

doi: 10.3724/SP.J.1201.2010.06086

# 地质环境中挥发性有机污染研究现状

钱永, 张兆吉, 费宇红, 王春晓, 陈京生

(中国地质科学院水文地质环境地质研究所, 石家庄 050061)

**摘要:** 有机化工产品的广泛使用和不当排放, 造成越来越严重的环境有机污染。其中, 地质环境有机污染研究, 尤其是地下水有机污染调查和研究广泛开展。详细介绍了国内外关于有机污染尤其是挥发性有机污染的研究现状, 认为目前该方面的研究主要侧重于地下水有机污染方面, 非饱和带中挥发性有机污染及土、孔、水共存的特性对其该种迁移的影响研究则正在广泛兴起, 并正在成为有机污染研究的一个重要的方向。

**关键词:** 挥发性有机污染物; 气液二相关系; 氯代烃; 地质环境

**中图分类号:** X144; X53 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-1683(2010)06-0086-05

## Research Status of VOCs in Geo-environment

QIAN Yong, ZHANG Zhao-ji, FEI Yu-hong, WANG Chun-xiao, CHEN Jing-sheng

(The Institute of Hydrogeological and Environmental Geology, CAGS, Shijiazhuang 050061, China)

**Abstract:** More and more organic contamination of environment has been occurred with broad utilization of chemical products and their improper discharging. Studies about geological environment, especially groundwater organic contamination have been carried out. Study status about VOCs contamination at home and abroad was introduced in this paper. And it was concluded that the study was mainly focused on groundwater organic pollution at present, on the contrary, it was not given enough attention on unsaturated zone's contamination of VOCs and the multiphase impact on its migration. Now, there are more and more efforts on the latter, and it is an important field of organic contamination study.

**Key words:** VOCs (Volatile Organic Compounds); liquid-gas phase transition; chlorinated hydrocarbons; geological environment

近年来, 随着社会的发展, 石油化工生产、有机溶剂和洗涤剂等化工材料的广泛使用以及含有机化合物的生活垃圾的排放等造成了严重的环境有机污染问题, 包括威胁地下水的水质安全、污染空气、改变土壤结构特性、对农作物造成危害等<sup>[1]</sup>。其中, 地质环境尤其是地下水有机污染更是直接危及人类的生存安全。

相比于无机污染, 有机污染尤其是地质环境有机污染的污染物种类多、毒性大(有很多有致癌、至畸和致突变的“三致”等作用, 对人体和其他生物危害极大), 且天然条件下难完全降解, 其迁移、转化和存在形式既受污染物本身性质(溶解度、吸附常数和挥发性等)的制约, 同时还受周围环境因素的影响, 比较复杂。

有机污染物在地质环境尤其是土壤中可以以挥发态、自由态、溶解态和固态4种形式存在, 其中绝大多数都属于挥发性有机污染物(Volatile Organic Compounds, VOCs)。由于其广泛和长期的使用, VOCs已成为一类最重要的环境污染物,

其中一些已经确定或怀疑对人类有致癌作用。VOCs在土壤中主要以气相和液相两种相态存在, 并在土壤中滞留或通过挥发、淋浴和由浓度梯度产生扩散等运移或逸入空气、水体中, 或被生物吸收迁出土体之外, 进而对大气、水体、生态系统和人类生命造成极大危害。

目前, 地质环境有机污染问题, 尤其是地下水有机污染问题, 已成为国际科学界的研究热点, 并受到社会和公众的关注。而土壤做为污染物进入地下水的重要途径, 关于土壤污染的研究也已兴起, 并越来越受到重视。

## 1 国外研究现状

由于地质环境尤其是地下水有机污染的危害性随着社会的发展日趋普遍和严重, 发达国家对其给予了高度重视, 并投入了大量人力和物力进行调查和研究。欧美等西方发达国家到20世纪末已基本完成了区域地下水有机污染调查工作, 目前研究主要围绕局部的污染场地开展工作, 并已经开展风险

收稿日期: 2010-10-18 修回日期: 2010-11-13

基金项目: 中国地质调查局国土资源大调查项目“华北平原地下水污染调查评价”(1212010634600); 中国地质科学院水文地质环境地质研究所基本科研业务费“土壤中挥发性有机污染物气液关系及转化研究”(SK200806)

作者简介: 钱永(1981-), 男, 河南信阳人, 助理研究员, 硕士, 主要从事水文地质环境地质方面的研究。

评价和恢复治理技术以及有机污染物的迁移转化规律和机制方面的研究。受分析技术及经济的限制,发展中国家在这方面则多处于起步阶段。

关于挥发性有机污染方面的调查和研究,美国、日本等发达国家开展较早,已深入到污染机理和治理技术的研究,且较为全面。

美国地质调查局(USGS)国家水质评价(NAWQA)计划根据1985年—2002年的取样结果和进行的长期研究,对地下水中的VOCs进行了一次全面的全国性分析,以全面评价全国地下水中VOCs的分布情况,确定目前与地下水中存在VOCs相关的问题,并通过研究浓度随时间的变化情况,了解人类和自然因素对VOC的影响。研究结果表明,在全国大部分的含水层中都能检测到VOCs,最常检出的VOCs是氯仿、四氯乙烯(PCE)、三氯乙烯(TCE)和汽油添加剂甲基叔丁基醚(MTBE),其中四氯乙烯、三氯乙烯和氯仿在一些水样中作为混合组分被检出。对作为饮用水的未经处理的地下水样进行分析,结果表明在生活供水井(14%)和公共水井(26%)的水样中检测到了VOCs。该研究还对饮用水井中的VOCs进行了单独分析,并采集未经处理或混合的生活供水井和公众水井的水样,对检测的44种VOCs中的27种的浓度与联邦饮用水标准(USEPA的最高污染物标准,简称MCLs)进行比较,建立了“健康基准筛选浓度(HBSLs)”<sup>[3]</sup>。

挥发性有机污染物中,卤代烃污染物,尤其是三氯乙烯(TCE)、四氯乙烯(PCE)最为常见,分布最广,研究程度也最高(李雯等,2007;徐嵩等,2006;李海明等,2005;张国俊等,2006)<sup>[3-6]</sup>。西欧和北美的发达工业国家,早在20世纪70年代初期就已认识地下水卤代烃的污染机理及其危害为主要方向,大量开展地下水有机污染监测方法、评价方法及迁移转化规律的研究,目前已深入到卤代烃的污染机理和治理技术的研究(张达政等,2002)<sup>[7]</sup>。美国国家环保局早在1976年就将三氯乙烯列入129中优先污染物。20世纪80年代,荷兰232个地下水抽水站中三氯乙烯检出率高达67%(Hirata T.等,1992)<sup>[8]</sup>;此后,有机污染物尤其是氯代烃对地下水的污染,越来越引起引起各国关注。日本、美国、英国等发达国家相继开展饮用地下水的有机污染调查与研究。1982年日本环境厅对全国15个工业城市的地下水水质进行检测,结果表明,30%的供水井受到四氯乙烯(TCE)、三氯乙烯(PCE)等挥发性有机化合物所污染(Partrick T.等,1987)<sup>[9]</sup>;美国环保局39个小城镇地下水供水水源地的检测结果表明,在处理或未处理过的地下水都发现了11种挥发性氯代链烃,由此100多个供水井被迫关闭,其中检出率最高的是三氯乙烯和二氯乙烯,分别为36%和31%<sup>[8]</sup>;Folkard对英国209口供水井的氯代烃作过分析,发现TCE和PCE是主要的污染组分<sup>[8]</sup>。

做为地质环境的重要组成部分,土壤是有机污染物进入地下水的重要途径,同时也是有机污染物的自然净化场所,因而,土壤有机污染的研究广泛开展。挥发性有机污染物在土壤中的吸附和解吸过程影响着其向大气、地下水与地表水的迁移,因而关于其吸附和解吸特征和机理的工作已做了很多,在过程机理和动力学模型等方面已经取得一些很有意义的进

展。Unger等<sup>[10-11]</sup>将挥发性有机物(VOC)在土壤上的吸附过程解释为:在湿度很低的条件下,VOC蒸气在土壤上的直接吸附占主要地位,并与土壤表面积相关;在水饱和条件下,矿物质表面没有污染物可到达的吸附位点,在吸附过程中,VOCs首先溶解入水相,然后吸附在土壤表面;在非饱和湿度下,则存在着气、液和固三相之间的平衡,是前两者的结合。由此,Unger等提出了3点假设:①在描述气、液两相间的分配时,适用亨利定律;②在微观范围内,土壤表面均一;③水会先注入较小的土壤孔隙,再注入较大孔隙。以这些假设为基础,推出了土壤中挥发性有机物的吸附模型,该模型认为,在任一土壤湿度条件下,土壤表面吸附的有机物的量是以下3个参数的函数:①相对饱和湿度为0%时的吸附浓度;②相对饱和湿度为100%时的吸附浓度;③相对饱和湿度已定时,土壤表面暴露于各相中所占分数(由BET低温气吸附法和压汞法测定)(Unger等,1996)。通过实际检测三氯乙烯、1,1,1-三氯乙烷、甲苯和苯在一种粉质壤土上的吸附,验证了这个模型。为研究土壤中有机污染物通过渗滤污染地下水的可能性,研究人员还建立很多渗滤模型。EXPRES模型是一个评价亚表层土壤中有机农药污染物行为的专家系统,其采用了两个迁移模型(LEACHM和PRZM)及两个数据库(加拿大所大量使用的农药化学性质数据库及加拿大10个地区的气候和施药情况数据库)(A. S. Crowe等,1992; Mutch J. P.等,1993)<sup>[12-13]</sup>。Wilson等用化合物在土壤中的迁移模型评价污泥中有机污染物的渗滤趋势(Wilson S. C.等,1996)<sup>[14]</sup>。

土壤中挥发性有机污染物从地下向地表挥发,是土壤有机污染物消失的一个重要途径。Wang等对随污泥进入土壤中氯苯类的行为进行了研究(Wang M. J.等,1994)<sup>[15]</sup>。结果表明,挥发是其消失的主要过程。作者提出氯苯的散失过程存在着第二步一级动力学。其解释为:刚随污泥施入土壤中的氯苯被土壤吸附需要一段时间,开始时存在着大量游离的氯苯,因而挥发速率较快。随后氯苯逐渐由游离变为吸附态,挥发速率趋于平缓。由于其它过程对氯苯类消失的贡献不显著,因而其消失过程实质上反映出挥发的动力学过程。Woodrow等研究了农药的挥发速率(F)与其性质的关系(Woodrow J E等,1997)<sup>[16]</sup>;Burkhard等检验了一系列农药从土壤表面的挥发(Niklaus Burkhard等,1981)<sup>[17]</sup>。证明挥发速率随着化合物浓度、空气流速、温度和化合物的蒸汽压的增加而增加;Jury等发展的模型(Jury W. A.等,1984)<sup>[18]</sup>也支持Burkhard等的结果。在这些理论中,影响挥发过程的主要参数之一是有机污染组分的蒸汽压,其受温度的影响较大。Cohen证实温度每升高10℃,挥发性将增大4倍。位于土壤深层的污染物,在其从地表挥发至大气之前,需先迁移至地表,这个过程一般认为属于一维扩散,由于土壤的非均匀性,Lindhardt等用Fick第二定律近似描述土壤中化合物进入大气的过程,并用于预测被煤焦油污染的土壤中有有机物的挥发速率(Cohen S. Z.等,1984)<sup>[19]</sup>。与实际值相近。

对挥发性有机污染的研究中,关于其在土壤中的多相态运移规律和迁移、富集特征的研究开展不多,但也有研究者对此关注并展开研究。曾有研究者研究挥发性氯代烃类有机

污染溶剂污染地下水的过程和机理,研究了土壤气体取样方法以获取土壤中的气相氯代烃溶剂(P. K. Bishop, 1990)<sup>[20]</sup>。前述 Unger 等基于对非饱和带中存在的气、液和固三相间的平衡的认识提出的3点假设,是土壤中挥发性有机污染研究的一大突破,对今后的研究具有重要的启示意义。近年来随着挥发性有机污染越来越受到重视,研究程度也越来越高,地质环境中挥发性有机污染物的多相态运移研究正受到越来越多的关注。Graber 等通过对以色列特拉维夫滨海平原区沙土含水层受挥发性有机污染物(VOCs)问题的研究,认为,由于非饱和带中气体的运移独立于地下水流,气相 VOCs 会先于液相 VOCs 对非饱和带形成污染,从而对非饱和带造成二次污染(Graber 等, 2002)<sup>[12]</sup>。Daniel Romén, Ellen R. Graber 等在对同一地区(即以以色列特拉维夫滨海平原区)开展的挥发性有机污染研究中,研究了饱和含水层和非饱和含水层界面附近挥发性有机污染物的分布规律,结果表明,在非饱和带中,气相和液相挥发有机物的平衡关系遵循亨利定律,且不管是在饱和含水层(液相浓度)还是在非饱和带(气相浓度),挥发性有机污染物浓度都随着与界面距离的增加而减小(Daniel Romén 等, 2005)<sup>[21]</sup>。Martine Bohy 等利用大型试验(25 m×12 m×3 m 的大尺寸人工非饱和带)和数值模拟方法研究三氯乙烯(TCE)在非饱和带中的运移转化规律,对比试验和数值模拟研究结果,认为温度和气液二相间的平衡关系是影响挥发性有机污染物在非饱和带中运移和转化机制的重要因素(Martine Bohy 等, 2006)<sup>[23]</sup>。

## 2 国内研究现状

受分析技术及经济水平的限制,我国地下水有机污染研究刚刚起步,而关于土壤中挥发性有机污染物流态关系方面的研究也较为少见,且主要是在政府部门主导下开展的针对包括有机污染在内的地下水污染调查工作。1999年,在国土资源部中国地质调查局组织下,首次系统的开展了北京地下水有机污染调查,之后对苏锡常、上海、杭嘉湖地区部分城市浅层地下水有机污染进行了调查。按照地调局的部署,从2005年起,计划利用6年时间,以城市及人口密集区和重要经济区(带)为重点,以区域地下水系统为单元,以浅层地下水及其环境系统为对象,开展首轮地下水污染调查与评价。目前我国地下水有机污染研究仍处于区域调查阶段,有关迁移转化机理和修复原理、特别是有机污染物的迁移转化规律方面的研究尚不成熟,但这方面的研究正受到越来越多的关注,并有部分跟踪世界前缘的尝试性研究工作开展。目前正在开展的地质调查项目“全国地下水污染调查评价”主要是查明全国地下水污染状况,综合评价其污染程度和变化趋势,并建立地下水污染调查评价信息系统。其中,“华北平原地下水有机污染调查评价(有机测试)”已完成了华北平原1:25万地下水有机污染调查和取样工作,为进一步开展地下水有机污染研究奠定了前期基础。

近年来,我国也开始进行关于挥发性有机物的研究,但多是针对 TCE、PCE 等挥发性氯代烃及少数苯系挥发物,且应用范围不大,主要研究其在地质环境的运移、转化规律及去

污、防止技术等。张达政等对浅层地下水卤代烃污染进行了初步研究,认为卤代烃运移和空间分布与污染源和包气带岩性密切相关,但没有提出其运移转化规律及机制(张达政等, 2002)<sup>[7]</sup>。李海明德等研究了氯代脂肪烃(CAH)在某工业区浅层地下水中的污染特征,指出地下水流场和地下水动态变化是影响其分布和变化的重要因素,氯代脂肪烃浓度沿地下水流向呈由高到低的分布特征,且呈季节性变化(李海明等, 2005)<sup>[5]</sup>。徐鹭等通过吸附实验研究了三氯乙烯(TCE)在天然土壤中的吸附行为及其影响因素,研究认为,三氯乙烯(TCE)在土壤中的吸附主要是分配作用的结果;土壤有机质含量是影响土壤/沉积物吸附三氯乙烯(TCE)的主要因素,有机质含量越大,疏水吸附位点越多,越有利于三氯乙烯(TCE)在有机质中的分配,从而使三氯乙烯(TCE)能大量吸附于土壤/沉积物中(徐鹭等, 2006)<sup>[4]</sup>。黄国强等为研究污染物在土壤多孔介质中的迁移性质,建立了一种可快速测定非保守性污染物在土壤孔隙中有效扩散系数的新方法,采用了土柱扩散实验研究挥发性有机物(VOCs)在土壤中的有效扩散系数;根据多孔介质为干燥和含水体系将挥发性有机物分为保守性和非保守性两种类型的扩散组分,建立了不同的迁移模型方程进行过程描述,并提出了迁移方程的一维解析解;通过对三氯乙烯和苯在砂土体系的研究,验证了利用土柱扩散实验测定挥发性有机物的有效扩散系数方法的可靠性和实用范围(黄国强等, 2004)<sup>[24]</sup>。孙静针对挥发性有机污染物的挥发特性,研究了其在土壤中提取检测方法(孙静, 2006)<sup>[25]</sup>。薛强对石油污染物在地下环境系统中运移的多相流模型进行了尝试研究,在考虑气体滑脱效应条件下,提出了挥发性有机污染物去污过程的滑逸耦合模型,并给出了耦合动力学模型的有限差分格式(薛强, 2003)<sup>[26]</sup>。

目前,除台湾地区外,国内关于挥发性有机污染物在土壤中的气液二相关系的研究几乎尚未开展。台湾有研究人员在近年开始了气相有机污染的研究,这得益于台湾地区对加油站污染问题的重视。在该地区,对很多加油站都定期进行土壤油气检测或者取土壤气样进行测试以监控加油站油气泄漏情况的发生。但据2008年8月在西安召开的“第四届海峡两岸土壤与地下水污染与防治研讨会”上向台湾专家了解的情况,以及通过网络搜集的资料,台湾地区的挥发性有机污染研究仅限于实用的油气监测与检测,尚未见有关于土壤中挥发性有机污染物运移规律与多相态的研究文献,其土壤气体的取样方法也仅有启示作用。

## 3 讨论与展望

挥发性有机污染物作为一类特殊的污染物,因其成分复杂,危害性大,已经被列为环境中潜在危险性大、应优先控制的毒性污染物。国外许多发达国家已明文规定,对受挥发性有机物污染的土壤等地质环境必须进行妥当处置,以保证生物及其环境的安全。虽然我国对挥发性有机物污染土壤尚未出台相应的标准和法规进行控制,但在上海等国内少数发达城市,挥发性有机物的危害问题已引起政府部门的高度重视(吴健,沈根祥,黄沈发等, 2005)<sup>[27]</sup>。同时,地下水有机污染

问题的突出,也已引起政府、社会和研究人员的普遍关注。因此,地质环境中挥发性有机污染正在成为环境污染研究中热点问题之一。

目前,地质环境中挥发性有机污染的研究,大都是将挥发性有机污染物等同于一般有机污染物,侧重于其在地下水中的分布特征,且主要是氯代烃方面的研究。而关于非饱和带中挥发性有机污染的研究则正在兴起,但较少考虑非饱和带的土、孔、水共存的特性对挥发性有机污染物在土壤中运移的影响。

因此,地质环境中挥发性有机污染的研究,尤其在土壤中的运移和转化机制、多相流运移规律方面,随着关注程度的增大和对土壤多相共存体系认识的成熟,都将会有新的突破和发展。而随着计算机技术的发展,挥发性有机污染的多相流模型研究也将是挥发性有机污染研究的一个重要方向。

此外,随着对挥发性有机污染物关注的增加,主要针对挥发性有机污染的防治技术的研究与开发也将是未来的一个重要研究领域。

#### 参考文献:

- [ 1 ] 薛强,梁冰,王惠芸.挥发性有机污染物去污过程的数值模型及应用[J].化工学报,2005,56(10):1962-1966.(XUE Qiang,LIANG Bing,WANG Hui-yun.Numerical Model of Volatile Organic Compounds Remediation and its Application[J].Journal of Chemical Industry and Engineering(China),2005,56(10):1962-1966.(in Chinese))
- [ 2 ] 美国内政部美国地质调查局(李焯译;冯翠娥、田芳校译).美国地下水和饮用水井中挥发性有机物分析.http://www.samsco.com.cn/info/50409.htm,2006.10.14.(United States Geological Survey(USGS),DOI(translated by Li Ye).Analysis of volatile organic compounds in groundwater and drinking wells in American.http://www.samsco.com.cn/info/50409.htm,2006.10.14.(in Chinese))
- [ 3 ] 李雯.三氯乙烯在饮用水中的污染机理[J].中国水运,2007,5(7):77-78.(LI Wen.Mechanism of Trichloroethylene's Polluting in Drinking Water[J].China Water Transport,2007,5(7):77-78.(in Chinese))
- [ 4 ] 徐嵩,冯流.三氯乙烯在天然土壤中的吸附行为及其影响因素[J].农业环境科学学报,2006,25(增刊):65-68.(XU He,FENG Liu.The Adsorption Behavior of Trichloroethylene on Natural Soils and Relevant Influencing Factors[J].Journal of Agro-Environment Science,2006,25(Supp.):65-68.(in Chinese))
- [ 5 ] 李海明,陈鸿汉,郑西来.某城市工业区浅层地下水CAHs污染特征[J].地学前缘,2005,15(增刊):132-138.(LI Hai-ming,CHEN Hong-han,ZHENG Xi-lai.Characteristics of Chlorinated Aliphatic Hydrocarbons Transported to Shallow Groundwater in the Industrial Area of a City[J].Earth Science Frontiers,2005,15(Supp.):132-138.(in Chinese))
- [ 6 ] 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.(ZHANG Guo-jun,MENG Hong,XUE Feng,et al.TCE/PCE DNAPL Pollution and Zero-valent Iron Technology[J].Chinese Journal of Environmental Engineering,2006,7(4):12-18.(in Chinese))
- [ 7 ] 张达政,陈鸿汉,李海明,等.某城市浅层地下水卤代烃污染初步研究[J].中国地质,2002,(3):326-329.(ZHANG Da-zheng,CHEN Hong-han,LI Hai-ming,et al.Preliminary Study of Halogenated Hydrocarbon Pollution in Shallow Groundwater of a City[J].China Geology,2002,(3):326-329.(in Chinese))
- [ 8 ] Hirata T,Nakasugi Yoshioka M,et al.Groundwater Pollution by Volatile Organochlorines in Japan and Related Phenomena in the Subsurface Environment[J].Water Science & Technology,1992,125(11):9-16.
- [ 9 ] Partrick R,Ford E,Quarles J.Groundwater Contamination in the USA[M].Philadelphia:University of Pennsylvania Press,1987.
- [ 10 ] Unger D.R.,Lam T.T.,Schaefer C.E.,et al.Predicting the Effect of Moisture on Vapour-phase Sorption of Volatile Organic Compounds to Soils[J].Environment Science Technology,1996,30(4):1081-1091.
- [ 11 ] 胡泉,樊耀波,王敏健.影响有机污染物在土壤中的迁移、转化行为的因素[J].环境科学进展,1998,7(5):14-22.(HU Xiao-FAN Yao-bo,WANG Min-jian.Factors Affecting Behavior and Fate of Organic Pollutants in Soil[J].Advances in Environmental Science,1998,7(5):14-22.(in Chinese))
- [ 12 ] A.S.Crowe,Mutch J.P..EXPRES:An Expert System for Assessing the Fate of Pesticides in the Subsurface[J].Environmental Monitoring and Assessment,1992,23:19-43.
- [ 13 ] Mutch J.P.,Crowe A.S.and Resler O..EXPRES:An Expert System for Assessing the Fate of Pesticides in the Subsurface.Users Manual,Environment Canada,Inland Waters Directorate Scientific Series No.1993,201:128.
- [ 14 ] Wilson S.C.,R.Duarte-Davidson and K.C.Jones.Screening the Environmental Fate of Organic Contaminants in Sewage Sludges Applied to Agricultural Soils;The Potential for Downward Movement to Groundwaters[J].Science of The Total Environment,1996,7,185(1-3):45-47.
- [ 15 ] Wang M.J.,Kevin C.Jones.Uptake of Chlorobenzenes by Carrots from Spiked and Sewage Sludge-Amended Soil[J].Environment Science Technology,1994,28(7):1260-1267.
- [ 16 ] Woodrow J E,James N,Seiber Lynton W.Baker.Correlation Techniques for Estimating Pesticide Volatilization Flux and Downwind Concentrations[J].Environment Science Technology,1997,31(2):523-529.
- [ 17 ] Niklaus Burkhard,Johann A.Guth.Rate of Volatilisation of Pesticides From Soil Surfaces;Comparison of Calculated Results with those Determined in a Laboratory Model System[J].Pest Management Science,1981,12(1):37-44.
- [ 18 ] Jury W.A.,W.F.Spencer and W.J.Farmer.Behavior Assessment Model for Trace Organics in Soil;III.Application of Screening Model[J].J.Environ.Qual.,1984,13:573-579.
- [ 19 ] Cohen S.Z.,Treatment and Disposal of Pesticide Wastes[M].ACSS Ymposium Series 59,American Chemicalsociety,Washington,D.C.,1984.297-325.
- [ 20 ] P.K.Bishop,M.W.Burston,D.N.Lemer,et al.Soil Gas Sur-

- veying of Chlorinated Solvents in Relation to Groundwater Pollution Studies[ J]. Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology, 1990, 23: 255-265.
- [ 21] Graber, E. R., D. Ronen, S. Elhanany, et al. Assessment of Aquifer Contamination in the Nahalat Itzhak Area-Tel Aviv. Final Rep. to the Israel Water Commission. Israel Water Commission, 2002.
- [ 22] Daniel Ronen, Ellen R. Graber, and Yael Laor. Volatile Organic Compounds in the Saturated-Unsaturated Interface Region of a Contaminated Phreatic Aquifer[ J]. Vadose Zone Journal, 2005, 4: 337-344.
- [ 23] Martine Bohy, Lotfi Dridi, Gerhard Schafek, et al. Transport of a Mixture of Chlorinated Solvent Vapors in the Vadose Zone of a Sandy Aquifer; Experimental Study and Numerical Modeling[ J]. Vadose Zone Journal, 2006(5): 539-553.
- [ 24] 黄国强, 姜斌, 李鑫钢, 等. VOCs在土壤孔隙中扩散模型的适用性[ J]. 天津大学学报, 2004, 37(11): 945-948. (HUANG Guo-qiang, JIANG Bin, LI Xin-gang, et al. Applicability of Diffusion Models for VOCs in Porous Soils[ J]. Journal of Tianjin University, 2004, 37(11): 945-948. (in Chinese))
- [ 25] 孙静. 土壤中挥发性有机污染物的提取检测方法研究[ D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2006. (SUN Jing. Discussion on Extraction Methods of Total Volatile Organic Compounds in Soil[ D]. Beijing: China University of Geology (Beijing), 2006. (in Chinese))
- [ 26] 薛强. 石油污染物在地下环境系统中运移的多相流模型研究[ D]. 阜新: 辽宁工程技术大学, 2003. (XUE Qiang. Research on Multiphase Flow Model of Petroleum Pollutant Transport in Subsurface System[ D]. Fuxin: Liaoning Technical University, 2003. (in Chinese))
- [ 27] 吴健, 沈根祥, 黄沈发, 等. 挥发性有机物污染土壤工程修复技术研究进展[ J]. 土壤通报, 2005, 36(3): 430-435. (WU Jian, SHEN Gen-xiang, HUANG Shen-fa, et al. A Review on Engineering Remediation Techniques for VOCs-contaminated Soils[ J]. Chinese Journal of Soil Science, 2005, 36(3): 430-435. (in Chinese))
- (上接第73页)
- [ 14] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[ M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 1999. (LU Ru-kun. Analytical methods of soil agricultural chemistry[ M]. Beijing: China Agricultural Science Press, 1999. (in Chinese))
- [ 15] Yang J, Huang Z C, Chen T B, et al. Predicting the probability distribution of Pb-increased lands in sewage-irrigated region; A case study in Beijing, China[ J]. Geoderma, 2008, 147: 192-196.
- [ 16] 陈述彭, 鲁学军, 周成虎. 地理信息系统导论[ M]. 北京: 科学出版社, 2003. (CHEN Shu-peng, LU Xue-jun, ZHOU Cheng-hu. The introduction of Geography Information System[ M]. Beijing: Science Press, 2003. (in Chinese))
- [ 17] 李天文, 刘学军, 汤国安. 地形复杂度对坡度坡向的影响[ J]. 山地学报, 2004, 22(3): 272-277. (LI Tian-wen, LIU Xue-jun, TANG Guo-an. Influence of terrain complexity on slope and aspect[ J]. Journal of Mountain Science, 2004, 22(3): 272-277. (in Chinese))
- [ 18] GB/T 17941.1-2000. 数字测绘产品质量要求[ S]. (GB/T 17941.1-2000. Quality requirement for digital products of surveying and mapping[ S].)
- [ 19] 王尊亲, 祝寿泉, 俞仁培. 中国盐渍土[ M]. 北京: 科学出版社, 1993. (WANG Zun-qin, ZHU Shou-quan, YU Ren-pei. Saline Soil in China[ M]. Beijing: Science Press, 1993. (in Chinese))
- [ 20] 雷志栋, 杨诗秀, 谢森传. 土壤水动力学[ M]. 北京: 清华大学出版社, 1988. (LEI Zhi-dong, YANG Shi-xiu, XIE Sen-chuan. Soil water dynamics[ M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1988. (in Chinese))
- [ 21] Cochran W G. Sampling Techniques; 3rd edit[ M]. New York: John Wiley and Sons, Inc., 1977.