

地下水脆弱性 评价导则研究

唐蕴 唐克旺 高爽 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

地下水脆弱性 评价导则研究

唐蕴 唐克旺 高爽 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

· 北京 ·

内 容 提 要

本书系统介绍了国内外地下水脆弱性评价相关研究成果，对分区评价模型、评价指标、评价标准、适用范围、存在问题等方面进行了评述和分区案例分析，提出了水量脆弱性与水质防污性综合考虑的地下水脆弱性评价导则草案。

本书可供从事地下水保护与管理工作的相关科研人员、技术人员、管理者及学生参考。

图书在版编目（C I P）数据

地下水脆弱性评价导则研究 / 唐蕴，唐克旺，高爽
著. — 北京：中国水利水电出版社，2017.11
ISBN 978-7-5170-6097-0

I. ①地… II. ①唐… ②唐… ③高… III. ①地下水
保护 IV. ①P641.8

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第295120号

审图号：GS（2018）2703号

书 名	地下水脆弱性评价导则研究 DIXIASHUI CUIRUOXING PINGJIA DAOZE YANJIU
作 者	唐蕴 唐克旺 高爽 著
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 68367658 (营销中心)
经 售	北京科水图书销售中心(零售) 电话: (010) 88383994、63202643、68545874 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	北京九州迅驰传媒文化有限公司
规 格	184mm×260mm 16开本 9.5印张 225千字
版 次	2017年11月第1版 2017年11月第1次印刷
印 数	001—600册
定 价	48.00元

凡购买我社图书，如有缺页、倒页、脱页的，本社营销中心负责调换

版权所有·侵权必究

前 言

水是生命之源、生产之要、生态之基。地下水作为水资源的重要组成部分，在应急供水和保障供水安全以及维系良好的生态环境方面发挥着十分重要的作用。自 20 世纪 70 年代以来，由于我国北方地区地表水减少和水污染加剧，我国地下水开发利用规模不断扩大。2010 年全国地下水供水量较 1972 年增加了 4.5 倍，北方一些地区地下水供水量超过总供水量的 50%，部分地区高达 70% 以上。优质的地下水已成为城市和农村生活、农田灌溉、工业生产等的重要供水水源。地下水具有多年调节功能，在特殊干旱年份或遭遇突发事件导致地表水供水减少或无法供水时，可提供应急供水，对保障应急供水时的生活饮水安全、生产供水安全，以及维护社会稳定和降低灾害损失具有极其重要的作用。此外，地下水在形成、转换和运移过程中，对维持地表植被生长、调节江河径流、维护良好生态环境也具有不可替代的作用。

近 30 年来，随着我国经济社会的快速发展，工业化和城市化进程不断加快，各类污染源对地下水水质构成严重威胁。据水利部全国水资源调查评价成果，197 万 km^2 的平原评价区中，不能直接饮用的超过 60%，受人为污染影响的水质劣于Ⅲ类的面积超过 25%。据国土及环保部门的相关调查，我国城市及周边地区、工业企业集聚区、农业化肥农药施用区都存在不同程度的地下水污染问题。淮河等流域甚至出现了癌症村现象。可以说，地下水水质恶化已经给我国人民群众的身体健康带来了严重危害，形势已相当严峻，相比地下水超采问题，地下水污染具有危害大、潜伏期长、治理极其艰巨等特点，这就决定了主动保护地下水的重大意义。

国家高度重视地下水的保护工作，2011 年国务院批复实施了环保部、国土资源部、水利部等部门联合编制的《全国地下水污染防治规划（2011—2020 年）》，提出“综合考虑地下水水文地质结构、脆弱性、污染状况、水资源禀赋及其使用功能和行政区划等因素，建立地下水污染防治区划体系，划定地下水污染治理区、防控区及一般保护区。”水利部正在编制的《全国水资源保护规划》也明确提出了地下水脆弱性评价的工作要求。从实际工作及研究基础上看，国内外很多学者先后进行了地下水脆弱性的研究，并在个别地区进行了脆弱性分区的实践，提出了很多的模型。地下水脆弱性评价对积极保护地下水有

重要意义，也是落实全国相关规划要求的具体工作。目前，该领域的研究基础较好，有实践需求，但规范性技术导则方面还较弱，需要加大标准化研究力度。为此，科技部在科技基础性工作专项中列了“地下水脆弱性评价导则研究”项目（编号 2012FY130400），旨在系统整理现有研究成果并选择典型地区进行示范应用的基础上，提出地下水脆弱性评价方面的技术标准草案，为地下水保护的标准化工作提供科技支撑。

本书收集、分析和整理了国内外文献及标准 200 多篇（部），进行了大量的野外调研考察，实施了两个案例区的示范研究，开展了多次专家咨询及讨论，与水资源管理和保护部门也进行了交流，在上述工作基础上，提出了项目报告及相关成果，并通过对项目研究成果的进一步总结和凝练编写了本书。

本书第 1、2 章由唐蕴、唐克旺撰写，第 3~6 章由唐蕴、高爽撰写，第 7、8 章由高爽、张川撰写，第 9 章由高爽、唐蕴撰写，第 10 章由张川、唐蕴撰写，附录 A 由唐蕴、唐克旺、高爽、张川撰写，全书由唐蕴统稿。本书的完成和出版得到了科技部科技基础性工作专项“地下水脆弱性评价导则研究”项目（编号 2012FY130400）和中国水利水电科学研究院重点科研专项“重点地区地下水水位控制性指标研究”项目（编号 WR0145B502016）的资助，在此表示感谢！

因时间和作者水平所限，书中疏漏和不足之处，恳请读者批评指正。

作者

2017 年 7 月

目 录

前言

第 1 章 国内外研究现状	1
1.1 国外研究现状	1
1.2 国内研究现状	2
第 2 章 地下水脆弱性概念及分类	4
2.1 概念	4
2.2 分类	5
2.2.1 地下水本质脆弱性	5
2.2.2 地下水特殊脆弱性	6
第 3 章 地下水脆弱性评价指标体系	7
3.1 评价指标体系框架	7
3.1.1 指标体系的构建原则	7
3.1.2 指标体系	8
3.2 地下水脆弱性评价指标权重确定方法	8
3.2.1 专家赋分法	8
3.2.2 主成分—因子分析法	9
3.2.3 层次分析法	9
3.2.4 灰色关联度法	13
3.2.5 神经网络法	14
3.2.6 熵权法	14
3.2.7 试算法	15
第 4 章 地下水脆弱性评价方法	16
4.1 迭置指数法	16
4.2 过程模拟法	21
4.3 统计方法	23
4.4 模糊数学法	24
4.5 其他方法	25
4.6 方法比较	27
第 5 章 地下水脆弱性评价模型	28
5.1 DRASTIC 模型	28
5.1.1 DRASTIC 模型评价指标	28

5.1.2 各评价指标分别描述	28
5.2 Legrand 模型	31
5.3 GOD 模型	32
5.4 SINTACS 模型	34
5.5 Vierhuff 法	34
5.6 AVI 方法	35
5.7 SI 法	35
5.8 针对岩溶含水层的脆弱性评价模型	35
5.8.1 EPIK 法	35
5.8.2 表层岩溶带地下水脆弱性评价模型 (EPIKSVLG)	36
5.8.3 欧洲模式	38
5.8.4 越南模式	41
5.8.5 Slovenia 模式	41
5.9 针对干旱区地下水脆弱性的评价方法	41
5.9.1 地下水胁迫因子对应变类型的 IRRUDQELTS 指标模型	41
5.9.2 基于传统水文地质成果的流域地下水脆弱性评价 DRAV 模型	42
5.9.3 基于遥感技术的县域地下水脆弱性评价 VLDA 模型	43
5.10 盆地地下水脆弱性评价方法	44
5.11 平原地下水脆弱性评价方法	44
第 6 章 地下水脆弱性编图方法	46
6.1 概述	46
6.2 分类	46
6.3 制图技术	47
6.4 地下水脆弱性编图的图例	49
6.5 国内外编图实践	50
第 7 章 相关案例分析	51
7.1 平原区	51
7.1.1 三江平原地下水脆弱性评价	51
7.1.2 松嫩平原地下水脆弱性评价	52
7.1.3 下辽河平原地下水脆弱性评价	52
7.1.4 华北平原地下水脆弱性评价	53
7.1.5 银川平原地下水脆弱性评价	53
7.1.6 江汉平原地下水脆弱性评价	54
7.2 岩溶区	54
7.3 分区评价指标	55
7.3.1 西北地区	55
7.3.2 东北地区	57

7.3.3 华北平原区	58
第 8 章 相关技术标准分析及导则编制	60
8.1 《地下水脆弱性评价技术要求 (GWI-D3)》	60
8.2 《区域浅层地下水脆弱性评价技术指南》	61
8.3 《地下水或含水层敏感性和脆弱性评价方法选择指南》	61
8.4 《地下水脆弱性评价导则 (征求意见稿)》	62
第 9 章 通辽市示范应用	63
9.1 研究区背景	63
9.1.1 研究区自然地理与经济概况	63
9.1.2 地下水开发利用现状	64
9.2 研究区水文地质概况	64
9.2.1 研究区地质条件	64
9.2.2 研究区水文地质条件	64
9.2.3 地下水动态及水化学特征	66
9.3 地下水脆弱性指标体系	67
9.3.1 DRASTIC 模型及其改进	67
9.3.2 研究区指标体系建立	68
9.3.3 水质防污性指标分区及等级划分	69
9.3.4 水量脆弱性指标分区及等级	73
9.4 评价指标权重	75
9.4.1 水质防污性指标	76
9.4.2 水量脆弱性指标	77
9.5 评价结果分析及验证	78
9.5.1 水质防污性结果分析	78
9.5.2 水量脆弱性分析	78
9.5.3 结果验证	80
9.6 敏感度分析	82
9.6.1 水质防污性敏感度分析	83
9.6.2 水量脆弱性敏感度分析	83
9.7 结论	84
第 10 章 呼伦贝尔示范应用	86
10.1 研究区概况	86
10.1.1 自然地理	86
10.1.2 地形地貌	86
10.1.3 气象	87
10.1.4 水文	88
10.1.5 社会经济	88

10.2	区域地质及水文地质条件	88
10.2.1	地层条件	88
10.2.2	水文地质条件	90
10.3	水资源及开发利用现状	93
10.4	地下水脆弱性评价模型的构建	94
10.4.1	本质脆弱性 DRASC 评价模型	94
10.4.2	特殊脆弱性 DRASCLM 评价模型	98
10.4.3	评价指标权重的确定	100
10.5	地下水脆弱性评价结果及分析	101
10.5.1	潜水本质脆弱性评价结果	101
10.5.2	潜水特殊脆弱性评价结果	102
10.6	潜水脆弱性评价结果验证	103
10.7	敏感性分析	104
10.8	结论	106
附录 A	地下水脆弱性评价导则（征求意见稿）	108
1	总则	108
2	基本要求	109
3	地下水脆弱性影响因素分析	110
4	地下水脆弱性评价方法	111
5	地下水脆弱性评价步骤	115
6	地下水脆弱性评价成果	120
附录 B	地下水脆弱性编图指南	122
附录 C	地下水资源对污染敏感脆弱性编图及风险评价指南	126
附录 D	国外研究案例	129
1	基于改进的 DRASTIC 模型在伊戈迪亚湖流域（土耳其，伊斯帕尔塔）的地下水脆弱性评价	129
2	VUKA：基于改进后的 COP 方法应用于南非岩溶含水层的地下水脆弱性评价	132
3	基于 WMCDSS 模型在尼罗河三角洲东北部第四系含水层的地下水脆弱性评价	135
参考文献		139

第1章 国内外研究现状

1.1 国外研究现状

早期的地下水脆弱性评价与编图始于20世纪60年代中期的欧洲,到70年代期间,联邦德国、民主德国、捷克斯洛伐克、法国、西班牙、苏联、波兰和保加利亚等国家分别编制了小比例尺地下水脆弱性图,试图从国家和区域层次上了解地下水易于污染的地区,以便制定国家或区域的地下水保护政策。在20世纪70—80年代,为适应较小区域地下水保护的需要,开始转向编制中比例尺地下水脆弱性图。其中,法国地质调查局编制了1:10万、捷克斯洛伐克编制了1:20万的系列地下水脆弱性图,英国国家河流管理局编制了一系列1:10万的区域地下水固有脆弱性图,捷克斯洛伐克编制了1:10万的白垩盆地地下水脆弱性图。在20世纪80—90年代,世界上涌现出相当数量的大、中比例尺地下水脆弱性图。例如,意大利由Civita等在1987年通过国家研究委员会的研究计划,编制出版了1:2.5万和1:5万地下水污染脆弱性图;荷兰在1987年编制出版了1:4万的国家地下水污染脆弱性图;联邦德国由联邦地质科学研究所先后编制出版了1:4万和1:1万的地下水污染脆弱性图;民主德国在1980—1985年期间编制了1:5万的地下水脆弱性图;瑞典编制了1:2.5万的地下水脆弱性图;美国普遍使用了由Aller开发研制的DRASTIC方法评价含水层脆弱性,在俄克拉荷马州使用该方法对12个主要含水层开展了区域尺度的含水层污染脆弱性评价,在美国的得克萨斯州、怀俄明州、罗德岛、马萨诸塞州、威斯康星州、内布拉斯加州、特拉华州、南达科他州等地区也采用了类似的方法进行了含水层脆弱性填图。

为确保饮水安全,美国从1996年在《安全饮用水法案》(Safe Drinking Water Act, SDWA)修正案中明确要求各州对水源地进行安全评价,其中包括脆弱性评价。在以色列、葡萄牙、南非、韩国等国家,水源地保护方面脆弱性评价也得到了广泛应用(Vrba, 1994)。

2004年6月16—19日,由国际水文地质学家协会(IAH)组织的“地下水脆弱性评价与编图”国际研讨会在波兰Ustron市举行,地下水脆弱性评价得到了广泛关注。

考虑地下水的治理与恢复,荷兰建立了大规模地下水监测网,对地下水脆弱性进行调查评价与编图,编制出版了相当数量且具有普遍代表性的大比例尺地下水脆弱性图。

总的来说,20世纪90年代以前,地下水脆弱性评价主要侧重于水文地质本身的内部要素的地下水固有脆弱性方面。在1987年召开的土壤与地下水脆弱性国际会议以后,考虑人类活动造成的污染影响成为20世纪90年代以后世界地下水脆弱性评价研究的主流,一些国际组织和机构积极推动含水层脆弱性评价与编图工作。国际水文地质学家协会地下水保护委员会与联合国教科文组织合作,编制了《地下水脆弱性评价与编图指南》;美国

水科学和技术理事会 (WSTB) 成立了地下水脆弱性评价技术委员会, 开展了“地下水脆弱性评价: 不确定性条件下的污染潜势”研究; 作为欧洲共同体委员会 (EEC) 标准化地下水污染脆弱性编图的试点国家, 葡萄牙于 1993 年编制出基于 DRASTIC 方法的 1:5 万葡萄牙大陆地下水脆弱性图, 后来, Loboferreir 等又编制了 1:10 万葡萄牙中心海岸带地下水脆弱性图, 在 1998—2003 年期间, 葡萄牙投资 1000 万欧元用于开发 15 个河流盆地计划, 葡萄牙国家岩土工程实验室 (LNEC) 承担了其中的地下水脆弱性编图的任务。

1.2 国内研究现状

国内关于地下水脆弱性的研究始于 20 世纪 90 年代中期。目前, 国内研究大多局限于地下水的固有脆弱性评价研究。例如, 刘淑芬根据地下水水位埋深、包气带黏土厚度以及含水层厚度, 对河北平原的地下水防污性能进行了评价; 杨庆等应用 DRASTIC 指标体系法对大连市的地下水易污性进行了评价; 朱雪芹等应用 DRASTIC 方法开展了哈尔滨市地下水的易污性评价; 雷静等 (2003) 选择了地下水埋深、降雨灌溉入渗补给量、土壤有机质含量、含水层累计砂层厚、地下水开采量和含水层渗透系数 6 个评价因子, 通过数值模拟、主因子分析和 GIS 技术, 应用改进的 DRASTIC 方法对唐山市平原区地下水脆弱性评价研究, 并用地下水中硝酸盐浓度的实际观测数据对评价结果进行了验证。

我国在地下水脆弱性评价时考虑人类活动与污染源的影响的研究还不多见。郑西来等既考虑了包气带、含水层等水文地质内部特征, 又考虑了污染源特征, 对西安市潜水的特殊脆弱性进行了评价。

目前侧重于较湿润地区的地下水对污染的脆弱性研究, 干旱区地下水脆弱性研究则较少。干旱地区由于地下水形成条件及系统结构功能完全不同于湿润地区, 地下水系统不稳定性机制主要表现在降水少, 地下水的重复补给率高, 地下水脆弱性不仅表现在污染方面, 更表现在水资源的枯竭与生态环境恶化方面。因此, 干旱区地下水脆弱性的概念、评价指标体系和评价方法完全不同于湿润地区。马金珠根据胁迫一应变理论, 确定了河川径流中冰雪融水比重、地表径流入渗占地下水补给比例、地下水补给强度、地表水的引用率等 10 项指标进行定量评价, 对干旱区塔里木盆地南缘地下水脆弱性评价进行了探索研究。

从评价方法来看, 我国开展的地下水脆弱性评价研究多是按 DRASTIC 的思路, 建立指标评价体系, 使用专家知识确定各属性的评分体系和权重, 应用 GIS 技术对属性图层进行叠加运算。我国一些学者在地下水脆弱性评价中探索使用模糊理论、数值模拟以及统计学方法。例如, 雷静等使用了数值模拟方法确定每个参数的评分体系, 并通过主因子分析多元统计的方法形成权重体系。这种将数值模拟与指标体系结合起来的做法, 可以尽可能地克服因子评分过程中的主观性。陈守煜等在含水层脆弱性评价中建立了以语气算子比较法确定权重为基础的一套比较完整的模糊分析评价理论、模型和方法。这些探讨对于完善地下水脆弱性评价方法来说非常有意义。

尽管国内外现已对地下水脆弱性的研究有了一定程度的重视, 并且做了大量的研究工作, 取得了许多理论和实践成果, 但是由于地下水系统的复杂性和人们认识的差异性, 目前在地下水脆弱性的研究方面仍然存在诸多问题, 主要表现在: ①迄今为止仍没有一个明

确统一的地下水脆弱性概念，人们对其内涵和外延的认识还存在着一定差异；②由于可获取的指标数据的数量和质量不够，并且缺乏对确定性和非确定性方面信息知识的表征方法，使现有的评价方法都具有非确定性；③目前对地下水脆弱性的定义及评价大多只侧重于水质方面，基本上不考虑水量因素。随着过量开采地下水所产生的一系列地下水环境负面效果问题的发生，这一矛盾越来越突出；④地下水脆弱性的编图原则和方法存在着差异，各地所编的脆弱性图缺乏统一性和可比性；⑤在地下水脆弱性评价中，评价指标体系的选取至关重要，由于影响地下水脆弱性的因素指标很多，其中有定性指标，也有定量指标，并且它们之间的关系也错综复杂，所以在确定评价指标体系时，如何解决以上问题以及定性指标的量化标准问题尚无较好的解决办法；⑥缺乏检验脆弱性评价有效性的方法，已有的许多方法都是用单一的统计方法或单一的过程模型方法进行评价，运用将过程模型与评价模型相耦合的评价方法寥寥无几。因此，制定地下水脆弱性评价导则可以进一步深入研究以上亟待解决的问题。

我国地形复杂，水文地质条件更是变化多样，因此，更有意义的地下水脆弱性评价应针对各地区地形、地貌、地质、水文地质条件（岩溶区、采矿区、垃圾填埋区、平原区、盆地区、湿地区以及干旱区和水源地等）以及地下水开采程度，采取合适、相应的评价方法，选择具有针对性的评价指标和参数，得出更有效的地下水脆弱性评价结果。

第2章 地下水脆弱性概念及分类

2.1 概念

地下水脆弱性是1968年由法国人Margat首次提出的。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。

Vierhuff等(1981)认为定义地下水脆弱性离不开以下两方面:①包气带的保护能力;②饱水带的净化能力。他们进一步提出定义地下水脆弱性应着重考虑含水层类型、含水层在水文地质循环中的位置、包气带性质这三个因素。

1987年在荷兰举行的土壤与地下水脆弱性国际会议认为,地下水脆弱性指地下水对外界污染源的敏感性,是含水层的固有特性。地下水脆弱性对于不同污染物是不同的,因此评价脆弱性时可将污染源进行分类,如营养物质、有机物、重金属、病原体等。Foster(1987)也提出了类似观点。

Vrba(1994)将时间尺度引入到地下水脆弱性定义中,他认为地下水脆弱性相对人文历史时期来说是地下水系统的一个不变的本质特征,水文地质系统的脆弱性是该系统应对在时间和空间上影响其状态和特征的外部(自然和人类)冲击的能力。

美国国家研究委员会(1993)认为地下水脆弱性是污染物进入含水层上方一定位置后,到达地下水系统一个特定位置的可能性。地下水脆弱性不是一个绝对或可测量的属性,只是一个相对的指标。因此,所有的地下水都是具有脆弱性的。这个定义也是现在普遍公认的地下水脆弱性概念。

美国环境保护署1993年提出含水层敏感性(Aquifer Sensitivity)和含水层脆弱性(Aquifer Vulnerability)的概念,并认为含水层敏感性与土地利用、污染物特征无关,而含水层脆弱性则包括了特定的土地利用和污染物的特征。国际水文地质学家协会1994年出版的《地下水系统脆弱性编图指南》一书中给出的定义为:地下水脆弱性是地下水系统的固有属性,该属性依赖于地下水系统对人类或自然冲击的敏感性。

以上可以看出:许多学者都是从自身角度出发,给予“地下水脆弱性”不同角度的定义。总体来说,地下水脆弱性概念的发展可以以1987年为界分为两个阶段:

(1) 1987年以前,关于地下水脆弱性的定义是基于“一个地区的地下水相对于另一个地区对污染物更脆弱”这一想法提出来的,大都从水文地质要素出发。

(2) 在1987年的土壤与地下水脆弱性国际会议上,来自各地的专家学者结合影响地下水脆弱性的内外因素,对地下水脆弱性有了新的认识,不少学者在考虑内部因素的同时,也考虑到了人类活动和污染源等外部因素对地下水脆弱性的影响。

2.2 分类

总体上，目前的研究中都倾向于美国国家研究委员会于 1993 年提出的将地下水脆弱性分为两类的主张：一类是本质脆弱性，即不考虑人类活动和污染源而只考虑水文地质自然因素的脆弱性；另一类是特殊脆弱性，即地下水对某一特定污染源或人类活动的脆弱性 (Worrall, 2002; Worrall, 2005; Almasri, 2008)。

与地下水脆弱性的概念相对应，地下水脆弱性的评价也分为本质脆弱性评价和特殊脆弱性评价。与本质脆弱性相对应的称为自然因素，与特殊脆弱性相对应的称为人为因素。自然因素指标主要包括地形、地貌、地质、水文地质条件以及与污染物运移有关的自然因子等；人为因素指标主要指可能引起地下水环境污染的各种行为因子。

2.2.1 地下水本质脆弱性

地下水本质脆弱性影响因素见表 2-1。

表 2-1 地下水本质脆弱性影响因素

主要因素	补给量	主要参数	净补给量、年降水量
		次要参数	蒸发量、蒸腾量、空气湿度
	土壤介质	主要参数	成分、结构、厚度、有机质含量、黏土矿物含量、透水性
		次要参数	阴离子交换容量、解吸与吸附能力、硫酸盐含量、体积密度、容水量、植物根系持水量、土壤的饱水能力
	包气带	主要参数	厚度、岩性、水运移时间
		次要参数	风化程度、透水性
	含水层	主要参数	岩性、孔隙度、导水系数、流向、地下水年龄与驻留时间
		次要参数	水的不可亲性、容水量、不透水性
次要因素	地形	主要参数	地面坡度变化
		次要参数	植物覆盖程度
	下伏含水层	主要参数	透水性、结构与构造、补给/排泄潜力
		次要参数	承压含水层和下伏含水层的参数是否一样
	与地表水、海水的联系	主要参数	入/出河流、岸边补给潜力、滨海地区咸淡水界面
		次要参数	—

1. 影响地下水本质脆弱性的主要因素

(1) 补给量。补给量作为地下水本质脆弱性评价的主要赋值指标，通过野外调查、水均衡方法或遥感图像来计算。

(2) 土壤介质。主要考虑土壤的成分、结构、厚度、有机质含量、黏土矿物含量和透水性等。

(3) 包气带。包气带的特征和它的潜在吸附、降解能力对确定地下水脆弱性程度起决定性作用。

(4) 含水层。主要考虑含水层的岩性、孔隙度、导水系数、流向、地下水年龄与驻留时间。

2. 影响地下水本质脆弱性的次要因素
- 次要因素包括地形、下伏含水层和与地表水、海水的联系。

2.2.2 地下水特殊脆弱性

特殊脆弱性是根据污染物对地下水系统的危害来评价的。主要包括的参数有污染物在非饱和带的运移时间、在含水层中的滞留时间以及相对于单一污染物性质的土—岩—地下水系统的稀释能力。地下水的特殊脆弱性评价主要是进行系统的污染风险评价。

地下水特殊脆弱性影响因素见表 2-2。

表 2-2 地下水特殊脆弱性影响因素

特殊脆弱性	主要因素	土地利用状态、人口密度，污染物在包气带中的运移时间、土壤和包气带的稀释和净化能力、含水层的降解能力、地下水的矿化度
	次要因素	污染物在含水层中的驻留时间、人工补给量、灌溉量、排水量、污染物的运移特征（分布、参数值）、滞留半衰周期

1. 影响地下水特殊脆弱性的主要因素

影响地下水特殊脆弱性涉及的主要因素是土地利用（人为作用）和人口密度。在人为影响下的农业、工业、居住区及天然状态下的林地、未开垦的草场、无人山区区域存在着重要的差异。人口越密、经济技术活动强度越大的地区，地下水遭受污染的可能性越大。

2. 影响地下水特殊脆弱性的次要因素

影响地下水特殊脆弱性的次要因素有污染物在含水层中的驻留时间、污染物的运移特征等。

第3章 地下水脆弱性评价指标体系

3.1 评价指标体系框架

3.1.1 指标体系的构建原则

地下水脆弱性评价的研究中,评价指标的选取和构建非常关键。应根据研究区的目的、范围、自然地理背景、地质、水文地质条件及人类活动等方面来选取评价指标,同时还要兼顾指标体系的可操作性和系统性。只有选择了合理的指标体系,才能根据各种模型或方法合理地评价地下水脆弱性。构建评价指标体系应遵循以下原则(张伟红,2007;周金龙,等,2009)。

(1) 代表性原则。指标体系的建立一定要有科学的依据,各指标应能够直接反映地下水脆弱性特点和潜在影响因素,具有代表性,能够较客观和真实地反映地下水脆弱性的影响因素。选取的指标既要能反映地下水脆弱性的现状,也要能反映地下水脆弱性的发展趋势,应注重选择一些反映变化、趋势的指标(如土地利用),实现静态的现状和动态的进展相结合。

(2) 系统性原则。所选取的各指标应相互联系、相互补充,充分揭示各影响因素与地下水脆弱性规律之间的内在联系。

(3) 评价指标个数适中原则。所选指标不宜过多,以免增加不必要的工作量;但指标过少则无法全面反映地下水的脆弱性。指标体系并非越庞大越好,指标也并非越多越好,要充分考虑到指标的可量化性及数据的可靠性,注意选择有代表性的综合性指标和主要指标。指标太多,也会冲淡主要指标的影响作用。指标经过加工和处理,必须简单、明了、明确,容易被人所理解,并具有较强的可比性、可测性,将需要与可能、理论与实际结合起来,使所选指标达到科学合理和简单实用的高度统一。

(4) 易获得性原则。指标的设置应充分考虑数据容易获取,所选指标尽量能在以往传统地下水资源调查成果图件(如地下水埋深分区图、包气带岩性图)或现代地下水资源调查成果图件(遥感解译获得的土地利用现状图)中获得,以保证数据的准确性并能及时更新,使评价过程客观可靠。就流域尺度而言,土壤介质和含水介质类型这两项指标不易获得。

(5) 相对独立性原则。选取指标必须明确含义,各指标含义不重叠。在较多备选指标的初选及其后的复选中,相关性考察和独立性分析都是进行指标筛选的重要手段。可根据典型地段获得的地下水脆弱性与相关指标的同步数据,计算各指标之间的相关系数,以各指标间的总体平均相关系数为标准,将相关性低的指标作为独立性指标,相关性高的指标作为相关性指标。再以尽量剔除相关性指标中重叠因素和追求指标的独立性为原则,对相关性指标进行合并,合并中优先保留同其他独立性指标重叠少且要素综合性强的指标。

(6) 特殊性原则。由于不同的地区水文地质条件、环境条件和水文地质勘察程度存在差异，因此指标体系应该突出地域特征，因地域不同而不同。我国水文地质条件有其地域特色，有别于国外的水文地质条件，不可完全借鉴国外的评价指标。在美国等发达国家有比较完善的基础数据库系统，比较容易获得地下水脆弱性评价有关参数的相关资料和数据，而在我国许多地区并不具备这样的条件。

(7) 易理解性原则。各指标评分及综合得分宜采用十分制或百分制，以便于决策者和公众等非专业人士理解。

3.1.2 指标体系

影响地下水脆弱性的各因素构成了地下水脆弱性的评价指标体系。要建立一个包含所有因素的模型来评价地下水脆弱性相当困难，在实际应用中是不可能和不现实的。指标越多，意味着需投入的工作量越大；有些指标（如土壤的成分、有机质含量、黏土矿物含量）在区域性评价中取值比较困难，可操作性较差；指标越多，指标之间的关系也就越复杂，容易造成指标之间相互关联或包容（如含水层的水动力传导系数与含水层岩性密切相关）；指标太多，也会冲淡主要指标的影响作用；精度不同的指标进行叠加时，最终结果的精度往往取决于低精度的指标。因此，应根据研究的目的、范围、研究区的自然地理背景、地质及水文地质条件以及污染与人类其他活动等方面来选取评价指标，同时还要兼顾指标体系的可操作性和系统性。建立一套客观、系统、易操作的指标体系是地下水脆弱性评价的关键。

3.2 地下水脆弱性评价指标权重确定方法

评价指标的相对权重反映了各个参数在地下水脆弱性中的影响大小，权重越大，表明该因子对地下水脆弱性的相对影响越大。评价因子权重的分配，直接影响到评价结果的合理性，是地下水脆弱性评价中的关键技术。目前，采用的权重确定方法有专家赋分法、主成分—因子分析法、层次分析法、灰色关联度法、神经网络法、熵权法、试算法等（周金龙，2010）。

3.2.1 专家赋分法

美国环境保护署提出的 DRASTIC 模型给出的因子权重见表 3-1。

表 3-1 DRASTIC 模型因子权重 (R C Gogu, A Dassargues)

参 数	正常权重	农药权重
地下水埋深	5	5
净补给量	4	4
含水层介质	3	3
土壤介质	2	5
地形坡度	1	3
包气带影响	5	4
力传导系数	3	2