

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第33卷 第5期

Vol.33 No.5

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

区域空气质量模拟中查表法的应用研究	谢旻,王体健,江飞,李树,蔡彦枫,庄炳亮(1409)
长江三角洲地区秸秆露天焚烧大气污染物排放清单及其在空气质量模式中的应用	苏继峰,朱彬,康汉青,王红磊,王体健(1418)
北京及周边城市一元脂肪酸大气颗粒物干沉降通量及来源分析研究	徐小娟,李杏茹,王跃思,刘晨书,潘月鹏,王英锋(1425)
上海大气超细颗粒物和工业纳米颗粒的表征及细胞毒性的比较研究	张睿,吕森林,尚羽,易飞,任晶晶,郝晓洁,安静,吴明红(1431)
青岛市大气 PM _{2.5} 元素组成及来源研究	李秀镇,盛立芳,徐华,屈文军(1438)
冬季天津家庭室内空气颗粒物中邻苯二甲酸酯污染研究	王夫美,陈丽,焦姣,张雷波,姬亚芹,白志鹏,张利文,孙增荣,张星梅(1446)
再悬浮装置在大气 PM _{2.5} 源谱分析中的应用	段恒轶,钱冉冉,吴水平,印红玲(1452)
黔西南煤燃烧产物微量元素分布特征及富集规律研究	魏晓飞,张国平,李玲,项萌,蔡永兵(1457)
三峡水库不同运行状态下支流澎溪河水-气界面温室气体通量特征初探	蒋滔,郭劲松,李哲,方芳,白镭,刘静(1463)
香溪河库湾夏季温室气体通量及影响因素分析	王亮,肖尚斌,刘德富,陈文重,王雨春,陈小燕,段玉杰(1471)
臭氧浓度升高与土壤湿度对农田土壤微生物呼吸温度敏感性的影响	陈书涛,张勇,胡正华,史艳妹,沈小帅(1476)
托木尔峰青冰滩 72 号冰川径流水化学特征初步研究	赵爱芳,张明军,李忠勤,王飞腾,王圣杰(1484)
五大连池水溶性有机磷矿化特性的研究	张斌,席北斗,赵越,魏自民,白雪,王曼林(1491)
7 条环太湖河流沉积物氮含量沿程分布规律	卢少勇,远野,金相灿,焦伟,吴瑶洁,任德有,周羽化,陈雷(1497)
巢湖十五里河沉积物氮磷形态分布及生物有效性	李如忠,李峰,周爱佳,童芳,钱家忠(1503)
北运河系地表水近 10 年来水质变化及影响因素分析	郭婧,荆红卫,李金香,李令军(1511)
东莞运河排涝对东江河网水质影响分析	孙磊,毛献忠,黄旻旻(1519)
北京平原区地下水污染源识别与危害性分级	陆燕,何江涛,王俊杰,刘丽雅,张小亮(1526)
地下水曝气修复过程的三维数值模拟	李恒震,胡黎明,王建,武晓峰,刘培斌(1532)
垂向水动力扰动机的蓝藻控制效应数值实验研究	邹锐,周璟,孙永健,嵇晓燕,岳佳,刘永(1540)
新型生物岛栅中污染物去除的微生物机制研究	高明瑜,谢慧君,王文兴(1550)
营养盐水平对念珠藻胞外有机物产生的影响	齐飞,刘晓媛,徐冰冰,黄岳,封莉,张立秋(1556)
水网藻种植水对铜绿微囊藻生长的抑制作用研究	傅海燕,柴天,赵坤,刘智峰,张明真,侯明,许鹏成(1564)
酞酸酯在模拟海河苕草微宇宙中的消减和分布特征	迟杰,杨青(1570)
电子束辐射对铜绿微囊藻毒素产生和释放的抑制作用研究	刘书宇,吴明红,姜钦鹏(1575)
青铜峡灌区典型排水沟水污特征解析	李强坤,胡亚伟,罗良国(1579)
四溴双酚 A 的辐射降解研究	李杰,徐殿斗,徐刚,马玲玲,吴明红(1587)
污泥基活性炭催化臭氧氧化降解水中微量布洛芬的效能研究	王红娟,齐飞,封莉,张立秋(1591)
高水力负荷对人工湿地处理精养虾塘排水效果的影响	李怀正,章星异,陈卫兵,叶剑峰(1597)
城市污水生物脱氮系统出水经氯胺消毒形成 NDMA 的影响因素研究	尚晓玲,李咏梅(1604)
利用淀粉基共混物作为反硝化固体碳源的研究	沈志强,吴为中,杨春平,陈佳利,王建龙(1609)
好氧污泥颗粒化过程中 Zeta 电位与 EPS 的变化特性	王浩宇,苏本生,黄丹,崔晓姣,竺建荣(1614)
活性污泥对病毒的生物吸附特性	周玉芬,郑祥,雷洋,陈迪(1621)
阴离子型聚丙烯酰胺在离子交换膜上的吸附规律	邓梦洁,于水利,时文歆,衣雪松(1625)
两性修饰膨润土对苯酚的吸附及热力学特征	李婷,孟昭福,张斌(1632)
表面活性剂对苯并[a]芘在黑炭表面吸附解吸的影响	张景环,陈春溶,张玮航,栗桂州(1639)
南京市 4 个污水处理厂的活性污泥中细菌的分离鉴定和抗生素耐药性分析	葛峰,郭坤,周广灿,张会娟,刘济宁,戴亦军(1646)
焦化废水中苯酚降解菌筛选及其降解性能	陈春,李文英,吴静文,李静(1652)
Xanthobacter flavus DT8 降解二噁英的特性研究	金小君,陈东之,朱润晔,陈静,陈建孟(1657)
未开发油气田地表炔氧化菌空间定量分布	满鹏,齐鸿雁,呼庆,马安周,白志辉,庄国强(1663)
矿化垃圾中氧化甲烷兼性营养菌的筛选与生物特性研究	赵天涛,项锦欣,张丽杰,全学军,赵由才(1670)
长江中游干流及 22 条支流表层水中多氯联苯的分布特征及其潜在风险	李昆,赵高峰,周怀东,曾敏,廖柏寒,吴正勇,张盼伟,郝红(1676)
典型血吸虫病区表层水中酚类化合物的污染特征及潜在风险	吴正勇,赵高峰,周怀东,李科林,曾敏,李昆,张盼伟,郝红(1682)
闽江福州段沉积物中多环芳烃的空间分布异质性研究	陈卫锋,倪进治,杨红玉,魏然,杨玉盛(1687)
三峡库区蓄水运用期表层沉积物重金属污染及其潜在生态风险评价	王健康,高博,周怀东,陆瑾,王雨春,殷淑华,郝红,袁浩(1693)
典型电器工业区河涌沉积物中重金属的分布和潜在生态风险	邓代永,孙国萍,郭俊,张宏涛,张琴,许政英(1700)
密云水库上游金属矿区土壤中重金属形态分布及风险评价	高彦鑫,冯金国,唐磊,朱先芳,刘文清,李宏兵(1707)
湘西花垣矿区土壤重金属污染及其生物有效性	杨胜香,袁志忠,李朝阳,龙华,唐文杰(1718)
基于 GIS 的某训练场土壤重金属污染评价	刘玉通,方振东,杨琴,谢朝新,王大勇,毛华军(1725)
土壤质地和湿度对 SVE 技术修复苯污染土壤的影响	刘少卿,姜林,姚玉君,李艳霞,刘希涛,林春野(1731)
蒙脱土、高岭土和针铁矿对 DNA 吸附与解吸特征	王慎阳,饶伟,王代长,张亚楠,李腾,唐冰培,杨世杰(1736)
LNAPL 在砂质含水层中动态迁移的电阻率法监测试验研究	潘玉英,贾永刚,郭磊,李进军,单红仙(1744)
亚临界水解预处理稻草秸秆制备活性炭及表征	董宇,申哲民,雷阳明,王茜,刘婷婷(1753)
蓝藻好氧堆肥及其氮素损失控制的研究	任云,崔春红,刘奋武,占新华,周立祥(1760)
固定化微生物技术修复 PAHs 污染土壤的研究进展	钱林波,元妙新,陈宝梁(1767)
《环境科学》征订启事(1483)	《环境科学》征稿简则(1620)
信息	(1490,1496,1586,1743)

地下水曝气修复过程的三维数值模拟

李恒震¹, 胡黎明^{1*}, 王建¹, 武晓峰¹, 刘培斌²

(1. 清华大学水沙科学与水利水电工程国家重点实验室, 北京 100084; 2. 北京市水利规划设计研究院, 北京 100048)

摘要: 地下水曝气法是去除挥发性有机污染物的重要原位修复方法之一, 目前已得到广泛应用, 但其现场设计主要依据经验, 缺乏系统的设计标准. 为深入了解曝气去除污染物过程, 并为现场设计提供重要参考依据, 针对地下水曝气过程开展了数值模拟研究. 水气两相渗流数值模型以水压力 and 气压力作为基本未知量, 利用达西定律和质量守恒原理可以建立水气两相渗流过程的控制方程. 利用 Van Genuchten (VG) 模型及 Mualem 公式, 建立渗透系数-饱和度-基质吸力 ($K-S-P$) 三者之间的关系. 污染物的去除过程则是在水气两相渗流的基础上, 引入污染物的溶质运移、相间交换及生物降解模型. 采用开发的有限元数值模型, 对地下水曝气过程及污染物去除过程进行三维数值模拟, 并将三维数值模拟的结果与二维数值模拟的结果进行对比. 结果表明, 三维模型的曝气影响区域偏小, 在曝气口附近, 水有效饱和度最小; 在曝气口上方, 水饱和度先增大后减小. 考虑气体所受的浮力作用或不考虑气体可压缩性均会使计算得到的曝气影响区域偏小. 污染物去除边界与曝气影响区域的边界基本一致, 在曝气区域内, 溶质交换过程大大促进了污染物的去除速率; 在曝气区域外, 污染物的去除主要通过生物降解作用, 去除较慢. 结果表明实际工程地下水曝气修复系统设计时, 应使得曝气影响区域覆盖污染区域以得到较好的修复效果. 研究结果表明, 两相渗流模型结合污染物迁移转化模型的三维有限元数值模拟可以较好地模拟地下水曝气法去除污染物的全过程, 对地下水曝气的设计、应用与效果评价具有重要指导意义.

关键词: 地下水曝气法; 水气两相渗流; 污染物去除; 三维; 数值模拟

中图分类号: X523 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2012)05-1532-08

3D Numerical Simulation of Air Sparging Remediation Process

LI Heng-zhen¹, HU Li-ming¹, WANG Jian¹, WU Xiao-feng¹, LIU Pei-bin²

(1. State Key Laboratory of Hydrosience and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. Beijing Institute of Water, Beijing 100048, China)

Abstract: Air sparging (AS) is an important in situ remedial technology which was widely used in groundwater remediation for volatile organic compounds (VOCs). However, lack of standards, the field design of air sparging system was mainly based on experience. In order to further explore the process of contaminant removal by AS and provide principles for field design, numerical simulation of air sparging process was conducted. In the process of water-air two phase flow, Darcy's law and mass conservation law were employed to get the control equations of water and air transport. The relationship between permeability-saturation-suction ($K-S-P$) was described by the Van Genuchten (VG) model and Mualem formula. Based on the water-air two phase flow, numerical simulation of contaminant removal was performed regarding the solute transport, inter-phase mass transfer and biodegradation model. 3D FEM model was developed to simulate the air sparging process and compared with the 2D simulation results. As shown in the simulation results, the zone of influence (ZOI) calculated by the 3D model is much smaller, and the lowest water saturation occurs near the sparging point while above the point the water saturation goes higher then lower. Either considering buoyant force or neglecting the air compressibility makes the ZOI smaller. The contaminant removal zone fits well with sparging influence zone. Within the ZOI, solute transfer enhances removal process while biodegradation which is the main removal factor outside the ZOI makes the removal process slow. The results suggest a better remediation effect is achieved when the contaminant zone is covered by the air sparging ZOI. It is shown that two phase flow model combined with contaminant removal could be applied to well simulate the whole process of air sparging, instructive and meaningful to the in-situ air sparging design, application and effectiveness evaluation.

Key words: air sparging; water-air two phase flow; contaminant removal; 3D; numerical simulation

地下水曝气法 (air sparging, AS) 是去除地下水 中挥发性有机污染物的主要技术之一. 其将洁净的 空气以一定气压力注入受污染的地下水饱和区, 由于气压力梯度、地下水浮力和毛细压力的作用, 气体 将向上运动. 空气向上的流动使饱和土体中的有机 组分产生解吸和挥发等作用, 挥发性污染物随同气 体一同溢出地表, 回收处理, 从而达到去除地下水污

染物的目的. 同时, 由于曝气带来的氧气浓度增加, 促进了好氧微生物的生物降解作用, 加快了污染物

收稿日期: 2011-07-14; 修订日期: 2011-10-14

基金项目: 北京市科委 2008 年度科技计划重大项目 (D07050601510000); 水利部公益性行业科研专项经费项目 (200801012); 国家自然科学基金项目 (50879038)

作者简介: 李恒震 (1987 ~), 男, 博士研究生, 主要研究方向为环境 岩土工程, E-mail: lihz09@mails.tsinghua.edu.cn

* 通讯联系人, E-mail: gehu@mail.tsinghua.edu.cn

的去除,其示意图如图 1 所示.地下水曝气法因其成本低廉、设备简单、处理周期短、效果显著、可与土壤气相抽提法联合使用等优点^[1,2]而被广泛使用.

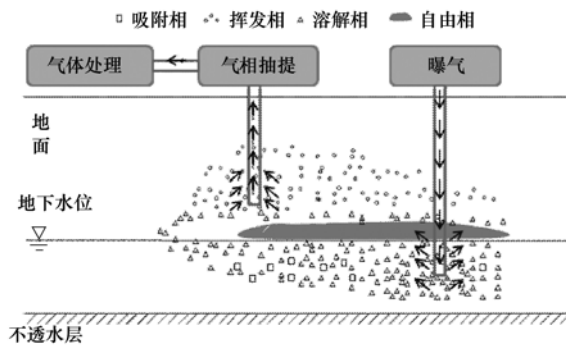


图 1 地下水曝气法修复技术示意

Fig. 1 Scheme for air sparging technology

尽管地下水曝气修复技术已经成功应用于受污染含水层的修复,但迄今为止曝气修复系统没有公认的设计标准,修复系统的设计主要依靠经验.对于地下水曝气法的数值模拟可以指导现场曝气的设计以及评价曝气的效果,具有重要意义.国外对于曝气过程的数值模拟进行了一定的研究.在水气两相渗流方面,Mohtar 等^[3]开发了二维的稳态计算模型“SPARG”来预测曝气过程中基质吸力的分布. Huyakorn 等^[4]和 Panday 等^[5]开发三维的多相渗流模型描述 NAPL 运动过程.该模型可以简化为两相渗流模型.同样没有考虑空气的压缩性和浮力作用. Van Dijke 等^[6]采用多相渗流模型,模拟了轴对称各相同性介质中的瞬态过程.其研究并非真三维模型,同样也没有考虑空气的可压缩性和浮力. Mei 等^[7]首先考虑了多孔介质中空气的压缩性,但没有考虑浮力的影响,并只进行了二维计算.水气两相渗流结合污染物去除的数值模拟很少. Jang 等^[8,9]对水气两相渗流及污染物去除过程进行三维的有限元数值模拟.忽略了空气的压缩性、浮力以及生物降解作用.目前国内对于曝气过程的数值模拟研究起步较晚,研究也不深入.郑艳梅等^[10]进行了水、气两相渗流的二维模拟计算.没有考虑空气压缩性、浮力的影响,也没有模拟污染物运移过程.王建等^[11]考虑空气压缩性,对曝气的水气两相渗流过程进行二维数值模拟,但其研究中未考虑浮力作用.

本研究利用两相渗流模型模拟水气两相渗流过程,并结合污染物迁移转化过程,模拟三维曝气修复过程.在两相渗流的数值模拟中,运用达西定律描述流体在土体中运动,根据水和气的质量守恒建立控制方程,并使用 VG 模型及 Mualem 公式建立渗透系

数-饱和度-基质吸力 ($K-S-P$) 三者关系.与此同时,考虑空气的压缩性及浮力对于水气两相渗流的影响.在污染物的迁移转化过程中,考虑溶解相和挥发相污染物的对流和水动力弥散过程,吸附相、溶解相、挥发相的污染物之间的溶质交换过程,以及污染物的生物降解过程进行污染物去除的模拟.在 COMSOL 有限元数值计算平台上,进行模型二次开发,实现三维曝气修复过程的模拟.对地下水曝气的设计、应用与效果评价具有重要指导意义.

1 理论模型

在地下水曝气过程中,存在水气两相渗流和污染物去除 2 个基本物理过程.本节将首先分别对 2 个过程进行理论研究,推导基本控制方程,在此基础上介绍所采用的参数关系曲线,并对数值模拟的二次开发工作进行理论介绍.

1.1 控制方程

1.1.1 水气两相渗流

地下水曝气法首先将气体注入饱和土体中,在这个过程中,涉及水和气在土体中的运动.土壤是典型的多孔介质.描述流体在多孔介质中的运动常采用达西定律^[12]:

$$\mathbf{u}_f = -\frac{\kappa \cdot k_{rf}}{\eta_f} (\nabla p_f + \rho_f g \nabla D), f = \text{nw}, \text{w} \quad (1)$$

式中, $\mathbf{u}_f$ 为达西流速向量 [LT^{-1}]; κ 为多孔介质的固有渗透系数 [L^2]; k_{rf} 为流体的相对渗透系数; η_f 为流体的动力粘滞系数 [$\text{ML}^{-1}\text{T}^{-1}$]; p_f 为流体压力 [$\text{ML}^{-1}\text{T}^{-2}$]; ρ_f 为流体密度 [ML^{-3}]; g 为重力加速度 [LT^{-2}]; D 为重力方向的单位向量 [L]; f 代表流体种类; nw 和 w 分别代表空气和水.

在流体的运动过程中,根据质量守恒方程,对于流体有:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_f \theta_f) + \nabla \cdot \rho_f \mathbf{u}_f = \rho_f Q_s \quad (2)$$

式中, θ_f 为流体的体积分数; Q_s 为流体的源项.

令:

$$S_{ef} = \begin{cases} (\theta_w - \theta_{rw}) / (\theta_s - \theta_{rw}), f = \text{w} \\ (\theta_{nw} - \theta_{rnw}) / (\theta_s - \theta_{rnw}), f = \text{nw} \end{cases} \quad (3)$$

式中, S_{ef} 为流体的有效饱和度; θ_s 为土壤中饱和体积含水量或孔隙率; θ_{rw} 为残余含水量; θ_{rnw} 为残余含气量.在计算中认为 $\theta_{rw} = \theta_{rnw} = 0$.

对于空气,假定其为理想气体,满足理想气体状态方程^[11]:

$$\rho_{nw} = \frac{m_{nw}}{V_{nw}} = p_{nw} \frac{M_{nw}}{RT} \quad (4)$$

式中, V_{nw} 为气体体积 [L^3], M_{nw} 为气体的摩尔质量 [M], T 为绝对温度 [Q].

将公式(3)、(4)带入公式(2), 认为温度恒定并不考虑源项, 可得:

$$\begin{cases} C_{pw} \frac{\partial(p_{nw} - p_w)}{\partial t} + \nabla \cdot \left[-\frac{\kappa \cdot k_{rw}}{\eta_w} (\nabla p_w + \rho_w g \nabla D) \right] = 0 \\ A \frac{\partial p_{nw}}{\partial t} + B \frac{\partial p_w}{\partial t} + \nabla \cdot p_{nw} \left[-\frac{\kappa k_{nw}}{\eta_{nw}} (\nabla p_{nw} + \rho_{nw} g \nabla D) \right] = 0 \end{cases} \quad (5)$$

其中:

$$\begin{cases} C_{pw} = (\theta_s - \theta_{rw}) \frac{\partial S_{ew}}{\partial(p_{nw} - p_w)} \\ A = S_{enw} \cdot (\theta_s - \theta_{rw}) - p_{nw} C_{pw}, B = p_{nw} C_{pw} \end{cases} \quad (6)$$

1.1.2 污染物迁移转化

石油烃类污染物在土壤中的存在形式有自由相、吸附相、溶解相、挥发相这 4 种. 工程实践中, 对于大量的自由相污染物采用直接抽取的方式进行去除. 因此, 在污染物去除的模拟中, 只考虑曝气对于吸附相、溶解相、挥发相这 3 种相态的去除.

吸附相的污染物附着在土颗粒表面, 无法自由运动. 为了简化计算, 模型中假设吸附相污染物只与溶解相污染物存在交换. 因此, 其去除通过与溶解相的吸附/解吸作用、生物降解作用进行. 对于吸附/解吸过程往往采用平衡吸附模型^[13]. 本研究采用 Henry 线性吸附模式, 并假设瞬时达到吸附平衡. 因此有:

$$C_p = k_p \rho_w \quad (7)$$

式中, C_p 为单位质量土颗粒所吸附的污染物质量, k_p 为分布系数 [$M^{-1}L^3$], ρ_w 为溶解相污染物的质量浓度 [ML^{-3}].

对于生物降解过程, 采用 MONOD 一级降解模型^[14~16]. 对于吸附相污染物, 有:

$$R_p = -\rho_b \varphi_p C_p = -\rho_b \varphi_p k_p \rho_w \quad (8)$$

式中, R_p 为吸附相的降解速率 [$ML^{-3}T^{-1}$], ρ_b 为土的干密度 [ML^{-3}], φ_p 为降解系数 [T^{-1}].

对于溶解相污染物, 有:

$$R_{Lw} = -\theta_s \varphi_{Lw} \rho_w \quad (9)$$

式中, R_{Lw} 为溶解相的降解速率 [$ML^{-3}T^{-1}$], φ_{Lw} 为降解系数 [T^{-1}].

对于溶解相和挥发相的污染物, 考虑到其对流

和水动力弥散作用、溶质交换及生物降解作用, 根据污染物的质量守恒方程, 有:

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial t} (\theta_s S_{enw} \rho_{nw}) + \nabla \cdot [-\theta_s S_{enw} D_{nw} \nabla \rho_{nw}] + \\ \nabla \cdot (q_{nw} \rho_{nw}) = I_{nw} \\ \frac{\partial}{\partial t} (\theta_s S_{ew} \rho_w) + \rho_b k_p \frac{\partial \rho_w}{\partial t} + \nabla \cdot [-\theta_s S_{ew} D_w \nabla \rho_w] + \\ \nabla \cdot (q_w \rho_w) = I_w + R_{Lw} + R_p \end{cases} \quad (10)$$

式中, ρ_{nw} 为挥发相污染物的质量浓度 [ML^{-3}], D 为水动力弥散系数 [L^2T^{-1}], 包括分子扩散和机械弥散, q 为流体通量 [LT^{-1}], I_w 为单位时间内由于水气交换造成溶解相的质量浓度增量 [$ML^{-3}T^{-1}$], I_{nw} 为单位时间内由于水气交换造成挥发相的质量浓度增量 [$ML^{-3}T^{-1}$], 采用传统的一阶关系式^[8]:

$$I_w = -I_{nw} = \theta_s S_{ew} \lambda_H (\rho_{nw} - H \rho_w) \quad (11)$$

式中, λ_H 为水和气之间的一阶质量转移系数 [T^{-1}]; H 为无量纲的亨利系数. 相间的溶质转移量同相间的相对速度相关. 当气相的速度 $< 0.04 m \cdot s^{-1}$ 时, 水相与气相之间的转移系数可以写成^[9]:

$$\lambda_H = 0.45 |q_{nw}| \quad (12)$$

1.2 K-S-P 关系曲线

在水气两相渗流计算中, 以气压力与水压力为基本未知量. 水、气饱和度通过 S - P 曲线与水压力、气压力建立联系. 本研究的 S - P 曲线采用 Van Genuchten 公式^[17]:

$$S_{ew} = \begin{cases} \frac{1}{[1 + (\alpha H_c)^n]^m} (H_c > 0) \\ 1 (H_c \leq 0) \end{cases} \quad (13)$$

式中, $H_c = (p_{nw} - p_w) / (\rho_w g)$, α 表征平均粒径大小, n 表征粒径均匀性, 且 $m = 1 - 1/n$.

渗透系数与饱和度通过 Mualem 积分模型^[18]建立联系.

$$\begin{cases} k_{rw} = S_{ew}^{0.5} [1 - (1 - S_{ew}^{\frac{1}{m}})^m]^2 \\ k_{rnw} = S_{enw}^{0.5} [1 - S_{enw}^{\frac{1}{m}}]^{2m} \end{cases} \quad (14)$$

1.3 数值模型开发

数值模拟在 COMSOL 有限元计算平台上进行. COMSOL 是一款大型的高级数值仿真软件, 以有限元法为基础, 通过求解偏微分方程或偏微分方程组来实现真实物理现象的仿真模拟, 对于多物理场可以很好地进行计算、模拟、仿真. 本研究所使用版本为 COMSOL 3.4.

本研究在 COMSOL 的 PDE 模块上进行二次开

发. 将地下水曝气过程中的物理现象进行详细分析, 建立计算模型, 确定控制方程、边界条件、初始条件, 并对模型的参数进行定义、赋值和优化, 实现了地下水曝气过程的三维数值模拟.

2 模型选取与计算参数

2.1 计算模型

数值计算采取的三维物理模型如图 2 所示. 计算区域为底面半径 1 m、高 2 m 的圆柱体区域. 地下水位在地面以下 0.5 m, 顶面与大气连通. 曝气口位于距离底面圆心上方 0.5 m 处, 为球状曝气口, 半径 0.02 m. 剖面图如图 3 所示. 曝气压力为 1.5 m 水头高度.

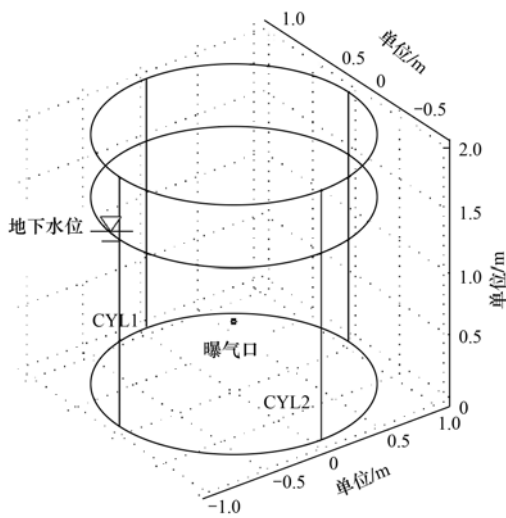


图 2 模型示意

Fig. 2 A sketch map of air sparging calculation model

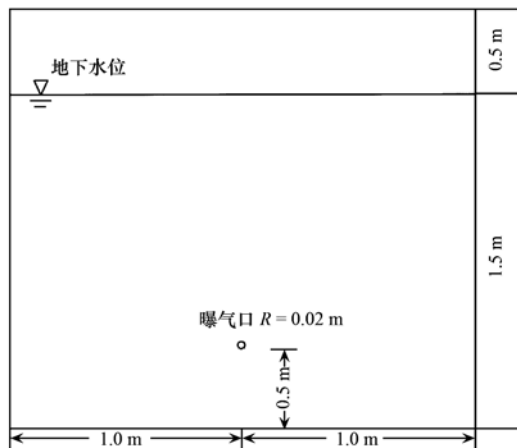


图 3 模型纵剖面示意

Fig. 3 A profile map of air sparging calculation model

2.2 计算条件

对于水气两相渗流模拟, 只计算达到最终稳定状态时的水气分布, 采用稳态计算. 而对于污染物去

除过程, 模拟污染物在不同时间内的去除过程, 采用瞬态计算.

在污染物去除过程中, 初始条件参照 Jang 等^[8]: 设置挥发相污染物初始浓度为 0; 饱和区溶解相污染物初始浓度为 $0.05 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$, 在非饱和区浓度为 0; 吸附相污染物在饱和区浓度为 $5 \times 10^{-3} \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 在非饱和区浓度为 0.

2.3 参数选取

在求解域内, 计算参数的选取参照 Jang 等^[9], 如表 1 所示. 在曝气的过程中, 气体密度远小于水密度, 因此受到向上的浮力作用, 在计算中通过气体密度与水密度的差值来考虑浮力作用.

表 1 计算参数选取

Table 1 Calculation parameters			
参数名称	符号	单位	取值
土体固有渗透系数	κ	m^2	2.5×10^{-9}
孔隙率	θ_s	1	0.32
残余液体体积分数	θ_r	1	0
VG 公式参数	α	1	1.89
VG 公式参数	n	1	2.8
VG 公式参数	m	1	0.64
分子扩散系数(水中)	D_w	$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$	7.0×10^{-10}
分子扩散系数(气中)	D_{nw}	$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$	6.0×10^{-6}
横向机械弥散率	α_1	m	0.1
纵向机械弥散率	α_3	m	1
亨利系数	H	1	0.3
溶解相降解系数	φ_w	s^{-1}	6.0×10^{-8}
吸附相降解系数	φ_p	s^{-1}	8.0×10^{-8}
土体干密度	ρ_b	$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	1 600
亨利吸附模式分布系数	k_p	$\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$	1.0×10^{-4}

3 结果与分析

3.1 水气两相渗流分析

在三维模型中, 选取圆柱体轴所在的平面, 绘制水相有效饱和度分布图, 如图 4 所示. 从中可以看出, 水有效饱和度在曝气口附近最小, 从曝气口向两侧, 水有效饱和度不断减小.

曝气口上方水有效饱和度沿 Z 轴的分布如图 5 所示. 从中可以看出, 沿 Z 轴水有效饱和度先增加后减小. 在曝气口附近, 气体的运动主要受压力梯度控制; 当气体逐渐上升, 浮力则成为造成气体运动的主要动力.

气体运动如图 6 及图 7 所示. 箭头方向代表气体运动方向, 长度反映气体速度的大小.

在距离曝气口上方 0.5 m 处的水平面上, 分析气体速度的分布. 取该平面上与 X 轴平行的直线, 绘制气体速度分布图, 如图 8 所示. 从中可以看出,

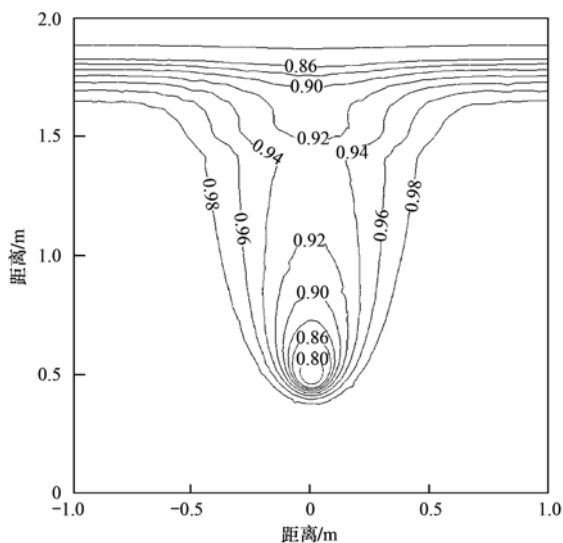


图4 剖面水有效饱和度分布示意

Fig. 4 Effective water saturation distribution of profile map

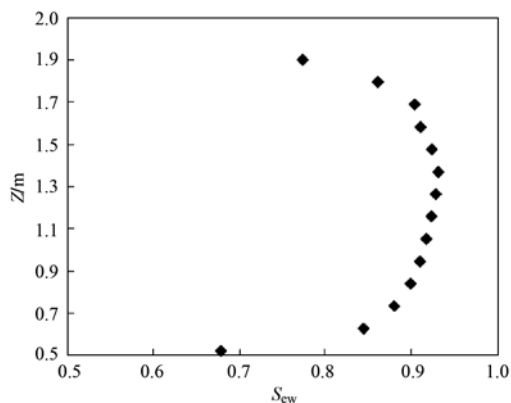


图5 曝气口上方轴线水有效饱和度分布

Fig. 5 Effective water saturation distribution along the axis above the sparging point

气体运动速度在曝气区域中心位置最大,向两侧逐渐减小。

在数值模拟中,本研究使用 VG 模型公式拟合 S - P 曲线。该模型的曲线是平滑的,未能反映土体的进气值。本研究使用如下方法来确定曝气影响区域:根据 VG 模型曲线确定土壤的进气压力,该进气压力对应的水有效饱和度为曝气区域边界的水有效饱和度。在该算例中,进气压力为 1.5 kPa,对应水有效饱和度为 0.98。因此,曝气影响区域由水有效饱和度为 0.98 的位置确定。

在计算参数完全相同的情况下,将三维计算的影响区域同二维计算结果进行对比,结果如图 9 所示。从中可以看出,三维模型的计算曝气影响区域比二维影响区域小。

在三维模拟中,将既考虑浮力又考虑气体压缩

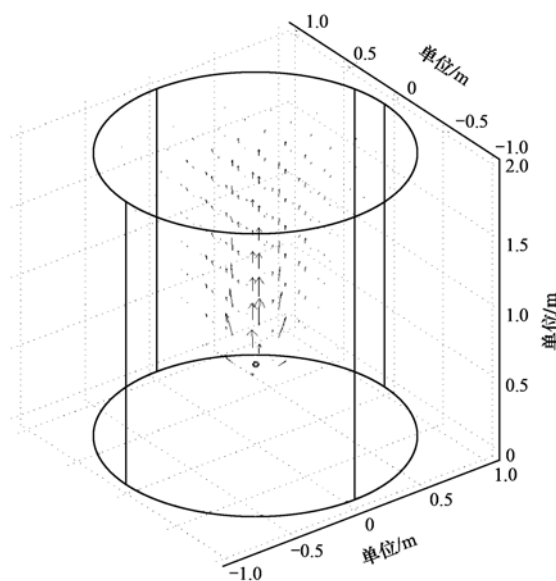


图6 气体运动三维示意

Fig. 6 A 3D sketch map of the air movement

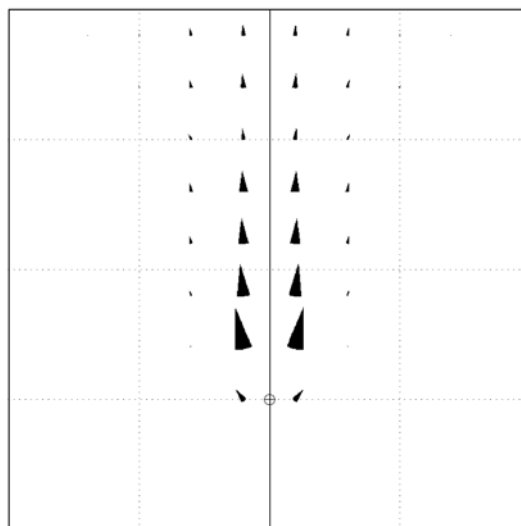


图7 气体运动二维示意

Fig. 7 A 2D sketch map of the air movement

性的曝气影响区域、不考虑浮力的曝气影响区域、不考虑可压缩性的曝气影响区域进行比较,结果一并绘制于图 9 所示。从中可以看出,考虑气体所受的浮力影响后,影响区域有很明显的缩小。而考虑空气可压缩性后,影响区域会比不考虑空气可压缩性的影响区域略大,但差别非常小。这是由于模拟中所加的气压力值较小所致。

从水气两相渗流的模拟结果中,可以获得如下结论。

- (1) 利用两相渗流模型,并考虑气体的压缩性和浮力,可以较好地模拟三维情况下水气运动过程。
- (2) 在曝气过程中,曝气口附近的水有效饱和

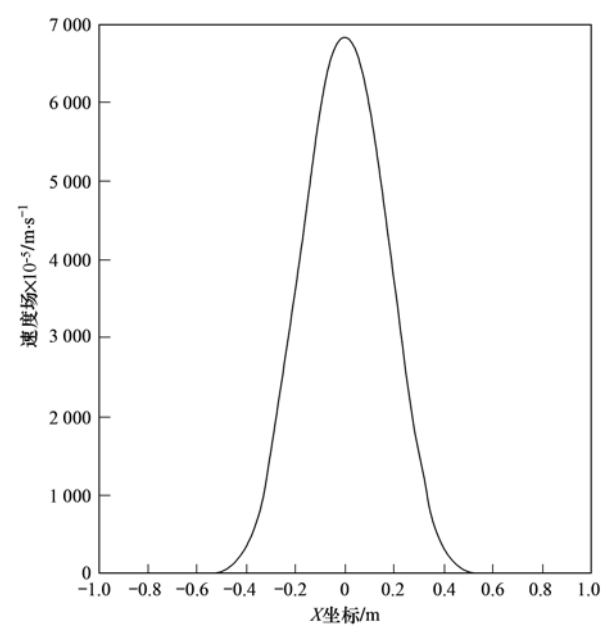


图8 X轴气体速度值曲线($Y=0, Z=1$)

Fig. 8 Air velocity value along the X axis($Y=0, Z=1$)

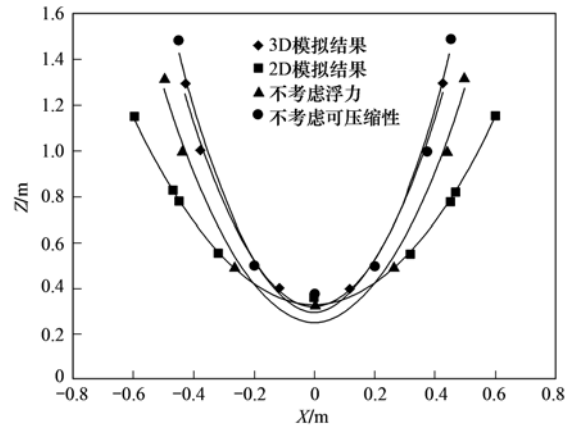


图9 曝气影响区域比较

Fig. 9 Comparison of zone of influence

度最小.在曝气口上方,水饱和度先增大后减小.这是由于气体在曝气口附近主要受压力梯度控制,而随着气体向上运动,浮力起主要作用.

(3)在曝气过程中,气体运动速度在曝气区域中心位置最大,向两侧逐渐减小.

(4)同二维水气两相渗流计算结果相比较,三维计算的曝气影响区域偏小.考虑气体浮力作用会使模拟的曝气影响区域变小.而考虑空气可压缩性使得模拟的曝气影响区域变大.

3.2 污染物去除分析

污染物去除过程的三维模拟采用瞬态计算.选取0.5、5、50 d这3个时间点,来展现污染的去除过程.与3.1节类似,同样选取圆柱轴线所在的剖面

进行分析.
对于溶解相污染物,0.5、5、50 d的浓度分布图如图10~12所示.

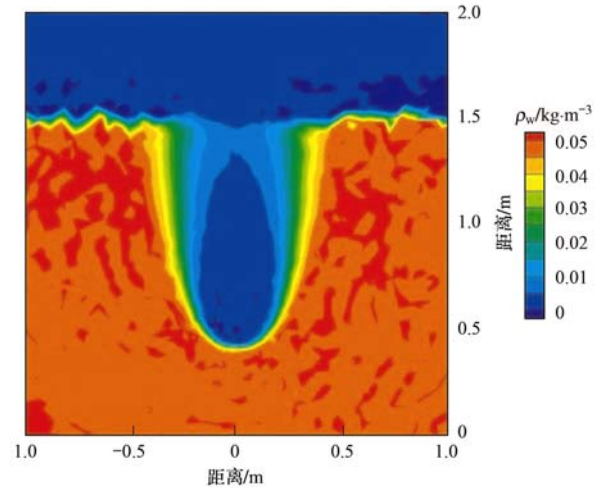


图10 溶解相浓度分布图(0.5 d后)

Fig. 10 Concentration distribution of dissolved contaminant after 0.5 day

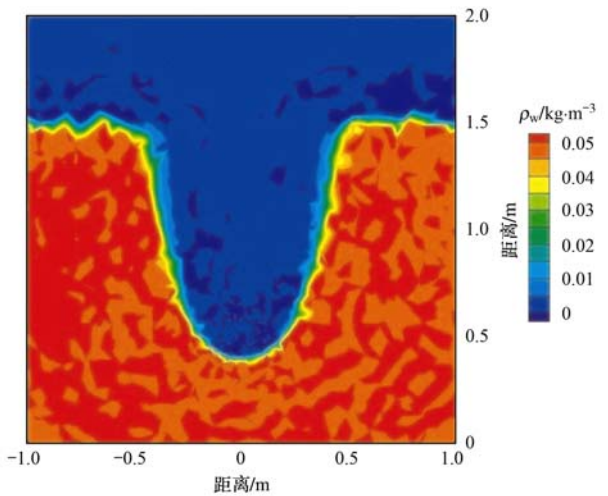


图11 溶解相浓度分布图(5 d后)

Fig. 11 Concentration distribution of dissolved contaminant after 5 days

从图10~12可以看出,在曝气区域内,由于水相和气相之间的溶质交换作用,溶解相污染物的去除速率明显提高,在50 d后,曝气区域内的溶解相污染物浓度基本为0.在曝气区域外,溶解相污染物的去除主要由生物降解作用完成.其去除速率较慢.在模型中,假设吸附相污染物与溶解相污染物瞬时达到吸附平衡,浓度关系如公式(7)所示.因此对于吸附相污染物的分布规律与溶解相类似.而挥发相污染物在曝气过程中不断被带出,浓度非常小(在 10^{-8} 量级),在此不做详尽分析.

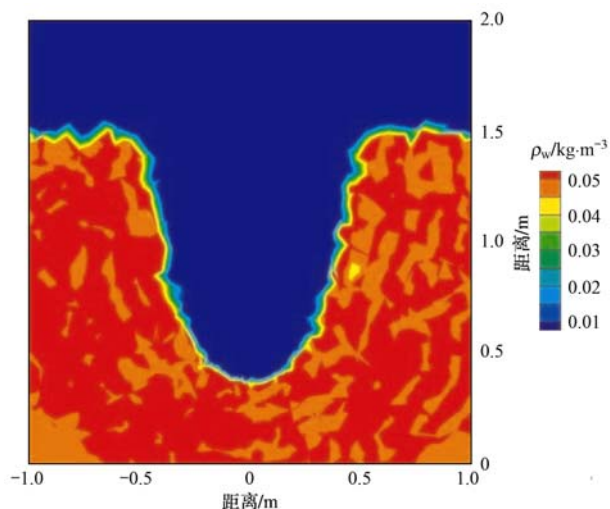


图 12 溶解相浓度分布图(50 d 后)

Fig. 12 Concentration distribution of dissolved contaminant after 50 days

当去除时间达到 50 d 时,污染物的去除范围基本达到稳定.其去除边界与曝气影响区域边界基本一致.如图 13 所示,其中,黑线为曝气影响区域边界.

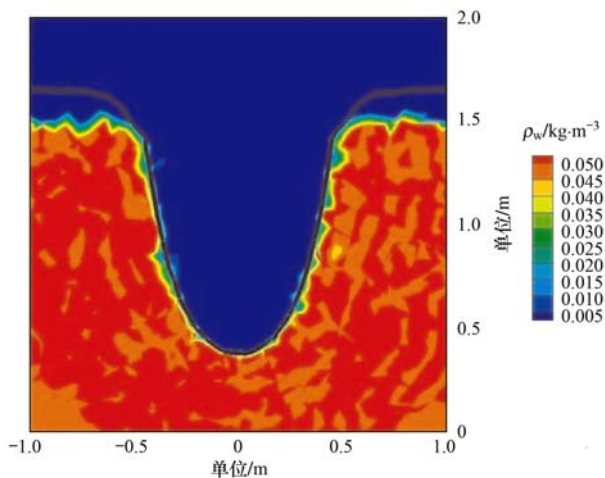
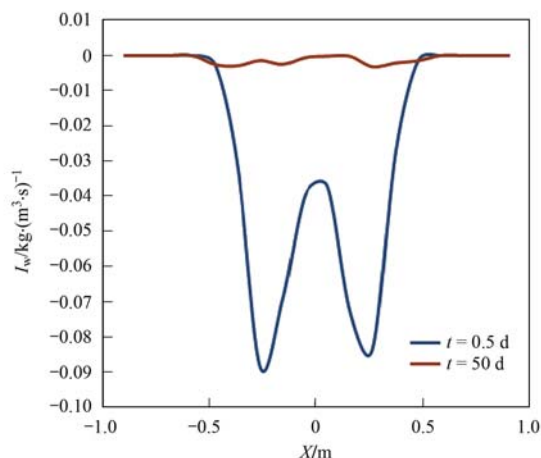


图 13 曝气影响区域与污染物去除边界比较

Fig. 13 Comparison between the air sparging ZOI and contaminant removal zone

分析溶解相污染物与挥发相污染物交换速率的时空分布规律.仍然选取曝气口上方 0.5 m 处水平面上与 X 轴平行的直线,分析其 I_w 值.在曝气 0.5 d 及 50 d 后的 I_w 值分布如图 14 所示.从中可以看出,在曝气初始阶段,大量的溶解相污染物挥发,主要发生在曝气区域内部.最大值出现在水气的交界面处.随着曝气时间的增长,溶解相污染物已基本去除,溶解相污染物与挥发相污染物交换速率趋近于 0.

在地下水曝气过程中,生物降解对污染物的去除起着重要作用.图 15 显示的是曝气 0.5 d 和 50 d

图 14 I_w 分布示意Fig. 14 I_w distribution

时生物降解速率沿曝气口上方 0.5 m 处水平面上与 X 轴平行的直线的变化情况.从中可以看出,在曝气区域之外,生物降解维持一定速率,在 $10^{-9} \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{s})^{-1}$ 量级.在曝气区域之内,曝气初始阶段时的生物降解速率在水饱和度高的地方较高;曝气达到稳定时,曝气区域内的生物降解速率基本为 0.这是由于降解主要发生在溶解相污染物和吸附相污染物中,且降解速率与污染物浓度成正比.

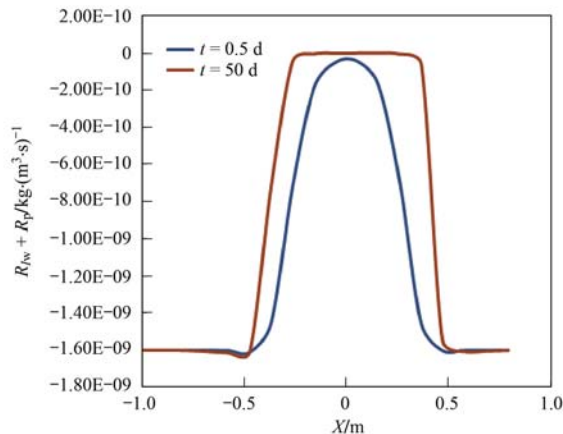


图 15 生物降解速率分布示意

Fig. 15 Distribution of biodegradation rate

从以上分析可以看出,在污染物去除过程的模拟中,可以再现曝气法去除污染物的过程.污染物去除边界与曝气区域影响边界基本一致.在曝气区域内,水相和气相之间的溶质交换作用明显加快了溶解相污染物的去除速率.溶解相污染物与挥发相污染物交换主要发生在曝气区域内部,最大值出现在水气的交界面处.在曝气区域外,溶解相污染物的去除速率趋近于 0.在曝气区域外,溶解相污染物的去除速率趋近于 0.

定时,曝气区域内的生物降解速率基本为0,曝气区域外仍维持在较高的速率。

4 结论

(1)利用两相渗流模型,并考虑气体的压缩性和浮力,可以较好地模拟三维情况下水气运动过程。

(2)在曝气过程中,曝气口附近的水有效饱和度最小。在曝气口上方,由于气体驱动力由压力转变为浮力,水饱和度先增大后减小。

(3)同二维水气两相渗流计算结果相比较,三维计算的曝气影响区域偏小。考虑气体浮力作用会使模拟的曝气影响区域变小。而考虑空气可压缩性使得模拟的曝气影响区域变大。

(4)考虑到对流、水动力弥散过程、溶质交换以及生物降解过程,可以通过有限元法模拟三维模型的污染物去除过程。

(5)污染物去除边界与曝气影响区域的边界基本一致。在曝气区域内,溶质交换过程大大促进了污染物的去除速率。而在曝气区域外,污染物的去除主要通过生物降解作用,去除较慢。

(6)曝气初始阶段,溶解相污染物与挥发相污染物交换主要发生在曝气区域内部,最大值出现在水气的交界面处;生物降解速率在水饱和度高的地方较高。曝气达到稳定时,曝气区域内的溶质交换速率和生物降解速率基本为0。

参考文献:

- [1] USEPA. How to Evaluate Alternative Cleanup Technologies for Underground Storage Tank Sites: A Guide for Corrective Action Plan Reviewers [EB/OL]. http://www.epa.gov/oust/pubs/tum_ch7.pdf, 1994-10.
- [2] 王志强, 武强, 邹祖光, 等. 地下水石油污染曝气治理技术研究[J]. 环境科学, 2007, **28**(4): 754-760.
- [3] Mohtar R H, Wallace R B, Segerlind L J. Finite element simulation of oil spill cleanup using air sparging [J]. Computational Methods in Water Resource, 1994, **10**(2): 967-974.
- [4] Huyakorn P S, Pinder G F. Computational Methods in Subsurface Flow[M]. New York: Academic Press, 1983. 432-436.
- [5] Panday S, Wu Y S, Huyakorn P S, *et al.* A 3-dimensional multiphase flow model for assessing NAPL contamination in porous and fractured media. 2. Porous medium simulation examples[J]. Journal of Contaminant Hydrology, 1994, **16**(2): 131-156.
- [6] Van Dijke M, Van der Zee I J, Van Duijn C J. Multi-phase flow modeling of air sparging [J]. Advances in Water Resources, 1995, **18**(6): 319-333.
- [7] Mei C C, Cheng Z, Ng C O. A model for flow induced by steady air venting and air sparging [J]. Applied Mathematical Modeling, 2002, **26**(7): 727-750.
- [8] Jang W Y, Aral M M. Density-driven transport of volatile organic compounds and its impact on contaminated groundwater plume evolution[J]. Transport in Porous Media, 2007, **67**(3): 353-374.
- [9] Jang W Y, Aral M M. Multiphase flow fields in in-situ air sparging and its effect on remediation [J]. Transport in Porous Media, 2009, **76**(1): 99-119.
- [10] 郑艳梅, 李鑫钢, 黄国强. 地下水曝气过程中空气流场的数学模拟[J]. 化工学报, 2007, **58**(5): 1277-1282.
- [11] 王建, 胡黎明. 地下水曝气法的两相渗流数值模拟[A]. 见: 中国岩石力学与工程学会. 岩石力学与工程的创新和实践[C]. 北京: 科学出版社, 2010. 282-287.
- [12] 陈仲颐, 周景星, 王洪瑾. 土力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 2003. 37-41.
- [13] Steenhuis T S, Walter M F. Closed form solution for pesticide loss in runoff water [J]. Transactions of American Society Agriculture Engineering, 1980, **23**(3): 615-620.
- [14] Prince M, Sambasivam Y. Bioremediation of petroleum wastes from the refining of lubricant oils [J]. Environmental Progress, 1993, **12**(1): 5-11.
- [15] De Jonge H, Freijer J I, Verstarren J M, *et al.* Relation between bioavailability and fuel oil hydrocarbon composition in contaminated soils [J]. Environmental Science & Technology, 1997, **31**(3): 771-775.
- [16] Calabrese E J. Principles and practices for petroleum contaminated soils [M]. New York: Lewis Publishers, 1993. 200-210.
- [17] Van Genuchten M T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils [J]. Soil Science Society of America Journal, 1980, **44**(5): 892-898.
- [18] Mualem Y. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media [J]. Water Resources Research, 1976, **12**(3): 513-522.

CONTENTS

Using Look-up Table Method in the Simulation of Regional Atmospheric Environment	XIE Min, WANG Ti-jian, JIANG Fei, <i>et al.</i> (1409)
Applications of Pollutants Released from Crop Residues at Open Burning in Yangtze River Delta Region in Air Quality Model	SU Ji-feng, ZHU Bin, KANG Han-qing, <i>et al.</i> (1418)
Atmospheric Dry Deposition Flux and Sources of Monocarboxylic Acids in Beijing and Surrounding Cities	XU Xiao-juan, LI Xing-ru, WANG Yue-si, <i>et al.</i> (1425)
Comparison of Physicochemical Characterization of Shanghai Ambient Ultrafine Particles and Engineered Nano Particles and Their Cytotoxicity	ZHANG Rui, LÜ Sen-lin, SHANG Yu, <i>et al.</i> (1431)
Element Compositions and Source of PM _{2.5} Aerosols in Qingdao	LI Xiu-zhen, SHENG Li-fang, XU Hua, <i>et al.</i> (1438)
Phthalate Esters Pollution in Household Indoor Air Particles of Tianjin in Winter	WANG Fu-mei, CHEN Li, JIAO Jiao, <i>et al.</i> (1446)
Application of a Resuspension Test Chamber in PM _{2.5} Source Profile Analysis	DUAN Heng-yi, QIAN Ran-ran, WU Shui-ping, <i>et al.</i> (1452)
Distribution and Enrichment of Trace Elements in Coal Combustion Products from Southwestern Guizhou	WEI Xiao-fei, ZHANG Guo-ping, LI Ling, <i>et al.</i> (1457)
Air-Water Surface Greenhouse Gas Flux in Pengxi River at Different Operational Stages of the Three Gorges Reservoir	JIANG Tao, GUO Jing-song, LI Zhe, <i>et al.</i> (1463)
Fluxes of Greenhouse Gases from Xiangxi River in Summer and Their Influencing Factors	WANG Liang, XIAO Shang-bin, LIU De-fu, <i>et al.</i> (1471)
Effects of Elevated Ozone Concentration and Soil Moisture on Temperature Sensitivity of Soil Microbial Respiration in a Cropland	CHEN Shu-tao, ZHANG Yong, HU Zheng-hua, <i>et al.</i> (1476)
Hydrochemical Characteristics in the Glacier No. 72 of Qinghingtian, Tomur Peak	ZHAO Ai-fang, ZHANG Ming-jun, LI Zhong-qin, <i>et al.</i> (1484)
Mineralization Characteristics of Dissolved Organic Phosphorus in Wudalianchi Lake, China	ZHANG Bin, XI Bei-dou, ZHAO Yue, <i>et al.</i> (1491)
Speciation Distribution of Nitrogen in Sediments of 7 Rivers around Taihu Lake	LU Shao-yong, YUAN Ye, JIN Xiang-can, <i>et al.</i> (1497)
Distribution and Bioavailability of Nitrogen and Phosphorus Species in the Sediments from Shiwuli Stream in Lake Chaohu	LI Ru-zhong, LI Feng, ZHOU Ai-jia, <i>et al.</i> (1503)
Surface Water Quality of Beiyun Rivers Basin and the Analysis of Acting Factors for the Recent Ten Years	GUO Jing, JING Hong-wei, LI Jin-xiang, <i>et al.</i> (1511)
Water Quality Impact of Dongjiang River Network Caused by Dongguan Canal Drainage	SUN Lei, MAO Xian-zhong, HUANG Min-min (1519)
Groundwater Pollution Sources Identification and Grading in Beijing Plain	LU Yan, HE Jiang-tao, WANG Jun-jie, <i>et al.</i> (1526)
3D Numerical Simulation of Air Sparging Remediation Process	LI Heng-zhen, HU Li-ming, WANG Jian, <i>et al.</i> (1532)
Numerical Experiment Study on the Algae Suppression Effect of Vertical Hydrodynamic Mixers	ZOU Rui, ZHOU Jing, SUN Yong-jian, <i>et al.</i> (1540)
Microbial Mechanism of Pollutants Removal in New Biological Island Grid	GAO Ming-yu, XIE Hui-jun, WANG Wen-xing (1550)
Effect of Nutrition Level of Phosphorus and Nitrogen on the Metabolism of the Extracellular Organic Matter of <i>Nostoc flagelliforme</i>	QI Fei, LIU Xiao-yuan, XU Bing-bing, <i>et al.</i> (1556)
Inhibitory Effects of Liquor Cultured with <i>Hydrodictyon reticulatum</i> on the Growth of <i>Microcystis aeruginosa</i>	FU Hai-yan, CHAI Tian, ZHAO Kun, <i>et al.</i> (1564)
Removal and Distribution of Phthalate Acid Esters in <i>Potamogeton crispus</i> L. Microcosm of Haihe River	CHI Jie, YANG Qing (1570)
Control and Removal of Microcystin Production of <i>Microcystis aeruginosa</i> by Irradiation of Electron Beam	LIU Shu-yu, WU Ming-hong, JIANG Qin-peng (1575)
Source Characteristics Analysis of Discharge and Pollutants in Typical Drainage Ditch of Qingtongxia Irrigation District	LI Qiang-kun, HU Ya-wei, LUO Liang-guo (1579)
Degradation of TBBPA by Electron Beam Radiolysis	LI Jie, XU Dian-dou, XU Gang, <i>et al.</i> (1587)
Catalytic Ozonation of Ibuprofen in Aqueous Solution by Activated Carbon Made from Sludge and Corn Cob	WANG Hong-juan, QI Fei, FENG Li, <i>et al.</i> (1591)
Effect of High Hydraulic Loading on Intensive Shrimp Aquaculture Wastewater Treatment Performance in Constructed Wetland	LI Huai-zheng, ZHANG Xing-yi, CHEN Wei-bing, <i>et al.</i> (1597)
Factors Influencing the Formation of NDMA During Chloramination Disinfection of Effluent from Biological Nitrogen Removal System for the Treatment of Municipal Sewage	SHANG Xiao-ling, LI Yong-mei (1604)
Denitrification Using Starch/PCL Blends as Solid Carbon Source	SHEN Zhi-qiang, WU Wei-zhong, YANG Chun-ping, <i>et al.</i> (1609)
Profiles of Zeta Potential and EPS in Granulation Process of Aerobic Sludge	WANG Hao-yu, SU Ben-sheng, HUANG Dan, <i>et al.</i> (1614)
Biosorption Characteristics of f2 Bacteriophage onto Activated Sludge	ZHOU Yu-fen, ZHENG Xiang, LEI Yang, <i>et al.</i> (1621)
Adsorption of Anionic Polyacrylamide on the Surface of Ion Exchange Membranes	DENG Meng-jie, YU Shui-li, SHI Wen-xin, <i>et al.</i> (1625)
Adsorption of Amphoteric Modified Bentonites to Phenol and Its Thermodynamics	LI Ting, MENG Zhao-fu, ZHANG Bin (1632)
Effect of Surfactants on Sorption and Desorption of Benzo[a]pyrene onto Black Carbon	ZHANG Jing-huan, CHEN Chun-rong, ZHANG Wei-hang, <i>et al.</i> (1639)
Isolation and Identification of Bacteria in the Activated Sludge from Four Sewage Treatment Plants in Nanjing City and Its Antibiotic Resistance Analysis	GE Feng, GUO Kun, ZHOU Guang-can, <i>et al.</i> (1646)
Screening and Characterization of Phenol Degrading Bacteria for the Coking Wastewater Treatment	CHEN Chun, LI Wen-ying, WU Jing-wen, <i>et al.</i> (1652)
Characteristics of 1,4-Dioxane Degradation by <i>Xanthobacter flavus</i> DT8	JIN Xiao-jun, CHEN Dong-zhi, ZHU Run-ye, <i>et al.</i> (1657)
Spatial Quantitative Distribution of Hydrocarbon-Oxidizing Bacteria of Unexploited Oil and Gas Fields	MAN Peng, QI Hong-yan, HU Qing, <i>et al.</i> (1663)
Screening and Biological Characteristics of Amphitrophic Methane-Oxidizing Bacteria from Aged-Refuse	ZHAO Tian-tao, XIANG Jin-xin, ZHANG Li-jie, <i>et al.</i> (1670)
Distribution Characteristics and Potential Risk of PCBs in Surface Water from 22 Tributaries and Mainstream in Middle Reaches of Yangtze River	LI Kun, ZHAO Gao-feng, ZHOU Huai-dong, <i>et al.</i> (1676)
Pollution Characteristics and Potential Risks of Phenolic Compounds in Schistosomiasis Epidemic Areas	WU Zheng-yong, ZHAO Gao-feng, ZHOU Huai-dong, <i>et al.</i> (1682)
Spatial Heterogeneity and Autocorrelation of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Sediment of Minjiang River in Fuzhou City	CHEN Wei-feng, NI Jin-zhi, YANG Hong-yu, <i>et al.</i> (1687)
Heavy Metals Pollution and Its Potential Ecological Risk of the Sediments in Three Gorges Reservoir During Its Impounding Period	WANG Jian-kang, GAO Bo, ZHOU Huai-dong, <i>et al.</i> (1693)
Investigation on the Distribution and Potential Ecological Risk of Heavy Metal in the Sediments from Typical Electrical Industrial Zone	DENG Dai-yong, SUN Guo-ping, GUO Ju, <i>et al.</i> (1700)
Fraction Distribution and Risk Assessment of Heavy Metals in Iron and Gold Mine Soil of Miyun Reservoir Upstream	GAO Yan-xin, FENG Jin-guo, TANG Lei, <i>et al.</i> (1707)
Heavy Metal Contamination and Bioavailability in Huayuan Manganese and Lead/Zinc Mineland, Xiangxi	YANG Sheng-xiang, YUAN Zhi-zhong, LI Zhao-yang, <i>et al.</i> (1718)
Evaluation of Heavy Metal Pollution in Soils from a Training Ground Based on GIS	LIU Yu-tong, FANG Zhen-dong, YANG Qin, <i>et al.</i> (1725)
Effects of Soil Texture and Water Content on Remediation of SVE on Soils Contaminated by Benzene	LIU Shao-qing, JIANG Lin, YAO Yu-jun, <i>et al.</i> (1731)
Characteristics of DNA Adsorption and Desorption in Montmorillonite, Kaoline and Goethite	WANG Shen-yang, RAO Wei, WANG Dai-zhang, <i>et al.</i> (1736)
LNAPL Migration Monitoring in Simulated Sand Aquifer Using Resistivity Method	PAN Yu-ying, JIA Yong-gang, GUO Lei, <i>et al.</i> (1744)
Preparation and Characterization of Activated Carbon from Rice Straw Pre-treated by the Subcritical Hydrolysis	DONG Yu, SHEN Zhe-min, LEI Yang-ming, <i>et al.</i> (1753)
Study on Composting of Cyanobacteria Amended with Different N Loss Inhibitor	REN Yun, CUI Chun-hong, LIU Fen-wu, <i>et al.</i> (1760)
Research Progress About Bioremediation of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons Contaminated Soil with Immobilized Microorganism Technique	QIAN Lin-bo, YUAN Miao-xin, CHEN Bao-liang (1767)

《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5月15日 33卷 第5期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 33 No. 5 May 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