

# Application and Development of 3MRA Model and Its Application Prospect Analysis in Environmental Risk Assessment

Xiaoxia Wu<sup>1,2</sup>, Yang Chen<sup>2\*</sup>, Lianqin Yin<sup>1</sup>, Liyuan Liu<sup>2</sup>, Luyuan Li<sup>1,2</sup>, Zhiyong Zhang<sup>2</sup>

<sup>1</sup>North China Electric Power University, Baoding

<sup>2</sup>Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing

Email: \*[chenyang.hky@126.com](mailto:chenyang.hky@126.com)

Received: Apr. 5<sup>th</sup>, 2014; revised: May 6<sup>th</sup>, 2014; accepted: May 15<sup>th</sup>, 2014

Copyright © 2014 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

---

## Abstract

A first-generation model—the Multimedia, Multi-pathway, Multi-receptor Exposure and Risk Assessment (3MRA) is a flexible framework for conducting nationwide multimedia, multi-pathway and multi-receptor risk assessments under uncertainty, which is developed to estimate protective chemical concentration limits in a source area. In this paper, according to the summary of the 3MRA model and its development and application at home and abroad, it is affirmed that 3MRA model has a good prospect of application. Finally, the methods of referencing and using model are proposed from four aspects, providing decision-making basis for waste management in our country.

## Keywords

3MRA, Environmental Risk, Mathematic Model, Environmental Decision-Making

---

# 3MRA模型在环境风险评价中的应用发展及前景分析

吴晓霞<sup>1,2</sup>, 陈扬<sup>2\*</sup>, 尹连庆<sup>1</sup>, 刘俐媛<sup>2</sup>, 李路远<sup>1,2</sup>, 张智勇<sup>2</sup>

<sup>1</sup>华北电力大学, 保定

\*通讯作者。

<sup>2</sup>中国科学院高能物理研究所, 北京  
Email: [chenyang.hky@126.com](mailto:chenyang.hky@126.com)

收稿日期: 2014年4月5日; 修回日期: 2014年5月6日; 录用日期: 2014年5月15日

## 摘要

**3MRA(the Multimedia, Multi-pathway, Multi-receptor Exposure and Risk Assessment)**是第一代模型, 是一种在不确定条件下, 针对全国性多介质、多途径和多受体进行风险评估的体系, 用于评估废物处置区域内对生态、人类构成风险的污染物的浓度阈值。本文中, 通过对3MRA模型及其在国内外发展应用现状的综述, 认为模型具有良好的应用发展前景, 并从4个方面提出借鉴使用模型的建议方法, 为我国废物管理提供决策依据。

## 关键词

3MRA, 环境风险, 数学模型, 环境决策

## 1. 引言

环境风险评价是对由自发的自然原因或人类活动引发的, 通过环境介质传播的、能对人类社会产生破坏、损害等严重不良后果事件的危害程度的评价[1]。风险评价中, 为解决数量众多的污染物在各种环境介质中迁移转化引起的各种环境和生态问题, 需建立快速、准确的实时监测方法, 测定污染物在环境各介质中的污染水平, 但工作量大、费用高且耗时[2]。所以, 我国在实现环境风险评价中, 为与实际情况更加吻合, 多借助多介质环境模型模拟生态环境中污染物迁移和归趋的过程, 实现对环境成本的衡量, 为环境管理决策提供参考依据, 这已成为一种非常有效的手段[3]。由于我国目前在环境风险评价中, 缺少相关数据资料, 基础较薄弱无法建立系统全面的风险评价数据库, 国内风险评价项目中多引用国外较为成熟的多介质风险评价模型[4]-[8]。3MRA 模型是《美国 2006~2011 年环境保护战略规划》中指定的废物风险评估专属模型[9], 主要用于评估废弃污染物释放区域, 受保护区域中化学物质的浓度阈值, 其模拟预测结果可作为相关法律制定、部门决策的参考依据, 地位已上升至环境立法层面, 是我国引入较权威的多介质模型[10]。本文将对 3MRA 模型应用现状及前景发展进行全面深入的分析, 为推动我国废物管理部门应用环境风险评价作为制定管理决策的依据提供新的思路和方法。

## 2. 模型概况

3MRA 体系最早由 Marin 等人[11]编写, 模型由美国环境保护署(US EPA)及其联办机构共同开发, 并通过同行评审。3MRA 是一种在不确定条件下, 针对全国性多介质、多途径和多受体进行风险评估的灵活体系, 遵循质量守恒规则, 适用于各种类型的废物污染物释放源的风险评估。3MRA 模型由 17 个子模型构成: 5 个污染源模型、5 个介质模型、3 个食物链模型和 4 个暴露/风险表征模型[12], 子模型间紧密结合构成一个多介质、多暴露途径、多受体风险评估体系(如图 1 所示)。该体系由两部分组成[13]: 风险评估和不确定性分析。风险评估是利用释放源、迁移转化、暴露和风险评估模型来评估所涉及的受体(人类、生态)的暴露风险; 不确定分析是通过两级蒙特卡洛程序嵌入到风险评估中, 该程序允许在风险评估中进行不确定性计算, 是一个计算输入参数不确定性和预测迁移转化、暴露、风险模型误差的功能组件。

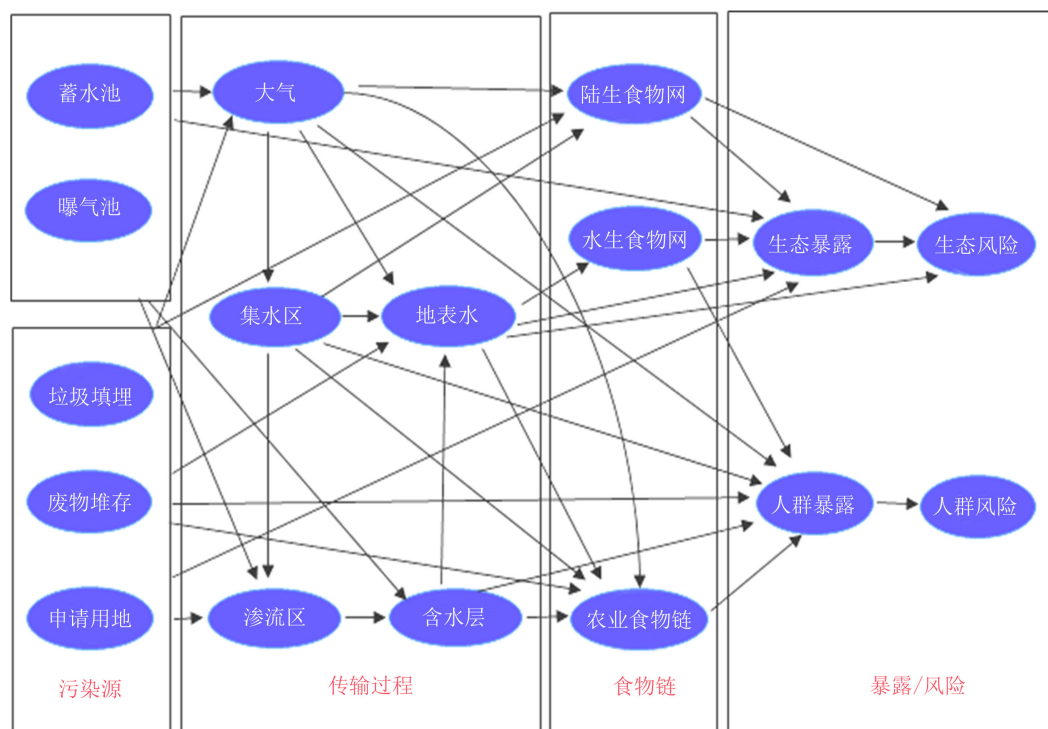


Figure 1. 3MRA science modules and related connectivity

图 1. 3MRA 模型体系关系图

不确定性对决策的影响，是通过修改传统保护措施实现的。3MRA 采用最新科学技术，可模拟 400 多种污染物(如有色金属、有机物和二恶英类等化学物质)的物理化学特性以及对人类、生态受体造成的影响 [12]。模型模拟计算得到的化学污染物浓度称之为“豁免水平”，即根据既定的可接受风险值推算出污染物的安全浓度阈值，当污染物实际浓度低于这个“阈值”时，则认为在非危险废物处置单元中处置该废物对人类、生态是安全的。

### 3. 3MRA 国内外发展及应用现状

#### 3.1. 3MRA 国外发展与应用现状

美国是危险废弃物生产大国，相关立法进展较快。2000 年，HWIR99(Hazardous Waste Identification Rule)首次应用 3MRA 模型进行全国范围内的风险评估，建立高置信度的危险废物“豁免水平”。作为 US EPA 国家暴露研究实验室(NERL)推出的一款评估全国范围内危险废物风险的权威模型[14]，模拟的结果的真实性与精确性备受重视与质疑[15]，但对于复杂的多介质模型，进行验证和不确定分析是非常困难的，也是不可或缺的。2004 年，为详细阐述 3MRA 模型的不确定性和敏感性，Babendreier J E 等[16]以污染物苯为研究对象，对模型进行验证与全面的不确定性分析。2005 年，EPA 为进一步提高 3MRA 多介质模型的置信水平，以模拟废物中汞污染物的迁移转化为例，将 3MRA 与 TRIM.FaTE[17]模拟结果进行比较。因 3MRA 模型构建采用基于区域位点的数据收集方式，研发经过大量质量保证测试，确保了输出信息的准确性和实用性[18]，又可根据特定情形，调整释放源、迁移转化模块实现评估目的而被广泛应用 [13]。2010 年，McFarland M J[19]-[21]巧妙地运用 3MRA 模型作为计算框架，结合简单的风险表征筛选工具(RCST)，评估了保护地下水水质不受有机污泥污染的最佳管理措施(BMPs)的有效性[22] [23]，拓展了 3MRA 模型的应用功能。上述实验的详细信息，如表 1 所示。

Table 1. Application status of 3MRA model overseas

表 1. 3MRA 模型在国外的应用现状

时间	单位/作者	模拟对象	实验内容与目的	模拟结果
2000 年	HWR99 (Hazardous Waste Identification Rule)	36 种危险 废物[24]	首次应用 3MRA 模型对 36 种危险废物进行 全国范围内的风险评估, 建立高置信度 的危险废物“豁免水平”	明确了当前危险废物清单中可从《资源 保护与回收法案》(RCRA)管理中 豁免的废物种类, 以摆脱法案制约 [24] [25]
2004 年	Babendreier J E	苯	对 201 个位点数据库中 419 个废物管理单元进行模 拟, 并对苯的处理方式、污染物释放源类型以及暴露 途径等进行全面的不确定性分析, 准确预测苯对生 态、人体健康的所造成风险	验证了 3MRA 模型是可替代了当时 的危险废物识别和管理的评估策略
2005 年	US EPA	氯碱厂, 汞	与 TRIM.FaTE[19]模拟结果进行比较, 提高 3MRA 模型置信水平, 为细化模型输入、算法和促进模型应 用发展提供了有力的科学依据和支撑	在模型输入和模拟程序都不同的情 况下, 结果非常接近(同一个数量级)
2010 年	McFarland M J	有机物污泥 土地利用单 元, 砷、镉、 镍、硒、锌等	结合简单的风险表征筛选工具(RCST), 以雅吉瓦县 (华盛顿州)的有机物污泥土地利用单元为示范地, 用 对地下水水质存在很大潜在风险的 3 个参数值, 即地 下水埋深、污染物监管浓度和污泥利用率, 评估保护 地下水水质不受有机物污泥污染的最佳管理措施(BMPs) 的有效性	当地下水埋深仅保持 0.5 m, 即使污 染物浓度达到上限浓度限值 10 倍, 污泥对地下水质的影响可忽略不计。 结果与编号为 40 的美国联邦法规 503 生物污泥规则[26]及美国环保局 推荐的一致

### 3.2. 3MRA 在我国的发展与应用现状

2009 年, 张钊[10]首次采用 3MRA 模型, 对模型及其可利用性做了详细的介绍与分析, 通过采用区域性环境风险模拟方法, 选取堆存(WP)、填埋(LF)两种废物管理模式, 预测铬渣在进行解毒填埋处置前后, Cd、Pb、Zn 污染物对生态、人体健康产生的风险值, 经与实际污染指数对比, 证实处置措施的合理性。同年, 刘茂昌[27]试选用 3MRA 模型预测废矿物油进行填埋处置后, Pb、Zn、PAHS、苯四种主要污染物在周围大气中和 2.0 km 范围内居民饮用水中的年平均浓度, 再运用 3MRA 中人体风险表征模型计算出 Pb、PAHs、苯三种致癌污染物和非致癌物 Zn 的风险值, 为废矿物油的环境管理决策制定提供可靠的理论依据。2010 年, 马春燕[28]为进一步满足实际应用所需, 对 3MRA 模型中的地下水与包气带、颗粒释放、空气迁移扩散、地表水、人体暴露和风险表征等子模型进行简化, 并结合国内常用的火灾风险表征模型对染料涂料废物中 21 种优先控制的污染物的主要暴露途径进行模拟, 据模拟结果提出对废物贮存地面防渗防漏设施进行改进的方案, 并建议以周边无地表水的路线为染料涂料废物运输路线, 对我国染料涂料废物及危险废物的分级管理具有重要的现实意义, 推进了 3MRA 模型在我国废物管理中的应用与发展。而后, 杨昱[29]综合分析了国内外不同行业、不同领域风险分级方法, 以北京市 22 个生活垃圾填埋场为例, 运用 3MRA 中描述污染物在地下水迁移的 EPA CMTF 模型和风险评估模型, 计算填埋场地下水污染风险指数 I, 又利用地下水含水层脆弱性模型(DRASTIC 模型)并结合 MATLAB 聚类分析为方法, 成功地将这 22 个填埋场地下水污染风险从高到低分为 4 级。2012 年, 为提高废物填埋处理的经济合理性, 袁英[30]选取案例填埋场常见的六价铬( $\text{Cr}^{6+}$ )、铅(Pb)、二价镍( $\text{Ni}^{2+}$ )、砷(As)、汞(Hg)、镉(Cd)以及苯这 7 种特征污染物, 研究在填埋(LF)废物处理模式下, 3MRA 模拟确定的 7 种污染物的安全填埋阈值, 再根据污染物阈值大小确定合理且节约成本的废物处置方法与措施。

从我国对 3MRA 模型的引入到因地制宜的应用发展, 不难看出, 3MRA 模型在废物的环境管理中具有良好的延展性及移植性, 虽然我国学者已应用 3MRA 对多种污染物进行模拟, 预测人类受到的风险, 但在实际应用中还没能完全实现模型的应用价值, 例如, 3MRA 共涉及 5 种废物管理模式, 但目前在我



国的应用发展中主要集中在填埋、堆存两种模式上，且多使用 3MRA 整个模型构架，缺乏针对案例中污染物可能的暴露途径的具体分析以及应用的可行性分析，同时，作为环境风险评价工具，模型验证与不确定性分析需要细化。

#### 4. 3MRA 模型应用前景分析

作为一款先进可靠地风险评价模型，3MRA 在有害废物风险评价和科学管理方面有较强的研究、借鉴价值和前景。针对我国多介质数学模型发展不甚成熟的情况，3MRA 模型前景分析有助于我国研究人员汲取模型体系优势，设计开发属于并符合我国实际情况的污染物环境风险评价体系。为我国污染物环境风险评价技术及相关政策体系制定提供更可靠的科学依据与技术支撑，平衡环境政策的制定中各方利益冲突。为此，笔者对 3MRA 模型移植应用前景进行分析并提出几点方法建议：

1) 鉴于 3MRA 模型构建时，环境风险研究的历史尚短，相关的信息和资料的积累比较有限，致使评价中缺乏所需的一些基础资料，增加了模拟结果的不确定性。因此，可依靠美国多年来在建模方面的知识积累，基于 3MRA 模型的模拟计算框架，充分利用以 GIS 为主的 3S 技术，对我国最新的水文、地质、气象、人口和生境等信息资料进行收集与归类整理，利用 Access、SQL、Basic 等编辑软件完成了数据录入，对基础数据库进行修改与更新。

2) 3MRA 模型研发时，选用了 46 种污染物作为 400 多种污染物的环境行为代表进行模拟设计[12]。但随着人类从空间和时间的角度上对污染物的环境行为的整体全面的认知，应拓展修改模型的化学物质数据库，使模拟结果更加真实有效。例如，汞的最新特性数据。

3) 结合现代废物管理的技术方式，添加 3MRA 各个子模块中欠缺或不足的功能组件，例如，Li Y[31] 在建立危险废物填埋对地下水污染的风险评估指标时，指出 3MRA 模型在模拟废物填埋对地下水污染时没有考虑防渗衬垫的影响。所以，修改模型子模块，增加经济效益估算模块，完善模型的可视化功能也是优化模型的必要途径。此外，适时调整 3MRA 体系的外推模拟的算法、环境介质模拟方程与暴露途径模拟方程，更新目前能为公众接受的各种必需的风险评估标准。

4) 将 3MRA 模型作为前期计算预测的基础模型，再结合我国发展成熟的模型，扩展模型应用范围，提升模拟结果实用性和准确性，以弥补 3MRA 初始版本中缺乏个性化数据输入的功能，增强模型的可移植性，为决策者在制定环境风险管理政策时提供更加可靠的参考依据。

#### 5. 结论与建议

环境风险管理是中国整个环保系统的一个薄弱环节，在资金、技术有限的情况下，借助模型对污染物在环境中的各种过程和状态进行描述，是总体把握和综合分析污染物环境行为特征的有效途径。本文中，通过对 3MRA 模型的介绍与对国内外发展应用现状的研究分析，认为模型的实际应用没能完全实现模型设计功能，应用范围局限于填埋、堆存两种废物管理模式上，且应用中缺乏针对案例中污染物可能的暴露途径的具体分析以及应用的可行性分析，所以需要进一步跟进 3MRA 模型应用验证与不确定性分析。与此同时，研究认为 3MRA 模型是一款具有较高借鉴价值的环境风险评价模型，应结合模型构建方法、设计理念与目的、应用方式和范围，并基于我国环境风险管理实情，从数据更新、模型构建等方面对模型进行改进，为推动我国应用环境风险评价作为部门决策参考提供新思维方法。

#### 基金项目

863 项目“化工行业典型含汞废物安全处置关键技术研究”(项目编号：2012AA062902)；国家环保公益项目“典型铅生产过程含铅废物风险控制及环境安全评价集成技术研究”(项目编号：2011467061)。

## 参考文献 (References)

- [1] 胡二邦 (2009) 环境风险评价实用技术, 方法和案例. 中国环境科学出版社, 北京.
- [2] 董玉瑛, 雷炳莉 (2005) 综合多介质模型的发展概述. *化学世界*, **9**, 566-570.
- [3] Mackay, D. (2001) *Multimedia environmental models: The fugacity approach*. 2nd Edition, CRC Press LLC, Boca Raton.
- [4] 刘信安, 吴昊, Jia, C.Q. (2004) 湖泊和水库中甲基汞行为的多介质模型研究. *环境科学与技术*, **6**, 9-11.
- [5] 陈华, 刘志全, 李广贺 (2006) 污染场地土壤风险基准值构建与评价方法研究. *水文地质工程地质*, **2**, 84-88.
- [6] 张应华, 刘志全, 李广贺, 张旭 (2008) 土壤苯污染引起的饮用地下水健康风险评. *土壤学报*, **1**, 82-89.
- [7] 张钊, 黄瑾辉, 曾光明, 袁兴中 (2010) 3MRA 风险模型在铬渣整治项目制定过程中的应用. *中国环境科学*, **1**, 139-144.
- [8] 黄瑾辉, 李飞, 曾光明, 袁兴中, 梁婕, 张钊, 唐晓娇 (2012) 污染场地健康风险评价中多介质模型的优选研究. *中国环境科学*, **3**, 556-563.
- [9] USEPA (2009) Goal 3: Land preservation and restoration, the 2006-2011 EPA strategic plan. <http://www.epa.gov/homelandsecurityportal/strategicplan.htm#goal3>
- [10] 张钊 (2009) 3MRA 风险评价模型在废物管理决策中的研究应用. 硕士论文, 湖南大学, 长沙.
- [11] Saleem, Z.A., Marin, C.M. and Guvanasen, V. (1999) An overview of the multimedia, multipathway, and multireceptor risk assessment technology development. *Annual Meeting of the Society for Risk Analysis*, Atlanta, 5-8 December 1999.
- [12] US EPA (2003) Multimedia, multipathway, and multireceptor risk assessment (3MRA) modeling system volume I: Modeling system and science. <http://www.epa.gov/wastes/hazard/wastetypes/wasteid/hwirwste/risk03.htm>
- [13] Marin, C.M., Guvanasen, V. and Saleem, Z.A. (2003) The 3MRA risk assessment framework—A flexible approach for performing multimedia, multipathway, and multireceptor risk assessments under uncertainty. *Human and Ecological Risk Assessment*, **9**, 1655-1677.
- [14] Furtaw, E.J. (2001) An overview of human exposure modeling activities at the USEPA's national exposure research laboratory. *Toxicology and Industrial Health*, **17**, 302-314.
- [15] Weinberg, N., Henning, M., Kladias, M. and Killingstad, M. (2003) Technical critique of the multimedia, multipathway, multireceptor risk assessment model. *Human and Ecological Risk Assessment*, **9**, 1679-1700.
- [16] Babendreier, J.E. and Castleton, K.J. (2005) Investigating uncertainty and sensitivity in integrated, multimedia environmental models: Tools for FRAMES-3MRA. *Environmental Modelling & Software*, **20**, 1043-1055.
- [17] US EPA (2005) EPA's evaluation of environmental fate, transport and ecological exposure module (TRIM.FaTE), volume II: Model performance focusing on mercury test case. [http://www2.epa.gov/sites/production/files/2014-01/documents/eval\\_rept\\_vol2\\_2005.pdf](http://www2.epa.gov/sites/production/files/2014-01/documents/eval_rept_vol2_2005.pdf)
- [18] Kroner, S.M. (1999) Risk characterization report for the HWIR99 multimedia, multipathway, and multireceptor risk assessment (3MRA). US Environment Protection Agency Office of Solid Waste, Washington DC.
- [19] McFarland, M.J., Kumarsamy, K., Brobst, R.B., Hais, A. and Schmitz, M. (2010) Protecting groundwater quality at biosolids land application sites using EPA's multimedia, multi-pathway, multi-receptor exposure and risk assessment (3MRA) technology. *Proceedings of the Water Environment Federation*, **4**, 783-796.
- [20] McFarland, M.J., Kumarsamy, K., Brobst, R.B., Hais, A. and Schmitz, M.D. (2011) Characterizing human health risks associated with biosolids land application practices. *Proceedings of the Water Environment Federation*, **4**, 187-196.
- [21] McFarland, M.J., Kumarsamy, K., Brobst, R.B., Hais, A. and Schmitz, M.D. (2012) Groundwater quality protection at biosolids land application sites. *Water Research*, **46**, 5963-5969.
- [22] US EPA (2003) Multimedia, multi-pathway, and multi-receptor risk assessment (3MRA) modeling system volume V: Technology design and user's guide. <http://www.epa.gov/wastes/hazard/wastetypes/wasteid/hwirwste/risk03.htm>
- [23] US Environmental Protection Agency (EPA) and Science Advisory Board (SAB) (2005) Review of the multimedia, multi-pathway, and multi-receptor risk assessment (3MRA) modeling system.
- [24] Bergeson, L. (2000) The HWIR99 saga continues. *Pollution Engineering*, **32**, 39-40.
- [25] US EPA (2000) Hazardous Waste Identification Rule (HWIR): Identification and listing of hazardous of hazardous wastes. Notice of data availability and request for comments. *Federal Register*, **65**, 44491-44506. <http://www.epa.gov/epawaste/hazard/wastetypes/wasteid/hwirwste/pdf/wh2a-fr.pdf>
- [26] US EPA (1993) Technical support document for the land application of sewage sludge volume II (revised). United States Environmental Protection Agency, Washington DC.
- [27] 刘茂昌 (2009) 小量危险废物填埋处置的环境风险研究. 硕士论文, 西南大学, 重庆.

- [28] 马春燕 (2010) 基于风险评价方法染料涂料废物的分级管理. 硕士学位论文, 西北农林科技大学, 咸阳.
- [29] 杨昱, 姜永海, 席北斗, 何小松, 安达, 张进保 (2010) 生活垃圾填埋场地下水污染风险分级方法研究. *生态环境学报*, **7**, 1704-1709.
- [30] 袁英, 席北斗, 何小松, 魏自民, 李鸣晓, 姜永海, 安达 (2012) 基于 3MRA 模型的填埋场安全填埋废物污染物阈值评估方法与应用研究. *环境科学*, **4**, 1383-1388.
- [31] Li, Y., Li, J., Chen, S. and Diao, W. (2012) Establishing indices for groundwater contamination risk assessment in the vicinity of hazardous waste landfills in China. *Environmental Pollution*, **165**, 77-90.