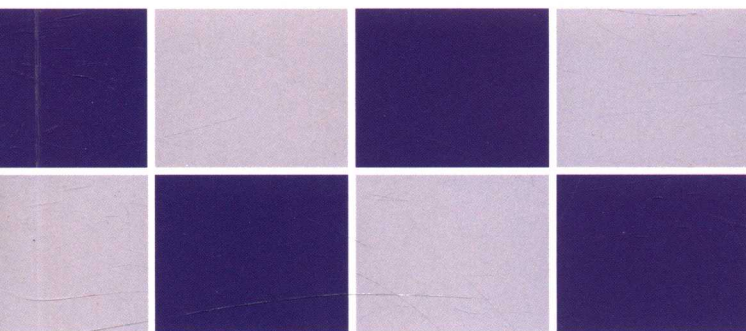


DISTINGUISH THE POLLUTION RISK SOURCES FOR
GROUNDWATER AND THE TECHNOLOGY OF
REGIONALIZATION ON PREVENTION AND CONTROL



地下水污染 风险源识别与防控区划技术

李广贺 赵勇胜 何江涛 张 旭 金爱芳 白利平 等 著

中国环境出版社

环保公益性行业科研专项经费项目系列丛书

地下水污染风险源识别与 防控区划技术

DISTINGUISH THE POLLUTION RISK SOURCES FOR GROUNDWATER
AND THE TECHNOLOGY OF REGIONALIZATION ON PREVENTION AND CONTROL

李广贺 赵勇胜 何江涛 张旭 金爱芳 白利平等 著

中国环境出版社·北京

图书在版编目 (CIP) 数据

地下水污染风险源识别与防控区划技术/李广贺等著. —北京: 中国环境出版社,
2015. 2

(环保公益性行业科研专项经费项目系列丛书)

ISBN 978-7-5111-1427-3

I. ①地… II. ①李… III. ①地下水污染—污染源—识别—研究 ②地下水污
染—污染源—分级—研究 ③地下水污染—污染防治—研究 IV. ①X523

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 024322 号

出 版 人 王新程
责任编辑 葛 莉
文字加工 郑中海
责任校对 尹 芳
封面设计 宋 瑞

出版发行 中国环境出版社
(100062 北京市东城区广渠门内大街 16 号)
网 址: <http://www.cesp.com.cn>
电子邮箱: bjgl@cesp.com.cn
联系电话: 010-67112765 编辑管理部
010-67113412 教材图书出版中心
发行热线: 010-67125803 010-67113405 (传真)

印 刷 北京中科印刷有限公司
经 销 各地新华书店
版 次 2015 年 7 月第 1 版
印 次 2015 年 7 月第 1 次印刷
开 本 787×1092 1/16
印 张 11.75
字 数 262 千字
定 价 36.00 元

【版权所有。未经许可请勿翻印、转载, 侵权必究。】

如有缺页、破损、倒装等印装质量问题, 请寄回本社更换

环保公益性行业科研专项经费项目系列丛书

编著委员会

顾 问：吴晓青

组 长：熊跃辉

副组长：刘志全

成 员：禹 军 陈 胜 刘海波

本书编委会

著 者：李广贺 赵勇胜 何江涛 张 旭
 金爱芳 白利平

参著人员：韩 巍 张伟红 王俊杰 李发生
 王 坚 宋一之 洪 梅 周 睿
 陆 燕 谷庆宝

序 言

我国作为一个发展中的人口大国，资源环境问题是长期制约经济社会可持续发展的重大问题。党中央、国务院高度重视环境保护工作，提出了建设生态文明、建设资源节约型与环境友好型社会、推进环境保护历史性转变、让江河湖泊休养生息、节能减排是转方式调结构的重要抓手、环境保护是重大民生问题、探索中国环保新道路等一系列新理念、新举措。在科学发展观的指导下，环境保护工作成效显著，在经济增长超过预期的情况下，主要污染物减排任务超额完成，环境质量持续改善。

随着当前经济的高速增长，资源环境约束进一步强化，环境保护正处于负重爬坡的艰难阶段。治污减排的压力有增无减，环境质量改善的压力不断加大，防范环境风险的压力持续增加，确保核与辐射安全的压力继续加大，应对全球环境问题的压力急剧加大。要破解发展经济与保护环境的难点，解决影响可持续发展和群众健康的突出环境问题，确保环保工作不断上台阶、出亮点，必须充分依靠科技创新和科技进步，构建强大坚实的科技支撑体系。

2006年，我国发布了《国家中长期科学和技术发展规划纲要（2006—2020年）》（以下简称《规划纲要》），提出了建设创新型国家战略，科技事业进入了发展的快车道，环保科技也迎来了蓬勃发展的春天。为适应环境保护历史性转变和创新型国家建设的要求，原国家环境保护总局于2006年召开了第一次全国环保科技大会，出台了《关于增强环境科技创新能力的若干意见》，确立了科技兴环保战略；2012年，环境保护部召开第二次全国环保科技大会，出台了《关于加快完善环保科技标准体系的意见》，全面实施科技兴环保战略，建设满足环境优化经济发展需要、符合我国基本国情和世界环保事业发展趋势，建设环境科技创新体系、环保标准体系、环境技术管理体系、环保产业培育体系和科技支撑保障体系。几年来，在广大环境科技工作者的努力下，水体污染控制与治理科技重大专项实施顺利，科技投入持续增加，科技创新能力显著增强；现行国家标准达1300余项，环境标准体系的建设实现了跨越式发展；完成了100余项环保技术文件的制定、修订工作，确立了以技术指导、评估和示范为主要内容的框架。环境科技为全面完成环

保规划的各项任务起到了重要的引领和支撑作用。

为优化中央财政科技投入结构,支持社会公益研究活动(这些活动无法得到市场机制的支持),“十一五”期间国家设立了公益性行业科研专项经费。根据财政部、科技部的总体部署,环保公益性行业科研专项紧密围绕《规划纲要》和《国家环境保护科技发展规划》确定的重点领域和优先主题,立足环境管理中的科技需求,积极开展应急性、培育性、基础性科学研究。“十一五”以来,环境保护部组织实施了公益性行业科研专项项目439项,涉及大气、水、生态、土壤、固废、核与辐射等领域,共有包括中央级科研院所、高等院校、地方环保科研单位和企业等几百家企事业单位参与,逐步形成了优势互补、团结协作、良性竞争、共同发展的环保科技“统一战线”。目前,这些科研专项取得了重要研究成果,提出了一系列控制污染和改善环境质量技术方案,形成一批环境监测预警和监督管理技术体系,研发出一批与生态环境保护、国际履约、核与辐射安全相关的关键技术,提出了一系列环境标准、指南和技术规范建议,为解决我国环境保护和环境管理中急需的成套技术和政策制定提供了重要的科技支撑。

为广泛共享“十一五”以来环保公益性行业科研专项项目研究成果,及时总结项目组织管理经验,环境保护部科技标准司组织出版了《环保公益性行业科研专项经费项目系列丛书》。该丛书汇集了一批专项研究的代表性成果,具有较强的学术性和实用性,可以说是环境领域不可多得资料文献。丛书的组织出版,在科技管理上也是一次很好的尝试,我们希望通过这一尝试,能够进一步活跃环保科技的学术氛围,促进科技成果的转化与应用,为探索中国环保新道路提供有力的科技支撑。

中华人民共和国环境保护部副部长

吴晓青

2011年10月

前 言

地下水是我国城市供水的重要水源地,70%的人口饮用地下水。在全国655个城市中,地下水作为饮用水水源的城市有400多个,对于我国国民经济和社会发展、安全供水保障具有十分重要的作用。随着工农业迅速发展和人口的不断增加,地下水污染问题日益严重,直接或间接威胁饮用水安全保障,对人体健康造成不同程度的危害。

针对我国地下水环境管理的重大需求,在国家公益科技专项“地下水污染风险源识别与防控区划技术研究”(200909038)支持下,探索地下水污染风险源识别方法,确定地下水污染风险源空间属性。基于地下水污染防控区划要素分析,建立多层次复合要素防控区划模型与指标体系;基于层次分析技术,形成集风险源评价、防控区划于一体的地下水污染防控管理技术体系。在此基础上,完成《地下水污染风险源识别与防控区划技术》的编制。

全书共分9章。第1章全面论述地下水污染防控区划内涵与技术框架;第2章系统介绍地下水污染源类型、特征、污染过程与途径;第3章阐述不同尺度地下水污染风险识别与分级方法;第4章论述了地下水污染防控区划技术框架、技术方法和不确定性分析;第5—7章分别介绍了区域尺度、城市尺度和地下水源尺度的地下水污染风险源识别与分级、地下水污染防治区划;第8章论述了地下水风险源识别与防控区划的尺度效应,阐述了不同尺度的污染源特性、方法效应和评价结果的差异性;第9章对本书进行了总结及对下一步工作提出建议。

本书所构建的具有指导性和普适性的地下水污染风险源识别与防控区划技术导则和地下水污染防控区划的技术与指标体系,为制定有效的地下水污染防控措施和决策提供了技术与方法。

本书可作为环境管理、环境科学与工程、地下水科学与工程等专业的教学参考书,也可供相关管理和工程技术人员参考。

著 者

2014年10月

目 录

第 1 章 地下水污染防控区划的内涵与技术框架	1
1.1 防控区划的内涵与方法框架	1
1.2 地下水易污性指标与评价方法	5
1.3 地下水污染源危害性的指标体系与评价方法	10
1.4 地下水污染风险评价方法与研究进展	14
第 2 章 地下水污染源与污染过程	21
2.1 污染源类型与特征	21
2.2 特征污染物的分类与特性	25
2.3 地下水污染过程与途径	26
2.4 小结	30
第 3 章 地下水污染风险源的识别与分级方法研究	31
3.1 不同空间尺度的划分	31
3.2 地下水易污性的评价方法	32
3.3 地下水污染源的识别与分级方法	35
3.4 小结	50
第 4 章 地下水污染防控区域划分技术研究	51
4.1 地下水污染风险源的识别与分级模型	51
4.2 防控区划的指导思想与基本原则	52
4.3 地下水污染防控区划的技术框架	53
4.4 地下水污染防控区划的技术与方法	56
4.5 不确定性分析	59
4.6 小结	61
第 5 章 典型区域地下水风险源的识别与防控区划研究	63
5.1 研究区地下水污染风险源的识别与分级	63
5.2 研究区地下水污染防控区划	80
5.3 不确定性分析	81
5.4 小结	83

第 6 章 典型城市风险源的识别与污染防治区划	84
6.1 研究区基本概况	84
6.2 研究区地下水污染风险源的识别与分级	93
6.3 研究区地下水污染防治区划	111
6.4 不确定性分析	117
6.5 包头市平原地区地下水风险源的识别与污染防治区划	122
6.6 小结	131
第 7 章 集中水源地风险源的识别与污染防治区划	133
7.1 研究区基本概况	133
7.2 研究区地下水污染风险源的识别与分级	136
7.3 研究区地下水污染防治区划	155
7.4 不确定性分析	158
7.5 小结	161
第 8 章 地下水风险源的识别与防控区划尺度的效应分析	163
8.1 基础信息尺度效应	163
8.2 污染源特性差异	163
8.3 方法尺度效应	164
8.4 评价结果差异性	165
8.5 小结	166
第 9 章 总体进展与建议	167
9.1 总体进展	167
9.2 建议	169
参考文献	170

第1章 地下水污染防控区划的内涵与技术框架

饮用水安全与否直接关系到人民身体健康,以及国家经济和社会的发展。地下水作为重要的饮用水水源,由于其自身独特的优势,在饮用水供水占有重要位置。随着工农业迅速发展和人口的不断增加,地下水污染问题日益凸显^[1,2]。地下水污染已经直接或间接威胁饮用水安全保障,对人体健康造成不同程度的危害。尤其需要关注的是,地下水污染属于复杂的地质-地球化学过程,具有长期性、复杂性、隐蔽性和污染治理难度大、费用高、时间长的特点。地下水一旦受到污染,恢复和治理都十分缓慢,有时甚至是不可恢复的。

地下水饮水安全保障和污染防治的核心是保护地下水资源、预防地下水污染。目前,我国不断加强对地下水污染源类型、强度和空间分布特征的认识,加大对地下水影响程度的分析力度。但由于造成地下水污染的污染源种类繁多,污染物的性质各异,在地下水污染源控制与管理方面,缺乏对地下水影响显著、危害严重的污染风险源的准确识别,缺乏对污染地下水空间分布的有效识别和对重要污染防控区域的明确界定,使得我国地下水污染防控重点区域不明确,地下水污染防控措施的针对性不强,这些成为显著制约我国地下水环境保护、污染防治和环境监管的重要瓶颈问题。

基于此,通过地下水污染风险源识别与防控区划技术研究,解析地下水污染源结构,揭示污染物构成与输移过程,分析地下水污染风险源的构成,探索地下水污染风险源识别方法;通过地下水污染防控区划构成要素分析,结合地下水使用功能、地下水价值等属性,形成地下水污染防控区划的技术体系;基于GIS平台,通过不同性质界面的叠加与耦合,建立污染防控区划模型和不确定性分析方法,形成地下水污染风险源识别与污染防控区划技术指导性文件,为制定有效的地下水污染防控措施和决策提供技术与方法支持。

1.1 防控区划的内涵与方法框架

区划(Regionalization),即区域的划分,是根据一定目的和要求,将相似性的地理信息单元合并,将差异性较大的信息单元分开,从而将整个区域划分成不同子区。按照对象的不同可分为自然区划、经济区划、行政区划及综合(自然)区划;按照服务部门的不同分为气候区划、地貌区划、土壤区划、水文区划、植被区划、海洋区划等类型^[3]。

国外区划工作可以回溯至 18 世纪末 19 世纪初^[4]。地理学区域学派的奠基人赫特纳 (A. Hettner) 指出, 区域就其概念而言是整体的一种不断分解, 一种地理区划就是将整体不断地分解成为它的部分, 这些部分必然在空间上互相连接, 而类型则可以是分散分布的^[5]。后来, 有许多学者如德国地理学家洪堡 (A. von Humboldt)、霍迈尔 (H. G. Hommeyer)、俄国的道库恰耶夫 (B. B. Докучаев) 及罗士培 (P. M. Roxby) 等提出多种区划类型与方案, 但由于认识的局限性和调查研究的不够充分, 工作大都停留在对自然界表面的认识上, 缺乏对其内在规律的认识和了解, 且区划的指标也比较单一, 基本上都属于单要素区划^[6]。一直到 20 世纪 40 年代以后, 区划研究才有了较大的发展, 然而多数国家仍以自然和生态系统的地域划分为研究对象, 很少考虑作为主体的人类在生态系统中的巨大影响作用。近十多年来, 深入探讨区划方法和考虑人文因素对区划研究提出了更高的要求。

我国区划思想的最早萌芽可追溯至春秋战国时期的《尚书·禹贡》和《管子·地员篇》等地理著作。前者是世界最早的区划研究著作之一, 后者则可能是世界上最早的土地类型区划著作。总体来看, 我国近代区划工作大致经历了 3 个阶段: 早在 20 世纪 20—30 年代便已开始区划的研究工作, 是世界上较早开展现代区划研究的国家之一。这时期的区划研究缺乏对区划理论与方法的深入探讨, 所制定的区划方案大多比较简略, 多是专家集成的定性工作, 以统一地理学思想为指导的地理区划分的研究工作较多, 而且以单要素为主的部门自然区划较多, 但其所作的开创性研究却为我国区划工作走向全面发展奠定了基础。

20 世纪 50 年代以后, 我国国民经济建设事业迅速发展, 为满足对全国自然条件和自然资源的全面了解, 推动发展了我国的自然区划工作。自然地理地带性和区域分异规律是 20 世纪地理学研究的最重大成果。20 世纪 80 年代以来, 为改善生态系统和可持续发展服务的呼声日益高涨, 我国生态区划发展迅速, 生态系统观点、生态学原理和方法被逐渐引入自然地域系统研究。与综合自然区划相呼应, 我国部门的区划研究也同期展开, 出现了涵盖各种自然和人文要素的区划, 如气候区划、水文区划、植被区划、农业区划、交通区划、建筑区划、地震区划、环境功能区划等。

1.1.1 区划的方法框架

基于不同的研究目的构建的不同区划类型均是在借鉴自然区划原理和方法的基础上发展起来的。研究发现, 其都具有共同的特性^[7-11], 即拥有相似的区划框架, 均是由基础研究、区划理论体系 (包括区划理论依据及原则的确定, 指标体系的选取等)、区划方案、区划目标等几部分构成, 各部分之间的关系如图 1.1 所示。

由图 1.1 可以看出, 在明确区划目的的基础上, 构建的区划的方法框架主要由四部分组成, 区划理论体系和区划方案两部分构成的区划系统是核心部分, 也是区划的难点所在。

(1) 区划基础性研究

通过分析、研究调查与收集到的不同尺度下资源、环境、社会经济等相关基础信

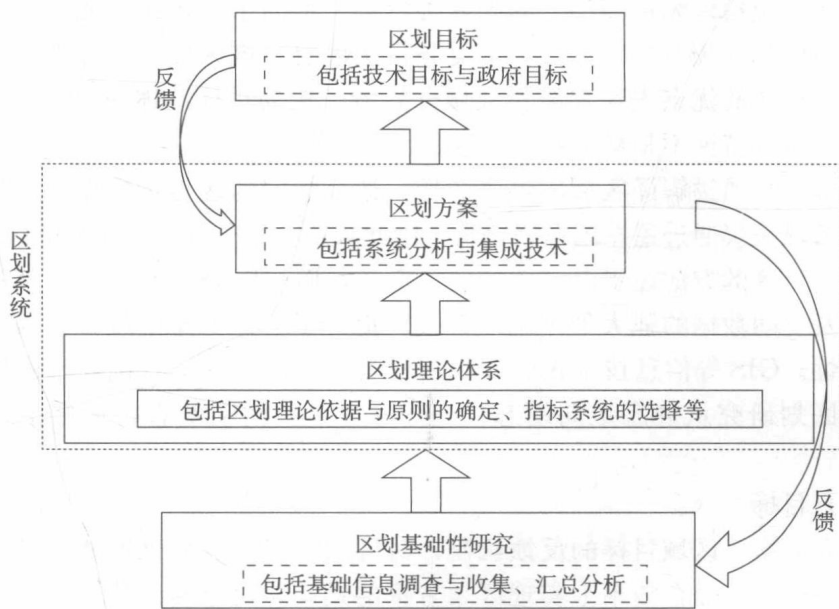


图 1.1 区划体系研究框架

息，识别区划范围内自然要素及人文要素的变化及相互作用机理，并结合已有区划研究理论及实践成果的总结，必要时补充相关信息的调查。

(2) 区划理论体系

在区划基础性研究的基础上，探讨建立区划理论体系。涉及区划理论依据与原则的确定和取决于区划的目的。遵循相关原则构建指标体系，其中指标逐渐向综合化方向发展，力求科学性与实用性相结合。

(3) 区划方案

在系统分析指标体系及研究方法的基础上，确定该尺度范围的区划方案，并采用集成技术确定不同区划结果的空间分布。经典的区划方法包括“自上而下”和“自下而上”两种^[12]。“自上而下”的区划方法是把高级区划单位逐步划分成小的区域单元。但越向低级单位划分，指标越不易选择，界线越难确定。而“自下而上”是在基本单元的基础上对区域进行相似性合并，逐级得出区划单元。由于下级区划单元界线的可靠性较大，所以保证了更高一级区划单元界线的精确性。在具体工作中，需要综合采用专家个人、团体智能、理念分析、模型应用等方法，探索区划的综合集成方法。从已有区划方法的研究中，可以看出目前区划的技术手段主要有迭置法、主导标志法、聚类分析法、遥感解译法、地理信息系统（GIS）和全球定位系统（GPS）等分析方法。

叠置法目前仍是运用最广泛的方法，它是将反映有关主题层组成的不同要素专项分布图进行叠置，利用它们叠置后形成的图层进行区划，确定分区界线。由于该方法需要多类图层，因此适用于具备各类要素专项分布图的情况。

主导标志法即选取反映地域分异主导因素的某一指标作为确定区界的主要依据，并且强调在进行某一级分区时，必须统一按此指标来划分，这是生态区划中使用较普遍的一种方法^[13]。

聚类分析法包括模糊聚类法、动态聚类法等,将因子分析或主成分分析与聚类分析法结合进行区划是较有效的方法。聚类分析法需要有该区域较为详细的资料和相关数据。聚类分析法的优点表现在能将区域分异特征较为具体地体现出来。因此,该方法适用于区域分异特征不是特别明显的区划。

遥感解译法是通过解译区域的遥感图像,选择特定的区划指标作为区划标准进行分区。遥感解译法仅通过遥感图像来分析,因此较适合于分异特征明显的区域。

由于目前分区的方法逐步由定性发展到定量,而GIS技术的介入,其在支持分区数据的采集及空间数据的强大处理功能方面,提升了分区的精确度,增强了分区的科学性和合理性。GIS等信息技术在区划中所具有的功能适用于我国面临的综合区划任务,为综合区划研究从静态走向动态、充分考虑人类活动的影响提供了良好的技术基础。

(4) 区划目标

通过区划方案、区域目标的反馈机制,对区划方案及区划理论体系及信息进行及时的修改与完善,从而在技术上实现区划方案的动态基础平台的构建,为多目标和多用户决策提供技术保障,在国家层面上为相关部门的宏观经济调控、社会可持续发展及国家安全策略提供决策依据。

1.1.2 地下水污染防控区划的方法框架

地下水污染防控区划是根据区划区域的自然属性,结合人类活动类型与强度及地下水资源的开发利用价值,划分为不同地下水污染风险等级与防控水平的过程。

地下水污染防控区划的概念涉及5个方面内容:①所要划分的区域具备一定的自然属性条件,即自然资源条件、环境状况和地理区位。②该区域存在直接或潜在污染地下水的污染源,即人类活动所造成的地下水污染负荷。③该区域具备一定的社会属性条件,即地下水的开发利用现状和社会经济发展的需求。④该区域的地下水污染风险具有不同的等级,而不是所有的地下水都具有同样的防范机制。⑤其目的是根据不同的风险等级,采取不同的措施,对所划定的区域进行治理或防护,保证地下水资源的可持续利用与发展。

基于以上分析,地下水污染防控区划的技术框架如图1.2所示。

由图1.2可以看出,地下水污染防控区划的技术框架主要由两部分构成,地下水污染风险及其资源社会属性。其中地下水污染风险是核心部分,它反映了地下水受到污染的概率,它由区域的自然属性(包括地质条件、地理区位等信息)和人类活动(引起的污染)两部分构成,是二者共同作用的结果。自然属性主要体现了地下水系统抵御污染的能力,人类活动(引起的污染)主要体现了进入土壤—地下水系统中的污染负荷。

地下水资源社会属性是表征地下水的预期损害性,即地下水系统受到污染后导致价值功能(包括社会服务功能、开采利用功能等)的改变。

目前国内外关于地下水易污性(或脆弱性)及人类活动(引起的污染)均有不同

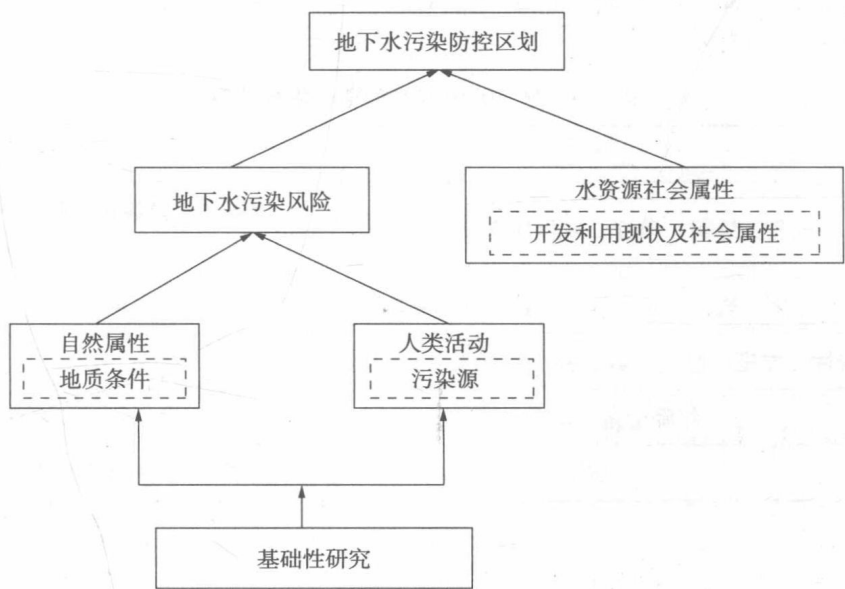


图 1.2 地下水污染防控区划体系技术框架

程度的研究，下面将分别介绍其研究进展。

1.2 地下水易污性指标与评价方法

地下水脆弱性这个概念是 1968 年由法国的 Margat 首次提出的^[14]，他主要从水文地质等地质学的角度考虑地下水的脆弱性，与人类活动无关。随着对地下水脆弱性研究的不断深入，地下水脆弱性的定义与内容在不断完善，逐渐由考虑自然条件过渡到人类活动及自然条件共同作用。目前大部分学者认为地下水脆弱性是指地下水环境对自然条件变化和人类活动影响的敏感程度，它反映了地下水环境的自我防护能力。地下水脆弱性通常分为本质脆弱性和特殊脆弱性。

本质脆弱性是指在天然状态下含水层对污染所表现出的内部固有的敏感性，它不考虑污染源或污染物的性质和类型，是静态、不可变和人为不可控制的。特殊脆弱性是对特定的污染物或人类活动所表现的敏感性，它与污染源和人类活动有关，是动态、可变和人为控制的。也就是说，对于某一给定地下水含水层，其本质脆弱性是恒定的，特殊脆弱性随污染源或污染物的不同而变化。

对与人类活动相关的污染要素而言，地下水易污性是指地下水的本质脆弱性。它反映了污染物到达含水层的难易程度。

1.2.1 地下水易污性的指标体系

自然因素是影响地下水易污性的主导因素^[15,16]。因此，地下水易污性评价指标体系主要为自然因素指标，它主要包括含水层的地形、地貌、地质、水文地质条件及与

污染物运移有关的自然因子等，以上诸多因子构成了地下水易污性的评价指标体系。常见的指标见表 1.1。

表 1.1 地下水易污性的评价指标体系

指标	主要指标	次要指标
土壤	成分、结构、厚度、有机质含量、透水性	阳离子交换容量、吸附—解吸能力、含水量、植物根系持水量
包气带	厚度、岩性、垂向渗透系数、水运移时间	风化程度
含水层	岩性、厚度、渗透系数、补给量（强度）、开采量	
补给量	年降雨量、净补给量	蒸发、蒸腾、空气湿度
地形	坡度	植物覆盖程度

1.2.2 地下水易污性的评价方法

基于已有的研究成果，国内外有关地下水易污性的评价方法主要有以下几种。

1.2.2.1 迭置指数法

考虑污染物从地表向地下迁移过程中的影响因素，通过选取各评价参数的分指数进行迭加，形成一个反映脆弱程度的综合指数，然后再由综合指数进行评价的一种方法。其又可分为水文地质背景参数法（Hydrogeologic Complex and Setting Methods, HCS）和参数系统法（Parametric System Methods）。

水文地质背景参数法是通过一个与研究区类似条件的已知易污性标准的地区来比较确定研究区的易污性。这种方法需要建立多组地下水易污性标准模式，且多为定性或半定量评价，一般适用于地质、水文地质条件比较复杂的大区域^[17]。

参数系统法是将选择的评价参数综合起来建立一个参数系统，每个参数均有一定的取值范围，这个范围又可分为几个区间，每一区间给出相应的评分值（参数等级评分标准），把各参数的实际资料与此标准进行比较评分，最后根据参数所得到的评分值迭加即得到综合指数。参数系统法应用广泛，简单实用，主要包括矩阵系统（MS）、标定系统（RS）、计点系统（PCSM）3 种分类方法。

MS 对研究区各单元的易污程度是以定性方式进行评价的；RS 是一种采用等权赋值下各指标评分值相加的方法，常见的评价模型有 GOD 模型、AVI 模型；PCSM 是将各指标不等值赋权下评分值叠加得到一个综合指数，因此又叫权重评分法。常见的有 DRASTIC 模型、SINTACS 模型、EPIK 模型等，其中最典型的是美国国家环保局于 1987 年提出的 DRASTIC 模型^[18]，该方法已被广泛地应用于国内外^[19-28]。表 1.2 是几种常用模型的计算方法。

表 1.2 常用参数系统评价模型的计算方法

方法	模型参数	计算方法
GOD 模型	地下水状况 (G)，即非承压水、半承压水和承压水等； 整个含水层的固结、岩性特性 (O)；地下水的埋深 (D)	$V=G \cdot O \cdot D$
AVI (含水层敏感性 指数) 模型 ^[29]	沉积单元的厚度 d 、水力传导系数 k	$c=\sum_{i=1}^n \frac{d_i}{k_i}$
COP 模型 ^[30,31]	径流大小 (C)、覆盖层 (O)、降雨 (P)	$V=C \cdot O \cdot P$
PI 模型 ^[32]	保护层因子 P 和径流因子 I	$V=P \cdot I$
DRASTIC 模型 ^[33]	地下水埋深 (D)、含水层的净补给 (R)、含水层的岩 性 (A)、土壤类型 (S)、地形 (T)、包气带的影响 (I) 及含水层水力传导系数 (C)	$V=D_r D_w+\cdots+C_r C_w$
SINTACS 模型 ^[34-36]	地下水埋深 (S)、入渗量 (I)、包气带功能 (N)、 土壤 (T)、含水层的水文地质特征 (A)、含水层的导 水系数 (C)、地面平均坡度 (S)	$V=S_r S_w+\cdots+S_r S_w$
EPIK 模型 ^[37]	表层岩溶带发育强度 (E)、保护性覆盖层厚度 (P)、 补给类型 (I) 和岩溶网络系统发育情况 (K)	$V=E_r E_w+\cdots+K_r K_w$

注：表中 c 为含水层敏感性指数； V 为地下水易污性指标。

1.2.2.2 过程模拟法

过程模拟法是在水分和污染质运移模拟模型基础上，使用确定性的物理、化学方程来模拟污染物的运移转化过程，将各评价因子定量化后放在同一个数学模型中求解，得到一个可评价易污性的综合指数。该方法最大的优点是量化程度高，可以描述影响地下水易污性的物理、化学和生物等过程，并可以估计污染物的时空分布情况。尽管描述污染质运移的二维、三维等各种模型很多，但目前还没有用在区域地下水易污性的评价中，大多集中在土壤和包气带的一维过程模型，如衰减因素指数模型 AF (Attenuation Factor)、污染物迁移时间模型等。

1.2.2.3 统计方法

统计方法是通过测量一系列与地下水易污性有关的变量及其污染物浓度，利用统计学方法建立变量与实测污染物之间的关系，并建立统计模型，把已赋值的各评价因子代入模型中进行计算，然后根据其结果进行易污性分析。常用的统计方法包括地理统计 (Geostatistical) 方法、Kriging 方法、线性回归分析法、逻辑回归 (Logistic Regression) 分析法、实证权重法 (Weight of Evidence) 等。

1.2.2.4 模糊数学法

近年来，许多学者采用了基于模糊评价理论的评价方法^[38-41]，丰富了地下水易污性的评价方法。该方法是在确定各评价因子及其分级标准和因子赋权的基础上，经过