

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第33卷 第3期

Vol.33 No.3

2012

中国科学院生态环境研究中心 主办

科学出版社 出版



目次

典型排放源黑碳的稳定碳同位素组成研究	陈颖军,蔡伟伟,黄国培,李军,张干(673)
天山典型冰川区雪冰中碳质气溶胶浓度特征研究	王圣杰,张明军,王飞腾,李忠勤(679)
兰州市夏秋季颗粒物谱分布特征研究	赵素平,余晔,陈晋北,刘娜,何建军(687)
不同交通状况下道路边大气颗粒物数浓度粒径分布特征	杨柳,吴焯,宋少洁,郝吉明(694)
南京市夏季大气气溶胶新粒子生成事件分析	王红磊,朱彬,沈利娟,康汉青,刁一伟(701)
西北干旱区降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 变化特征及其水汽输送	李小飞,张明军,李亚举,王圣杰,黄小燕,马潜,马雪宁(711)
海南东部河口和近岸海域总溶解态无机砷的分布及季节变化	曹秀红,任景玲,张桂玲,张金娥,杜金洲,朱德弟(720)
大辽河口痕量元素砷的河口混合行为	简慧敏,姚庆祯,于立霞,田琳(727)
渤海湾表层沉积物各形态重金属的分布特征与生态风险评价	徐亚岩,宋金明,李学刚,袁华茂,李宁(732)
青岛近岸表层海水中 PAHs 的分布特征及物源初步解析	李先国,邓伟,周晓,唐旭利,魏新运,王岩(741)
广西乐业大石围天坑群多环芳烃的干湿沉降	孔祥胜,祁士华,黄保健,张原,李杰(746)
上海宝山区城市土壤铅污染来源的同位素判别	董辰寅,张卫国,王冠,马鸿磊,刘圆,刘莹,叶雷平,俞立中(754)
溶质迁移模型在地下水有机污染源识别中的应用	王树芳,王丽亚,王晓红,林沛,刘久荣,辛宝东,贺国平(760)
地下水污染风险评价中特征污染物量化方法探讨	王俊杰,何江涛,陆燕,刘丽雅,张小亮(771)
用于地下水回灌的再生水预处理工艺研究	高清端,张薛,赵璇,赵刚(777)
菲律宾蛤仔养殖对胶州湾沉积物-水界面生源要素迁移的影响	邓可,刘素美,张桂玲,陆小兰,张经(782)
南京市九乡河流域景观格局空间分异对河流水质的影响	胡和兵,刘红玉,郝敬峰,安静(794)
上海都市农业村域地表水非点源氮素的时空分异特征	王楠,毛亮,黄海波,张进忠,周培(802)
不同粒径地表街尘中重金属在径流冲刷中的迁移转化	何小艳,赵洪涛,李叙勇,连宾,王小梅(810)
新型人工湿地对工业区降雨径流的净化研究	何丽君,马邕文,王金泉,李东亚,王艳(817)
改性膨润土应急截留液态有机物的性能及机制	李宇,刘贤君,张兴旺,雷乐成(825)
卵圆卡盾藻香港株过氧化氢产生的影响因素研究	江涛,吴霓,钟艳,江天久(832)
芽孢杆菌 B1 胞外活性物质对球形棕囊藻的溶藻特性研究	李蕾,赵玲,尹平河(838)
底泥对洋河水库微囊藻和鱼腥藻生长影响的研究	储昭升,张玉宝,金相灿,徐颖,杨红君(844)
新型无极准分子光源深度处理水相中含 N-杂环化合物	叶招莲,汪斌,路娟娟,李峰,张仁熙(849)
La/Ce 掺杂钛基二氧化铅电极的制备及电催化性能研究	郑辉,戴启洲,王家德,陈建孟(857)
DTT 对三苯基甲染料脱色的研究	潘涛,刘大伟,任随周,郭俊,孙国萍(866)
pH 及络合剂对亚铁活化 $\text{S}_2\text{O}_8^{2-}$ 氧化去除活性艳蓝的影响研究	张成,王金泉,马邕文,王艳,黄明智,兰明(871)
臭氧降解高浓度腐殖酸动力学	郑可,周少奇,杨梅梅(879)
采用体积信息熵表征颗粒污泥系统稳定性及其稳定机制	李志华,姬晓琴,李胜,谢磊,赵海龙,王晓昌(885)
活性污泥的理化性质与絮凝调理投药量的关系	李婷,王毅力,冯晶,徐萌(889)
不同颗粒龄的好氧颗粒污泥性能的研究	周曼,杨昌柱,濮文虹,罗应东,龚建宇(896)
颗粒粒径与数量对硝化与反硝化过程的影响	李志华,曾金锋,李胜,姬晓琴,王晓昌(903)
氧化沟不同曝气模式对氮磷去除性能的优化与比较	郭昌梓,彭党聪,陈雪梅,王丹(910)
生物沥浸的酸化效应对城市污泥脱水性能的影响	朱海风,周立祥,王电站(916)
2 种不同生物接触氧化工艺性能差异的微生物生态研究	钱殷,全向春,裴元生,马景赞,陶锟(922)
微生物群落对土壤微生物呼吸速率及其温度敏感性的影响	范分良,黄平容,唐勇军,李兆君,梁永超(932)
干旱沙区人工固沙植被演变过程中土壤有机碳氮储量及其分布特征	贾晓红,李新荣,周玉燕,李元寿(938)
密云水库上游流域土壤有机碳和全氮密度影响因素研究	王淑芳,王效科,欧阳志云(946)
外加营养源作用下微生物黏结剂对土壤团聚体的影响	莫艳华,汤佳,张仁铎,李方舟(952)
低分子量腐殖酸改性蒙脱土对黄曲霉素的吸附作用	姚佳佳,康福星,高彦征(958)
液固比对土壤洗涤去除多环芳烃效果的影响	吴威,姜林,陈家军,彭胜(965)
基于 PPI 的土地利用优化研究	武晓峰,李婷(971)
若尔盖高原湿地藻类多样性研究	陈曦,刘如钢,王艳芬,张洪勋(979)
3 种杀真菌剂对 AM 真菌侵染和黄芩生长的影响	贺学礼,王平,马丽,孟静静(987)
崇明东滩夏季沉积物厌氧氨氧化菌群落结构与空间分布特征	郑艳玲,侯立军,陆敏,谢冰,刘敏,李勇,赵慧(992)
厌氧条件下 2,2',4,4'-四溴联苯醚的微生物降解	卢晓霞,陈超琪,张姝,欧阳,尹力,吴蔚(1000)
重金属对白腐菌降解十溴联苯醚的影响	熊士昌,尹华,彭辉,何宝燕,龙焰,叶锦韶,张娜,彭素芬(1008)
有机农药滴滴涕和毒死蜱生物降解机制的分子模拟研究	林玉珍,曾光明,张斌,陈明,蒋敏,张嘉超,鲁伦慧,刘利锋(1015)
高效木薯渣分解复合菌群 RXS 的构建及其发酵特性研究	何江,毛忠贵,张庆华,张建华,唐蕾,张宏建(1020)
四环素类抗生素污染畜禽粪便的厌氧消化特征	童子林,刘元璐,胡真虎,袁守军(1028)
上推流厌氧反应器连续干发酵猪粪产沼气试验研究	陈闯,邓良伟,信欣,郑丹,刘刈,孔垂雪(1033)
《环境科学》征稿简则(878) 《环境科学》征订启事(1007) 信息(759, 770, 870, 1027)	

溶质迁移模型在地下水有机污染源识别中的应用

王树芳^{1,2,3}, 王丽亚¹, 王晓红¹, 林沛¹, 刘久荣¹, 辛宝东¹, 贺国平⁴

(1. 北京市水文地质工程地质大队, 北京 100195; 2. 中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029; 3. 中国科学院研究生院, 北京 100049; 4. 北京市水利规划设计研究院, 北京 100048)

摘要: 采用现场调查与数值模拟的方法, 借助 RT3D(reactive transport in 3-dimensions), 对我国北方某城市局部地区地下水中的四氯乙烯(PCE)和三氯乙烯(TCE)污染来源进行了识别, 对污染输入强度进行了反演, 并利用 Matlab 中的 Stepwise 函数, 对影响污染物输入强度的因素进行了多元回归分析. 研究结果显示, 研究区地下水中的 PCE 和 TCE 主要来源于区内使用有机溶剂的工厂和企业. 地下水中的 PCE 和 TCE 存在天然衰减, 在 173 天中, 3 个点的 PCE 浓度分别衰减了 93.15%、61.70% 和 61.00%; TCE 分别为 70.05%、73.66% 和 63.66%. 通过模拟识别出的 4 个点状污染源在模拟期间共向含水层中输入 0.910 6 kg PCE 和 95.693 8 kg TCE. 回归分析结果显示, 大气降水与包气带厚度是有机物输入地下水的主要影响因素. 35 cm 深的包气带中 PCE 和 TCE 浓度介于 0~5 mg·kg⁻¹ 之间. 以上结果表明, 区内地下水中 PCE 和 TCE 来源于地表释放的有机污染物. 有机污染物一部分在向下迁移过程中自然衰减了, 一部分进入包气带, 然后又进入了含水层. 由于本区第四系以砂卵砾石为主, 所以大气降水促进了 PCE 和 TCE 向含水层的迁移.

关键词: 地下水; 四氯乙烯(PCE); 三氯乙烯(TCE); RT3D; 多元回归分析

中图分类号: X523 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2012)03-0760-11

Solute Transport Modeling Application in Groundwater Organic Contaminant Source Identification

WANG Shu-fang^{1,2,3}, WANG Li-ya¹, WANG Xiao-hong¹, LIN Pei¹, LIU Jiu-rong¹, XIN Bao-dong¹, HE Guo-ping⁴

(1. Beijing Institute of Hydrogeology and Engineering Geology, Beijing 100195, China; 2. Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China; 3. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 4. Beijing Institute of Water, Beijing 100048, China)

Abstract: Investigation and numerical simulation, based on RT3D(reactive transport in 3-dimensions) were used to identify the source of tetrachloroethylene (PCE) and trichloroethylene (TCE) in the groundwater of a city in the north of China and reverse the input intensity. Multiple regressions were applied to analyze the influenced factors of input intensity of PCE and TCE using Stepwise function in Matlab. The results indicate that the factories and industries are the source of the PCE and TCE in groundwater. Natural attenuation was identified and the natural attenuation rates are 93.15%、61.70% and 61.00% for PCE, and 70.05%、73.66% and 63.66% for TCE in 173 days. The 4 source points identified by the simulation have released 0.910 6 kg PCE and 95.693 8 kg TCE during the simulation period. The regression analysis results indicate that local precipitation and the thickness of vadose zone are the main factors influencing organic solution transporting from surface to groundwater. The PCE and TCE concentration are found to be 0 and 5 mg·kg⁻¹ from surface to 35 cm in vadose zone. All above results suggest that PCE and TCE in groundwater are from the source in the surface. Natural attenuation occurred when PCE and TCE transporting from the surface to groundwater, and the rest was transported to groundwater through vadose zone. Local precipitation was one of the critical factors influencing the transportation of PCE and TCE to aquifer through sand, pebble and gravel of the Quaternary.

Key words: groundwater; PCE; TCE; reactive transport in 3-dimensions (RT3D); multiple regression analysis

本研究借鉴实验室和现场研究成果^[1~12], 利用地下水有机物检测数据, 借助 RT3D 溶质迁移模块^[13~18]建立了研究区浅层地下水中有有机污染物的迁移转化模型, 并结合现场调查成果, 对北方某城市遭受 PCE 和 TCE 污染的地下水的污染源进行了识别. 在已识别污染源的基础上, 构建了以有机污染物输入强度为目标函数, 以大气降水、包气带厚度和地表污染源特征为自变量的多元回归模型, 借助

Matlab 中的逐步回归函数进行了回归分析, 探讨了大气降水、包气带厚度和地表污染源特征对污染物输入强度的影响.

从统计数据来看, 四氯乙烯(tetrachloroethylene,

收稿日期: 2011-04-30; 修订日期: 2011-09-30

基金项目: 北京市科技计划重大项目(D07050601510000)

作者简介: 王树芳(1980~), 男, 博士研究生, 工程师, 主要研究方向为地下水监测与数值模拟, E-mail: shufangwang111@163.com

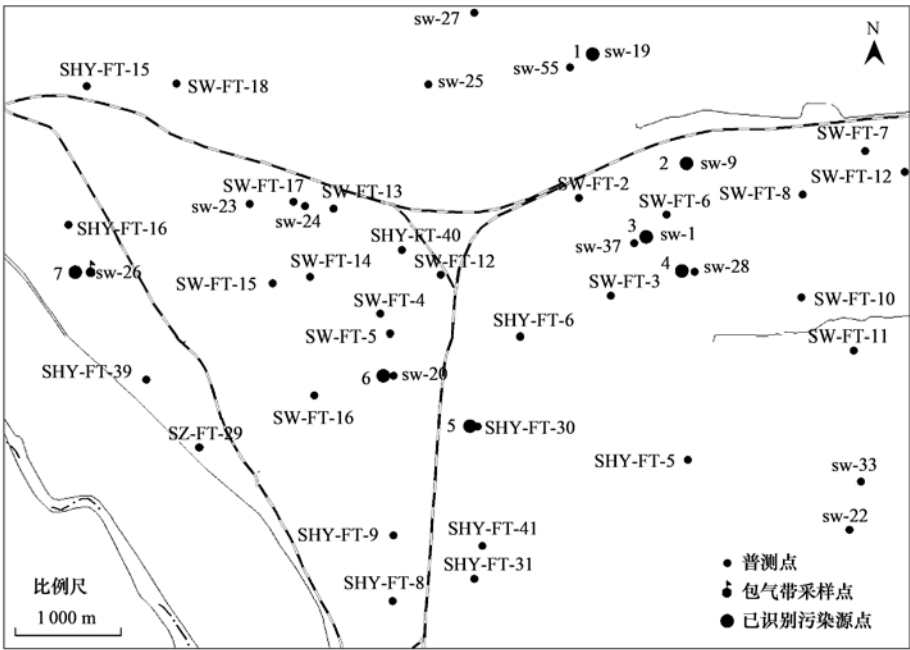
PCE) 和三氯乙烯 (trichloroethylene, TCE) 是地下水中检出率很高的有机污染物^[1~4]. 一些学者已经对 PCE 和 TCE 的降解途径^[19~30]进行了研究. 一般认为, PCE 和 TCE 的降解途径有 2 个, 厌氧还原脱氯和需氧生物降解. 四氯乙烯首先经过还原脱氯反应降解成三氯乙烯, 三氯乙烯经过还原脱氯反应降解成 3 种产物, 顺[式]-1, 2-二氯乙烯 (trans-1, 2-DCE), 反[式]-1, 2-二氯乙烯 (cis-1, 2-DCE) 和 1,1-二氯乙烯 (1,1-DCE). 这 3 种产物可以通过好氧或厌氧代谢直接降解为二氧化碳, 还可以通过还原脱氯反应降解成氯乙烯, 氯乙烯通过还原脱氯反应最终降解成乙烯. 国内外的一些研究者已经利用 RT3D 模块对污染物在地下水中的迁移和转化进行了模拟和研究^[13~18]. 其中, 对于历史上污染物的输入量的确定, 不同的研究者也使用了不同的方法进行了计算^[15,35,36].

本研究旨在通过包气带和地下水有机污染物的数据, 反演有机污染物在地下迁移规律, 并探讨其影响因素, 以期研究区地下水有机污染的控制和治理提供参考.

1 研究区概况

研究区位于河流冲洪积扇上部, 主要地貌形态为河床、河漫滩和一级阶地. 地表黏性土厚度一般小于 2 m, 含水层为单一的卵砾石夹漂石的潜水含水层, 含水层底板为透水性非常弱的第三系泥岩. 地下水的主要补给来源为大气降水和上游的侧向补给. 主要排泄途径为人为开采和向下游的侧向流出. 研究区在模拟期间 (2008 年 12 月 ~ 2009 年 6 月) 包气带厚度一般为 21 ~ 28 m, 潜水位标高一般为 18 ~ 37 m.

考虑到研究区历史上曾经存在一些使用有机化学溶剂的工厂和企业, 工业垃圾和生产过程中副产品的不合理处理可能会对地下水产生污染, 于 2008 ~ 2009 年对浅层地下水进行有机污染调查. 共取样 44 个, 其中 30 个点的地下水样品中检测出 PCE 和 TCE (PCE 和 TCE 的检测下限为 $0.1 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, 图 1). 检测结果表明, 四氯乙烯 (PCE) 和三氯乙烯 (TCE) 是研究区的主要有机污染物, 最高浓度分别达到 $85.68 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $405 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$.



“普测点”指单纯取样点, 并无污染源存在; “已识别污染源点”指通过模拟分析已经识别的有机污染源点;
“包气带取样点”指包气带中取样的地点

图 1 研究区地下水有机物取样点和识别污染源点分布示意

Fig. 1 Distribution groundwater organic contaminant of sampling sites and identified contaminant source of groundwater in the study area

2 研究方法

首先根据研究区的地质和水文地质条件建立了

水流模型, 利用多年的水位监测数据进行了模型的校正. 在已校正的水流模型基础上应用 RT3D (reactive transport in 3-dimensions) 建立了溶质迁移

模型. RT3D 可以模拟地下水中移动/非移动的多种微生物共存的有机污染物生物降解过程. 溶质迁移模型参数的确定参考了实验室和现场实验的研究成果.

研究区有机污染源的确定的关键是进行地下水中的有机污染现状调查^[31~34]. 考虑到工厂使用的有机溶剂可能是地下水中 PCE 和 TCE 的主要来源,因此首先对研究区内工厂的分布情况和历史进行了调查,并在 2008 年 11 月~2010 年 3 月进行连续采样. 检测结果显示,研究区内有 7 个点的 PCE 和 TCE 值异常高. 为进一步查明污染源的分布情况,对这 7 个点所在地及其附近地区进行了反复调查. 调查结果表明这 7 个点所在位置曾经存在使用有机溶剂的工厂和企业,部分工厂目前仍在运行. 进一步的场地调查发现,部分场地目前仍存在释放或者泄露有机溶剂的可能. 但这并不能完全排除其它地区并无有机污染物的排放的可能. 如果其它地区也存在有机污染源,从全区的检测结果分析,PCE 和 TCE 的高

值点一般应该位于有机污染物的排放点. 但是除这 7 个点附近之外,其它地区的三氯乙烯和四氯乙烯的检测值要远小于这 7 个点的检测值,说明这些地区即使存在 PCE 和 TCE 泄露点,其排放强度也应该远小于上述 7 个点. 考虑到这 7 个点位于研究区内主要的有机污染物排放源附近,对其进行研究具有典型意义.

污染场地一般可以通过采样检测结果圈定,但是在没有记载的情况下,一般很难确切得知污染源的位置、输入强度和输入模式. 这种情况下,可以通过假设情景^[15, 35~37]进行模拟,将模拟结果与检测结果拟合最优的情景作为最接近实际的情景(表 1). 不同情景考虑了不同的污染物输入模式和输入强度. 最后采用多元回归方法对污染物输入强度和大气降水、包气带厚度和地表污染源特征之间的相关关系进行分析. MATLAB 统计工具箱中提供了 Stepwise 函数,用来做交互式逐步回归分析,寻找最优回归方程.

表 1 各情景检测值与模拟值相关系数¹⁾

Table 1 Correlation coefficients of detected and simulated values for different scenarios

样点	污染物	情景 1 (0 源输入)	情景 2 (常量输入)	情景 3 (变量输入)	综合分析 最优情景
sw-1	PCE	1.00	不相关	未计算	情景 1
	TCE	0.77	不相关	未计算	
sw-9	PCE	1.00	不相关	未计算	情景 1
	TCE	1.00	不相关	未计算	
sw-19	PCE	1.00	不相关	未计算	情景 1
	TCE	1.00	不相关	未计算	
sw-20	PCE	0.82	不相关	0.89	情景 3
	TCE	0.77	不相关	0.96	
sw-26	PCE	0.20	不相关	1.00	情景 3
	TCE	0.58	不相关	0.76	
sw-28	PCE	0.92	不相关	0.91	情景 3
	TCE	0.73	不相关	0.99	
SHY-FT-30	PCE	0.39	不相关	0.99	情景 3
	TCE	0.84	不相关	0.86	

1) 情景 1:研究区内没有任何污染源输入到含水层中; 情景 2:各点保持相当于 2008-12 的浓度不变; 情景 3:各点在不同时期污染物的输入浓度是变化的

3 结果与讨论

模拟结果显示,模拟结果与检测结果(图 2)以及羽状体的形态(图 3 和图 4)都获得了较好的拟合效果,拟合结果相关系数在 0.8 以上的达到 87%.

3.1 有机污染物的天然衰减

污染物的天然衰减作用主要包括稀释、扩散、吸附、挥发、非生物和生物降解等作用^[38]. 根据调查,研究区场地内在 2008 年 11 月~2009 年 6 月这一段时期,未发现地表有机污染源,地表也无有机污染物的输入,而且也没有对污染场地进行人为的处理. 因

此,点 sw-1、sw-9 和 sw-19 的检测和模拟结果,可以说明下面 3 个问题.

(1)地下水已经受到四氯乙烯和三氯乙烯的污染. 在无污染天然状态下,地下水中四氯乙烯和三氯乙烯的背景值一般小于 $0.05\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$,远远低于研究区内地下水样品中四氯乙烯和三氯乙烯的检测值(最大的是 $405\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$,达到 8 095 倍;最小的是 $0.1\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$,达到 2 倍). 多次采样分析的结果验证了以上的判断(图 2).

(2)模拟结果表明,当情景为无污染源输入时,模拟数据与检测数据拟合的相关系数最小为 0.77,

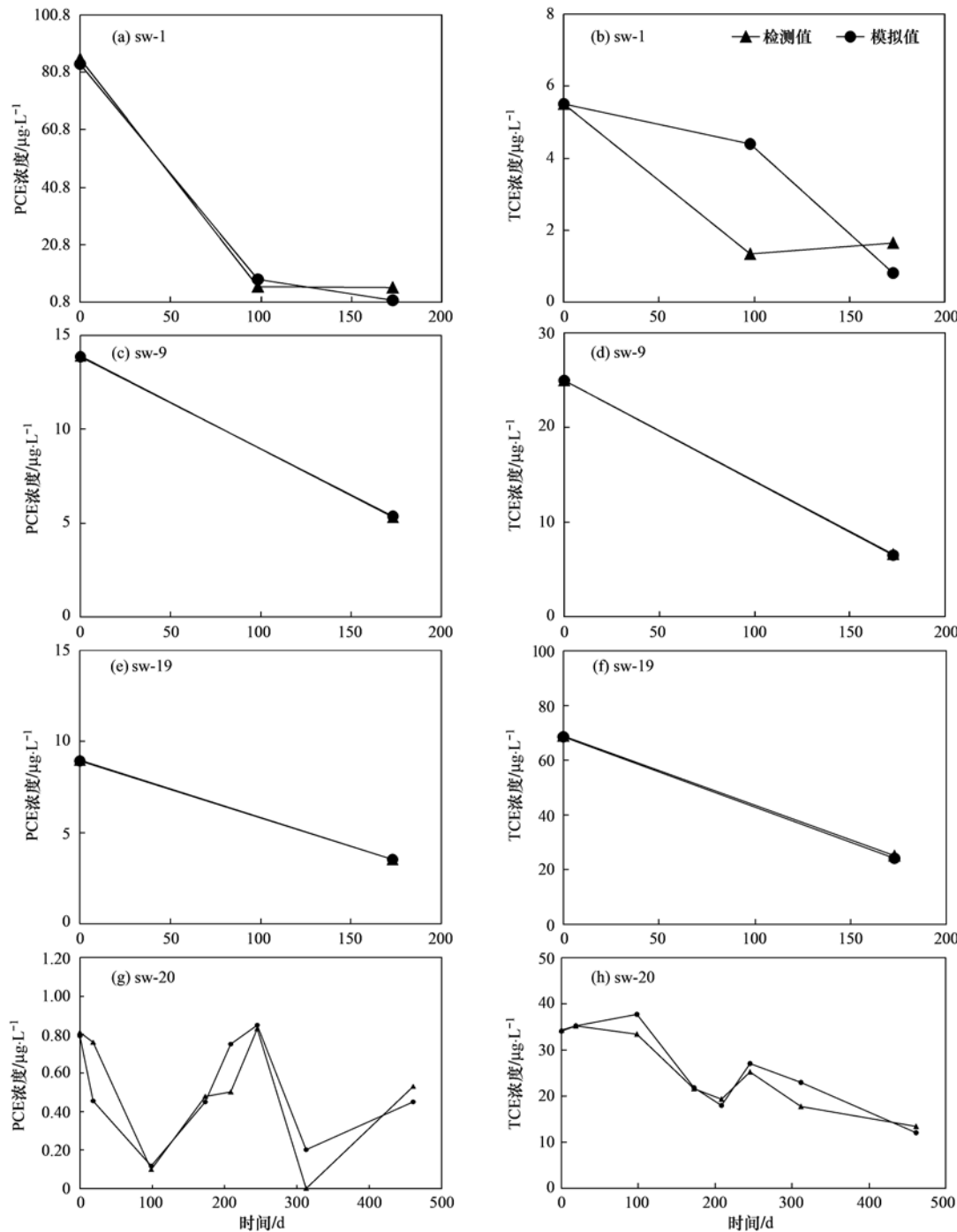
大部分达到了 1.00(表 1). 而常量输入和非常量输入情景下, 不能与检测浓度(单调下降)拟合. 考虑到模拟期开始于 2008 年 11 月, 有机污染物最晚也是在 2008 年 11 月以前进入到含水层中的.

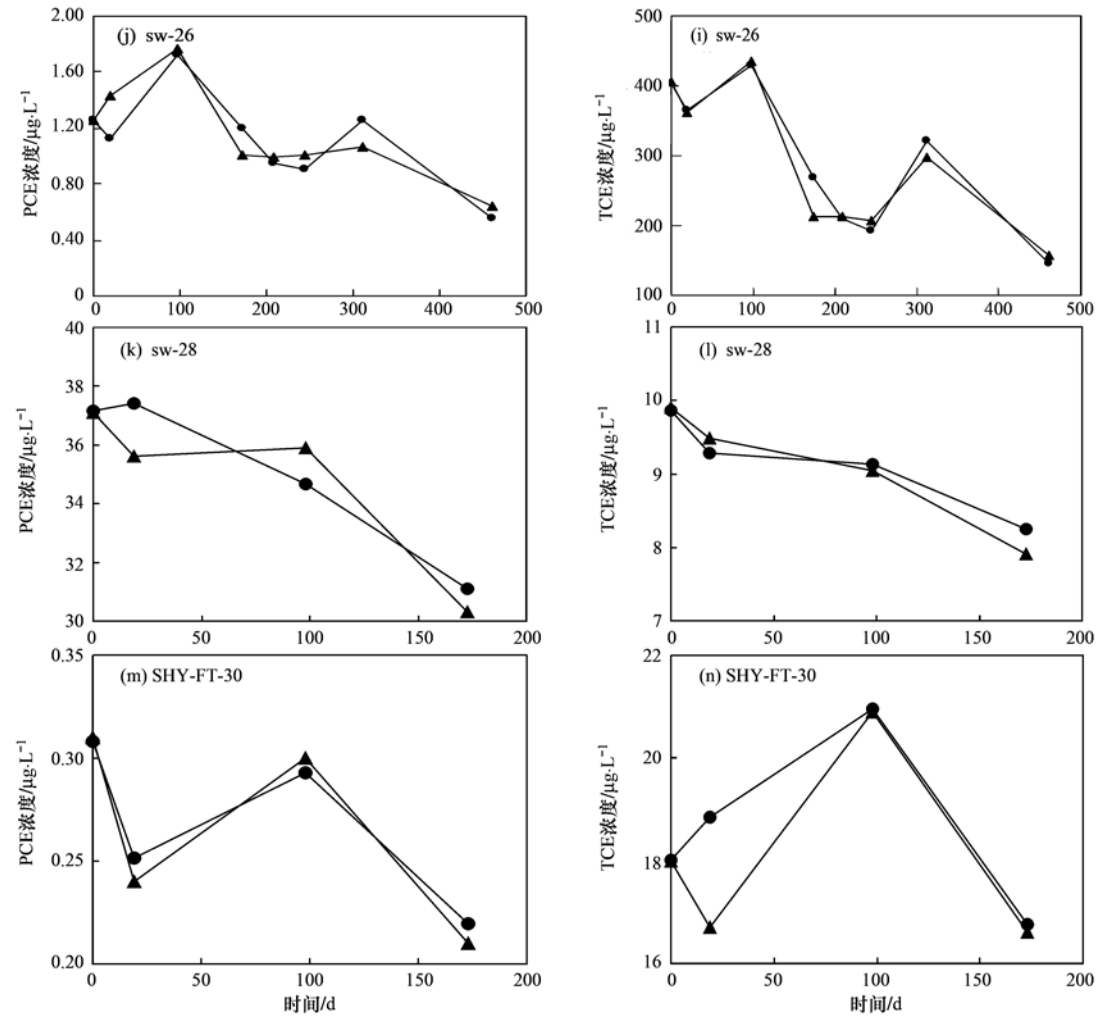
(3) 在 2008 年 11 月~2009 年 6 月总计 173 d 内, 取自点 sw-1、sw-9 和 sw-19 的地下水样品中 PCE 检测浓度分别衰减了 93.15%、61.70% 和 61.00%; TCE 分别为 70.05%、73.66% 和 63.66% (图 2). 根据调查, 在这段时期内, 没有采取任何人

为措施对污染场地进行处理, 这说明地下水中的有机污染物存在着天然衰减, 场地和室内实验成果^[7]也证明了天然衰减现象的存在.

3.2 有机污染源输入强度特征

有机污染物由地表进入到含水层的过程中所发生的化学、生物以及物理过程非常复杂, 所以污染源的输入一般不是常数, 而可能是脉冲式、阶梯式或是单调递增或递减式^[39~42]. 根据调查分析, 研究区可能存在 7 个点状有机污染源(图 1). 将这 7 个点状





sw-20 和 sw-26 点的数据采集时间是 2008-11 ~ 2010-03,其它点的采集时间是 2008-11 ~ 2009-06

图 2 四氯乙烯和三氯乙烯模拟值与检测值比较

Fig. 2 Comparison of simulated values and detection values of PCE and TCE

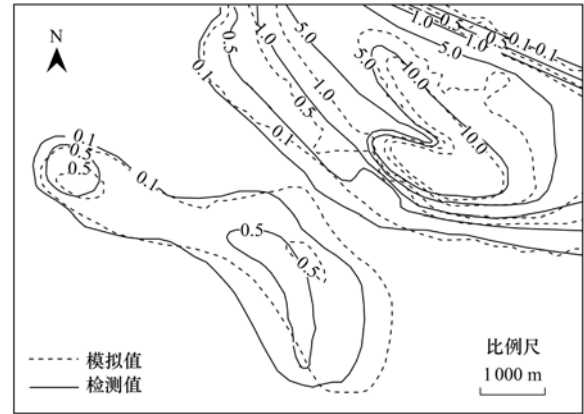


图 3 2009-06 四氯乙烯模拟浓度等值线与实测浓度等值线

Fig. 3 Simulated and detected isolines of PCE in June 2009

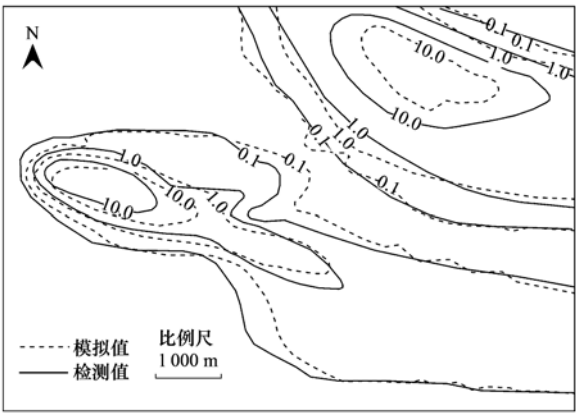


图 4 2009-06 三氯乙烯模拟浓度等值线与实测浓度等值线

Fig. 4 Simulated and detected isolines of TCE in June 2009

有机污染源作为潜在污染源进行模拟,模拟结果表明其中 3 个点(点 1 ~ 3)自 2008 年 12 月 25 日 ~

2009 年 7 月 1 日期间(模拟期间)无有机污染物输入,另外 4 个点(点 4 ~ 7)存在有机污染物输入(图

5). 这里所讲的“输入”指进入到地下水中,并不是指存在于地表.

模拟结果显示 PCE 和 TCE 输入强度模拟期间呈现不同的变化特征,例如点 5 在模拟期间有 PCE 的输入,但是无 TCE 的输入,点 4 在模拟期间无 PCE 的输入,但是有 TCE 的输入. 这可能有 2 个方面的原因:一方面是 PCE 和 TCE 来自不同的有机污染源,即由于使用不同的有机溶剂造成的(有的有机溶剂只含 PCE,有的有机溶剂只含 TCE);另一方面是与 PCE 和 TCE 在地下水中的迁移转化特征有关(例如在相同条件下 PCE 比 TCE 更容易被吸附^[38]). 同一个污染源点相似的输入函数表明 PCE 和 TCE 可能来源于同一种溶剂,而且这种溶剂中同时含有 PCE 和 TCE,但 PCE 和 TCE 在其中的含量不同.

模拟结果表明,在模拟期间研究区 PCE 的总输入量为 0.910 6 kg,分别为点 5、6 和 7 输入; TCE 的

总输入量为 95.693 8 kg,分别在点 4、6 和 7 输入(图 6). 根据现场调查分析,虽然目前地表不存在污染源,但是有机物已经进入到包气带中,并逐渐的向含水层中迁移. 点 6 和 7 同时有 PCE 和 TCE 的输入,而且点 6 处 PCE 和 TCE 的输入量最大. 点 5 处只有 PCE 的输入,无 TCE 的输入;而点 4 处只有 TCE 的输入,无 PCE 的输入. 这是由于使用 PCE 和 TCE 含量不同的有机溶剂造成的.

3.3 污染物输入强度的影响因素

虽然在地下水中检测到了 PCE 和 TCE,但是没有污染物泄漏量的准确记录,很难准确计算进入到地下水的有机物的量^[15,35,36]. 经过现场调查和监测,可以得到一些研究区现场的信息,包括当地的大气降水、包气带(地表与地下水面之间的非饱和带)的厚度以及地表污染源的存在特征. 通过多元回归分析,可以在一定程度上认识以上各因素对有机污染物输入强度的影响程度. 回归分析以点 4~7 为例,

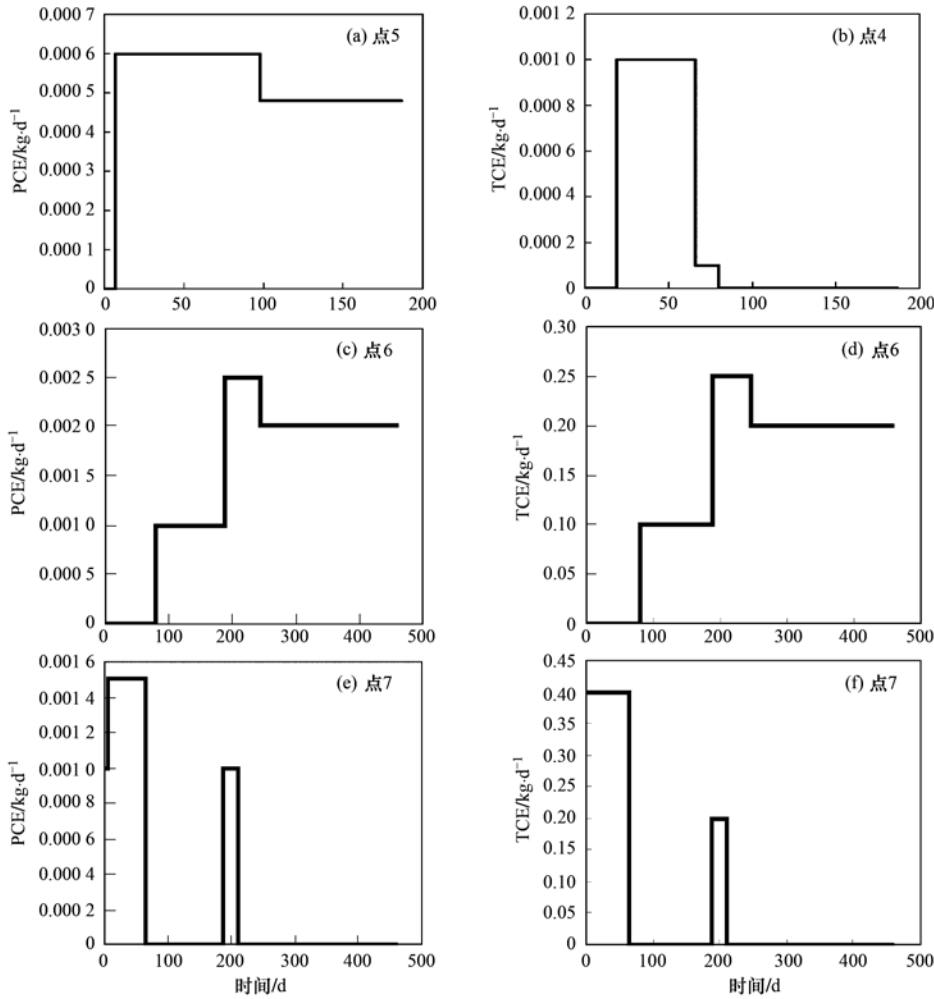


图 5 模拟期四氯乙烯和三氯乙烯输入强度函数

Fig. 5 Input intensity function of PCE and TCE during the simulation period

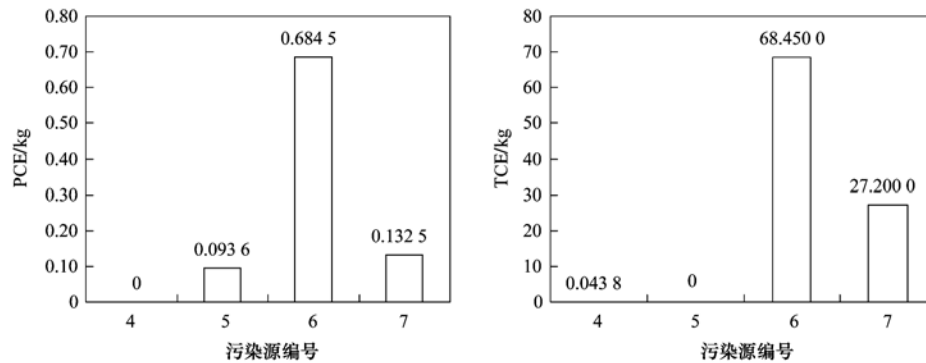


图 6 截止到 2010-3 月末含水层中四氯乙烯和三氯乙烯输入总量

Fig. 6 Total input mass of PCE and TCE in groundwater at the end of March 2010

回归分析过程如下。

3.3.1 确定目标函数

选取数值模拟中每个应力期初的 PCE 和 TCE 的输入强度值,而且包括最后一个应力期末的数据。选取每个点对应每个应力期的 PCE 和 TCE 数据作为样本。回归分析中,设每个点的 PCE 或 TCE 的输入强度为目标函数 Y 。

3.3.2 数据来源

将大气降水(x_1)、包气带厚度(x_2)和地表污染源特征(x_3)作为回归模型的自变量。大气降水采用当地气象部门的监测数据,考虑到大气降水对污染物输入的影响不是瞬间完成的,所以采用每个应力期内大气降水的累积数值。包气带厚度根据研究区地表标高和每个应力期初的水位标高计算得到。地表污染源特征参考现场调查结果确定。根据调查,点 4、6 和 7 处主要是堆放或储存废弃的机械零件和汽车零件(这些堆放物都附着有机溶剂),场地没有做防渗处理;点 5 原为机修车间,曾使用有机溶剂作为机车的清洗剂。其中点 4 和点 6 的堆放物在模拟期间逐渐累积,始终没有清除,污染物浓度呈递增趋势。点 7 处的堆放物是定期清除的,所以污染物的浓度呈现脉冲的特征,即清除前递增,清除后为零,然后再递增。点 5 在 2008 年已经停止生产,不再使用清洗剂,但生产车间仍存在,所以污染物浓度递减。

3.3.3 数据处理

为了便于回归分析而又不失数据特征,对所有数据进行极差归一化处理。设极差归一化处理前的自变量为 x_i^0 , $i = 1, 2, 3$, 处理后的自变量为 x_i , $i = 1, 2, 3$ 。

$$x_i = \frac{x_i^0 - \min_{1 \leq i \leq 3} x_i^0}{\max_{1 \leq i \leq 3} x_i^0 - \min_{1 \leq i \leq 3} x_i^0} \quad i = 1, 2, 3 \quad (1)$$

极差归一化处理后所有变量的取值范围均在 0 ~ 1 之间。

3.3.4 回归分析

首先进行线性回归分析,假设 Y 关于 x_1, x_2, x_3 的理论回归方程为:

$$Y = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3 \quad (2)$$

利用 MATLAB 统计工具箱中的逐步回归函数进行交互式逐步回归分析,寻找最优回归方程。回归分析过程中,用 $Penter$ 参数指定变量进入模型的最大显著性水平(默认值为 0.05),显著性检验的 P 值小于 $Penter$ 的变量才可能被引入模型。用 $Premove$ 参数指定从模型中剔除变量的最小显著性水平(默认值为 $Penter$ 和 0.1 的最大值),显著性检验的 P 值大于 $Premove$ 的变量有可能被剔除出模型。 $Penter$ 参数的值必须小于或等于 $Premove$ 参数的值^[43]。

在回归过程中,以点 5 ~ 7 的 PCE 或 TCE 输入强度为目标函数的回归分析通过了约束条件下的显著性检验,得到了最优的线性回归方程(图 7 和表 2)。

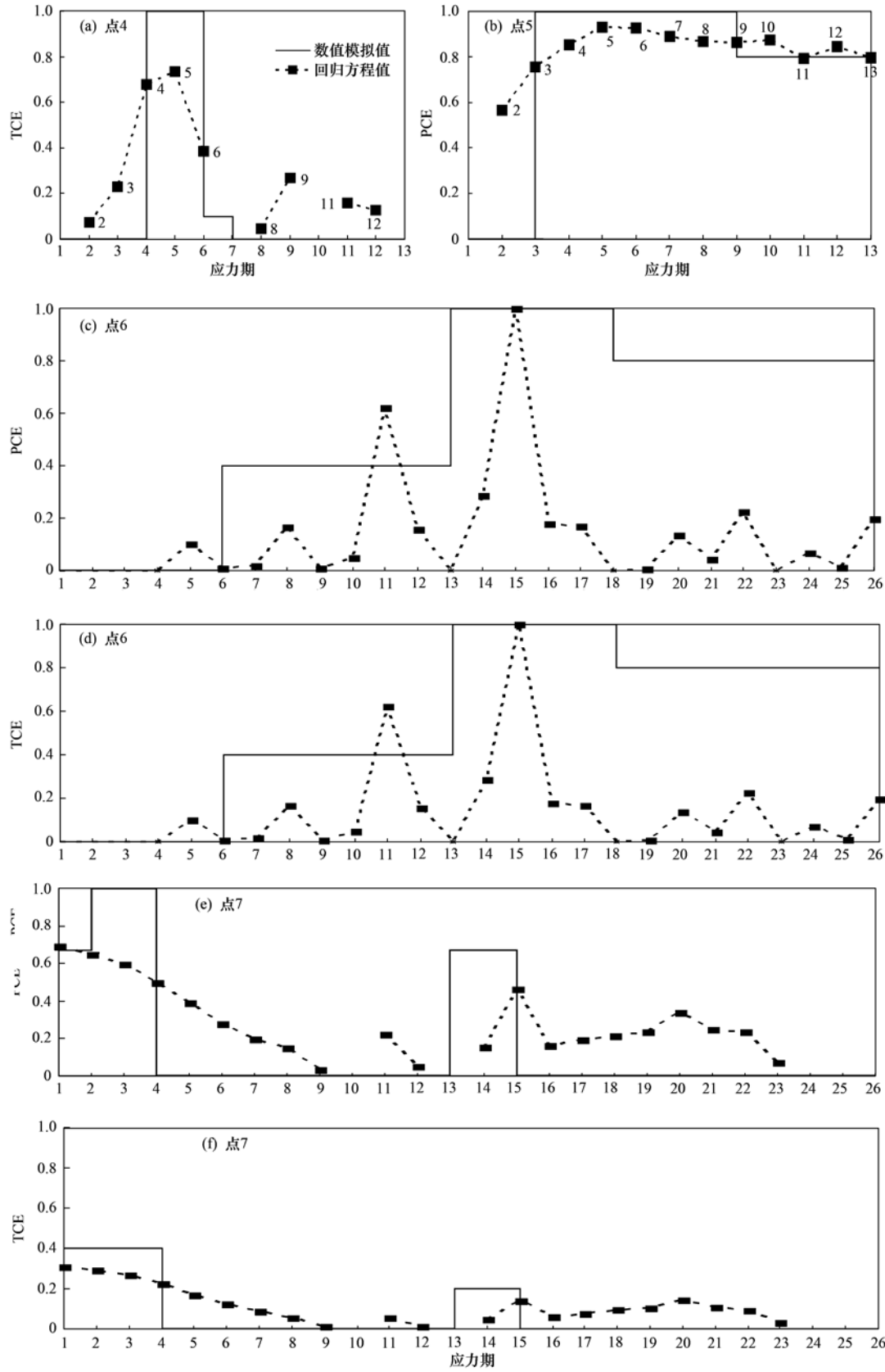
但是以点 4 的 TCE 输入强度为目标函数的回归分析没有通过约束条件下的显著性检验,所以考虑做二次回归分析。假设 Y 关于 x_1, x_2, x_3 的理论回归方程为:

$$Y = b_0 + \sum_{i=1}^3 b_i x_i + \sum_{i=1}^2 \sum_{j=i+1}^3 b_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^3 b_{ii} x_i^2 \quad (3)$$

利用 MATLAB 统计工具箱中的逐步回归函数进行交互式逐步回归分析,寻找最优回归方程。回归分析通过了约束条件下的显著性检验,得到了最优的二次回归方程(表 2)。

3.3.5 回归结果与讨论

回归分析结果显示自变量大气降水(x_1)始终没有进入点 4 和点 5 的回归方程。由于大气降水补给



纵坐标表示经过极差归一化后的有机污染物输入强度；横坐标表示每个应力期初的值；考虑到回归方程计算出的大于1或小于0的值对于本例来说没有实际意义，所以在拟合时将这数据点剔除，其它数据点保留

图7 四氯乙烯和三氯乙烯输入强度与影响因素回归分析结果

Fig.7 Regression analysis result of input intensity of PCE and TCE and influence factors

表 2 污染源输入强度与其影响因素回归分析结果¹⁾

Table 2 Regression analysis result of contaminant source input intensity and influence factors							
污染源编号	有机物	大气降水	包气带厚度	地表污染源特征	源输入强度	回归方程	调整的判定系数
4	TCE	x_1	x_2	x_3	Y	$Y = -0.6862 + 11.2042x_3 - 4.2926x_2x_3 - 10.8597x_3^2$	0.5239
5	PCE	x_1	x_2	x_3	Y	$Y = 0.7827 - 1.1081x_2 + 1.1381x_3$	0.5847
6	PCE, TCE	x_1	x_2	x_3	Y	$Y = -1.2293 + 0.01x_1$	1
7	PCE	x_1	x_2	x_3	Y	$Y = 0.6899 + 0.3934x_1 - 1.0352x_2$	0.4240
7	TCE	x_1	x_2	x_3	Y	$Y = 0.3067 + 0.1120x_1 - 0.4680x_2$	0.3101

1) 点 4 的一次回归不能通过假设检验,所以进行了二次回归;点 6 的 PCE 和 TCE 数据点经过极差归一化处理后形式相同,所以回归方程相同

地下水要滞后大气降水 1~2 月,加之计算时间为 7 个月,时间较短,所以污染物输入强度受包气带厚度变化的影响较敏感。

由于点 6 和点 7 的时间较长,而且横跨了一个水文年,就使大气降水对污染物输入的影响表现的非常明显。点 6 的回归方程表明大气降水与污染物输入存在很强的线性关系。在对点 4~7 的回归分析所得出的 5 个回归方程中,包气带厚度(x_2)进入了其中 4 个回归方程,说明包气带厚度(x_2)是污染物输入强度最重要的影响因素之一。

包气带厚度(x_2)系数接近为负值说明自变量和目标函数之间存在负相关关系,即表明包气带厚度增大,污染物输入强度减小;包气带厚度减小,污染物输入强度增大。从污染物在地下的迁移转化的角度来分析,有机污染物首先存在于地表,然后进入到包气带,最后才输入到含水层中。

地表污染源特征(x_3)的系数 >0 表明与有机物输入强度呈正相关关系。这说明,地表污染源作为有机物的原始来源在很大程度上影响着污染物向地下迁移的强度。

包气带中 PCE 和 TCE 浓度的分布在一定程度上支持了回归分析的结果^[44]。图 8 为 sw-26 附近取得的 35 cm 深包气带中 PCE 和 TCE 浓度垂向的分布。图 8 所示的浓度分布可以说明 3 个问题:第一,说明 TCE 和 PCE 首先是由地表进入到地下,然后再

进入到含水层中的;第二,从数量级($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)上看,包气带内的 TCE 和 PCE 浓度要远远大于地下水中有机的浓度($\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$),说明 TCE 和 PCE 在由地表向地下迁移的过程中很大一部分已经自然衰减了,只有一少部分进入到地下水中;第三,说明由于 TCE 和 PCE 的强挥发性,接近地表的 TCE 和 PCE 的自然衰减以挥发为主,而且挥发的比例随着埋深的增大逐渐减少,导致深部浓度高于浅部。

4 结 论

(1)以现场调查成果为基础,应用现场实验与室内实验数据,借助数值模拟技术可以有效地对污染场地的有机污染源进行识别,识别结果表明,点 4、5、6 和 7 存在点状污染源。

(2)点 sw-1、sw-9 和 sw-19 的地下水样品中 PCE 浓度分别衰减了 93.15%、61.70% 和 61.00%; TCE 分别为 70.05%、73.66% 和 63.66%,这表明地下水中的四氯乙烯和三氯乙烯在存在着天然衰减。

(3)模拟结果表明,研究区地下水中的四氯乙烯和三氯乙烯的输入呈现一种脉冲式特征。在模拟期间 PCE 的总输入量为 0.9106 kg,分别在点 5、6 和 7 输入; TCE 的总输入量为 95.6938 kg,分别在点 4、6 和 7 输入。

(4)回归分析结果说明大气降水和包气带厚度对污染物输入强度影响较大,而含水层厚度也受大气降水的影响。地表污染物特征对污染物输入强度的影响相对较小。

(5)包气带中有机物的分布也表明目前存在于包气带中的有机物是地下水中有机的最可能来源,大气降水一方面将地表的污染物携带到包气带中;一方面通过影响包气带厚度(潜水面标高)来影响有机物从包气带向含水层的迁移。

参考文献:

[1] Beneteau K M, Aravena R, Frappe S K. Isotopic characterization

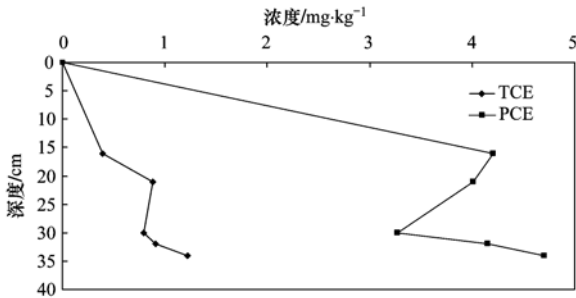


图 8 sw-26 点附近包气带内 TCE 和 PCE 垂向分布

Fig. 8 Vertical distribution of PCE and TCE in vadose zone near sw-26

- of chlorinated solvents-laboratory and field results[J]. *Organic Geochemistry*, 1999, **30**(8): 739-753.
- [2] Eguchi M, Kitagawa M, Suzuki Y K, *et al.* A field evaluation of *in situ* biodegradation of trichloroethylene through methane injection[J]. *Water Research*, 2001, **35**(9): 2145-2152.
- [3] 李纯, 武强. 地下水有机污染的研究进展[J]. *工程勘察*, 2007, **7**(1): 27-30.
- [4] 王昭, 王慧珍, 石建省, 等. 地下水有机污染研究进展[J]. *勘察科学技术*, 2008, (6): 23-27.
- [5] 李海明. 浅层地下水有机污染研究——以某城市近郊为例[D]. 北京: 中国地质大学, 2002.
- [6] 张达政, 陈鸿汉, 李海明, 等. 浅层地下水卤代烃污染初步研究[J]. *中国地质*, 2002, **29**(3): 326-329.
- [7] 何江涛, 史敬华, 崔卫华, 等. 浅层地下水氯代烃污染天然生物降解的判别依据[J]. *地球科学-中国地质大学学报*, 2004, **29**(3): 357-362.
- [8] 何江涛, 程东会, 韩冰, 等. 浅层地下水氯代烃污染天然衰减速率的估算[J]. *地学前缘*, 2006, **13**(1): 140-144.
- [9] 何江涛, 李烨, 刘石, 等. 浅层地下水氯代烃污染的天然生物降解[J]. *环境科学*, 2005, **26**(2): 121-125.
- [10] 刘明柱, 陈鸿汉, 胡丽琴. 北方某城市浅层地下水中有有机污染物迁移转化的数值模拟研究[J]. *中国地质*, 2005, **32**(3): 507-511.
- [11] 刘明柱, 陈鸿汉, 胡丽琴, 等. 生物降解作用下地下水中 TCE/PCE 迁移转化的数值模拟研究[J]. *地学前缘*, 2006, **13**(1): 155-159.
- [12] 王雪莲. 三氯乙烯的好氧共代谢与挥发模型研究[D]. 北京: 中国地质大学, 2006. 30-55.
- [13] Clement T P, Jones N J. RT3D Tutorials for GMS Users[Z]. USA: Pacific Northwest National Laboratory, 1998.
- [14] Prommer H, Barry D A, Davis G B. Modelling of physical and reactive processes during biodegradation of a hydrocarbon plume under transient groundwater flow conditions[J]. *Journal of Contaminant Hydrology*, 2002, **59**(1-2): 113-131.
- [15] Clement T P, Johnso C D, Sun Y W, *et al.* Natural attenuation of chlorinated ethene compounds: model development and field-scale application at the Dover site[J]. *Journal of Contaminant Hydrology*, 2000, **42**(2-4): 113-140.
- [16] Tsou M S, Tu K, Neville C J. Comparison of three numerical models for Chain-Decay transport simulation at a closed AFB in Texas[C]. MODFLOW 2003 Conference, Golden, Colorado, September, 2003. 17-19.
- [17] Phanikumar M S, McGuire J T. A 3D partial-equilibrium model to simulate coupled hydrogeological, microbiological, and geochemical processes in subsurface systems[J]. *Geophysical Research Letters*, 2004, **31**: L11503, doi: 10.1029/2004GL019468
- [18] Johnson C D, Truex M J. RT3D reaction modules for natural and enhanced attenuation of Chloroethanes, Chloroethenes, Chloromethanes, and daughter products[R]. USA: Pacific Northwest National Laboratory, 2006.
- [19] Fathepure B Z, Nengu J P, Boyd S A. Anaerobic bacteria that dechlorinate perchloroethene[J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 1987, **53**(11): 2671-2674.
- [20] Fathepure B Z, Vogel T M. Complete degradation of polychlorinated hydrocarbons by a two-stage biofilm reactor[J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 1991, **57**(12): 3418-3422.
- [21] Freedman D L, Gossett J M. Biological reductive dechlorination of tetrachloroethylene and trichloroethylene to ethylene under methanogenic conditions[J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 1989, **55**(9): 2144-2151.
- [22] Bagley D M, Gossett J M. Tetrachloroethene transformation to trichloroethene and cis-1, 2-dichloroethene by sulfate-reducing enrichment cultures[J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 1990, **56**(8): 2511-2516.
- [23] de Bruin W P, Kotterman M J J, Posthumus M A, *et al.* Complete biological reductive transformation of tetrachloroethene to ethane[J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 1992, **58**(6): 1996-2000.
- [24] 孙菽芬, 廖文根. 生物降解处理地下有机污染物的模型研究[J]. *水利学报*, 1994, (8): 1-9.
- [25] Doong R A, Wu S C, Chen T F. Modeling transport and fate of chlorinated hydrocarbons governed by biotic transformation in porous media[J]. *Water Research*, 1998, **32**(1): 39-46.
- [26] 李广贺, 张旭, 黄巍. 石油污染包气带中降解微生物的分布特性[J]. *环境科学*, 2000, **21**(4): 61-64.
- [27] 徐向阳, 任艳红, 黄绚, 等. 典型有机污染物微生物降解及其分子生物学机理的研究进展[J]. *浙江大学学报(农业与生命科学版)*, 2004, **30**(6): 684-689.
- [28] 张国俊, 孟洪, 薛峰, 等. TCE/PCE 的 DNAPL 污染及零价铁墙防治技术[J]. *环境污染治理技术与设备*, 2006, **7**(4): 12-18.
- [29] 刘翠英, 余贵芬, 蒋新, 等. 土壤和沉积物中多氯代有机化合物厌氧降解研究进展[J]. *生态学报*, 2007, **27**(8): 3482-3488.
- [30] 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.
- [31] 文冬光, 林良俊, 孙继朝, 等. 区域性地下水有机污染调查与评价方法[J]. *中国地质*, 2008, **35**(5): 814-819.
- [32] 刘菲, 王苏明, 陈鸿汉. 欧美地下水有机污染调查评价进展[J]. *地质通报*, 2010, **29**(6): 907-917.
- [33] 刘雪松, 蔡五田, 李胜涛. 石油类污染场地土壤与地下水污染调查实例分析[J]. *水文地质工程地质*, 2010, **37**(4): 121-125.
- [34] 陈慧川. 珠江三角洲地区顺德-民众地段地下水有机污染源分析[J]. *地下水*, 2010, **32**(6): 85-87.
- [35] Ball W P, Liu C X, Wilson R D, *et al.* Studies of contaminant diffusion in an aquitard and groundwater remediation by reactive metals at Dover air force base, Delaware[R]. USA: Air force Research Laboratory, Airbase and Environmental Technology Division, 1998.
- [36] Witt M E, Klecka G M, Lutz E J, *et al.* Natural attenuation of chlorinated solvents at Area 6, Dover Air Force Base;

- groundwater biogeochemistry [J]. Journal of Contaminant Hydrology, 2002, **57**(1-2): 61-80.
- [37] Pinder G, Ross J, Dokou Z. Optimal search strategy for the definition of a DNAPL source[R]. USA: Strategic Environmental Research and Development Program, 2009.
- [38] 王焰新. 地下水污染与防治[M]. 北京: 高等教育出版社, 2007. 100-150.
- [39] Frind E O, Hokkanen G E. Simulation of the Borden plume using the alternating direction Galerkin technique [J]. Water Resources Research, 1987, **23**(5): 918-930.
- [40] Rogers L L. History matching to determine the retardation of PCE in ground water[J]. Ground Water, 1992, **30**(1): 50-60.
- [41] Domenico P A, Schwartz F W. Physical and chemical hydrogeology[M]. (2nd ed.). New York: Wiley, 1990. 506.
- [42] 郑春苗, Bennett G D, 著. 孙晋玉, 卢国平, 译. 地下水污染物迁移模拟[M]. 北京: 高等教育出版社, 2009.
- [43] 谢中华. Matlab 统计分析与应用 40 个案例分析[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2010. 283-289.
- [44] 陈鸿汉, 何江涛, 刘菲, 等. 北京地下水有机污染调查报告[R]. 北京: 中国地质大学(北京)地调院, 2003. 61.

《环境科学》多项引证指标名列前茅

2011 年 12 月 2 日,中国科学技术信息研究所在中国科技论文统计结果发布会上公布了 2010 年度中国科技论文统计结果. 统计结果显示 2010 年度《环境科学》多项引证指标位居环境科学技术、安全科学技术类科技期刊前列.

综合评价总分 86.5,排名第一(排名前三名的期刊分别是《环境科学》86.5,《中国环境科学》77.9,《环境科学学报》77.3).

总被引频次 5 197,排名第一(排名前三名的期刊分别是《环境科学》5 197,《环境科学学报》3 914,《农业环境科学学报》3 700).

影响因子 1.125,排名第三(排名前三名的期刊分别是《环境科学研究》1.531,《中国环境科学》1.457,《环境科学》1.125).

综合评价总分是根据中国科技期刊综合评价指标体系,计算多项科学计量指标(总被引频次、影响因子、他引率、基金论文比、引文率等),采用层次分析法确定重要指标的权重,分学科对每种期刊进行综合评定,计算出每个期刊的综合评价总分. 这项指标屏蔽了各个学科之间总体指标背景值的差异,使科技期刊可以进行跨学科比较. 根据发布的统计结果,2010 年度《环境科学》综合评价总分 86.5,在被统计的 1998 种核心期刊中名列第 27 位,在被统计的 36 种环境科学技术、安全科学技术类期刊中名列第一.

CONTENTS

Stable Carbon Isotope of Black Carbon from Typical Emission Sources in China	CHEN Ying-jun, CAI Wei-wei, HUANG Guo-pei, <i>et al.</i> (673)
Characteristics of Carbonaceous Aerosol Concentration in Snow and Ice of Glaciers in Tianshan Mountains	WANG Sheng-jie, ZHANG Ming-jun, WANG Fei-teng, <i>et al.</i> (679)
Size Distribution Properties of Atmospheric Aerosol Particles During Summer and Autumn in Lanzhou	ZHAO Su-ping, YU Ye, CHEN Jin-bei, <i>et al.</i> (687)
Particle Number Size Distribution near a Major Road with Different Traffic Conditions	YANG Liu, WU Ye, SONG Shao-jie, <i>et al.</i> (694)
Atmospheric Particle Formation Events in Nanjing During Summer 2010	WANG Hong-lei, ZHU Bin, SHEN Li-juan, <i>et al.</i> (701)
Characteristics of $\delta^{18}\text{O}$ in Precipitation and Moisture Transports over the Arid Region in Northwest China	LI Xiao-fei, ZHANG Ming-jun, LI Ya-ju, <i>et al.</i> (711)
Distributions and Seasonal Variations of Total Dissolved Inorganic Arsenic in the Estuaries and Coastal Area of Eastern Hainan	CAO Xiu-hong, REN Jing-ling, ZHANG Gui-ling, <i>et al.</i> (720)
Mixing Behavior of Arsenic in the Daliaohe Estuary	JIAN Hui-min, YAO Qing-zheng, YU Li-xia, <i>et al.</i> (727)
Variation Characteristics and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in the Surface Sediments of Bohai Bay	XU Ya-yan, SONG Jin-ming, LI Xue-gang, <i>et al.</i> (732)
Distribution of PAHs in Surface Seawater of Qingdao Coast Area and Their Preliminary Apportionment	LI Xian-guo, DENG Wei, ZHOU Xiao, <i>et al.</i> (741)
Atmospheric Deposition of PAHs in Dashiwei Karst Tiankeng Group in Leye, Guangxi	KONG Xiang-sheng, QI Shi-hua, HUANG Bao-jian, <i>et al.</i> (746)
Lead Isotope Signatures and Source Identification in Urban Soil of Baoshan District, Shanghai	DONG Chen-yin, ZHANG Wei-guo, WANG Guan, <i>et al.</i> (754)
Solute Transport Modeling Application in Groundwater Organic Contaminant Source Identification	WANG Shu-fang, WANG Li-ya, WANG Xiao-hong, <i>et al.</i> (760)
Quantitative Method of Representative Contaminants in Groundwater Pollution Risk Assessment	WANG Jun-jie, HE Jiang-tao, LU Yan, <i>et al.</i> (771)
Study on the Advanced Pre-treatments of Reclaimed Water Used for Groundwater Recharge	GAO Yu-tuan, ZHANG Xue, ZHAO Xuan, <i>et al.</i> (777)
Influence of <i>Ruditapes philippinarum</i> Aquaculture on Benthic Fluxes of Biogenic Elements in Jiaozhou Bay	DENG Ke, LIU Su-mei, ZHANG Gui-ling, <i>et al.</i> (782)
Influence of Spatial Difference on Water Quality in Jiuxiang River Watershed, Nanjing	HU He-bing, LIU Hong-yu, HAO Jing-feng, <i>et al.</i> (794)
Temporal and Spatial Variation of Non-Point Source Nitrogen in Surface Water in Urban Agricultural Region of Shanghai	WANG Nan, MAO Liang, HUANG Hai-bo, <i>et al.</i> (802)
Migration and Transformation of Heavy Metals in Street Dusts with Different Particle Sizes During Urban Runoff	HE Xiao-yan, ZHAO Hong-tao, LI Xu-yong, <i>et al.</i> (810)
Treatment Studies of Industrial Rainoff With a New Type of Constructed Wetland	HE Li-jun, MA Yong-wen, WAN Jin-quan, <i>et al.</i> (817)
Emergent Retention of Organic Liquid by Modified Bentonites: Property and Mechanism	LI Yu, LIU Xian-jun, ZHANG Xing-wang, <i>et al.</i> (825)
Production of Peroxide Hydrogen in <i>Chattonella ovata</i> Hong Kong Strain	JIANG Tao, WU Ni, ZHONG Yan, <i>et al.</i> (832)
Characteristics Study of Extracellular Active Substance of <i>Bacillus</i> sp. B1 on <i>Phaeocystis globosa</i>	LI Qiang, ZHAO Ling, YIN Ping-he (838)
Effects of Sediment on the Growth of <i>Microcystis</i> and <i>Anabaena</i> in Yanghe Reservoir	CHU Zhao-sheng, ZHANG Yu-bao, JIN Xiang-can, <i>et al.</i> (844)
New-Type Electroless Excilamp for Advanced Treatment on Nitrogen-Heterocyclic Compounds (NHCs) in Aqueous Solution	YE Zhao-lian, WANG Bin, LU Juan-juan, <i>et al.</i> (849)
Preparation and Electro-catalytic Characterization on La/Ce Doped Ti-base Lead Dioxide Electrodes	ZHENG Hui, DAI Qi-zhou, WANG Jia-de, <i>et al.</i> (857)
Study on Decolorization of Triphenylmethane Dyes by DTT	PAN Tao, LIU Da-wei, REN Sui-zhou, <i>et al.</i> (866)
Influences of pH and Complexing Agents on Degradation of Reactive Brilliant Blue KN-R by Ferrous Activated Persulfate	ZHANG Cheng, WAN Jin-quan, MA Yong-wen, <i>et al.</i> (871)
Degradation Kinetics of Ozone Oxidation on High Concentration of Humic Substances	ZHENG Ke, ZHOU Shao-qi, YANG Mei-mei (879)
Index of Stability and Its Mechanisms of Aerobic Granular System Using Volume-based Information Entropy	LI Zhi-hua, JI Xiao-qin, LI Sheng, <i>et al.</i> (885)
Relationship Between Physicochemical Characteristics of Activated Sludge and Polymer Conditioning Dosage	LI Ting, WANG Yi-li, FENG Jing, <i>et al.</i> (889)
Research of Aerobic Granule Characteristics with Different Granule Age	ZHOU Man, YANG Chang-zhu, PU Wen-hong, <i>et al.</i> (896)
Effect of Size and Number of Aerobic Granules on Nitrification and Denitrification	LI Zhi-hua, ZENG Jin-feng, LI Sheng, <i>et al.</i> (903)
Optimization and Comparison of Nitrogen and Phosphorus Removal by Different Aeration Modes in Oxidation Ditch	GUO Chang-zi, PENG Dang-cong, CHENG Xue-mei, <i>et al.</i> (910)
Effect of Acidification on the Dewaterability of Sewage Sludge in Bioleaching	ZHU Hai-feng, ZHOU Li-xiang, WANG Dian-zhan (916)
Microbial Ecology Analysis of the Biofilm from Two Biological Contact Oxidation Processes with Different Performance	QIAN Yin, QUAN Xiang-chun, PEI Yuan-sheng, <i>et al.</i> (922)
Altered Microbial Communities Change Soil Respiration Rates and Their Temperature Sensitivity	FAN Fen-liang, HUANG Ping-rong, TANG Yong-jun, <i>et al.</i> (932)
Storages and Distributed Patterns of Soil Organic Carbon and Total Nitrogen During the Succession of Artificial Sand-Binding Vegetation in Arid Desert Ecosystem	JIA Xiao-hong, LI Xin-rong, ZHOU Yu-yan, <i>et al.</i> (938)
Factors Controlling Soil Organic Carbon and Total Nitrogen Densities in the Upstream Watershed of Miyun Reservoir, North China	WANG Shu-fang, WANG Xiao-ke, OUYANG Zhi-yun (946)
Impact of Microbial Aggregating Agents on Soil Aggregate Stability Under Addition of Exogenous Nutrients	MO Yan-hua, TANG Jia, ZHANG Ren-duo, <i>et al.</i> (952)
Adsorption of Aflatoxin on Montmorillonite Modified by Low-Molecular-Weight Humic Acids	YAO Jia-jia, KANG Fu-xing, GAO Yan-zheng (958)
Influence of Operating Parameters on Surfactant-enhanced Washing to Remedy PAHs Contaminated Soil	WU Wei, JIANG Lin, CHEN Jia-jun, <i>et al.</i> (965)
Study on the Land Use Optimization Based on PPI	WU Xiao-feng, LI Ting (971)
Research on Algal Diversity in Zoige Alpine Wetland	CHEN Xi, LIU Ru-yin, WANG Yan-fen, <i>et al.</i> (979)
Effects of Three Fungicides on Arbuscular Mycorrhizal Fungal Infection and Growth of <i>Scutellaria baicalensis</i> Georgi	HE Xue-li, WANG Ping, MA Li, <i>et al.</i> (987)
Community Structure and Spatial Distribution of Anaerobic Ammonium Oxidation Bacteria in the Sediments of Chongming Eastern Tidal Flat in Summer	ZHENG Yan-ling, HOU Li-jun, LU Min, <i>et al.</i> (992)
Microbial Degradation of 2,2',4,4'-Tetrabrominated Diphenyl Ether Under Anaerobic Condition	LU Xiao-xia, CHEN Chao-qi, ZHANG Shu, <i>et al.</i> (1000)
Effect of Heavy Metals on Degradation of BDE-209 by White-rot Fungus	XIONG Shi-chang, YIN Hua, PENG Hui, <i>et al.</i> (1008)
Biodegradation Mechanism of DDT and Chlorpyrifos Using Molecular Simulation	LIN Yu-zhen, ZENG Guang-ming, ZHANG Yu, <i>et al.</i> (1015)
Construction of a Microbial Consortium RXS with High Degradation Ability for Cassava Residues and Studies on Its Fermentative Characteristics	HE Jiang, MAO Zhong-gui, ZHANG Qing-hua, <i>et al.</i> (1020)
Anaerobic Digestion of Animal Manure Contaminated by Tetracyclines	TONG Zi-lin, LIU Yuan-lu, HU Zhen-hu, <i>et al.</i> (1028)
Continuous Dry Fermentation of Pig Manure Using Up Plug-Flow Type Anaerobic Reactor	CHEN Chuang, DENG Liang-wei, XIN Xin, <i>et al.</i> (1033)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

万国江 王华聪 王凯军 王绪绪 田 刚 田 静 史培军
朱永官 刘志培 汤鸿霄 陈吉宁 孟 伟 周宗灿 林金明
欧阳自远 赵景柱 姜 林 郝郑平 郝吉明 聂永丰 黄 霞
黄 耀 鲍 强 潘 纲 潘 涛 魏复盛

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2012年3月15日 33卷 第3期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 33 No. 3 Mar. 15, 2012

主 管	中国科学院	Superintended	by	Chinese Academy of Sciences
主 办	中国科学院生态环境研究中心	Sponsored	by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协 办	(以参加先后为序) 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院	Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主 编	欧阳自远	Editor-in -Chief		OUYANG Zi-yuan
编 辑	《环境科学》编辑委员会 北京市2871信箱(海淀区双清路 18号, 邮政编码:100085) 电话:010-62941102, 010-62849343 传真:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn	Edited	by	The Editorial Board of Environmental Science (HUANJING KEXUE) P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel:010-62941102, 010-62849343; Fax:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn
出 版	科 学 出 版 社 北京东黄城根北街16号 邮政编码:100717	Published	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷 装 订	北京北林印刷厂	Printed	by	Beijing Bei Lin Printing House
发 行	科 学 出 版 社 电话:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com	Distributed	by	Science Press Tel:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com
订 购 处	全国各地邮电局	Domestic		All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易总公司 (北京399信箱)	Foreign		China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 70.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行人