

赵丹,徐伟攀,朱文英,等.土壤地下水环境损害因果关系判定方法及应用[J].环境科学研究,2016,29(7):1059-1066.

ZHAO Dan, XU Weipan, ZHU Wenying *et al.* Determining causality of soil and groundwater damage[J]. Research of Environmental Sciences, 2016, 29(7): 1059-1066.

土壤地下水环境损害因果关系判定方法及应用

赵丹^{1,2}, 徐伟攀¹, 朱文英¹, 张衍燊^{1*}, 於方¹

1. 环境保护部环境规划院环境风险与损害鉴定评估研究中心, 北京 100012

2. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101

摘要: 因果关系判定是环境损害鉴定评估的关键环节。为了应对我国日益增加的土壤、地下水环境损害事件和诉讼需求,开展土壤与地下水环境损害因果关系判定技术方法研究十分必要。环境损害因果关系判定主要是通过构建污染源到受体的途径,来确定污染源与损害之间的关联性。基于该原则,结合土壤地下水调查评估实践,构建了土壤和地下水环境损害鉴定评估过程中因果关系判定的技术框架,包括源和受体中污染物的同源性分析、污染物在污染源与受体之间传输载体和介质的识别、传输污染物的载体的运动方向和污染物浓度梯度方向的确定、污染物在源和受体之间迁移途径的连续性和完整性分析 4 个步骤。同源性利用指纹图谱、多元统计、同位素等方法进行分析,载体和介质基于地质和水文地质调查、污染调查等手段识别,载体和污染物迁移方向判断以及迁移途径连续性和完整性分析通过空间模拟等技术实现。将所构建的技术框架和方法在某企业与下游池塘污染事件案例中进行应用,指纹图谱分析结果显示,污染源(企业)和受损资源(池塘水体)中污染物主要为 Zn,具有同源性;通过地质和水文地质调查识别出污染物传输的载体和介质为土壤和地下水;运用取样分析和空间模拟方法判断载体的运动方向为污染源向载体的方向,但地下水 Zn 污染羽在该方向上不连续;进一步结合影像分析、地质条件分析、人员访谈等,证实迁移途径不连续的原因因为存在优势通道,最终判定污染源(企业)与下游池塘污染之间确实存在因果关系。案例应用也证实了该研究所提出的技术框架的合理性与可行性。

关键词: 土壤; 地下水; 环境损害评估; 因果关系判定

中图分类号: X32 文章编号: 1001-6929(2016)07-1059-08

文献标志码: A DOI: 10.13198/j.issn.1001-6929.2016.07.14

Determining Causality of Soil and Groundwater Damage

ZHAO Dan^{1,2}, XU Weipan¹, ZHU Wenying¹, ZHANG Yanshen^{1*}, YU Fang¹

1. Center for Environmental Risk and Damage Assessment, Chinese Academy for Environmental Planning, Beijing 100012, China

2. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

Abstract: Identifying causality of pollution sources and receptors is a key step in assessing environmental damages. In order to cope with the increasing events and litigation needs around soil and groundwater damage, it is necessary to explore the technologies and methods to identify the causation of soil and groundwater damage. The causality judgment of environmental damage is mainly through seeking the path from pollution sources to receptors, so as to determine the relationship between pollution sources and damages resulting from environmental contamination. Based on the above principle, we put forward a technical framework to identify the causation from assessing the environmental damages of soil and groundwater after an investigation on the soil and groundwater. The framework includes four steps: 1) homology analysis of the pollution sources and receptors; 2) identification of the transmission carriers and mediums in charge of transporting the pollutants from pollution sources to receptors; 3) confirming the motor direction of transmission carriers and concentration gradient direction of pollutants; and 4) analyzing the continuity and integrity of the migration path of the pollutants from the pollution sources to receptors. Fingerprints, multivariate statistics and isotopic analysis were used for homology analysis; carriers and mediums were identified through geological and hydrogeological investigations, as well as pollution surveys; migration direction and the continuity of

migration path were analyzed using space simulation and other techniques. The framework was implemented in practice in a case about a contamination event of a pond which is located downstream to an enterprise. The results showed that the pollutant zinc (Zn, a primary pollutant) from the pollution source (enterprise) and receptor (water of the pond) were homological

收稿日期: 2015-11-24 修订日期: 2016-03-09

基金项目: 国家环境保护公益性行业科研专项(201309060)

作者简介: 赵丹(1985-),女,湖南湘潭人,助理研究员,博士,主要从事环境损害鉴定与修复研究, zhaodan@caep.org.cn.

* 责任作者: 张衍燊(1980-),男,山东淄博人,助理研究员,博士,主要从事环境健康研究, zhangys@caep.org.cn

based on a fingerprint analysis. We also surveyed the geological and hydrogeological conditions, found that the transmission carriers and mediums of zinc were soil and groundwater, and confirmed the motor direction of transmission carriers was from source to receptor. While the groundwater Zn contamination plume was not consistent judging from the results of a sampling analysis and a space simulation method, we analyzed the reasons about the spatial discontinuity of the migration path of Zn based on some analysis including image analysis, geological condition analysis and dominant channel analysis. Taken together, we considered that there is a certain relationship between the enterprise and the pollution of downstream pond. The success in the application of this technical framework to the current case also proved its reasonability and feasibility.

Keywords: soil; groundwater; environmental damage assessment; causality judgment

环境损害鉴定评估是指评估机构按照特定的程序和方法,综合运用科学技术和专业知识评估污染环境或破坏生态行为所致环境损害的范围和程度,判定污染环境或破坏生态行为与环境损害间的因果关系,确定生态环境恢复至基线状态并补偿期间损害的恢复措施,量化环境损害数额的过程^[1]. 美国从20世纪70年代开始,就有专门的环境立法主要针对生态环境损害进行严格责任追究,并在随后的20年建立了较完善的生态环境损害评估与赔偿制度、技术方法和标准体系;欧盟也从20世纪90年代开始关注污染造成的生态环境损害^[2]. 我国国家海洋局、农业部分别于1997年和2000年开始针对海洋溢油事故和渔业污染事故制定了相关损失评价方法. 自2011年环境保护部《关于开展环境污染损害鉴定评估工作的若干意见》出台以来,已有学者^[3]开始系统地研究环境损害鉴定评估制度、方法和标准.

土壤和地下水环境损害是目前废弃物、废水倾倒地、历史遗留工业场地、矿区常见的环境损害类型,也是目前环境损害鉴定评估方法和标准体系研究的重点. 因果关系判定是环境损害鉴定评估的一个重要环节,也是难点问题^[4]. 大量学者针对环境损害因果关系的理论进行了研究和探讨^[4-8],但对环境损害因果关系的判定目前还没有形成统一的技术体系,仅有少量探索性研究^[9]. 为了应对我国日益增加的土壤、地下水环境损害事件和诉讼需求,该研究针对土壤和地下水环境损害中的因果关系判定方法开展研究,将因果关系判定的法学理论与污染场地调查过程中的水文地质调查、污染调查手段和方法相结合,构建因果关系判定框架,并通过案例验证方法和框架的合理性.

1 因果关系判定原则

因果关系作为一个哲学范畴,是指事物之间引起与被引起的关系. 但污染事件对于土壤、地下水等环境资源的损害,与对人身和财产的直接作用不同,而是通过水、气等环境要素进行传递^[10]. 土壤与地下

水环境损害的因果链条可表示为: 污染物(A) → 从污染源排出外部(B) → 通过媒介扩散(C) → 到达损害受体(D) → 发生损害(E), 只有证明该因果链条的每一环节才可判定因果关系^[9]. 由于环境损害原因的复杂性、结果的长期性和反复性以及查证的艰巨性,目前主流的盖然性因果关系说、疫学因果关系说、间接反证说等都主张利用推定原则来判定因果关系,即原告对于因果关系的证明无需进行严密的科学论证,只要达到某种程度的盖然性即可^[11].

美国内政部^[12]和土地管理局^[13]环境损害评估导则中均指出,在自然资源损害确定的因果关系判定环节,必须确定油类或危险废物传输到受损资源的传输途径. 可以通过证实可能迁移路径下资源(水、沉积物、土壤或植物)中含有足够浓度的油类或危险废物来证明传输途径的存在;或者使用模型证明可能迁移路径中的污染情况和油类或危险废物中一致,来证明该路径为传输途径. 美国国家海洋和大气管理局自然资源损害评估导则^[14]指出,如果损害是由直接暴露于油泄漏中导致的,那么需要证明: ① 泄漏和受关注的自然资源之间存在传输途径; ② 资源暴露于泄露中; ③ 该暴露导致了对资源的不利影响. 欧盟资源等值分析和环境损害评估量化导则^[15]指出,文献中的研究数据、逻辑分析、特定场地研究、模拟和演绎推理都能够用于评价因果关系. 因果关系证明包括: ① 发生危险化学物质的泄漏(证人、采样数据、照片); ② 泄漏的化学物质通过空气或水传输到受影响区域(采样数据、证人、照片、模拟); ③ 受体暴露于化学物质中(证人、采样数据、逻辑假设); ④ 基于已知化学物质的毒性判断化学物质浓度足以引起有害效应(采样数据、模拟); ⑤ 效应已经发生或可能发生(文献数据、专业观点、现场或实验室证实暴露、模拟). 评估者不需要确定单一事件对所涉及自然资源和服务的准确效应,只要证明因果关系是合理的,并且至少对效应有一定的贡献即可.

近年来我国相关的法律条文和标准规范中对因

果关系判定的原则和要求也已经有所涉及。2014年《环境损害鉴定评估推荐方法(第II版)》^[1]指出,污染环境行为与环境损害间的因果关系判定,包括环境暴露与环境损害间的因果关系判定和环境污染从源到受体的暴露途径的建立与验证两部分。环境暴露与环境损害间的因果关系判定应符合以下一般原则:环境暴露与环境损害间存在时间先后顺序,环境暴露与环境损害间的关联具有合理性、一致性、特异性。在掌握污染源排放状况、区域环境质量状况等基础资料的基础上,提出污染来源的假设并建立和验证暴露途径。2015年6月1日公布的《最高人民法院关于审理环境侵权责任纠纷案件适用法律若干问题的解释》^[16]中第六条指出,被侵权人根据《中华人民共和国侵权责任法》第六十五条规定请求赔偿的,应当提供证明以下事实的证据材料:①污染者排放了污染物;②被侵权人的损害;③污染者排放的污染物或者其二次污染物与损害之间具有关联性。

2 因果关系判定技术框架

综合上述原则,因果关系判定主要是要通过构建污染源到受体的途径,确定污染源与损害之间的关联性。因此,土壤和地下水环境损害因果关系判定需要解决的主要问题包括:①土壤和地下水环境中的污染物是否来源于污染源?②污染物是如何从污染源迁移到受损害土壤和地下水中的?基于此,结合土壤和地下水调查评估实践,该研究提出了土壤和地下水环境损害与废弃物/废水倾倒/排放/泄漏事故之间因果关系判定的技术框架,具体如图1所示。

该研究提出的因果关系判定技术框架将因果关系判定过程分为同源性分析、载体与介质识别、传输方向判断、完整性和连续性分析4个步骤。

2.1 同源性分析

由于因果关系判定通常是针对潜在污染源已知情况,因此,因果关系判定的第一步是对受损环境(土壤和地下水)的污染和潜在污染源的污染进行同源性分析,即通过分析潜在污染源排放的污染物与受损环境中的污染物组成及物理、化学、生物学性质的异同,来初步判定受损环境中的污染物是否来源于污染源。对事故发生地排放或泄漏的污染物成分进行检测,并对受损环境(土壤和地下水)的污染状况开展调查,分析受损环境中污染物与事故发生地废弃物/废水/废气中污染物是否具有同源性。同源性分析可采用的方法包括指纹图谱技术、多元统计方法、同位素分析、地理信息技术等。

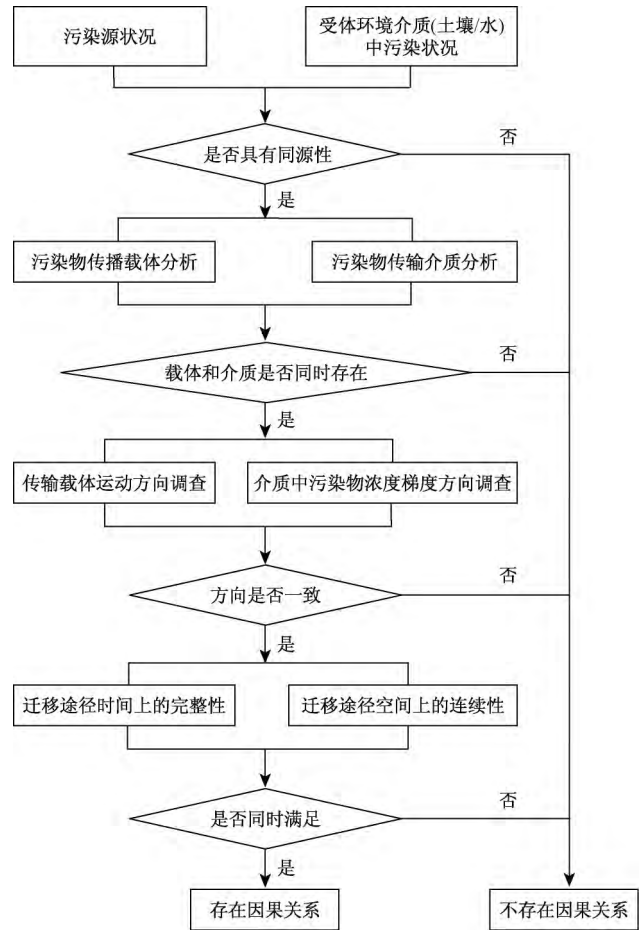


图1 土壤和地下水环境损害因果关系判定技术框架
Fig. 1 Technical framework for determining the causality of soil and groundwater damages

指纹图谱技术。指纹图谱技术最早用于海洋溢油的鉴别,即通过对溢油和嫌疑油样品的“油指纹”进行鉴别比对来确认溢油源。油品中正构烷烃、多环芳烃、类异戊二烯类化合物、甾烷和萜烷等均可作为“油指纹”用于原油鉴别^[17-18],之后该“指纹”的概念被扩展应用到其他领域。全氟化合物的指纹也能用于来源解析^[19]。王燕等^[20]测定了涉污企业外排污水中以无机元素、金属离子、阴离子、有机小分子与有机大分子等信息为代表的化学指纹,并通过超排指纹与涉企指纹的对比,进行了溯源追责。

多元统计方法。统计分析方法可以用于研究污染元素之间的相关性和结合特征,依据环境中污染指标和某些已知污染源的污染物排放特性,可辨别其污染源^[14-21]。通过对污染元素之间的相关分析,可确定其同源关系^[22]。主成分分析是用几个因子来解释污染状况,属于同一个主成分的污染指标可能为同一污染源^[23-24]。样本聚类分析中,聚在一类的样本具

有相同来源;变量聚类分析中归在一类的变量具有相同来源^[25]。富集因子分析主要用于区分自然污染与人为污染^[26]。

同位素分析。物理、化学及生物等因素均会引起同位素自然丰度的变化,从而使不同来源物质的同位素组成比例可能存在差异,通过元素的稳定同位素组成特征可以鉴别元素的来源,追踪其传输途径和归趋。Pb同位素在工业活动和环境迁移过程中的分馏作用不显著,其稳定同位素组成主要与原矿石有关^[27],可以通过Pb同位素的组成判断污染来源和迁移途径^[28-29];Cd、Zn、Ni、Hg等并非从母体核素中经过放射性内增长而来,这些同位素可用于追踪人类活动产生的分馏作用^[21, 28]。此外,有机污染物的碳同位素比值也可用于其来源解析,生物较易降解^{12C},造成^{13C}比例上升^[30-31]。Cl同位素和H同位素等也可用于有机污染物来源的判断^[32-33]。

地理信息技术。地理信息技术(GIS)在污染源解析中也有所应用,主要利用计算机成图获得污染物浓度按地理分布的等值线图,将其与含有工业、道路和其他潜在污染源的地图进行叠加,分析污染物空间异常分布与污染源的关系,从而判断导致污染物分布异常的成因^[21, 34]。

2.2 载体与介质识别

在证实受损环境(土壤和地下水)中污染物与污染源中污染物的同源性之后,需要对污染源和受损环境之间的传输途径进行分析,即污染物是如何从污染源到达受损环境的。污染物的空间传输需要具备两类要素,即传输介质和携带污染物进行传输的载体,因此,传输途径分析包括介质识别和载体识别两部分,从而初步建立污染源到受损环境(土壤和地下水)之间的联系。污染物传输载体和介质的识别可借助场地概念模型进行,场地概念模型是在地质调查、水文地质调查、污染调查等多项工作的基础上构建的,是以“污染源—迁移途径—受体”为核心,不仅包括场地的污染情况,还包括地质、土壤、水文地质、工程地质性质与环境背景、场地现状与规划利用情况等^[35-36]。污染物在地下环境中传输的载体通常包括入渗水、地下水、非水溶相液体等;传输介质包括土壤、地下水等。携带污染物的入渗水或非水溶相液体等载体进入土壤后会和土壤接触,土壤成为介质并伴随水体流动,致使污染物进一步迁移到含水层或饱和层,由此地下水成为载体和介质。

2.3 传输方向判断

因果关系判定的第三步在于判断传输载体的运动方向和污染物浓度梯度方向是否一致。因为污染物从污染源排放或释放出来后,在环境介质中会随各种物理、化学、生物学过程而削减,在下游和污染源之间形成浓度梯度。只有当传输载体的运动方向与污染物浓度梯度方向一致,才能认为污染物迁移是由该传输载体的运动所致,也才能说明迁移途径在空间和时间上是合理的。传输载体的运动方向包括地表水渗流方向、非水相液体对流和弥散方向以及地下水流向等。地表水渗流方向和地下水流向可以通过对地质和水文地质条件的调查进行确定,地下水流向的测定方法还包括解析法、抽水试验法、同位素稀释示踪法、充电法、高密度电法仪、地下水流向流速计等多种方法。非水相液体传输方向可以通过试验测定和模型模拟等方式获取^[37]。污染物浓度梯度方向的判断主要依赖于对污染物空间分布情况的调查,并利用地理信息系统软件(ArcGIS)、地质三维可视化分析系统(EVS)、Surfer、Voxler等对介质或载体中的污染物浓度进行空间插值分析,以判断污染物的浓度梯度方向。

2.4 完整性和连续性分析

因果关系判定的第四步是对污染迁移途径的在时间和空间上的连续性进行分析,以建立污染物从源到受体的完整的时间和空间联系,进一步论证因果关系。完整性和连续性分析方法包括污染物空间分析模拟和污染物随时间迁移转化模拟,模拟方法包括物理模型模拟、数值模型模拟等。大量一维、二维、三维物理模型已被用于模拟三氮、重金属或有机污染物等在包气带或含水层中的迁移转化^[38-40]。基于污染现状、地质条件和其他参数,使用数值模拟模型或软件来模拟倾倒/泄漏/排放的污染物到达受体的时间,同时结合实验室和/或现场试验所获得数据,对模型进行校准或验证。GMS、MT3D、Visual Modflow、Feflow等都是国内目前使用较多的地下水数值模拟软件。

3 因果关系判定案例

目前,土壤与地下水环境损害因果关系判定技术框架已经在3~4个案例中得到应用,该研究选取了其中较为典型的案例,即某企业与下游池塘污染之间的因果关系判定。2015年4月,位于某企业东北方向的池塘水中 $\rho(\text{Zn}^{2+})$ 为34 mg/L,池塘西南角疑似出露泉眼泉水的 $\rho(\text{Zn}^{2+})$ 为164 mg/L,由于该池塘的污染可能影响到下游居民的饮水安全,会引发居民与企业的冲突,造成严重后果。为了明确企业与池塘中

$\rho(\text{Zn}^{2+})$ 超标之间的因果关系, 开展此次案例研究.

按照第 2 节所述框架, 按照 4 个步骤开展因果关系判定.

3.1 池塘与企业污染的同源性分析

首先利用指纹图谱技术对受损环境(池塘水体)的污染特征与污染源污染特征进行比较. 根据污染物组成及其性质的异同, 分析其同源性. 采集池塘水、疑似泉眼水、疑似污染源(企业 1) 以及潜在污染源(企业 2 和企业 3) 的地下水进行分析检测, 比较污染物成分及浓度特征, 判断池塘水体污染物是否来自污染源. 结果(见表 1) 显示, 池塘水和疑似泉眼水中 $\rho(\text{Zn}^{2+})$ 较高, 与疑似污染源情况较为一致, 而另外两个潜在污染源地下水中 $\rho(\text{Zn}^{2+})$ 均很低. 因此, 根据池塘水体污染物与企业 1 地下水污染物的指纹特征, 初步判断企业 1 为池塘水体中污染物的主要来源.

表 1 不同来源水样中的 $\rho(\text{Zn}^{2+})$

Table 1 Zinc concentration in water samples from different sources

水样来源	$\rho(\text{Zn}^{2+}) / (\text{mg/L})$
池塘水(受体)	27.900
疑似泉眼水(受体附近)	135.000
疑似污染源(企业 1)	369.000
潜在污染源(企业 2)	0.475
潜在污染源(企业 3)	0.013

3.2 污染源与受体间的载体与介质识别

在确定了污染源和受损环境中污染物的同源性后, 对污染物从污染源迁移到受损环境的介质和载体进行识别. 同源性分析中代表污染源的样品采自该企业内的 4#地下水井(见图 2), 而代表受损环境的样品采自池塘地表水, 污染物在二者之间传播的载体与介质需要明确. 池塘西南角有疑似泉眼出露, 泉水

因此进入池塘, 据此推断污染物在污染源(该企业地下水井)和受损资源(池塘水体)之间的迁移是通过土壤和含水层介质进行的, 而载体主要为地下水.

为了对载体和介质做进一步确认, 采用地质和水文地质调查技术对污染源和受体之间的地层分布和含水层特征进行了分析. 在该企业和池塘之间新建了 8 口地下水监测井(GW1 ~ GW8), 以监测地下水中污染物的分布情况, 具体如图 2 所示.

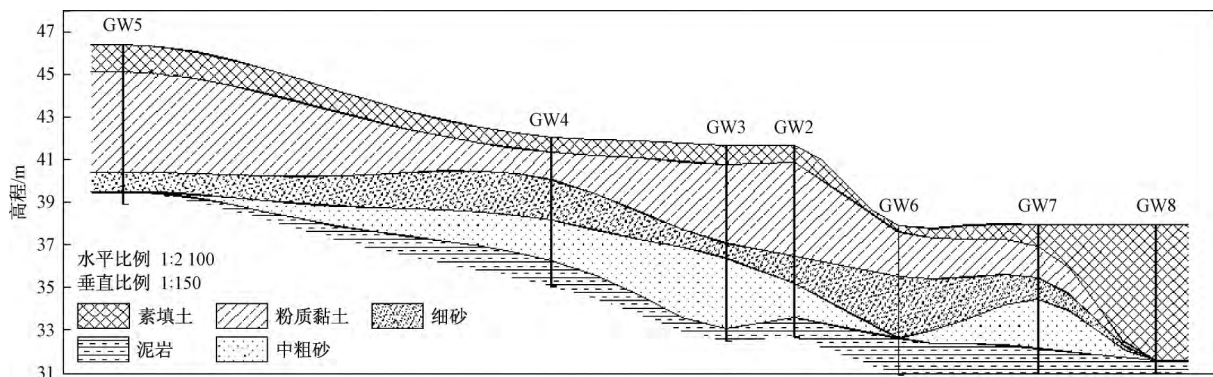


注: QY 为疑似泉眼; 4#为疑似污染源企业内原有地下水井; GW1 ~ GW8 为在疑似污染源企业和池塘之间新建的 8 口地下水监测井.

图 2 调查点位空间分布

Fig. 2 Spatial layout of sampling points

根据钻探过程中获得的信息, 绘制了疑似污染源企业场地的地质剖面图(见图 3). 结果显示, 该场地土壤从上到下分为填土层、粉质黏土、细砂、中粗砂和泥岩共 5 层. 从目前的地层分布来看, 该企业到池塘之间有连续的细砂/中粗砂层, 并且场地内潜水分布于该层位, 因此, 该潜水含水层可能为污染物在污染源与受体之间传输的主要介质, 该含水层的地下水可能为主要载体.



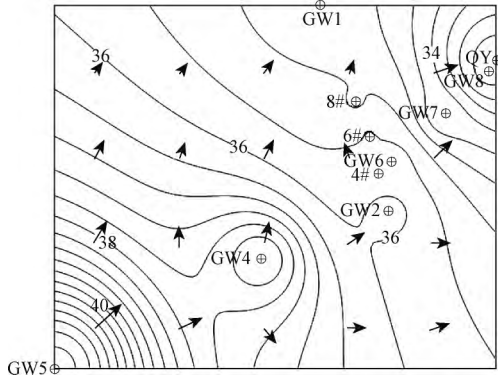
注: 此次测量采用的是黄海高程系; 选择近似在同一直线上的点进行地质剖面图绘制(不含 GW1 地下水监测井).

图 3 场地工程地质剖面

Fig. 3 Geological profile of the site

3.3 案例中污染物锌的传输方向判断

为了确定污染物迁移载体(即地下水)的运动方向,在上述水文地质调查成果基础上,进一步利用空间模拟手段对地下水流向进行分析。对场地内各监测井的地下水水位进行测量,利用 Surfer 11 软件绘制等水位线(见图 4),由此判断地下水流向总体上表现为南西—北东,即从该厂区向池塘方向。



注:等水位线数值单位为 m; 箭头表示地下水流向; 6#、8#均为企业 1 原有地下水井。

图 4 场地地下水等水位线

Fig. 4 Equal waterline of groundwater level of the site

为了确定污染物的浓度梯度方向,综合运用取样分析、地理信息技术等手段对污染物分布特征进行刻画。采集新建监测井中的地下水样,进行 $\rho(\text{Zn}^{2+})$ 检测,并利用 ArcGIS 10.4 对各监测井地下水中的 $\rho(\text{Zn}^{2+})$ 测定结果进行空间插值,得到地下水中 Zn 污染羽的空间分布(见图 5)。4#原有地下水井和 GW6 地下水监测井中的 $\rho(\text{Zn}^{2+})$ 最高,其次是 GW8 地下水监测井和疑似泉眼,位于中间的 GW7 地下水监测井则较低。因此,疑似污染企业和池塘之间的污染羽并不是连续的,可能与局部含水层不连续或存在某些优势通道有关,需要开展进一步研究。

3.4 污染物 Zn 迁移途径的完整性和连续性分析

为了确定污染物在污染源和受体之间迁移途径的完整性和连续性,基于影像分析、地质条件分析、人员访谈等方法,对影响污染物在污染源和受体之间分布的原因进行了深入研究。调取该场地 2004 年 9 月的 Google Earth 影像资料,发现有一汇水区域连通厂区东南角与东北角的池塘。通过将此次调查研究获得的钻孔数据与该企业和池塘之间小区建设时地勘报告中的钻孔数据进行集成,对局部地层特征做进一步刻画。结果(见图 6)显示,回填范围内大部分钻孔

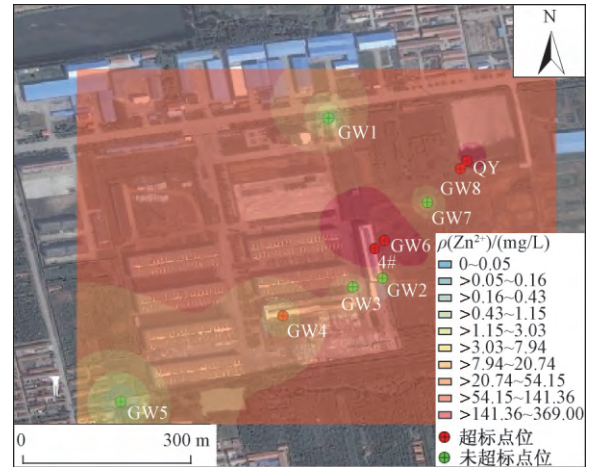


图 5 地下水中 Zn 污染羽分布

Fig. 5 Plume distribution of zinc pollution in groundwater

地表以下 10 m 内仅分布有回填土和泥岩两层,该回填范围位于上述汇水区域内。此外,场地所在区域村委会出具书面证明,2009 年前后,上述汇水区域曾经铺设过水泥汇水管道,埋深约 7 m,其中一部分暗管位于填土区域内,另一部分位于填土区域东侧,具体位置见图 6。



图 6 回填区域和管道埋藏分布

Fig. 6 Schematic diagram of the backfilling area and buried pipe

将地下水中 $\rho(\text{Zn}^{2+})$ 的空间分布与上述回填区域位置、管道埋藏位置等信息进行综合,以分析其相互关系(见图 7)。可以推断 Zn^{2+} 从 4#原有地下水井附近随地下水迁移至 GW7 地下水监测井附近,随后经过暗管到达 GW8 地下水监测井附近;或者绕过填土区域,从南侧的暗管到达 GW8 地下水监测井附近。GW7 和 GW8 地下水监测井之间的地层存在局部不连续性,但暗管构成了 GW7 到 GW8 地下水监测井之

间的优势通道,因此判断污染源(该企业)到受体(池塘)之间存在因果关系。

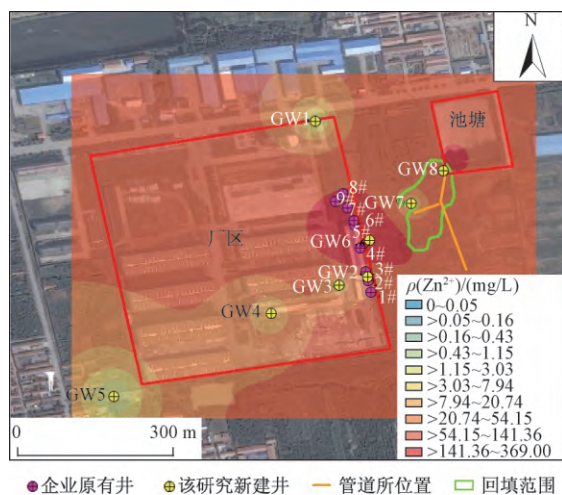


图7 场地条件和污染分布情况

Fig. 7 Comprehensive diagram of site conditions and pollutant distribution

4 结论

a) 土壤与地下水环境损害因果关系判定可按照源与受体中污染物的同源性分析、污染物从源到受体之间的传输载体与介质识别、载体与污染物传输方向判断、污染物在源和受体之间迁移途径的完整性和连续性分析4个步骤开展。

b) 土壤与地下水环境损害因果关系判定需要综合运用多种技术方法,包括但不限于指纹图谱技术等用于同源性分析的方法,地质调查、水文地质调查、取样分析、空间模拟、地理信息技术等用于识别载体和介质以及判断载体与污染物传输方向的方法,以及影像分析等辅助进行迁移途径完整性判断的方法。

c) 某企业与附近池塘污染的因果关系案例分析显示,该研究提出的土壤与地下水环境损害因果关系判定技术框架和方法合理可行,能够在其他环境损害因果关系判定案例中进行应用。

参考文献(References):

[1] 环境保护部环境规划院. 环境损害鉴定评估推荐方法(第II版)(环办[2014]90号)[R]. 北京: 环境保护部环境规划院, 2014.

[2] 张红振,曹东,於方,等. 环境损害评估: 国际制度及对中国的启示[J]. 环境科学 2013, 34(5): 1653-1666.
ZHANG Hongzhen, CAO Dong, YU Fang, et al. Environmental damage assessment: international regulations and revelation to China[J]. Environmental Science 2013, 34(5): 1653-1666.

[3] 於方,刘倩,齐霁. 借他山之石完善我国环境污染损害鉴定评估与赔偿制度[J]. 环境经济 2013(11): 38-47.

[4] 李勇军. 从国外发展状况看我国环境损害赔偿因果关系的认定[J]. 武汉理工大学学报(社会科学版) 2003, 16(4): 394-399.
LI Yongjun. Viewing the presumption of causality in environmental compensation for damage of our country from foreign development [J]. Wuhan University of Technology (Social Science Edition), 2003, 16(4): 394-399.

[5] 马栩生,吕忠梅. 环境侵权诉讼中的举证责任分配[J]. 法律科学(西北政法学院学报) 2005(2): 80-88.

[6] 丁凤楚. 论国外的环境侵权因果关系理论: 兼论我国相关理论的完善[J]. 社会科学研究 2007(2): 96-100.

[7] 宋宗宇,王热. 环境侵权诉讼中的因果关系推定[J]. 中国人口·资源与环境 2008, 18(5): 210-215.
SONG Zongyu, WANG Re. Causation presumption in environmental tort actions [J]. China Population, Resources and Environment, 2008, 18(5): 210-215.

[8] 胡学军. 环境侵权中的因果关系及其证明问题评析[J]. 中国法学 2013(5): 163-177.

[9] 唐小晴,张天柱. 环境损害赔偿之关键前提: 因果关系判定[J]. 中国人口·资源与环境 2012, 22(8): 172-176.
TANG Xiaoqing, ZHANG Tianzhu. Key to environmental damage: causality judgment [J]. China Population, Resources and Environment 2012, 22(8): 172-176.

[10] 薄晓波. 倒置与推定: 对我国环境污染侵权中因果关系证明方法的反思[J]. 中国地质大学学报(社会科学版) 2014, 14(6): 68-81.

[11] 乔世明. 重金属污染因果关系推定理论与实务研究: 以广西镉污染为例[J]. 法治研究 2012(10): 31-38.

[12] Department of Interior. Natural resource damage assessments (43 CFR Part 11) [R]. Washington DC: Office of the Secretary of the Interior, 1994: 241-301.

[13] United States Department of the Interior. BLM natural resource damage assessment and restoration handbook [R]. Washington DC: Bureau of Land Management 2008.

[14] HUGUENIN M T, HAURY D H, WEISS J C, et al. Injury assessment: guidance document for natural resource damage assessment under the Oil Pollution Act of 1990 [R]. Maryland: National Oceanic and Atmospheric Administration, 1996.

[15] LIPTON J, LEJEUNE K, CALEWAERT J B, et al. REMEDE deliverable 13: toolkit for performing resource equivalency analysis to assess and scale environmental damage in the European Union [R]. Belgium: European Union 2008.

[16] 最高人民法院. 最高人民法院关于审理环境侵权责任纠纷案件适用法律若干问题的解释(法释[2015]12号)[EB/OL]. 北京: 最高人民法院, 2015 [2016-01-06]. <http://www.court.gov.cn/fabu-xiangqing-14615.html>.

[17] CHRISTENSEN J H, TOMASI G. Practical aspects of chemometrics for oil spill fingerprinting[J]. Journal of Chromatography A 2007, 1169(1/2): 1-22.

[18] WANG Chuanyuan, CHEN Bing, ZHANG Baiyu, et al. Fingerprint and weathering characteristics of crude oils after Dalian oil spill,

- China[J]. *Marine Pollution Bulletin* 2013 71(1/2): 64-68.
- [19] BENSKIN J P ,DE SILVA A O ,MARTIN J W. Isomer profiling of perfluorinated substances as a tool for source tracking: a review of early findings and future applications [J]. *Reviews of Environmental Contamination and Toxicology* 2010 208 (1): 111-160.
- [20] 王燕 李彩鹦 莫恒亮. 超标偷排污水溯源的物证分析技术研究[J]. *北京化工大学学报(自然科学版)* 2014 41(1): 39-45.
WANG Yan ,LI Caiying MO Hengliang *et al.* Evidence analysis for identifying suspect sources of illegally discharged wastewater [J]. *Journal of Beijing University of Chemical Technology (Natural Science)* 2014 41(1): 39-45.
- [21] 章骅 姚其生 朱钰敏. 固体废物重金属污染源解析技术研究进展[J]. *科学通报* 2012 57(33): 3132-3138.
- [22] ZHOU Ping ZHAO Yao ZHAO Zicheng *et al.* Source mapping and determining of soil contamination by heavy metals using statistical analysis ,artificial neural network ,and adaptive genetic algorithm [J]. *Journal of Environmental Chemical Engineering* 2015 3(4): 2569-2579.
- [23] DAVIS H T ,MARJORIE AELION C ,MCDERMOTT S ,*et al.* Identifying natural and anthropogenic sources of metals in urban and rural soils using GIS based data ,PCA and spatial interpolation [J]. *Environmental Pollution* 2009 157(8/9): 2378-2385.
- [24] LUO Xiaosan , XUE Yan , WANG Yanling , *et al.* Source identification and apportionment of heavy metals in urban soil profiles [J]. *Chemosphere* 2015 127: 152-157.
- [25] LEE S L ,LI X D ,SHI W Z *et al.* Metal contamination in urban , suburban and country park soils of Hong Kong: a study based on GIS and multivariate statistics [J]. *Science of the Total Environment* 2006 356(1/2/3): 45-61.
- [26] YE Chen ,LI Siyue ,ZHANG Yulong ,*et al.* Assessing soil heavy metal pollution in the water-level-fluctuation zone of the Three Gorges Reservoir ,China [J]. *Journal of Hazardous Materials* 2011 , 191(1/2/3): 366-372.
- [27] SUN Guoxin ,WANG Xinjun ,HU Qinhong. Using stable lead isotopes to trace heavy metal contamination sources in sediments of Xiangjiang and Lishui Rivers in China [J]. *Environmental Pollution* 2011 159(12): 3406-3410.
- [28] CLOQUET C ,CARIGNAN J ,LIBOUREL G *et al.* Tracing source pollution in soils using cadmium and lead isotopes [J]. *Environmental Science & Technology* 2006 40(8): 2525-2530.
- [29] LUO Xiaosan ,YU Shen ,LI Xiangdong. Distribution ,availability , and sources of trace metals in different particle size fractions of urban soils in Hong Kong: implications for assessing the risk to human health [J]. *Environmental Pollution* ,2011 159(5): 1317-1326.
- [30] MANSUY L ,PHILP R P ,ALLEN J. Source identification of oil spills based on the isotopic composition of individual components in weathered oil samples [J]. *Environmental Science & Technology*. 1997 31(12): 3417-3425.
- [31] MAZEAS L ,BUDZINSKI H. Molecular and stable carbon isotopic source identification of oil residues and oiled bird feathers sampled along the Atlantic coast of France after the Erika oil spill [J]. *Environmental Science & Technology* 2002 36(2): 130-137.
- [32] STURCHIO N C ,CLAUSEN J L ,HERATY L J ,*et al.* Chlorine isotope investigation of natural attenuation of trichloroethene in an aerobic aquifer [J]. *Environmental Science & Technology* ,1998 32 (20): 3037-3042.
- [33] POND K ,HUANG Y ,WANG Y ,*et al.* Hydrogen isotopic composition of individual n-alkanes as intrinsic tracer for bioremediation and source identification of petroleum contamination [J]. *Environmental Science & Technology* ,2002 36(4): 724-728.
- [34] ZUSHI Y ,MASUNAGA S. GIS-based source identification and apportionment of diffuse water pollution: perfluorinated compound pollution in the Tokyo Bay Basin [J]. *Chemosphere* 2011 85(8): 1340-1346.
- [35] 潘云雨 宋静 骆永明. 基于人体健康风险评估的冶炼行业污染场地风险管理与决策流程 [J]. *环境监测管理与技术* 2010 22 (3): 55-61.
PAN Yunyu ,SONG Jing ,LUO Yongming. Risk management and decision-making process for metallurgical contaminated sites based on human health risk assessment [J]. *The Administration and Technique of Environmental Monitoring* 2010 22(3): 55-61.
- [36] 钟茂生 姜林 姚珏君 等. 基于特定场地污染概念模型的健康风险评估案例研究 [J]. *环境科学* 2013 34(2): 647-652.
ZHONG Maosheng ,JIANG Lin ,YAO Juejun *et al.* Case study on health risk assessment based on site-specific conceptual model [J]. *Environmental Science* 2013 34(2): 647-652.
- [37] AGAOGLU B ,SCHEYTT T ,COPTY N K. Laboratory-scale experiments and numerical modeling of cosolvent flushing of multi-component NAPLs in saturated porous media [J]. *Journal of Contaminant Hydrology* 2012 140/141: 80-94.
- [38] MAEDA M ,BERGSTROM L F. Leaching patterns of heavy metals and nitrogen evaluated with a modified tanks-in-series model [J]. *Journal of Contaminant Hydrology* 2000 43(2): 165-185.
- [39] JACQUES D ,SIMUNEK J ,MALLANTS D *et al.* Modelling coupled water flow ,solute transport and geochemical reactions affecting heavy metal migration in a podzol soil [J]. *Geoderma* 2008 145(3/4): 449-461.
- [40] ZHANG Wenjing ,LIN Xueyu ,SU Xiaosi. Transport and fate modeling of nitrobenzene in groundwater after the Songhua River pollution accident [J]. *Journal of Environmental Management* , 2010 91(11): 2378-2384.

(责任编辑:周巧富)