



## 中国地下水污染有效防控探析\*

文 / 王明玉

中国科学院研究生院水系统安全研究中心 北京 100049

**【摘要】** 中国等发展中国家因现阶段财力资源有限,在进行地下水保护时通常只能对部分已污染场地和预计污染场地采取有限的防治措施。而经济、社会可持续发展战略则要求当前的经济发展不能给未来社会、经济发展及生态环境带来巨大负担。为妥善解决上述矛盾并有效地保护地下水资源,本文提出了主要针对中国等发展中国家的地下水污染有效防控方法与对策,其中包括地下水保护优化管理模型、经济有效的地下水污染修复方法、地下水污染的环境影响评价策略,并对地下水保护管理机制建设、法律和政策的制定与实施提出了一些建议。

**【关键词】** 发展中国家,地下水保护,可持续发展,污染修复,优化管理模型,环境影响评价,管理机制

DOI: 10.3969/j.issn.1000-3045.2012.04.009

### 1 引言

地下水是重要的供水水源和生态系统要素,但令人担忧的是,我国地下水污染已比较严重,且有不断恶化趋势。地下水污染不仅对地下水资源本身直接构成危害,而且将严重影响整个水系统的水质安全。国家对此尤为重视,2011年10月国务院正式批复实施《全国地下水污染防治规划

(2011—2020年)》,明确提出要本着保护优先、预防为主、防治结合、落实责任、强化监管的原则,全面实施好《全国地下水污染防治规划》,切实保障地下水环境安全。

不同来源的污染物会直接或间接地污染地下水。一旦地下水受到污染,其修复将要花费大量的金钱和时间。据报道,在美国修复一个超级基金污染场地(列入国家优先控制名录中的污染场地)所需的平均费用是3 000万美元<sup>[1]</sup>,在未来30年清理美国现已污染场地的费用估计将高达1万亿美元<sup>[2]</sup>。包括中国在内的发展中国家现阶段的财力,在进行地下水保护时通常只能对部分已污

\* 基金项目:国家 973 项目(2010CB428804)、国家自然科学基金(40972166)、国家科技重大专项和中科院百人计划择优项目

收稿日期:2012年7月3日

染场地和预计污染场地采取有限的防控措施。因此,在发展中国家要真正实现地下水保护目标还需长期不懈的努力。而经济、社会可持续发展战略则要求当前的经济发展不能给未来社会的经济发展和生态环境带来巨大负担。为妥善解决上述矛盾并有效地进行地下水保护,笔者认为,实施以环境、生态与人类健康为目标的环境管理对策势在必行,以最大限度地利用已有财政与人力资源,优化分配有限的资金,最大限度地减少对环境的不良影响,并谋求可持续发展。同时,进行地下水污染防治时应尽可能地采用经济有效的方法。此外,发展中国家有限的资金必然仅允许获得有限可利用的野外数据,因此研究相应行之有效的地下水污染环境风险评价方法势在必行。

本文主要针对中国等发展中国家的地下水污染问题探讨如何有效防控,包括提出优化管理模型,简要说明如何选取经济有效的地下水污染修复方法,阐释地下水污染的环境影响评价策略和方法,并对地下水保护管理机制、法律 and 政策的制定与实施提出一些建议。

## 2 地下水保护优化管理模型

选取哪些地下水污染场地优先进行修复或采取预防措施是关系到能否优化资金配置、获取最大效益的根本。对此笔者提出了多目标地下水保护优化管理模型<sup>[3]</sup>。

该优化管理模型强调4个关键组成部分,即:(1)地下水污染的环境影响,包括人类健康风险和生态风险;(2)可利用的财力

资源;(3)地下水保护价值,包括供水价值、生态价值和社会价值;(4)经济社会可持续发展。进行地下水污染暴露与风险评价以及正确估算地下水保护措施成本是实施这一管理模型与对策的关键所在。还应当指出的是在进行与风险评价相关的地下水污染物暴露评价及成本估计时,还需要了解地下水流动特征并建立污染物运移模型。

在该优化管理模型中,作者提出了6种不同种类的成本作为构建模型的基本组成。这6种成本包括:地下水已污染场地调查成本(ECSIC)、已污染场地修复成本(ECSRC)、地下水预计污染场地调查成本(PC-SIC)、预计污染场地预防成本(PCSPC)、预计污染场地潜在调查成本(PCSPIC)、预计污染场地潜在修复成本(PCSPRC)。

对地下水进行系统分析并采用地下水建模工具能够有助于完成不同成本的估算。例如,对于抽出-处理修复方法,应用可视化GMS等已广泛应用的地下水模拟软件包,可以模拟所需的抽、注井数目及强度、计算修复时间,从而估算出采取修复措施所需的成本。

该优化管理模型的目标函数由两部分组成。第一部分是人类健康与生态环境风险减少函数(RR),其与选取哪些污染场地作为保护目标有关,并以分配到所有已污染场地和预计污染场地的成本为变量。第二部分是地下水保护带来的新增地下水综合价值(IIGV)。其形式可分别由式(1)与式(2)来表达:

$$RR = \sum_{i=1}^{N_{ECS}} RR_{ECS-i}(C_{ECSI-i}, C_{ECSR-i}) + \sum_{j=1}^{N_{PCS}} RR_{PCS-j}(C_{PCSI-j}, C_{PCSP-j}) \quad (1)$$

$$IIGV = \sum_{i=1}^{N_{ECS}} IIGRV_{ECS-i}(C_{ECSI-i}, C_{ECSR-i}) + \sum_{j=1}^{N_{PCS}} IIGPV_{PCS-j}(C_{PCSI-j}, C_{PCSP-j}) \quad (2)$$



中国科学院

这里

$$RR_{ECS-i} = \alpha_1[i] * RR_{ECS-i-HCR} + \alpha_2[i] * RR_{ECS-i-HNCR} + \alpha_3[i] * RR_{ECS-i-ER}$$

$$RR_{PCS-j} = \beta_1[j] * RR_{PCS-j-HCR} + \beta_2[j] * RR_{PCS-j-HNCR} + \beta_3[j] * RR_{PCS-j-ER}$$

其中,  $RR_{ECS-i}$  和  $RR_{PCS-j}$  分别指第  $i$  个已污染场地和第  $j$  个预计污染场地的环境风险减少函数, 这些函数相应表示由于场地的修复和采取的预防措施带来的风险减少;  $C_{ECS-i}$  与  $C_{ECSR-i}$  分别是第  $i$  个已污染场地的调查成本与修复费用;  $C_{PCSI-j}$  及  $C_{PCSP-j}$  分别是第  $j$  个预计污染场地的调查费用和保护费用;  $N_{ECS}$  是已污染场地的总数,  $N_{PCS}$  是预计污染场地总数;  $RR_{ECS-i-HCR}$ ,  $RR_{ECS-i-HNCR}$  和  $RR_{ECS-i-ER}$  分别为第  $i$  个已污染场地对应于采取的修复方法的人类致癌风险函数、人类非致癌风险函数、生态风险减少函数;  $RR_{PCS-j-HCR}$ ,  $RR_{PCS-j-HNCR}$  和  $RR_{PCS-j-ER}$  分别代表第  $j$  个预计污染场地对应于采取的预防措施的人类致癌风险减少函数、人类非致癌风险减少函数、生态风险减少函数。最后,  $a_1[i]$ ,  $a_2[i]$  和  $a_3[i]$  是对应于第  $i$  个已污染场地的人类致癌风险、人类非致癌风险、生态风险的加权向量  $a_1$ ,  $a_2$  和  $a_3$  的第  $i$  个分量。而  $b_1[j]$ ,  $b_2[j]$  和  $b_3[j]$  是分别对应于第  $j$  个预计污染场地的人类致癌风险、人类非致癌风险、生态风险的加权向量  $b_1$ ,  $b_2$  和  $b_3$  的第  $j$  个分量。 $IGRV_{ECS-i}$  是针对第  $i$  个已污染场地所采取的修复措施获得的地下水保护综合价值(包括供水价值、生态价值和社会价值等)。同样地,  $IGPV_{PCS-j}$  代表针对第  $j$  个预计污染场地所采取的预防措施获得的地下水保护综合价值。

管理优化模型除了必须考虑费用约束外, 还应考虑如下(3)和(4)两个约束条件:

$$IGRV_{ECS-i} \geq IGRV_{ECS-cut-off} \quad (3)$$

$$IGPV_{PCS-j} \geq IGPV_{PCS-cut-off} \quad (4)$$

其中  $IGRV_{ECS-cut-off}$

和  $IGPV_{PCS-cut-off}$  分别是选定已经污染场地和预计污染场地作为保护目标时, 地下水保护综合价值设定的临界值。

为追求可持续发展战略, 对通过上面程序未能入选的剩余预计污染场地应进一步建立相应标准来判断是否将它们列入优先保护名单中。相应选择标准可给出如下:

$$C_{PCSPI-j} + C_{PCSPR-j} \geq \lambda * (C_{PCSI-j} + C_{PCSP-j}) \quad (5)$$

$$RR_{PCS-j} \geq RR_{SD-cut-off} \quad (6)$$

$$IGPV_{PCS-j} \geq IGPV_{SD-cut-off} \quad (7)$$

在这里,  $C_{PCSPI-j}$  和  $C_{PCSPR-j}$  分别为第  $j$  个预计污染场地的 PCSPIC 和 PCSPRC,  $\lambda$  为污染控制松弛因子, 其大小反映了可持续发展政策执行的力度。另外,  $RR_{SD-cut-off}$  是风险减少的临界值,  $IGPV_{SD-cut-off}$  是考虑可持续发展的地下水保护综合价值增值临界值。应当指出, 因子  $\lambda$  的值应大于或等于零, 并由相应的社会、经济 and 环境保护发展阶段来决定。

另外, 模型中还可以加入更多约束条件以强调各类风险减少的优先顺序。如人类致癌风险减少应优先或等于人类非致癌风险, 而人类非致癌风险减少优先于生态风险降低。

上述加权向量、临界值和污染控制松弛因子将影响地下水污染场地的选择, 应慎重确定。事实上, 还可通过这里所提出的模型对这些参数的影响以及参数敏感性进行测试和评价, 进而确定其在研究区可接受的波动范围。需要指出的是对于这种多目标优化问题存在不同的求解方法。同时, 场地地下水风险模拟与污染控制决策支持系统的研发与应用应给予足够的重视, 该系统可整合所提出的模型, 为地下水优化控制提供有力的

工具。

### 3 地下水污染修复方法的选取

在发达国家,地下水污染修复的研究和实践已开展多年,并积累了大量的研究成果和丰富经验,也汲取了许多教训。我国在进行地下水污染修复时应借鉴这些成果与经验,同时寻求适合我国具体条件的经济有效修复方法。

#### 3.1 优先考虑经济有效的新兴修复方法

新兴的修复方法尚不成熟,还需要进一步研发并在应用中确定其适用范围,有些方法可能还要求高级专业人员的正确实施,但 these 方法可能是经济有效的。因此如果能证明这些方法在理论、材料设备和操作上可行,应优先考虑采用这些新兴修复方法。

#### 3.2 优先考虑自然衰减监测法

自然衰减监测法(MNA)作为一种被动的修复方法,对于某些污染场地可行且经济有效<sup>[4]</sup>。选取该修复方法,会涉及到地下水污染物暴露与风险评估及成本估算等问题。对于已污染场地和预计污染场地,应首先评价其可行性及影响因素<sup>[5]</sup>。从石油碳氢化合物和氯化烃类溶剂污染场地的现场数据中,已经显示出污染物自然衰减作为可选修复办法的潜力。为了确认自然衰减法的可行性并能够在预计时间段内修复目标污染物,还应当采用适当的监测系统与这类修复方法相结合。

如果自然衰减监测法不能完全修复地下水污染,或其修复进程太慢,无法在给定的时间内完成修复任务,就应当考虑采用人工强化的自然衰减监测法与其他修复方法结合使用。

#### 3.3 抽出-处理方法与自然衰减监测法的结合

抽出-处理方法(Pump and Treat)是一

种传统的地下水修复方法,这种方法已经被证明在修复的初期阶段是非常有效的,但要彻底达到预期修复水平需花费较多的时间和资金<sup>[6]</sup>。由于污染物具有不可逆吸附性或慢解吸附作用,解析过程可大大增加修复的时间和成本<sup>[7-10]</sup>。充分认识这一过程对于选择合适的地下水修复预报模型及对修复效果的评价非常重要。基于抽出-处理方法这一局限性,在实施该方法一段时间后,可考虑采取自然衰减监测法使残余的污染物浓度达到可接受的水平。

#### 3.4 考虑污染源局部原位移除技术与自然衰减监测的综合修复方法

污染源局部原位移除技术是一种新的污染场地修复技术<sup>[11]</sup>。相对于移除场地内所有污染物方法来说,其成本较高,对发展中国家具有很大的可行性。事实上,残留污染物可通过自然衰减作用逐步衰减到可接受的程度,完全清除并非必要。因此,将污染源局部原位移除技术与自然衰减监测方法结合应用,可达到经济有效的地下水保护与应用目标。污染源局部原位移除的主要任务是确定污染源应该清除的程度。通过数值模拟技术量化污染源处污染物释放过程和污染羽迁移扩散将有助于确定污染源区域污染物无害残余程度。

#### 3.5 应用与进一步认识PRB技术

渗透反应格栅方法(PRB)适用于一定埋藏深度的地下水污染修复。当污染的地下水通过渗透反应格栅时,污染物能被吸附并降解。经过多年的研究与应用,渗透反应格栅技术已成为一项迅速成熟的实用修复技术。

PRB技术可以处理多种有机氯和无机化合物,被广泛认为是一种有效的地下水修复技术,并且操作相对比较简单,在全世界范围内有较多应用。然而实例证明,PRB技



中国科学院

术在修复各种不同污染化合物时效果很好,但是缺少对其长期修复效果的评估与研究,尤其是对其长期污染物去除效率、化合物沉淀影响及反应格栅渗透性随时间变化等需进一步研究。

### 3.6 充分利用模型模拟技术选取合适的修复方法

充分利用模型模拟技术(包括简单或复杂模型应用),来选取合适的修复方法并进行有效的设计和和实施非常必要。模型模拟技术,尤其是数值模拟方法,可用来研究MNA修复的可行性、辅助PRB的设计(包括位置、尺度及填充材料选取等)以及帮助理解其他许多修复方法的有效实施。需要指出的是,在应用模型模拟技术时对模型的不确定性应同时考虑。

## 4 地下水污染的环境影响评价策略和方法

### 4.1 地下水污染评价策略

实现本文提出的优化综合管理目标,需应用地下水污染暴露与环境风险评估模型,对地下水的环境影响进行定量评价。这意味着若想进行经济有效的地下水优化管理与保护,可靠的评估是成功的关键之一。为使地下水得到有效保护,实现优化管理目标,地下水污染的环境影响评价应考虑以下策略:(1)充分考虑模型模拟目标,在调查阶段尽可能为后续阶段多取得所需资料;(2)对监测、测量、取样点等进行优化设计;(3)充分考虑多目标优化管理需求,如成本最低、风险减少最大,获得最高地下水保护综合价值;(4)充分考虑地下水污染的复杂性、延迟反应和长期的环境影响;(5)了解并结合生态系统对于环境负载变化下的非线性反应过程,以及在此过程中,当环境负载改变迅速并超过阈值时,生态系统可能出现的延迟反应<sup>[12,13]</sup>。

### 4.2 通过地下水模型进行定量评价

地下水污染物暴露途径有多种,如排泄到江河或湖泊等地表水体中,挥发至地表大气中,补给排泄到水井中等途径被人体直接或间接吸收。这些途径应被查明并对其风险量化,可应用地下

水数值模型模拟估算。例如,通过构建污染场地的地下水流动与污染物运移过程模型,可模拟预报地下水排放到被调查河流的污染物浓度与总量。此外,地下水保护措施的成本估计与当前污染羽现状和未来变化有关,而未来变化又取决于地下水渗流与污染物运移参数,如水力传导系数和弥散系数等。通过地下水模型模拟技术可以有效反演这些参数。因此,地下水模型应充分有效地用于地下水保护决策中的风险评估及成本估算。

### 4.3 地下水污染综合建模与评价方法

地下水污染环境定量评价面临的困难主要是由于以下因素:(1)有限的野外数据;(2)地下水系统的复杂性;(3)模型参数的不确定性;(4)边界条件逼近的不易性。事实上,通过应用综合的地下水建模方法,能够明显减少模型识别和预测的不确定性。综合建模方法能有机集成模型的不同要素与属性,对地下水污染的影响进行客观评价。这些要素与属性包括模型水文地质构架、各种不同影响因素、不同系统状态、不同建模方法等。

## 5 建立基于地下水风险评估的环境污染责任保险管理体系制约机制

中国目前环境责任保险制度还处在探索阶段,开展环境责任保险制度的研究和实践具有重要意义。而实施环境责任保险制度的关键在于建立良性循环机制,达到系统的一致性、有效性、可行性和持久性。

环境污染责任保险制度是环境保护内约机制的重要一环,而建立各要素之间的良性循环机制是保障环境污染责任保险制度健康发展的根本(图1)。在实现环境污染责任保险制度时,应充分认识地下水环境污染的系统性、复杂性、长期性及修复的艰难性,地下水污染超前预防与控制应是环境污染责任保险管理体系构建与实施中的重要目标。同时,环境风险评估对环境污染责任保险

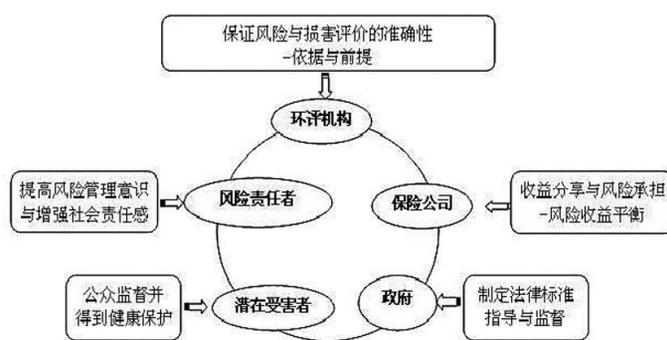


图1 建立良性循环机制各要素组成及其作用关系

管理体系的构建与实施非常重要。环境风险评估的量化是该制度稳定发展的关键。应当指出的是,应用综合建模方法,能够为地下水污染环境风险评估提供理论基础和技术可行性。地下水污染环境风险的可靠评估是地下水保护中环境责任保险制度稳步发展的关键。

## 6 地下水保护法律和政策的制定与实施

为了实施如上所述地下水保护对策和方法,我国应制定相应的地下水保护法律和政策。其中包括:(1)确立民众对地下水保护的责任和权利,提高公众参与的积极性;(2)建立各种地下水污染物(如农药、石油产品等)的使用登记制度;(3)建立不同行政层次、代表不同方面的地下水污染应急组织;(4)明确地下水污染责任的行政处罚、直接损害的法律責任,同时还应强调现在或将来地下水污染治理代价的昂贵性,使地下水保护的法制性与自觉性结合起来;(5)国家建立专款(如利用部分化工、石油等企业税收)用于处理紧急的污染事故、消除其严重危害,选择危害重大的地下水污染场地优先进行防治;(6)设立一定的款项研发符合发展中国家不同发展阶段的地下水保护方法和技术;(7)实行从中央、省、市、县多层管理与监督机制;(8)积极发展与认证地下水生态

环境风险评价组织机构与污染修复队伍;(9)对潜在的地下水污染场地要求定期提交地下水环境监测、评价报告;(10)作为一整体,不仅考虑环境恶化、人类健康影响,生态系统影响也应给予足够关注,同时强调地下水、地表水及大气圈环境相互影响,进行系统性的统一管理;与部门协调;

(11)强调重视废水、废物堆放及处理过程(如有害固体废物填埋场)对地下水环境与生态的影响与评价,确保地下水水质安全;(12)地下水的保护应遵循以防为主、治理与预防并举、尽早入手、切实执行可持续性发展及有限资金与人力资源优化配置的方针。

## 7 结论

因国家财力资源有限,同时又必须遵循经济社会可持续发展的国策,中国等发展中国家开展科学合理的地下水保护决策即实施多目标优化的地下水保护综合管理势在必行。本文提出的地下水保护的优化管理模型与对策包含了在国家层次或区域范围内综合管理地下水的组成要素,其能够最大限度地降低地下水污染带来的人类健康和生态风险,并优化配置用于地下水防治的有限资金,追求地下水保护利用效益的最大化与可持续发展目标的实现,同时满足不同的约束条件。其可行性与有效性依赖于对其构成要素的理解与定量化、相应保护与评价方法的研发与合理应用,以及与之配套的基于地下水风险评估的环境污染责任保险管理体系及法律政策等管理制约机制的制定与有效实施。提出的有效实施方法与管理机制虽然主要针对中国,但对其他发展中国家及发达国家也具有一定的借鉴意义。

### 主要参考文献

- 1 Reisch M. Superfund Reauthorization Issues in the 105th Congress. Congressional Research Service Reports IB95013, The Library of Congress. 1997.
- 2 US Environmental Protection Agency. Waste research strategy. EPA/600/R-98/154. 1999.
- 3 Wang M. Optimal environmental management strategy and implementations for groundwater contamination prevention and restoration. *Environmental Management* 2006,37(4): 553-556.
- 4 Bedient P B, Rifai H S ,Newell C J. Ground water contamination. Prentice Hall PTR, New Jersey, 07458. 1999.
- 5 Hendrickson E R, Ellis J A, Ebersole R C. et al. Molecular analysis of Dehalococcoides 16S ribosomal DNA from chloroethene-contaminated sites throughout North America and Europe. *Appl Environ Microbiol* 2002, 68(2):485-95.
- 6 Macdonald J A, Kavanaugh M C. Restoring contaminated groundwater: An achievable goal? *Environmental Science & Technology*, 1994, 28: 362A-368A.
- 7 Pavlostathis S P, Jaglal K. Desorptive behavior of trichloroethylene in contaminated soil. *Environmental Science & Technology*, 1991, 25: 274-279.
- 8 Fu G, Kan A T, Tomson M B. Adsorption and desorption irreversibility of polycyclic aromatic hydrocarbons in surface sediment. I. characterization of desorption hysteresis. *Environmental Toxicology Chemistry*, 1994, 13(10): 1 559-1 567.
- 9 Pignatello J P, Xing B. Mechanisms of slow sorption of organic chemicals to natural particles. *Environmental Science & Technology*, 1996, 30: 1-11.
- 10 Kan A T, Fu G, Hunter M A et al. Irreversible adsorption of naphthalene and tetrachlorobiphenyl to Lula and Surrogate Sediments. *Environmental Science & Technology*, 1997, 31: 2 176-2 185.
- 11 Bockelmann A, Zamfirescu D, Ptak T et al. Quantification of mass fluxes and natural attenuation rates at an industrial site with a limited monitoring network: a case study. *Journal of Contaminant Hydrology*, 2003, 60: 97-121.
- 12 Scheffer M et al. Catastrophic shifts in ecosystems. *Nature*, 2001, 413: 591-96.
- 13 Folke C et al. Regime shifts, resilience, and biodiversity in ecosystem management. *Annual Review in Ecology and Systematics*, 2004, 35: 557-581.

## Investigation of Effective Prevention and Remediation of Groundwater Contamination in China

Wang Mingyu

(Center for Water System Security, Graduate University of CAS 100049 Beijing)

**Abstract** An innovative implementation framework and an integrated management mechanism are proposed for optimized and comprehensive environmental management for groundwater contamination prevention and restoration allied with consideration of sustainable development in China. The implementation framework accounts for availability of limited resources, human health and ecological risks from groundwater contamination, costs for groundwater protection measures, beneficial uses and values from groundwater protection, and sustainable development. In addition, the management mechanism integrates comprehensive risk assessment technologies, effective remediation approaches, environmental insurance systems, laws, regulations, and other measures to ensure groundwater to be practically and efficiently protected.

**Keywords** developing countries, groundwater protection, sustainable development, contamination remediation, optimal management model, environmental impact assessment, management mechanism

王明玉 中科院研究生院教授、博士生导师、水系统安全研究中心主任、资源与环境学院副院长。主要研究领域包括复杂介质地下水环境综合建模、地下水污染风险评价、地下水污染控制与修复、地下水保护优化管理与决策支持系统等。曾在美国环保总署国家实验室(地下水分部)地下环境模拟中心从事相关研究与应用工作6年。中科院 百人计划 入选者。E-mail:mwang@gucas.ac.cn