

Triad, 污染场地管理的新模式

丁远昭¹, 沈欣², 曾辉³, 李喜青^{2,3*}

(1. 北京大学工学院, 北京 100871; 2. 北京大学城市与环境学院, 北京 100871; 3. 北京大学深圳研究生院深圳市循环经济重点实验室, 深圳 518055)

摘要:污染场地的调查和修复往往是个耗时很长、成本很高的过程。传统的多阶段的场地管理模式是造成这一状况的重要原因之一。随着场地管理经验的增加和新技术的出现, 美国形成了一种能大大缩短项目周期、显著降低成本的场地管理新模式: Triad 模式。本文系统阐述了 Triad 模式的 3 个要素, 即系统的项目计划, 动态的工作策略和实时的测量技术, 结合有关案例说明了 Triad 模式的优点和适用性, 最后针对我国目前场地调查和修复的现状, 提出相应的对策和建议。

关键词:Triad 模式; 污染场地; 管理; 不确定性

中图分类号: X53 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2011)03-0803-06

Triad, a New Approach for Contaminated Site Management

DING Yuan-zhao¹, SHEN Xin², ZENG Hui³, LI Xi-qing^{2,3}

(1. College of Engineering, Peking University, Beijing 100871, China; 2. College of Urban and Environmental Sciences, Peking University, Beijing 100871, China; 3. Shenzhen Key Laboratory of Circular Economy, Peking University Shenzhen Graduate School, Shenzhen 518055, China)

Abstract: Remediation of a contaminated site is typically a time-consuming and expensive process. The traditional multistage approach of site management is an important contributor of this lengthy and costly process. The emergence of new characterization technologies and past experiences have led to the development of a new site characterization and remediation approach—Triad approach. In this paper, the three key components of the Triad approach, namely, systematic project planning, dynamic work strategy, and real-time measurement, were elucidated. The advantages and applicability of the Triad approach were demonstrated with case studies. Based on the current practices of site characterization in China, recommendations are made to promote the application of the Triad approach.

Key words: triad approach; contaminated sites; management; uncertainties

随着我国城市经济结构和功能的调整, 许多工业企业需要搬迁(如从城市迁往农村, 从沿海迁往内地), 也有许多企业因为经营不善不得不关闭。这些搬迁和关闭企业留下的土地将在今后的几年里将迅速增加。而这些企业在以往生产活动中或多或少会对所在场地造成污染。从重庆市和北京市对部分搬迁场地的调查显示, 大约六分之一到五分之一的被调查场地需要修复后才能再开发。如何快速高效地修复这些受到不同程度污染的场地是各地城市规划部门、环保部门和土地管理部门面临的重要挑战。

发达国家, 特别是美国污染场地的整治往往需要耗费很长的时间, 而且费用非常高昂。这当然跟场地污染的隐蔽性和复杂性有极大的关系。造成这一情况的另一个重要原因是美国传统的污染场地管理模式是根据 20 世纪 80 年代人们对于场地污染的理解和当时的技术水平形成的, 这种模式本身就决定了污染场地的调查和修复必然是个极为耗时费力的过程。随着人们关于场地管理经验的增加、相关法规和标准的出台、新的场地调查和修复技术的出

现, 美国场地修复的技术和管理人员对传统的管理模式进行了一些改善, 到上世纪末本世纪初形成了一种系统的、和传统模式根本不同、操作性较强的新模式——Triad 模式^[1]。这种新模式可以大大缩短污染场地调查和修复的周期, 显著降低成本, 因此受到了技术人员和管理部门(如美国环保总署)的欢迎和重视。目前已有部分州(如新泽西州)的环保执法部门开始正式实施这一管理模式^[2]。本文将分析传统模式的缺陷, 进而详细阐述 Triad 模式的由来、要素、优点、适用性, 最后结合我国目前场地调查和修复的现状, 提出相应的对策和建议。

1 传统场地管理模式及其缺陷和演变

传统的场地管理采用分阶段进行的方式, 把场

收稿日期: 2010-01-31; 修订日期: 2010-09-17

基金项目: 深圳市科技信息局科技计划项目; 国家高技术研究发展计划(863)项目(2009AA063102)

作者简介: 丁远昭(1985~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为污染土壤和地下水修复技术研发, E-mail: armstrongding@gmail.com

* 通讯联系人, E-mail: xli@urban.pku.edu.cn

地的管理周期分为初步调查 (initial investigation)、场地详细调查 (site characterization)、修复设计 (remedial design)、修复实施 (remedial action)、运行和维护 (operation & maintenance)、竣工 (site closure) 等阶段。根据这种多阶段的模式, 场地修复在实践中被证明是个非常昂贵且耗时巨大的过程。造成这种情况的主要原因有: 部分利益相关者 (如场地所有者、周边居民)、特别是执法部门在项目前期参与较少, 而在后期参与后对项目目标和前期工作产生异议, 造成项目停顿甚至返工, 由此导致时间延误和费用增加; 样品的分析必须根据严格的程序 (USEPA SW-846) 并在固定的实验室进行, 这一方面使产生数据的周期较长, 另一方面由于分析成本高昂而导致分析的样品数量有限。由此必然造成对污染物分布的刻画存在很大的不确定性; 由于对污染分布状况掌握不完全, 修复设计往往存在不合理的地方, 或者导致修复不完全, 或者导致修复范围不必要的扩大而造成资源浪费。甚至在修复实施过程中发现需要再次进行场地调查和更改修复方案 (如发现新的污染物和污染源), 这无疑会显著延长项目周期和增加最终的修复成本; 另外, 许多污染场地是由政府出资进行调查和修复的, 一旦调查和修复费用超出原来的预算, 必须向政府再次申请立项和拨款, 而政府立项存在较大的不确定性, 并且拨款具有的一定周期性, 由此也必然导致修复项目的停顿和延误。这些因素共同作用的结果是美国场地修复的周期往往长达数年甚至十几年。

传统的场地管理模式是在 20 世纪 80 年代形成的。当时美国的场地修复刚刚起步, 人们对场地污染和修复的认识还很肤浅, 不了解污染物迁移和分布的规律, 进行场地调查和修复的技术手段也很有限, 缺乏场地修复后再利用的经验, 加之对场地修复的法律责任和后果存有较大的疑虑, 因此倾向于采用严格和分阶段的方式进行场地管理。与这种多阶段的管理模式相配合的是关于样品采集和分析的详细步骤的建立 (即美国环保总署的 SW-846 方法系统)。因为只有根据这些步骤在固定的实验室获得的数据才具有法律效力, 所以这些步骤成了场地管理领域的标准方法, 人们通常只采用根据这些步骤获得的数据以形成关于场地调查和修复的决策。根据这些步骤进行样品分析不仅产生数据时间较长 (因为必须送到固定的实验室进行分析), 而且成本很高, 由此带来的后果是分析样品数量的下降和关于污染物浓度和分布不确定性的增加。

用传统模式进行场地调查和修复的缺陷在实践中不断被人们认识到。因此从 20 世纪 80 年代开始从事场地管理的有关部门和公司提出了多种动议 (initiative) 来加快场地清理的进程。如美国环保总署于 20 世纪 80 年代建议采用“数据质量目标” (data quality objectives, DQO) 模式来加快场地清理^[3], 这一建议的核心是数据的质量取决于项目的目标, 即只要数据的质量能够满足项目的目标, 就不一定非要通过 SW-846 规定的步骤获得。尽管 DQO 模式没有被很好地执行^[4], 其核心思想和 Triad 模式是完全一致的。又如美国环保总署管理超级基金的部门提出了“动态的现场工作 (dynamic field activities)”的指导性文件^[5], 推动动态的现场工作策略; 再如美国陆军工程团 (US Army Corps of Engineers) 提出了“项目技术规划 (technical project planning, TPP)”模式, 强调在项目的前期对项目的工作和所需获取的信息进行详细的规划^[6]。从下面的阐述可以看出, 这些动议和模式对 Triad 模式的形成都产生了重要的贡献。Triad 是从 1998 年开始, 由美国“州际技术和管理委员会 (Interstate Technology and Regulatory Council)”结合美国 20 多年的修复经验和技术进步形成了关于污染场地管理的一种新模式, 其正式指导性文件出版于 2003 年^[1]。

2 Triad 模式及其要素

Triad 这个词并不是几个词的第一个字母组合而成的 (这样组成的词称为 acronym)。Triad 指一样事物具有 3 个组成部分, 由此可知这种新的管理模式具有 3 个要素。这 3 个相互关联的要素分别是系统的项目计划 (systematic project planning)、动态的工作策略 (dynamic work strategy)、以及实时的测量技术 (real-time measurement technology)。实施这 3 个组成部分的核心是降低场地调查和修复过程中的种种不确定性, 大大缩短项目的周期, 提高场地调查和修复的效率, 降低项目的成本。通常用图 1 来形象地表示 Triad 模式。下面详细说明各个要素的内容以及 Triad 模式下对不确定性的控制。

2.1 系统的项目计划

系统的项目计划是指在进行现场工作之前对项目的实施进行详细地规划。它的第一步是召集所有的利益相关者 (stakeholder), 包括场地的业主、政府环保部门的管理人员 (regulator)、开发商、从事场地调查和修复的机构或公司、保险公司代表、周边居民



图1 Triad 各要素示意

Fig. 1 Schematic diagram of the three elements of Triad

的代表等,并组成核心技术团队(core technical team)。这些利益相关者的首要任务是讨论并确定项目的最终目标,因为项目的目标决定了项目具体的实施过程。在传统的管理模式下,在开始现场工作之前,项目目标往往是不明确的,各利益相关者之间也没有就此达成一致。系统的项目计划最重要的工作是提出初步的场地概念模型(conceptual site model·CSM)。这一模型的内容包括场地过去的用途、以往场地调查的结果、场地的地质和水文地质状况、场地修复后再开发的用途、污染物迁移的路径和受体、可能的修复方式、项目完成的策略等。场地概念模型的核心是确定数据差距(data gap,即确定在现场工作中需要获得哪些数据),提出项目实施过程各种可能出现的情况及需要作出的决定(如何种情况下需要扩大采样范围),确定作出各种决定所采用的准则(如采样基于风险的准则还是环保部门规定的准则)。显然,提出这一模型的根本目的是用于指导项目的具体实施,而这一模型本身也在实施过程中得到不断的完善,项目的实施也随之作相应的调整。系统的项目计划还包括对项目所采用技术方法适用性的示范作出计划、细化动态工作策略、对实时数据的管理、评估、展示作出计划、评估和采购合适的技术和服务等。这些计划的目的是使 Triad 模式的另外 2 个要素得到顺利的实施。

2.2 动态的工作策略

动态的工作策略的要点是对现场工作进行合理排序以提高效率,确定决策的逻辑以指导现场活动,进行流程化工作。其核心是根据项目实施的实际情况在现场作出各种决策(如是否需要提高采样的密度),保证项目能够快速顺利地进行。这一策略和传统模式下的静态工作策略有很大的区别:静态方法进场前就确定好采样位置,在现场很少改变采样方案,动态方法提出采样方案但随时准备根据结果进

行调整以减少采样的不确定性;静态方法很少进行现场测定,动态方法以现场分析测定技术为基础;静态方法在计划阶段考虑 CSM,现场工作完成后再进行修改,动态方法根据现场进展随时修改 CSM;静态方法的决定是事先在办公室中作出的,而动态方法计划在现场实时作出决定。采用动态工作策略的根本目的使设备和人员的一次进场就能完成该次进场计划完成的任务(如获得全部需要的数据),避免设备和人员重复进场导致的项目周期延长和费用增加。

由于在动态的工作策略下许多决策是在现场作出的,这些决策必须得到所有核心技术团队(其中包括环保部分的管理人员)的一致同意。由于核心技术团队的所有成员不可能时时都在现场,因此如何把现场获得的信息和数据及相应的决策建议在最短的时间内远程传输给所有团队成员是动态的工作策略得以成功的前提。在过去 20 多年里信息技术的进步已经能够保证这种传输顺利进行。为了使团队的所有成员能够迅速掌握传输的数据并很好地理解决策建议,必须在现场对获得的数据进行管理,包括用专门的软件对数据进行整理和评估、将数据转换成指定的格式(如可视化的格式,使数据便于理解消化)、利用相关的决策支持工具或软件形成决策建议等。为了使数据管理和决策形成能够在现场顺利进行,核心技术团队在项目计划阶段就对此做出详细的计划并已达成共识,由此可见系统的项目计划和动态的工作策略是密切联系的。

2.3 实时的测量技术

从上文可以看出,动态的工作策略的顺利实施离不开实时的测量技术。所谓实时的测量并不是仅指在现场瞬时完成测量,而是还包括那些测量时间周期不影响现场决策的技术。因此实时的测量并不仅仅是现场测量,那些在固定实验室能够快速给出结果的测量同样也属于 Triad 模式下的实时测量。实时的测量技术和设备包括化学分析技术、地球物理技术、地质技术等几大类。实时的化学分析技术包括试剂盒、便携式仪器(如激光诱导检测器、X-射线荧光光谱仪)、原位的探头(如 membrane interface probe)、移动实验室、能快速给出结果的固定实验室等。实时的地球物理技术包括电磁技术、钻孔技术(borehole)、地震波技术等。实时的地质技术包括直接压入(direct-push)技术和圆锥贯入(cone penetrometer)技术等。实时测量产生的数据量一般都较大,因此需要现场的数据存储和管理技术作为

支持. 这些现场测量技术和数据存储管理技术在 20 多年前是不存在的, 由此可见 Triad 模式是以技术进步为基础的.

实时测量产生数据的速度快, 分析单个样品的成本比传统方法低得多, 因此可以大大增加样品分析的数量. 总体而言, 实时测量的结果的准确度低于按照严格程序在固定实验室的获得的结果, 如有些实时测量(如试剂盒)的结果只能给出有无污染物的结论, 而不能给出污染物的浓度数据. 因此尽管在传统的方法系统(SW-846)中并没有规定不能采用现场测量技术, 场地管理的各利益相关方(特别是环保部门的管理人员)往往难于接受现场测量的结果. 为了提高实时测量结果的可接受性, 必须在项目实施过程中展示实时测量技术的适应性和可靠性, 并建立相应的质量保证方案. 质量保证方案需在系统的项目计划阶段就经各利益相关方讨论并达成一致. 另外, 在 Triad 模式下, 一般把实时测量技术和传统的分析方法结合使用, 即采用实时测量技术分析大部分的样品, 以提高采样的代表性; 同时采用高成本的传统方法分析一小部分样品, 验证实时测量技术获得的数据, 保证总体的分析质量.

2.4 Triad 模式下场地管理的不确定性

场地管理过程中涉及多方面的不确定性, 如修复目标的不确定性, 修复范围的不确定性等. 不确定性越高, 修复的效率和效果就越差. 以污染物分布为例, 如果存在很大的不确定性, 必然会导致修复范围也存在很大的不确定性, 进而使得部分应该修复的区域没有得到修复, 而不需要修复的区域也被当做污染区域得到了处理, 这一方面导致修复不彻底, 另一方面导致资源浪费.

相对于传统的管理模式, Triad 模式大大降低了与场地管理有关的各种不确定性. Triad 模式中所有利益相关者都参与了项目前期的计划, 就项目的目标、实施的方案、数据差距、需要作出的决策、作决策所采用的依据等进行详细的讨论并达成了一致, 项目实施过程中又共同就这些方面进行了沟通并作出相应的调整, 因此可以降低这些方面的不确定性, 避免这些方面所可能存在的异议导致的场地调查和修复行动的反复. 更重要的是, Triad 模式采用的动态工作策略和实时测量技术大大降低了数据的不确定性, 进而进一步减小了 CSM 的不确定性, 提高了修复范围的准确性(即确定性), 采用的修复手段也更为合理, 因而修复的效率和效果得到极大的提高.

为了进一步阐明 Triad 模式对数据不确定性的降低, 有必要说明数据不确定性的来源. 人们过去通常认为数据的不确定性主要来自样品处理和分析测量的不确定性, 把数据的质量等同于样品分析的质量, 因此强调采用严格的分析程序在获得认证的固定实验室进行分析^[7]. 但是这样分析样品的成本很高, 因此受预算的限制, 通过这种途径分析的样品数量必然较少. 20 世纪 90 年代人们逐渐认识到数据的质量不仅仅取决于分析的质量, 更取决于样品的代表性^[8]. 因此采用过去高成本的分析方法必然牺牲样品的代表性(由于样品数量有限). 而采用动态工作策略和实时测量技术, 尽管分析质量可能不如以前, 但由于分析成本大为降低, 可以大大增加样品的数量(即提高采样的代表性), 使得数据的质量高过以前. 这点可由图 2 予以说明. 传统的模式下, 只有少量的样品用高成本的方法(以美元符号表示), 因此很有可能无法监测到部分重污染区域(深色的方框), 这时修复决策存在很大的不确定性, 致使部分污染区域没有得到修复. Triad 模式采用低成本的方法(美分符号表示)分析大量的样品, 因而能刻画所有的污染区域, 显著降低决策的不确定性, 实现彻底的修复.

3 Triad 模式优点、适用性和案例

从上文就可以看出, 采用 Triad 模式进行场地修复具有许多突出的优点. 其最重要的优点是在这种模式下场地调查和修复的时间大大缩短, 项目总体费用显著下降, 同时修复的效果大为改善. 与这些优点伴随的是参与项目各方人员的工作负担大为减轻, 士气得到提高, 对场地修复的信心也得到很大的增强. Triad 模式还能改善场地所有者与公众的关系, 这是因为公众的意见也在修复过程中得到了反映. 另外, Triad 模式还有助于场地调查和修复新技术的推广使用, 这是因为在这种模式下, 任何技术只要其适用性在现场得到展示并得到项目核心技术团队的认可就可以被采用.

与传统场地管理模式相比, Triad 模式前期的人力、时间、财力投入较高, 并且需要培训参与项目的各方人员. 这可能导致部分场地所有者或管理部门难以接受而选择不采用这种模式. 另外美国有些州的环境保护部门难以接受现场分析数据而拒绝采用 Triad 模式, 也有部分技术和管理人员因为习惯于传统的模式而不采用 Triad 模式. 当然, 这些缺点或问题和这种模式的优点相比是微不足道的, 随着时间

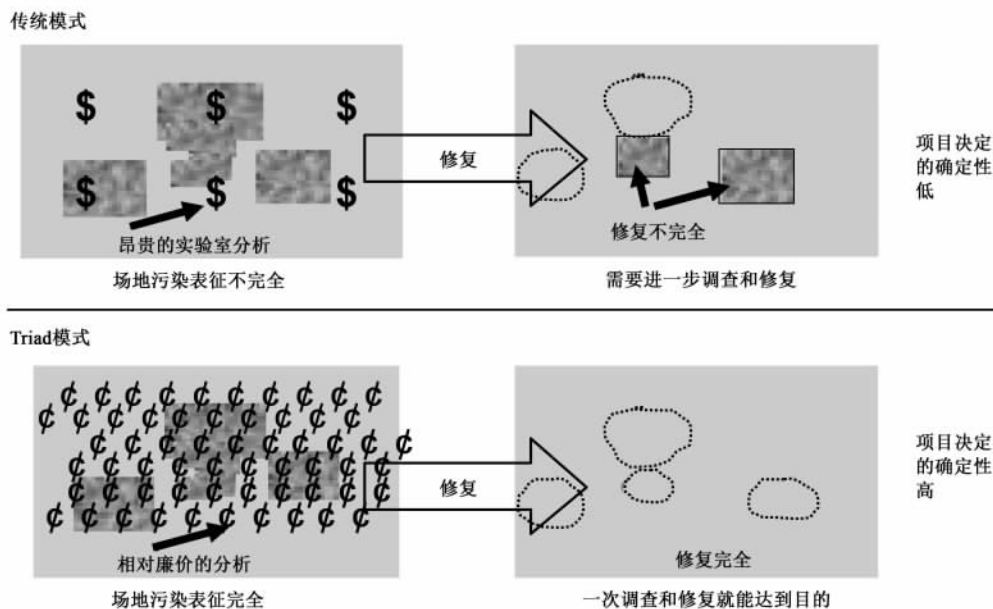


图2 传统和 Triad 模式下采样的代表性和修复的不确定性(参考了文献[1])

Fig. 2 Sampling representativeness and clean up uncertainty under traditional and triad approach

的推移, Triad 模式必将得到广泛的采用。

Triad 模式适用于绝大部分场地的调查和修复, 特别适合于过去曾进行过调查或修复但不成功的场地; 污染存在很大不确定性的项目; 水文地质方面存在很大非均一性的场地; 整治时间比较紧张的场地等。Triad 模式不适用于少量情况比较特殊的场地, 如不允许大量时间用于前期计划的项目和情况比较简单的场地(因为这类场地不需要采用 Triad 模式)。Triad 模式还不适用于争议较大、各利益相关方难以合作的项目, 对于这样的项目, Triad 模式的第一步, 即召集各利益相关方进行系统的项目计划就无法开展。

Triad 模式已在美国的许多场地得到了成功的应用^[1]。如在新泽西州的 McQuire 空军基地, 有关部门于 2003 年 2 月为 C-17 运输机修建新的机库时发现所在场地的地下水遭到了含氯有机溶剂的污染。由于机库的施工必须在当年的 6 月开始, 采用传统的场地调查方式肯定会导致施工的延误。因此有关各方与 4 月初组成了由美国空军、新泽西环境保护部门、美国环境保护总署区域办公室、三家咨询公司参与的核心技术团队, 采用 Triad 模式开展调查和修复工作。经过系统的项目计划, 团队提出的动态工作方案在 4 月下旬得到了新泽西环保部门和美国环保总署区域办公室的批准, 并于 4 月底就开始了现场采样调查工作。在现场工作过程中采用了 X-射线荧光分析、膜界面探头 (membrane interface

probe)、圆锥贯入 (cone penetrometer)、直接压入 (direct-push)、直接进样的离子阱质谱仪等技术和设备, 到 5 月 14 日就完成了现场的调查和临时的修复工作, 新泽西环境保护部门和美国环境保护总署区域办公室于 5 月 22 日批准认可了临时的修复行动(由于调查发现该场地存在含氯溶剂的自然降解, 因此不需要进一步的修复), 保证了机库施工如期开始。如果采用传统的工作方式, 估计需要多花 130 万美元和 1.5~2 a 的时间。类似的例子还有很多, 有的场地节省的费用高达数千万美元^[1]。

4 启示与建议

从上文可以看出, Triad 模式集美国 25 a 污染场地管理经验和技術进展之大成, 克服了传统模式的主要缺点。这一新模式已在美国已得到重视, 有的州(如新泽西)的环境保护部门已开始建立针对 Triad 模式的污染场地管理规范。在可以预计的将来, Triad 模式将成为美国污染场地管理的主要模式。我国目前开展的污染场地调查和修复主要还是采取分阶段的传统模式, 因此 Triad 模式非常值得我国场地修复界学习借鉴。

采用 Triad 模式需要丰富的污染场地调查和修复经验以及必要的现场采样和分析设备。由于我国污染场地调查和修复刚刚起步, 这方面的经验还很不足, 并且采用 Triad 模式所需要的许多技术和设备还不具备, 因此现阶段在我国全面推广采用 Triad

模式的时机还不成熟。但是应该看到,我国污染场地管理的法规标准正在制定中,工作习惯也未固定,因而不存在老的模式和习惯的干扰,这对于采用 Triad 模式进行污染场地管理非常有利。另外,采用 Triad 模式的部分要素(如进行详细的项目计划和采用部分现场实时测量技术)就可以对我国污染场地的修复起到积极的作用,因此现在就可以把这些要素融入到我国的场地管理实践中去。

为了使 Triad 模式尽早得到推广采用,笔者建议在现阶段就开始做些准备工作,如加强对美国有关 Triad 模式的法规和标准的研究,在制定我国的污染场地管理法规和标准时考虑为将来推广 Triad 模式预留有关条款;鼓励调查和修复单位采用动态工作方式和现场实时测量技术,资助购置所需的仪器设备;举行关于 Triad 模式的专题研讨会,对相关技术和管理人员进行培训;一旦条件具备,选择合适的场地进行 Triad 管理模式的示范等。这些措施一定会对 Triad 模式的推广采用和我国的场地修复工作起到积极的推动作用。

参考文献:

[1] ITRC Sampling, characterization, and monitoring team. Technical and regulatory guidance for the Triad approach: a new paradigm for environmental project management [EB/OL]. 2003. <http://www.itrcweb.org>.

[2] ITRC Sampling, Characterization, and Monitoring Team. Triad Implementation Guide [EB/OL]. 2007. <http://www.itrcweb.org>.

[3] U. S. Environmental Protection Agency. Data quality objectives process for Superfund (Interim Final Guidance) [R]. 1993. EPA- 540-R-93-071.

[4] Crumbling D M. In search of representativeness: Evolving the environmental data quality model[J]. Quality Assurance, 2002, **9**: 179-190.

[5] U. S. Environmental Protection Agency. Using dynamic field activities for on-site decision making: a guide for project managers[R]. 2003. EPA-540-R-03-002.

[6] U. S. Army Corps of Engineers. Technical project planning (TPP) process[R]. Engineer Manual EM 200-1-2, 1998.

[7] Crumbling D M, Groenjes C, Lesnik B, *et al.* Managing uncertainty in environmental decisions: applying the concept of effective data to contaminated sites could reduce costs and improve cleanups [J]. Environmental Science and Technology, 2001, **35**(18): 3A-7A.

[8] Jenkins T F, Walsh M E, Thorne P G, *et al.* Assessment of sampling error associated with collection and analysis of soil samples at a firing range contaminated with HMX [R]. Special Report 97- 22. U. S. Army Corps of Engineers/Cold Regions Research and Engineering Laboratory, National Technical Information Service, 1997.