

NEILU GANHANQU DIXIASHUI CUIRUOXING
PINGJIA FANGFA JIQI YINGYONG YANJIU



内陆干旱区地下水脆弱性

评价方法及其应用研究

周金龙 编著



黄河水利出版社

内陆干旱区地下水脆弱性 评价方法及其应用研究

周金龙 编著

黄河水利出版社

· 郑州 ·

内 容 提 要

本书从定义、研究意义、指标体系、权重标准、评价方法与制图等方面综述了国内外地下水脆弱性研究的现状及存在的问题。构建了内陆干旱区地下水脆弱性评价指标体系、权重标准及评价模型;应用GIS技术完成了脆弱性分区;用地下水污染现状评价结果或硝酸盐含量对脆弱性评价结果进行了检验;以新疆塔里木盆地平原区为例,构建了基于传统水文地质成果的流域地下水脆弱性评价的DRAV模型;以新疆焉耆县平原区为例,构建了基于遥感技术的县域地下水脆弱性评价的VLDA模型和基于数值模拟的县域地下水脆弱性评价的耦合DRAV模型,含水层特性用渗透系数 K 来表征,根据一维HYDRUS和三维MODFLOW模型模拟分别获得系统的含水层净补给量和渗透系数。

本书可供从事水文学及水资源、地下水科学与工程、环境科学、环境工程、土地管理等专业的教学人员、科研人员及研究生研究地下水脆弱性时参考。

图书在版编目(CIP)数据

内陆干旱区地下水脆弱性评价方法及其应用研究/周金龙编著. —郑州:黄河水利出版社,2010.5

ISBN 978 - 7 - 80734 - 822 - 1

I. ①内… II. ①周… III. ①干旱区 - 地下水 - 研究
IV. ①P641

中国版本图书馆CIP数据核字(2010)第080451号

出版社:黄河水利出版社

地址:河南省郑州市顺河路黄委会综合楼14层 邮政编码:450003

发行单位:黄河水利出版社

发行部电话:0371 - 66026940、66020550、66028024、66022620(传真)

E-mail:hslcbs@126.com

承印单位:河南省瑞光印务股份有限公司

开本:787 mm × 1 092 mm 1/16

印张:8.5

插图:16页

字数:196千字

印数:1—1 500

版次:2010年5月第1版

印次:2010年5月第1次印刷

定价:28.00元

前言

地下水资源在我国北方地区的社会经济发展中起着重要作用,地下水供水量大于总供水量的 50%, 在一些地区超过 80%。然而,随着经济的迅速发展、人口的不断增长和城市化进程的加快,地下水资源污染日益严重,地下水环境质量不断恶化,给社会发展和人类健康带来危害,地下水水质污染已成为我国一个突出的环境问题,遏制地下水水质恶化,解决地下水污染问题已成为当务之急。国际经验表明,地下水资源一旦遭到污染,因昂贵的经济代价以及含水层的复杂性使得治理和修复几乎是不可行的。因此,地下水保护不能走“先污染、后治理”或“边污染、边治理”的老路,防治地下水污染,应坚持“以防为主,防治结合,防重于治”的方针。采取区域地下水保护战略是防治地下水污染最经济有效的办法。地下水水质脆弱性评价与区划正是区域地下水资源保护的重要手段。通过对地下水水质脆弱性的研究,区别不同地区地下水的脆弱程度,评价地下水潜在的易污染性,圈定地下水污染的高风险区,提出合理的土地利用和地下水资源保护的对策和建议,实现地下水资源可持续利用。

尽管国内外已开展了一系列的地下水脆弱性评价的方法和案例研究,但尚未建立干旱区不同尺度(流域尺度、县域或城市尺度)与不同水文地质研究程度相适应的评价指标体系及适宜的评价方法。为加强流域尺度和县域尺度的地下水资源管理、有效地控制地下水污染,有必要针对内陆干旱区地下水的特征(水文地质条件、水化学条件、污染物特性及水文地质研究程度等),采用适宜的评价模型,开展流域尺度和县域尺度地下水的脆弱性评价,圈划出污染敏感带,为流域和县域地下水资源管理人员提供决策依据。

本书从定义、研究意义、指标体系、权重标准、评价方法与制图等方面综述了国内外地下水脆弱性研究的现状及存在的问题。构建了内陆干旱区地下水脆弱性评价指标体系、权重标准及评价模型;应用 GIS 技术完成了脆弱性分区;用地下水污染现状评价结果或硝酸盐含量对脆弱性评价结果进行了检验。以新疆塔里木盆地平原区为例,构建了基于传统水文地质成果的流域地下水脆弱性评价的 DRAV 模型,其中 D 为地下水埋深、 R 为含水层净补给量、 A 为含水层特性、 V 为包气带岩性;以新疆焉耆县平原区为例,构建了基于遥感技术的县域地下水脆弱性评价的 VLDA 模型,其中 L 为土地利用方式;以焉耆县平原区为例,构建了基于数值模拟的县域地下水脆弱性评价的耦合 DRAV 模型,含水层特性用渗透系数 K 来表征,根据一维 HYDRUS 和三维 MODFLOW

模型模拟分别获得系统的含水层净补给量 R 和渗透系数 K 。

本书的出版得到了“不同水质膜下滴灌棉田水盐调控技术集成与示范”(国家科技支撑计划课题之子课题 2007BAD38B01-4)、“干旱区可调控暗管排水条件下的农田水盐运移规律研究”(国家自然科学基金项目 40662002)、“灌区盐渍化土壤改良技术集成与盐土农业建设示范”(新疆自治区重大科技专项课题 20073314-4)以及“中盐度地下水源膜下滴灌技术开发与示范”(新疆自治区重大科技专项课题 20073117-3)的资金资助。

本书许多内容不够系统完善,一些结论尚显稚嫩,很多问题有待于进一步探讨。由于本人知识水平所限,加之时间仓促,书中难免存在不妥之处,敬请读者批评指正。

作 者

2010年3月16日

目 录

前 言

第一章 绪 论	(1)
第一节 研究的背景与意义	(1)
第二节 地下水脆弱性研究现状及存在的问题	(3)
第三节 研究目标及主要内容	(18)
第四节 技术路线与方法	(18)
第五节 主要创新点	(20)
第六节 小 结	(21)
第二章 地下水脆弱性评价理论及方法	(22)
第一节 地下水脆弱性的特征	(22)
第二节 地下水脆弱性影响因素及其评价指标体系	(23)
第三节 地下水脆弱性评价指标权重的确定方法	(27)
第四节 地下水脆弱性评价的方法	(32)
第五节 地下水脆弱性编图	(48)
第六节 小 结	(51)
第三章 基于传统水文地质成果的流域地下水脆弱性评价方法及应用	(52)
第一节 基于传统水文地质成果的流域地下水脆弱性评价模型——DRAV 模型的提出	(52)
第二节 应用 DRAV 模型评价塔里木盆地潜水水质脆弱性	(54)
第三节 DRAV 模型评价结果与地下水污染现状评价结果的一致性分析	(63)
第四节 地下水水质保护措施	(67)
第五节 小 结	(67)
第四章 基于遥感技术的县域地下水脆弱性评价方法及应用	(68)
第一节 基于遥感技术的县域地下水脆弱性评价模型——VLDA 模型 的提出	(68)
第二节 指标权重的确定	(69)
第三节 应用 VLDA 模型评价焉耆县平原区潜水脆弱性	(70)
第四节 潜水脆弱性评价结果与潜水硝酸盐含量的一致性分析	(80)
第五节 地下水水质保护措施	(82)
第六节 小 结	(82)
第五章 基于地下水流数值模拟的县域地下水脆弱性评价方法及应用	(84)
第一节 应用 HYDRUS -1D 模型确定地下水净补给量 R	(84)
第二节 应用 MODFLOW 模型确定含水层渗透系数 K 的空间分布	(101)

第三节	应用基于数值模拟的耦合 DRAV 模型评价焉耆县 平原区潜水脆弱性	(104)
第四节	小 结	(106)
第六章	结论与展望	(108)
第一节	结 论	(108)
第二节	展 望	(110)
致 谢	 周金龙	(111)
参考文献		(113)

第一章 绪 论

第一节 研究的背景与意义

一、研究背景

水资源是人类赖以生存的不可替代的物质基础,在全球经济和社会可持续发展过程中占有相当重要的地位。缺水和由于不合理使用水资源而产生的环境问题是当前人类面临的重大课题。中国目前人均水资源量仅为世界人均水资源量的 1/4,同时我国大部分地区的淡水资源供给已受到水质恶化和水生态系统破坏的威胁。水资源短缺已经严重制约着社会经济的发展。缓解水资源短缺问题,已成为我国迫切需要解决的战略问题。

地下水的重要性越来越引起国际社会的关注。例如,1998 年联合国就将当年世界水日的主题定为“地下水——看不见的资源”,反映了其对地下水问题的关注。

地下水资源在我国北方地区的社会经济发展中起着重要作用,地下水供水量大于总供水量的 50%,在一些地区超过 80% (Tang Ligua 等,2007)。然而,随着经济的迅速发展、人口的不断增长和城市化进程的加快,地下水资源污染日益严重,地下水环境质量不断恶化,给社会发展和人类健康带来危害。地下水水质污染已成为我国一个突出的环境问题,遏制地下水水质恶化、解决水污染问题已成为当务之急。国际经验表明,地下水资源一旦遭到污染,因昂贵的经济代价及含水层的复杂性使得治理和修复几乎是不可行的。因此,地下水保护不能走“先污染、后治理”或“边污染、边治理”的老路,防治地下水污染,应坚持“以防为主,防治结合,防重于治”的方针。采取区域地下水保护战略是防治地下水污染最经济有效的办法。地下水水质脆弱性评价与区划正是区域地下水资源保护的重要手段。通过对地下水水质脆弱性的研究,区别不同地区地下水的脆弱程度,评价地下水潜在的易污染性,圈定地下水污染的高风险区,提出合理的土地利用和地下水资源保护的对策和建议,实现地下水资源的可持续利用。

为了进一步掌握地下水水量和水质的特征,保护地下水资源,在 2002 年实施的第二轮全国综合水资源规划 (the second Comprehensive National Water Resources Planning, CNWRP) 中,基于丰富的资料和 GIS 技术,开展了地下水脆弱性评价研究 (Tang Ligua 等, 2007)。

中国地质调查局 2004 年以来主持开展的《中国主要城市环境地质调查与评价》项目中,地下水脆弱性的 DRASTIC 评价是其重点研究内容之一。

尽管国内外已开展了一系列的地下水脆弱性评价的方法和案例研究,但尚未建立干旱区不同尺度(流域尺度、县域或城市尺度)与不同水文地质研究程度相适应的评价指标体系及适宜的评价方法。

二、研究意义

开展干旱区地下水脆弱性评价研究的意义如下:

(1)对地下水开发程度较低的地区而言,地下水脆弱性评价有助于避免因不合理的人类活动对地下水水质造成明显的污染。在地下水还没有或几乎没有受到明显污染的情况下,开展地下水脆弱性评价研究,可以为管理部门实施地下水保护计划提供决策依据。在干旱区,仍存在地下水还没有或仅受到轻度污染的地区,针对这类地区,根据其水文地质条件及可能的污染物特性等情况圈划出污染敏感带,为土地利用规划、地下水利用规划部门的管理人员提供决策依据,实现水土资源开发与地下水保护相协调,从而避免因不合理的人类活动对地下水水质造成明显的污染。

(2)地下水脆弱性调查评价可以对地下水监测起指导作用。对于脆弱性高的地区,建立和完善包括地下水水位、水质动态观测在内的水环境观测网站,这样使得监测网的布设更为科学和合理,避免人力、物力的分散和浪费,使地下水环境监测和保护工作更好地发挥其服务经济建设和保护环境、生态的作用。

(3)对地下水开发程度较高的地区而言,地下水脆弱性评价(填图)是土地利用规划与地下水保护带划分的重要依据。地下水脆弱性评价与研究成果对于开发程度较高地区的城市发展远景规划、工农业发展与布局、水资源开发利用模式、地下水资源的合理开采与保护等方面也具有重要的参考价值,可以帮助决策者和管理者制订地下水管理战略和方针,将有限的资金和人力直接投入到地下水污染的高风险区或脆弱性大的地区,最大限度地保护地下水资源。例如,当工程选择在地下水脆弱性较高的地区时,就应当对场地条件作进一步详细的勘测,采取严格、可靠的污染防范措施,或者重新选择建设地点。位于脆弱性高的地区的已建地下水水源地应列为优先保护对象。

(4)地下水脆弱性图可以为规划者、决策者、管理者 and 公众了解地下水污染风险等方面的知识提供直观的工具。欧洲、北美和澳大利亚等地,在地下水污染防治工作中,已经从以污染治理为重点转变为以防止污染为重点,其中采取的一个重要措施即是进行地下水脆弱性评价,并编制评价图册,这种方法值得我国借鉴。

新疆塔里木盆地处于我国西北的内陆干旱地区,是我国重要的石油、天然气供应基地和棉花生产基地,孔隙地下水资源在该区是最重要的居民生活和工农业供水水源。据2002年地下水水质监测资料,塔里木盆地地下水水质总体处于轻度污染状态(参见本书第三章第三节)。但近年来,随着石油、天然气资源的开采、运输及城镇建设、农业生产的发展,该盆地孔隙地下水在局部地段已经受到了不同程度的污染。为加强流域尺度(全盆地)和县域尺度的地下水资源管理、有效地控制地下水污染,有必要针对内陆干旱区地下水的特性,根据研究区的水文地质条件、水化学条件、污染物特性及水文地质研究程度等情况,采用适宜的评价模型,对该地区流域尺度和县域尺度地下水的脆弱性进行评价,圈划出污染敏感带,为管理人员提供决策依据。

第二节 地下水脆弱性研究现状及存在的问题

“脆弱性(Vulnerability)”这一科学术语是由法国水文地质学家 Margat 于 1968 年首次提出来的(徐慧珍,2007)。此后,国内外许多学者和有关研究部门分别从地下水脆弱性的概念、评价指标体系及其权重的确定、评价方法和检验、脆弱性制图等方面进行了较为深入的研究,涉及部门及应用地区不断扩大(详见第二章)。

一、国外地下水脆弱性研究现状

据 2009 年 6 月 29 日进行的 Elsevier、Springer 和 2009 年 11 月 15 ~ 17 日进行的 Wiley - Blackwell 和 GSW(Geo-science World)网站“groundwater vulnerability”文献量统计(见表 1-1),国外专业期刊上有关地下水脆弱性的论述始见于 1981 年(作者是 Vierhuff),1994 年以后英文文献量明显增加。

表 1-1 国内外地下水脆弱性文献量统计

(单位:篇)

英文期刊		中文期刊			
年份	论文数	年份	期刊论文	硕士学位论文	博士学位论文
1981	1				
1982	0				
1983	0				
1984	0				
1985	0				
1986	0				
1987	2				
1988	2				
1989	1	1989	1	0	0
1990	2	1990	1	0	0
1991	1	1991	0	0	0
1992	2	1992	0	0	0
1993	4	1993	0	0	0
1994	15	1994	0	0	0
1995	8	1995	0	0	0
1996	7	1996	1	0	0
1997	8	1997	0	0	0
1998	29	1998	1	0	0
1999	15	1999	4	0	0
2000	20	2000	6	0	0
2001	5	2001	8	1	0
2002	17	2002	4	1	1
2003	31	2003	5	2	1
2004	24	2004	4	3	2
2005	25	2005	11	0	2
2006	45	2006	16	8	5
2007	45	2007	36	12	5
2008	44	2008	21	2	1
2009	35	2009	37	2	0

(一) 地下水脆弱性的概念

Vierhuff 等(1981)认为定义地下水脆弱性离不开以下两方面:一是包气带的保护能力,二是饱水带的净化能力。他们进一步提出定义地下水脆弱性应着重考虑以下三个因素:含水层类型、含水层在水文地质循环中的位置、包气带性质。

1987年在荷兰举行的“土壤与地下水污染脆弱性”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,它依赖于这个系统消化自然演化和人类活动影响的能力。

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。同时,该委员会将地下水脆弱性分为两类: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; Al-masri, 2008)。

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。

总体上,目前的研究中都倾向于美国国家研究委员会 1993 年提出的将地下水脆弱性分为两类的主张。

本书采用美国国家研究委员会(1993)给出的定义。

(二) 地下水脆弱性评价方法

目前,国外地下水脆弱性评价的主要方法有迭置指数法、过程模拟法和统计法等,每种方法有各自的特点和侧重。

1. 迭置指数法

迭置指数法评价地下水脆弱性利用数字分级系统,系统包含 4 个重要部分:指标、权重、值域、分级。各评价模型都有各自的指标体系,地区不同、模型不同,所选用的参数也不相同。国外对地下水脆弱性评价普遍使用的模型有 1987 年美国环境保护署提出的 DRASTIC、GOD、AVI 等(Allert 等, 1987),其他方法还有 Legrand 模型(Ibe 等, 2001)、GOD 模型(Gogu 等, 2000; Ibe 等, 2001; Simsek 等, 2008)、SIGA 模型(Ibe 等, 2001)、SINTACS 模型(Edet, 2004)、Vierhuff 法(钟佐荣, 2005)、AVI 法(张保祥, 2006)、SI 法(毛媛媛等, 2006)等。

针对岩溶含水层的脆弱性评价,国外提出的方法有欧洲法(COP法)(Daly等,2002)、PI法(王松等,2008)、VULK法(Zwahlen,2004;王松等,2008)、LEA法(Daly等,2002;王松等,2008)。

Barber等(1998)开展了特定区域地下水脆弱性评价方法与标准化评价方法(DRASTIC模型)的对比研究。Ibe等(2001)分别用DRASTIC、Legrand、GOD和SIGA等4种模型,对尼日利亚地下水防污性能进行了评价比较,结果见表1-2。Ravbar等(2009)应用EPIK、PI等4种方法评价了斯洛文尼亚岩溶流域的地下水脆弱性。

表 1-2 DRASTIC、Legrand、GOD 和 SIGA 模型评价结果比较(Ibe等,2001)

模型	防污性能指数	A 区	B 区	C 区	D 区	E 区
DRASTIC	DI 值	152.5	171.5	171.5	97.0	188.5
Legrand	DI 值	11.03	10.39	7.90	17.65	6.85
防污性能分级		中等	中等	差	好	差
GOD	DI 值	0.39	0.42	0.52	0.15	0.56
防污性能分级		中等	中等	差	好	差
SIGA	IV 值	8.51	8.22	7.15	2.28	7.30

2. 过程模拟法

过程模拟法(Methods Employing Process - based Simulation Models)是在水分和污染物运移模型基础上,建立一个脆弱性评价数学公式,将各评价因子量化后,得出区域脆弱性综合指数(Antonakos等,2007;Nobre等,2007;Almasri,2008)。该方法可以描述影响地下水脆弱性的物理、化学和生物等过程,但花费较多,只适用于小范围定量评价。该方法最大的优点是可以描述影响地下水脆弱性的物理、化学和生物等过程,并可以估计污染的时空分布情况。尽管描述污染物运移的二维、三维等各种模型很多,但目前还没有用在区域地下水脆弱性的评价中,脆弱性研究多数集中在包气带的一维过程模型,多为农药淋滤模型和氮循环模型。该方法的参数很多,资料 and 数据的获得比较困难。从理论上讲,该方法适用于地下水脆弱性评价的高级阶段,因为它需要具备足够且可靠的地质数据及长序列污染质运移资料,只有当基本掌握了地下水脆弱性与其评价要素之间的内在关系后,才能运用该方法。

过程模拟法与其他方法不同,该方法可以预测污染物在空间、时间上的迁移情况。在评价地下水污染风险的各种方法中,复杂的数学模型被认为是最可靠的(Uricchio等,2004)。

3. 统计法

统计法(Statistical Methods)是通过对已有的地下水污染信息和资料进行数理统计分析,确定地下水脆弱性评价因子并建立统计模型,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脆弱性分析。常用的统计法包括地统计(Geo - statistical)法、Kriging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)(Masetti等,2007)等。该方法在脆弱性评价中一般很少应用,因为这种方法需

要大量的精度较高的数据。

4. 其他方法

除以上 3 种脆弱性评价方法外,近年来,国外研究者也采用其他方法来评价地下水脆弱性。

Sadek 等(2001)将同位素和水化学方法应用于第四系含水层的污染脆弱性评价。

Dixon(2005a)采用模糊数学综合评判方法评价地下水脆弱性。Mohammadi 等(2009)用 GIS 技术和模糊数学方法评价含水层脆弱性。Mazari - Hiriar 等(2006)应用模糊多指标方法评价地下水有机污染物的脆弱性。

Butscher 等(2009)应用模拟手段和填图相结合的方法评价岩溶区地下水脆弱性。

Seabra 等(2009)用地质处理方法和遥感技术评价含水层脆弱性。

Lim 等(2009)通过确定抽水井附近最大污染物负荷极限评价地下水脆弱性。

Kuisi 等(2009)评价了半干旱环境下地下水晒的脆弱性。

Seifert 等(2008)利用替代概念模型评价埋藏古河道对地下水脆弱性的影响。

(三) 地下水脆弱性编图

为确保饮水安全,美国从 1996 年起在“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广泛运用(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的关注。

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具有普遍代表性的大比例尺地下水脆弱性图(冯裕华,2000)。

Ducci 等(1999)利用 GIS 技术编制地下水污染风险图。Hrkál(2001)讨论了地下水脆弱性制图方法及其可靠性。Heike 等(2007)以光学遥感数据作为补充手段编制半干旱地区的地下水风险强度图。Neukum 等(2008)利用实地调查和数值模拟方法编制地下水脆弱性图。Pochon 等(2008)基于脆弱性方法划定裂隙介质的地下水保护区。Bojórquez - Tapia 等(2009)应用可视化 DRASTIC 评价地下水脆弱性。Misstear 等(2009)利用地下水脆弱性填图进行地下水补给量的初步估计。Andreo 等(2009)用 COP 方法进行岩溶含水层固有脆弱性填图。

(四) 地下水脆弱性评价结果的检验

Hrkál(2001)评价了地下水对酸沉降的脆弱性。Cepilecha 等(2004)评价了科罗拉多州地下水硝酸盐污染脆弱性。Holman 等(2005)利用国家硝酸盐数据库对地下水污染的内在脆弱性评价结果进行了验证。Stigter 等(2006)利用地下水含盐度和硝酸盐污染水平检验农业区 DRASTIC 方法和 SI 方法的地下水脆弱性评价结果。

二、国内地下水脆弱性研究现状

据 2009 年 12 月 11 日中国期刊全文数据库(www.cnki.net)地下水脆弱性(包括地下

水易污性、DRASTIC、地下水防污性能、含水层易污染性、污染脆弱性)文献量统计(见表 1-1),国内有关地下水脆弱性的论述始见于 1989 年,2005 年以后中文文献量明显增加。

(一)在地下水脆弱性的概念方面

Groundwater vulnerability to pollution 直译为“地下水对污染的脆弱性”。我国学者从不同的角度给了它不同的名称。郑西来等(1997)称之为地下水污染潜势;杨庆等(1999a;1999b)称之为地下水易污性;郭永海等(1996)、周金龙等(2004)、钟佐荣(2005)称之为地下水防污性能;王焰新等(2002)、杨桂芳等(2003)、赵俊玲等(2004)称之为地下水污染敏感性。目前一般认同为地下水脆弱性。

中国地质调查局(2006)在《地下水污染调查评价规范》中给出明确定义:地下水系统防污性能(Vulnerability of Groundwater Systems to Contamination)指土壤-岩石-地下水系统抵御污染物污染地下水的功能。

(二)在评价指标体系方面

影响地下水脆弱性的因素很多,概括起来分为自然因素和人为因素。自然因素指标包括含水层的地质、水文地质条件等;人为因素指标主要指可能引起地下水污染的各种行为因子。以上因子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是相当困难的,在实际应用中是不可能和不现实的。因为指标越多,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。

不同评价方法选用的指标数量不等。国外学者提出的 DRASTIC 模型为 7 个指标, GOD 模型和 COP 模型为 3 个指标。国内学者结合具体研究区的特定条件,提出了指标个数为 3~11 个不等的众多的评价模型。如刘淑芬等(1996)提出了 3 个指标的模型,郑西来等(1997)、周金龙等(2004)、钟佐荣(2005)、张泰丽等(2007)、周金龙等(2008)、邢立亭等(2009)、周金龙等(2009)提出了 4 个指标的模型,章程(2003)、严明疆(2006)、严明疆等(2008)、胡万凤等(2008)、李万刚等(2008)、严明疆等(2009b)提出了 5 个指标的模型,付素蓉等(2000)、付素蓉(2001)、王焰新(2002)、严明疆等(2005)、孙丰英等(2006)、刘香等(2007)、李立军(2007)、吴晓娟(2007)、孙丰英等(2009)、张雪刚等(2009)提出了 6 个指标的模型,陈浩等(2006)、陈学群(2006)、张泰丽(2006)、范琦等(2007)、孙爱荣等(2007)、刘仁涛等(2007)、刘仁涛(2007)、范基姣等(2008)、张少坤等(2008)、付强等(2008)、黄冠星等(2008)、张少坤(2008)、李文文等(2009)、张雪刚等(2009)提出了 7 个指标的模型,邹胜章等(2005)、张保祥(2006)、张保祥等(2009)提出了 8 个指标的模型,马金珠(2001)、马金珠等(2003)、姚文锋(2007)、许传音(2009)提出了 10 个指标的模

型,李立军(2007)、卞建民等(2008)提出了 11 个指标的模型。

(三)在指标权重的确定方面

评价因子的相对权重反映了各个参数在地下水脆弱性中的“贡献”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,直接影响到评价的结果,是地下水脆弱性评价中的关键技术(左海凤等,2008)。

目前,确定指标权重的方法包括专家赋分法(胡万凤等,2008;李立军,2008)、主成分-因子分析法(雷静,2002;徐明峰等,2005;张泰丽,2006;姚文锋,2007;石文学,2009)、AHP 层次分析法(陈学群,2006;李绍飞,2008;左海凤等,2008;曾庆雨等,2009;黄栋,2009;李瑜等,2009)、灰色关联度法(严明疆,2006;严明疆等,2009)、BP 神经网络法(严明疆,2006;严明疆等,2009)、熵权法(张少坤,2008;曾庆雨等,2009)、试算法(邢立亭等,2007)、语气算子比较法(陈守煜等,2002)、ANN 法(武强等,2006)等。

(四)在评价方法方面

1996 年,欧盟与我国合作首次把 DRASTIC 方法引入并应用到大连和广州的含水层脆弱性评价中。目前,国内采用的地下水脆弱性评价方法主要有迭置指数法、过程模拟法、统计法和模糊数学法等(见表 1-3)。

表 1-3 我国采用的 4 类地下水脆弱性评价方法对比

方法	性质	对象	范围	结果	缺点	优点
迭置指数法	固有脆弱性或特殊脆弱性	多数潜水,少数浅层承压水	小比例尺(大范围)	定性、半定量或定量	评价指标的分级标准和权重多靠经验获得,客观性和科学性较差	指标数据比较容易获得,方法简单,易掌握
过程模拟法	特殊脆弱性	土壤、包气带	大比例尺(小范围)	定量	需要有足够的地质数据和长系列污染物运移数据	能描述影响地下水脆弱性的物理、化学和生物过程等
统计法	特殊脆弱性	潜水	小比例尺(大范围)	定量	需要足够的长系列的污染监测资料,在使用时应考虑可比性	能描述地下水对某一污染物的脆弱性
模糊数学法	固有脆弱性	潜水	小比例尺(大范围)	定量	人为构造隶属函数具有很大的随意性,计算烦琐	通过隶属函数来描述非确定性参数及其指标

注:引自徐慧珍,2007。

1. 迭置指数法

在迭置指数法中,指标一般采用加法模型,并广泛地应用 GIS 技术的图层叠加功能完成地下水脆弱性指数的计算和地下水脆弱性分区。吴晓娟等(2007)认为广义脆弱性是在狭义脆弱性的基础上加上人类活动的影响,分加法模型和乘法模型。

将 DRASTIC 方法原封不动地应用到我国各地区并不能取得很好的效果,其原因为:

首先,在美国等发达国家,有比较完善的基础数据库系统,比较容易获得该方法所考

虑的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。例如,土壤类型和包气带介质类型的资料就不容易获得。

其次,该方法中每个参数的评分范围也不完全适用于我国不同地区的具体状况。如在地势平坦的平原区,按照该方法的评分标准,全研究区的地形参数评分均为 10 分,地形参数对这类地区地下水脆弱性的判别已无实际意义。

在经典的 DRASTIC 模型的基础上,结合我国国情,针对不同地区的环境及地下水条件,国内众多学者提出了 30 余种设置指数法,详见表 1-4。

表 1-4 国内学者提出的设置指数法模型一览

评价模型或方法	评价指标	资料来源
DAADCQ(承压水)	含水层埋深、隔水层介质、含水层介质、地下水位下降幅度、渗透系数、地下水水质	李立军,2007
DARMTICH	地下水埋深、含水层补给模数、含水层岩性、地下水环境、地形坡度、非饱和带岩性、含水层综合渗透系数及人类活动影响	张保祥,2006
DCAT	承压含水层埋深、水力传导系数、隔水顶板岩性和隔水层厚度	邢立亭等,2009
DITRQP	地下水埋深、包气带岩性、含水层砂层厚度、含水层的补给强度、地下水水质现状、污染源	孙丰英等,2009
DLCT(承压水)	承压含水层埋深、隔水层岩性、隔水层的连续性、隔水层厚度	钟佐荣,2005
DPASTIC	地下水埋深、降雨入渗补给量、含水层岩性、土壤类型、地形坡度、非饱和带介质、含水层渗透系数	孙爱荣等,2007
DRAMIC	地下水埋深、含水层的净补给量、含水层岩性、含水层厚度、包气带岩性、污染物的影响	付素蓉等,2000
DRAMIP	地下水埋深、含水层富水性、含水层岩性、含水层厚度、包气带岩性、污染源的影响	刘香等,2007
DRAMTIC	降雨入渗补给量、地下水埋深、包气带介质、水力传导系数、含水层厚度、地下水开采强度、地形坡度	张泰丽,2006
DRAMTICH	地下水埋深、含水层补给模数、含水层岩性、地下水环境、地形坡度、非饱和带岩性、含水层导水系数、人类活动影响	张保祥等,2009
DRASCLP	地下水埋深、含水层的净补给、含水层的介质类型、土壤介质类型、含水层水力传导系数、土地利用率、人口密度	刘仁涛,2007
DRASEC	水位埋深、净补给量、含水层砂层厚度、地下水开采强度、包气带影响、含水层导水系数	严明疆等,2005
DRASICP	地下水埋深、净补给量、含水层介质、土壤类型、包气带岩性、含水层导水系数、污水灌溉	陈浩等,2006
DRASTE	地下水埋深、降雨灌溉入渗补给量、含水层渗透系数、土壤有机质含量、含水层累计砂层厚、地下水开采量	孙丰英等,2006
DRASTIK	地下水埋深、含水层降雨入渗补给量、含水层介质、土壤介质、地形、包气带介质、渗透系数	范基蛟等,2008

续表 1-4

评价模型或方法	评价指标	资料来源
DRATMIC	地下水埋深、含水层净补给量、含水层岩性、地形坡度、含水层厚度、包气带岩性、渗透系数	李文文等,2009
DRAV	地下水埋深、含水层净补给量、含水层岩性、包气带岩性	周金龙等,2008
DRITC	地下水埋深、降雨补给量、包气带岩性、含水层砂层厚度、含水层水力传导系数	严明疆等,2008
DRPAVG	地下水埋深、净补给量、含水层富水性、含水层岩性、岩(土)介质、地貌因子	吴晓娟,2007
DRTA(潜水)	地下水埋深、包气带评分介质、包气带评分介质的厚度、含水层厚度	钟佐桑,2005
DRTALGC	地下水埋深、包气带评分介质、包气带评分介质厚度、含水层介质、距河距离、地形坡度、盖层	黄冠星等,2008
DRUA	含水层埋深、净补给量、包气带介质类型、含水层组介质类型	范琦等,2007
DSCTI	地下水埋深、地下水中固形物的含量、含水层厚度、包气带介质	张泰丽等,2007
EPIKSVLG	表层岩溶带发育强度、保护性盖层厚度、补给类型、岩溶网络系统发育程度、土壤类型、植被条件、土地利用程度、地下水开采程度	邹胜章等,2005
GRADIC	地下水类型、地下水的净补给量、含水层介质、地下水埋深、渗流区的影响、含水层渗透系数	张雪刚等,2009
GRADICL	地下水类型、地下水的净补给量、含水层介质、地下水埋深、渗流区的影响、含水层渗透系数、土地利用情况	张雪刚等,2009
IRRUDQELTS	冰川融水占径流比重、地下水补给强度、地下水重复补给率、地表水引用率、地下水开采率、潜水平埋深 < 1 m 的蒸发力、矿化度 < 1 g/L 的面积比、潜水蒸发损失率、地下水水位下降幅度、泉水衰减率	马金珠,2001
MEQU - DRASTIC	除 DRASTIC 7 个指标外,增加地下水开采强度、潜水蒸发强度、地下水水质、土地利用	李立军,2007
MQL - DRASTIC	除 DRASTIC 7 个指标外,增加地下水开采强度、地下水水质、土地利用类型	许传音,2009
REKST	岩石、表层岩溶、岩溶化程度、土壤层、地形	章程,2003
四指标法	潜水含水层渗透性、包气带自净能力、污染源的环境影响、地下水水质	郑西来等,1997
四指标法	包气带厚度、岩石透水性、地下水补给强度、地下水水力坡度	林山杉等,2000
四指标法	包气带黏性土层厚度、包气带厚度、含水层富水性、含水层纳污指数	周金龙等,2004
三指标法	包气带厚度、包气带黏性土层厚度、含水层厚度	郭永海等,1996
二元法(岩溶水)	覆盖层、径流特征	章程等,2007