \text{ kW} \cdot \text{h/m}^3$ 。美国肯德基州应用 Lasagna 技术进行三氯乙烯污染去除。结果表明,当三氯乙烯尚未进入地下水时,Lasagna 技术对土壤中的三氯乙烯的去除效果很好,处理后的污染物浓度已不对地下水构成危害^[28]。Giacomo 等^[29]研究电化学动力修复对土壤中的多环芳烃(PAHs)、苯、甲苯、乙苯和二甲苯(BTEX)的治理效果。对质量为 973.2 g 的土壤进行小规模试验研究,应用平板电极,在电流密度是 3.72 A/m^2 的条件下处理23 d后约有94%的多环芳烃(PAHs)集中在阳极附近的土壤中。对质量 46.7 kg 的土壤,采用圆柱阴极在中心、周围呈六边形设置若干个阳极的多阳极系统。处理112 d后,在阳极和阴极之间连线,接近阳极的土壤pH值降至2.59,其他部分的土壤酸化不明显。PAHs和BTEX的混合物在电渗析的作用下迁向阴极,22 d后,土壤中PAHs的质量分数由 720 mg/kg 下降到 4.7 mg/kg 。实验结束后有28 mg的PAHs和9660 mg的苯集中到活性炭处理区处理。

国内主要是罗启仕等^[11-12]通过小型试验研究比较了土壤中苯酚和2,4-二氯酚在均匀和非均匀电动力学作用下的迁移特征和机理。电动力学过程能有效地促进土壤中苯酚及2,4-二氯酚的解吸附和迁移,电渗析和电迁移是其主要的作用机理,其迁移效果与电动力学形式、污染物类型、土壤酸碱性质和电极反应等密切相关,可以采用适当的电动力学工艺修复含酚类化合物的污染土壤,体现出该技术良好

的研究及应用前景。

电力修复过程中,土壤中的有机物可以通过电渗析等迁移方式迁移到水平或垂直方向的处理区,处理区可以含有吸附剂、催化剂、微生物或者氧化剂等^[30]。实验室研究证明^[17],以活性炭作为处理区,硝基苯的去除率可以达到99%;随后进行的现场实验表明,以活性炭作为处理区,在电压梯度是0.35~0.45 V/cm,电流密度是0.20 mA/cm²的条件下,95%的三氯乙烯能够被去除^[31-32]。

目前,电化学动力修复技术和其他技术的优化组合已经成为研究的热点。可以通过电动技术注入营养物质、电子受体、表面活性剂、共代谢物质、活性微生物等,增加原位生物修复的效果。Saichek等^[33]对采用表面活性剂技术去除土壤中疏水性有机物的研究进展做了介绍。我国学者曾用Tween80作为表面活性剂增强修复土壤中的疏水性有机物^[34]。Hov等^[35]研究通过电动修复技术注入三氯乙烯共代谢机制安息香酸的可行性。研究表明,在1 m长的受三氯乙烯污染的土柱中注入安息香酸后,三氯乙烯的一级厌氧降解速率为(0.039 ± 0.007) d⁻¹。目前,这一领域尚有很多问题需要解决。

4 存在问题及展望

虽然电化学动力修复技术用于去除土壤及地下水中的有机污染物的实验室研究相对成熟,表现出良好的处理效果,但仍不够完善,存在一系列问题有待解决。如,土壤含水率低于10%时,该技术的处理效果大大降低;在电场的作用下,可能产生有害副产物(如:氯气、三氯甲烷、丙酮等);对非极性有机物的去除效果不好;存在导致电流降低的极化现象等。这些因素已经成为制约土壤和地下水电化学动力修复技术发展的瓶颈,所以亟待加强这方面的理论与实践研究。

a. 原位电化学动力修复技术与表面活性剂配合使用对于去除土壤中不混溶性、非极性有机污染物有良好的效果,因此寻找最佳的表面活性剂,寻找最佳的控制条件,是今后原位电化学动力修复技术修复受有机物污染地下水的研究重点之一。

b. 原位电化学动力修复及其联用技术可克服单独采用原位电化学动力修复技术的缺点,提高污染物的去除效率,并降低修复成本。原位电化学动力修复可与Fenton技术、生物技术、表面活性剂技术和超生技术等联用,这有待进一步研究。

c. 原位电化学动力修复技术处理受有机物污染的土壤和地下水仍处于实验室试验探索和总结规律阶段,应当加强原位电化学动力修复污染区域现

场中试和示范工程,提高修复效率,扩大电化学动力修复应用的范围。

d. 虽然原位电化学动力修复技术处理受有机物污染的地下水在实际中还未得到广泛运用,但原位电化学动力修复技术被很多学者认为是处理地下水有机污染很具潜力的一种方法。

参考文献:

- [1] PROBSTEIN R F, HICKS R E. Removal of contaminants from soils by electric field[J]. Science, 1993, 60: 498-503.
- [2] 孟凡生, 王业耀. 污染土壤电动修复研究进展[J]. 污染防治技术, 2005, 18(5): 11-14.
- [3] VANE L M, ZANG G M. Effect of aqueous phase properties on clay particle zeta potential and electroosmotic permeability implications for electrokinetic soil remediation processes[J]. J Hazard Mater, 1997, 55: 1-22.
- [4] 罗启仕, 王慧, 张锡辉, 等. 电动力学技术强化原位生物修复研究进展[J]. 环境污染与防治, 2004, 26(4): 268-271.
- [5] ZHONG Ming-li, JI Wei-yu, NERETIENS I. A new approach to electrokinetic remediation of soils polluted by heavy metals[J]. Journal of Contaminant Hydrology, 1996, 22(3-4): 241-253.
- [6] JURATE V, MIKA S, PETRI L. Electrokinetic soil remediation critical overview[J]. The Science of the Total Environment, 2002, 289: 97-121.
- [7] SHE P, LIU Z, DING F X, et al. Surfactant enhanced electroremediation of phenanthrene[J]. Chinese J Chem Eng, 2003, 11: 73-78.
- [8] 陆小成, 陈露洪, 徐泉, 等. 污染土壤电动修复增强方法研究进展[J]. 环境污染治理技术与设备, 2005, 6(1): 14-24.
- [9] REDDY K R, PARUPUDI U S, DEVULAPALLI S N, et al. Effects of soil composition on the removal of chromium by electrokinetic[J]. Haz Mat, 1997, 55: 135-158.
- [10] PAGE M M, PAGE C L. Electroremediation of contaminated soil[J]. J Environ Eng, 2002, 128(3): 208-219.
- [11] 罗启仕, 张锡辉, 王慧, 等. 土壤酚类污染物在电动力学作用下的迁移及其机理[J]. 中国环境科学, 2004, 24(2): 134-138.
- [12] 罗启仕, 王慧, 张锡辉, 等. 土壤中2,4-二氯酚在非均匀电动力学作用下的迁移[J]. 环境科学学报, 2004, 24(6): 1104-1109.
- [13] 罗启仕, 王慧, 张锡辉, 等. 土壤中硝酸盐在非均匀电动力学作用下的迁移与转化[J]. 环境科学, 2004, 25(2): 107-113.
- [14] 罗启仕, 王慧, 张锡辉, 等. 土壤无机离子在非均匀电场作用下的迁移[J]. 中国环境科学, 2004, 24(5): 519-523.
- [15] JURATE V, MIKA S, PETRI L. Electrokinetic soil remediation critical overview[J]. The Science of Total Environment, 2002, 289: 97-121.
- [16] SOGORKA D B, GABERT H, SOGORKA B J. Emerging

technologies for soils contaminated with metals-electrokinetic remediation[J]. Hazard Ind Wastes ,1998 ,33 :673-685.

- [17] VAN C L. Electrokinetics :technology overview report[R]. Pittsburgh :Groundwater Remediation Technologies Analysis Centre ,1997 :1-17.
- [18] 范向宇 ,王慧 ,罗启仕 . 电动生物修复中电极矩阵的优化设计[J]. 中国环境科学 ,2006 ,26(1) :34-38.
- [19] ACAR Y B ,ALSHAWABKEH A N. Principles of electrokinetic remediation[J]. Environ Sci Technol ,1993 ,27(13) :2638-2647
- [20] RIBEIRO A B ,MEXIA J T. A dynamic model for the electrokinetic removal of copper from a polluted soil[J]. J Hazardous Mater ,1997 ,56 :257-271.
- [21] ALSHAWABKEH A N ,YEUNG A T ,BRICKA M R. Practical aspects of in-situ electrokinetic extraction[J]. J Environ Eng ,1999 ,125(1) :27-35.
- [22] MAINI G ,SHARMAN A K ,SUNDERLAND G ,et al. An intergrated method incorporating sulfur-oxidizing bacteria and electrokinetics to enhance of copper from contaminated soil [J]. Environ Sci Tech ,2000 ,34(6) :1081-1087.
- [23] MATTSON E D ,BOWMAN R S ,LINDGREN E R. Electrokinetic remediation using surfactant-coated ceramic casing[J]. J Environ Eng ,2000 ,126(6) :534-540.
- [24] VIRKUTYTE J ,SILLANPAA M ,LATOSTENMAA P. Electrokinetic soil remediation-critical overview[J]. The Science of the Total Environment ,1999 ,3 :12-14.
- [25] SHAPIRO A P ,PROBSTEIN R F. Removal of contaminants from saturated clay by electroosmosis[J]. Environ Sci Tech ,1993 ,27(2) :283-291.
- [26] BRUELL C J ,SEGALL B A ,WALSH M T. Electroosmotic removal of gasoline hydrocarbons and TCE from clay[J]. J

Environ Eng ,1992 ,118(1) :68-83.

- [27] ACAR Y B ,LI H ,GALE R J. Phenol removal from kaolinite by electrokinetics[J]. J of Geotech Eng ,1992 ,118(11) :1837-1852.
- [28] CAUWENBERGHE L. Electrokinetics :technology overview report [R]. Pittsburgh : Groundwater Remediation Technologies Analysis Centre ,1997 :3 :12-14.
- [29] GIACOMO M ,AJAY K S ,CHRISTOPHER J K ,et al. Electrokinetic remediation of metals and organics from historically contaminated soil [J]. Journal of Chemical Technology & Biotechnology ,2000 ,75(8) :657-664.
- [30] 张锡辉 ,王慧 ,罗启仕 . 电动力学技术在受污染地下水和土壤修复中新进展[J]. 水科学进展 ,2001 ,12(2) :249-255.
- [31] HOS V ,ATHMER C J ,SHERIDAN P W ,et al. Intergrated in situ soil remediation thchnology the lasagna process[J]. Environ Sci Tech ,1995 ,29 :2528-2534.
- [32] HOS V ,ATHMER C J ,SHERIDAN P W ,et al. The lasagan technology for in situ soil remediation 1 small field test[J]. Environ Sci Tech ,1999 ,33 :1086-1091.
- [33] SAICHEK R E ,REDDY K R. Electrokinetically enhanced remediation of hydrophobic organic compounds in soils :a review[J]. Crit Rev Env Sci Tec ,2005 ,35(2) :115-192.
- [34] SHE P ,LIU Z ,DING F X ,et al. Surfactant enhanced electroremediation of phenanthrene[J]. Chinese J Chem Eng ,2003 ,11 :73-78.
- [35] HOS V ,ATHMER C J ,SHERIDAN P W ,et al. The Lasagan technology for in situ soil remediation 2 large field test[J]. Environ Sci tech ,1999 ,33 :1092-1099.

(收稿日期 2008-10-18 编辑 胡新宇)

(上接第 15 页)

道对昆承湖的污染比较严重。建议有效隔离张家港河河道和莫城河道污水对湖区主体的侵害 ,有效控制河道与湖区的水体交换。当然 ,最根本的防治措施是加强张家港河河道和莫城河道污染治理 ,改善张家港河河道和莫城河道水质 ,以实现昆承湖水质的有效改善。

3 结 论

本文采用 EFDC 对苏州市昆承湖丰水期和枯水期水流水质进行了计算模拟 ,数值解与实测值吻合较好。结果表明 ,张家港河河道和莫城河道对昆承湖的污染比较严重 ,建议加强张家港河河道和莫城河道污染治理 ,改善河道水质 ,有效控制河道与湖区的水体交换 ,以实现昆承湖水质的有效改善。研究结果对昆承湖的水环境管理和环境综合整治有一定的参考价值。

参 考 文 献 :

- [1] 安莉娜 . 城市浅水湖泊二维水量、水质耦合模型应用研究 D]. 南京 : 河海大学 ,2005.
- [2] 杨丽 . 非恒定一、二维耦合水质数值模拟技术研究[J]. 水资源保护 ,2006 ,22(4) :78-81.
- [3] 唐迎洲 ,阮晓红 ,王文远 . WASP5 水质模型在平原河网区的应用[J]. 水资源保护 ,2006 ,22(6) :43-46.
- [4] 韩龙喜 ,陆冬 . 平原河网水流数值模拟研究展望[J]. 河海大学学报 :自然科学版 ,2004 ,32(2) :127-130.
- [5] 杨文斌 ,王国祥 ,张利民 ,等 . 常熟市昆承湖水水质时空变异特征和环境压力分析[J]. 自然资源学报 ,2007 ,22(2) :185-192.
- [6] CERCO C F ,COLE T M. Three-dimensional eutrophication model of Chesapeake Bay :volume I[R]. Vicksburg MS : US Army Engineer Waterways Experiment Station ,1994.
- [7] PARK K , KUO A Y , SHEN J. A three-dimensional hydrodynamic-eutrophication model HEM-3D : Description of water quality and sediment process submodels[R]. VIMS VA : SRAMSOE ,1995. (收稿日期 2008-06-24 编辑 :傅伟群)