

·非主题来稿选登·

地下水污染脆弱性评价方法

吴登定^{1,3}, 谢振华², 林 健², 杨 澍^{3,4}

WU Dengding^{1,3}, XIE Zhenhua², LIN Jian², YANG Shu^{3,4}

1. 中国地质大学, 北京 100083; 2. 北京市水文地质工程地质大队, 北京 100037;

3. 中国地质调查局, 北京 100011; 4. 吉林大学, 吉林 长春 130026

1. *China University of Geosciences, Beijing 100083, China;*

2. *Beijing Hydrogeology and Engineering Geology Team, Beijing 100037, China;*

3. *China Geological Survey, Beijing 100011, China;* 4. *Jilin University, Changchun 130026, Jilin, China*

摘要:地下水污染脆弱性是指污染物自顶部含水层以上某一位置到达地下水系统中某一特定位置的趋势和可能性,进一步分为固有脆弱性和特殊脆弱性。地下水污染脆弱性受地下水流系统和地球化学系统的影响和控制。其主要评价方法有主观分级评价法、统计或基于过程的评价法和综合评价法三大类。中国地下水污染脆弱性评价已有很好的工作基础,评价工作中应以地下水系统为单元,以饮用水井、集中供水水源地、区域含水层系统的补给区为重点保护目标,评价方法应综合区域地下水流系统的过程分析和指数评价方法,并利用已有的区域水质资料进行检验,增强评价结论的科学性和可靠性。

关键词:地下水; 污染; 脆弱性评价

中图分类号: P641.3

文献标识码: A

文章编号: 1671-2552(2005)10~11-1043-05

Wu D D, Xie Z H, Lin J, Yang S. Groundwater contamination vulnerability assessment. *Geological Bulletin of China*, 2005, 24(10-11):1043-1047

Abstract: Groundwater contamination vulnerability refers to the tendency or likelihood for contaminants to reach a specified position in the groundwater system from some location above the top of an aquifer. It can be further classified into intrinsic vulnerability and specific vulnerability. Vulnerability is controlled by the groundwater flow system and geochemical system and can be assessed with the subjective index method, statistical or process-based method and integrated method. Groundwater vulnerability assessment in China has had a very good basis and the assessment work should be carried out with the groundwater flow system as the unit and wellheads, public water supply fields and the recharge areas of regional aquifers as the important protection targets, and methodologically we should integrate the process analysis of the regional groundwater flow system analysis and the index evaluation method, and use available regional water quality data for check to produce scientifically defensible and reliable conclusions.

Key words: groundwater; contamination; vulnerability assessment

随着地下水污染形势的日趋严峻和人们对保证饮用水安全、维持生态系统健康发展要求的不断提高,以及地下水污染的复杂性、难以恢复性及其高昂的治理成本,人们越来越清醒地认识到科学评价并保护地下水资源的重要性。

中国地下水天然资源占全国水资源总量的1/3,地下水开采量占全国总供水量的近20%,全国70%的人口饮用地下

水。在全国660多个城市中,有400多个城市开采利用地下水,在华北和西北城市供水地中地下水所占的比例高达72%和66%,许多城市地下水几乎是唯一的供水水源。地下水是中国水资源的重要组成部分,在支撑国民经济与社会发展中具有不可替代的重要作用^①。

在近20年的经济快速发展进程中,由于防止地下水污染

收稿日期:2004-12-15;修订日期:2005-08-09

地调项目:《华北平原地下水可持续利用调查评价》项目(1212010534902)资助。

作者简介:吴登定(1975-),男,在读博士,从事水文地质环境地质调查与管理。Email:wdengding@mail.cgs.gov.cn

① 中国地质调查局.中国地下水资源与环境调查评价成果报告.2005.

的保护意识不强,对地下水形成演化科学规律的认识不足,以及不合理的土地利用、工业废物和生活垃圾的不合理处置、农药化肥的大量使用,全国地下水污染状况日趋加重。地下水污染造成可利用的水资源数量大幅度减少,缺水城市和地区日益增多,使水资源短缺的形势更加严峻,供需矛盾更加突出。水污染已被公认为是不亚于洪灾、旱灾甚至是更为严重的灾害。开展地下水污染防治工作的任务十分紧迫。

脆弱性评价作为一种预防地下水污染的重要手段已被广泛运用到水井、水源地的保护和流域地下水资源的综合管理之中,并在美国、南非、葡萄牙、以色列、尼加拉瓜、韩国等国家和地区得到广泛运用^[1]。地下水脆弱性评价与区划是预防地下水污染的重要基础工作,在中国尚未系统开展,目前仅在关中平原^[2]、大连^[3]、武汉^[4]等地区做过零星的研究工作。因此,本文将系统介绍其定义、影响因素、评价方法,并结合中国实际情况提出开展地下水污染脆弱性评价工作的建议。

1 地下水污染脆弱性的定义

1.1 脆弱性的定义

脆弱性一词在用于地下水领域之前,在系统性能的评价中有明确的定义。Hashimoto等^[5]从系统失稳的角度分析,给出了3个定义来刻画系统性能:可靠性(reliability)——系统失稳的可能性;可恢复性(resiliency)——系统失稳后多长时间可以恢复到满意的状态;脆弱性(vulnerability)——系统失稳所产生后果的严重性。用于评价系统性能的“脆弱性”概念也可用于地下水污染评价,用来刻画“污染物的输入”所引起的地下水水质恶化的严重性^[6]。1987年,在荷兰召开的土壤和地下水对污染物的脆弱性国际会议给出如下定义:地下水水质对外加污染负荷的敏感性,取决于含水层的本质特性^[6]。美国国家研究理事会定义地下水污染脆弱性如下:污染物自顶部含水层以上某一位置到达地下水系统中某一特定位置的趋势和可能性。进一步分为特殊脆弱性(specific vulnerability)——与某种特定污染物相关的脆弱性和固有脆弱性(intrinsic vulnerability)——与污染物物理化学性质无关或只与含水层性质有关的脆弱性。“地下水系统的某一特定位置”和“顶部含水层”2个词是考虑到使该定义能适用于不同尺度的地下水脆弱性评价工作,既可以针对整个含水层或含水层系统的一个部分,也可以是某个水井的污染脆弱性评价^[7]。

其他相关定义更加具体,将含水层特征同含水层和水井对污染物的脆弱性区分开来。在这种意义上,含水层敏感性(aquifer sensitivity)或天然易污性(intrinsic susceptibility)是水进入并在含水层中穿流难易程度的一种度量,它反映含水层及其上覆物质和水文地质条件的特征,而与污染物的化学特性和污染源的特征无关。与“含水层敏感性”或“天然易污性”类似的定义即为:水从污染物的进入点到达地下水系统中某一特定位置所需的时间^[8,9]。Vowinkel等^[10]将脆弱性定义为敏感性加强度。这里强度是对污染源的一种刻画尺度。

显然,地下水脆弱性不仅与地下水流动系统有关(天然

脆弱性),同时还与污染源的远近、污染物的特征等因素有关。地下水资源的脆弱性取决于天然脆弱性,天然污染源、人为污染源的类型、位置,保护目标的相对位置和污染物的迁移、转化。

1.2 脆弱性和污染风险

脆弱性与污染风险概念不同。污染风险不仅取决于脆弱性,也与大量可能存在的污染物进入地下环境有关。可能一个含水层的脆弱性很高,但由于那里没有明显的污染物进入含水层而无污染风险;也可能含水层脆弱性很低,但因有大量的污染物进入地下环境而污染风险很大。区分脆弱性与污染风险在地下水环境管理中很重要,污染风险不仅取决于相对稳定、不宜改变的含水层天然特征,还取决于污染活动存在的可能——这是动态因素,从根本上来讲是可以得到改变和控制的。污染风险、特殊脆弱性、固有脆弱性的区别见图1^[11]。

1.3 脆弱性的物理含义

自上述定义,一旦“某一具体位置(a specific position)”——脆弱性评价的目标地确定,在实践中可用3个参数表征地下水脆弱性明确的、可以度量的物理含义。一是污染源和保护目标的位置,二是多长时间可达目标污染点,三是超过污染物临界浓度的污染时间和强度。

2 影响地下水脆弱性的关键作用过程

污染物进入地下以后经过一系列物理、化学和生物反应,这些反应导致污染物改变其物理和化学形态,并决定地下水对污染的脆弱性。污染物从污染源到土壤带、非饱和带和饱水带中所经历的主要反应和过程见图2^[11]。其中,土壤带中发生的变化最大,特别是在根系带,大量化学物质通过化学、物理,尤其是微生物作用被分解并被植物吸收。非饱和带中微生物活动相对土壤带中较少,而以物理、化学作用为主。非饱和带的主要特点是延缓了污染物到达地下水面的过程。饱水带中发生的物理、化学作用较少,对污染物衰减的影响主要来自溶解作用、稀释作用及水动力弥散作用。所有这些作用过程可归结到地下水流系统和地球化学作用系统,并决定地下水对污染的脆弱性。

2.1 地下水流系统

地下水流系统是控制地下水固有脆弱性的本质过程。准确认识含水层系统的三维结构、地下水补给的时空特征、地下水径流的空间分布特征与径流速率、地下水排泄途径与数量等地下水流系统的基本条件,以及人类工程经济活动对水流系统的影响和改变,可使我们更加清楚地认识到在什么地方、为什么地下水易遭受污染,以便对地下水固有脆弱性做出科学、准确的评价。控制地下水流动系统的降雨条件、入渗过程、流动过程、排泄过程和控制这些过程的地表条件,岩性及相关渗透性、孔隙度等参数,地表、地下水的相互作用过程等均直接影响地下水的固有脆弱性。

2.2 影响污染物运移的地球化学作用

改变地下水中污染物浓度的主要地球化学作用包括吸

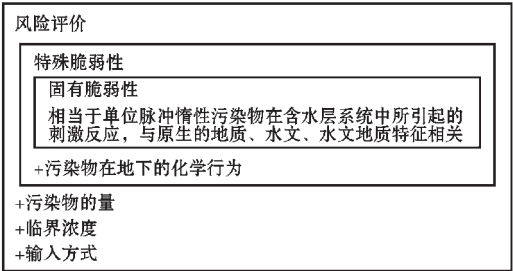
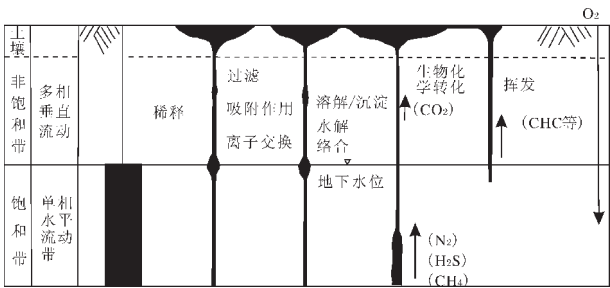


图1 污染风险评价与地下水脆弱性评价的相互关系

Fig.1 Relationship between contamination risk assessment and groundwater vulnerability assessment



注:线条的粗细表明这些过程在不同部位的相对重要性

图2 地下水污染物降解的过程^[11]

Fig.2 Process of degradation of contaminants in groundwater

附-解吸、溶解-沉淀、氧化-还原、络合作用等。应重点认识掌握与污染物相关的下列信息:(潜在)污染源的分布、类型及特征,目标污染物(组)的化学性质,在地下水流动系统中控制污染物迁移转化的重要机理和污染物的扩散、弥散过程。

3 评价方法

评价方法大体分为指数评价法、统计或基于过程的评价法和综合评价法三大类。指数评价法直接为政策和管理目标服务,评价结果为不同级别的脆弱性(通常分为高、中、低)。过程评价法通常给出如污染源区、超过环境标准的概率有多大等结果,由科学家为管理者提供地下水脆弱区为什么脆弱的科学解释,以科学目标为主,在评价结果应用于地下水环境管理实际中还要向管理者做进一步的解释和说明。综合评价法则为前两类方法的结合应用。

3.1 指数评价法

指数评价法(与叠加法“overlay methods”紧密联系)对影响地下水污染脆弱性的各类关键因子进行排序、分级并评分,按一定的权重关系将所有因子的得分(数值)叠加后得到综合脆弱性指数,再按数值的高低分为不同的脆弱性等级。

这种方法运用得最早,也最普遍^[9]。目前国外这类评价方法多达30多种,主要有DRASTIC、SINTACS、GOD、SEEPAGE、AVI、EPIK等方法^[1]。这类方法的主要特征就是定义众多的因子,并进行分级评分赋值,来区分地下水脆弱性的高、中、低,通常也称为主观分级评价法。

其中最流行的方法是DRASTIC评价方法^[12],以所选7个评价指标英文单词的第一个字母命名而得:Depth to water, net Recharge, Aquifer media, Soil media, Topography, Impact of vadose zone media, and hydraulic Conductivity of the aquifer。DRASTIC方法的计分分级系统是在总结分析美国全国水文地质条件的基础上,由经验丰富的水文地质专业人员综合评判建立起来的。这种方法可以编制大、中、小不同比例尺的图件,包括全国尺度的、省级尺度的或县镇级尺度的^①。这种方法之所以受到普遍欢迎,是因为相对省钱、直观、数据容易得到、评价结果易于解释并直接服务于决策过程。

3.2 统计或基于过程的评价法

这类方法很多,从统计法到过程模拟法和除主观分类法以外的各种方法的组合运用。这类方法不给出主观性的脆弱性指数,使得评价结果更加客观科学。

(1)统计法:统计方法利用区域上已有的地下水污染监测资料 and 发生地下水污染的各种相关信息,进行统计分析,确定影响地下水污染的主要因素及其权重,并计算区域上发生地下水污染(或超过标准浓度值)的概率,按照概率的高低来确定地下水脆弱性的分区。该方法包括常见的对地下水污染物浓度的简单统计描述(最大值、最小值、平均值、中值)和考虑较多影响地下水污染因素的多元回归分析。

实践中用得较多的是逻辑回归分析方法。逻辑回归是一种用来预测事件发生概率的统计方法,如某一事件发生的概率可用下式表示^[7]:

$$P=e^{(b_0+b_1\times var1+b_2\times var2+\cdots)}/(1+e^{(b_0+b_1\times var1+b_2\times var2+\cdots)}),或$$
$$\log(P/(1-P))=b_0+b_1\times var1+b_2\times var2+\cdots$$

式中:P为某一事件发生的概率;var1,var2, …为与发生某一事件相关的独立变量;b0,b1, …为统计得出的各独立变量的权重系数。建立的逻辑回归方程可经过假设检验分析,剔除统计上不显著影响地下水污染的变量,保留显著的重要影响因素,并通过相应的权重系数反映出来。最终以此回归方程预测地下水污染发生的概率,区分地下水污染的脆弱性。

统计方法的一个突出的优点在于,通过统计分析,客观地筛选出影响地下水污染的主要因素,并在回归方程中给出适当的权重值,避免了指数评价法中专家评判的主观性。但这种方法本质上还是将评价对象当做黑箱处理,没有涉及发生污染的基本过程,统计显著相关的,并不一定存在必然的因果关系。同时,用统计方法进行评价必须有足够的监测资料和信息。目前,这种方法在地下水脆弱性评价中的应用不

① Michael J Focazio, Thomas E Reilly, Michael G Rupert, et al. Assessing ground-water vulnerability to contamination: Providing scientifically defensible information for decision makers. USGS Circular 1224.

如叠置指数法和过程模型法那样得到重视。

(2)过程模拟法:过程模拟法是在对水分和污染质运移过程分析和模型模拟的基础上,确定不同地区地下水受到人为污染活动影响的脆弱性。常用于确定含水层的固有脆弱性和评价供水水源对某一目标污染物的脆弱性。利用过程模拟模型来评价固有脆弱性重点是认识地下水的来源和运动(包括地下水的年龄);而特殊脆弱性的评价主要关注污染物的来源、运移和转化。尽管描述污染物质运移的二维、三维等各种模型很多,但目前还没有用在区域地下水脆弱性的评价中,脆弱性研究多数集中于土壤和包气带的一维过程模型。例如,Rao等^[9]分别从土壤和包气带的衰减能力、污染质的对流弥散、污染质及其代谢物的毒理性等角度,提出了衰减因素指数模型AF、污染质的渗漏潜势指数评价模型LPI、分级指数模型RI。这3种数学模型要求输入的数据较少,便于应用,但缺陷是不能详细模拟污染质迁移、转化的所有过程。这些模型均被应用于美国的伊阿华南部一个农业区杀虫剂污染地下水的脆弱性评价中。

这里值得重点提出的是,环境示踪剂不但可以用于校正数值模型,它本身还可直接用于认识地下水的来源和循环规律,并评价地下水的脆弱性。一般来讲,几百年以前补给的地下水,在没有同现代地下水混合的情况下,不会受到现代地下水的污染。同样接受现代地下水补给的地下水显然易受到现代人类活动的影响。运用这一方法时最为重要的是要准确地确定地下水的年龄和不同年龄地下水的混合情况,以便能得到反映地下水的平均滞留时间和流速,并最终用于评价地下水受到现代人类活动影响的脆弱性。此外,Seiler等^[13]、Shelton等^[14]用地下水中是否检出咖啡因、药品、挥发性有机污染作为地下水是否受到工业化以来人类活动污染的判别标志^[2],评价地下水受现代人类活动影响的脆弱性。

3.3 综合评价法

综合评价法是指由统计评价法、基于过程的评价法和指数评价法(或这些方法的某一部分)相结合而形成的评价方法。分为客观综合评价法和主观综合评价法,区别在于客观法用统计、过程模拟及其他一些客观的方法来刻画变量或过程;而主观法也可能包括部分客观评价法,但同一些主观分类和脆弱性分级指数联合使用。主观综合法通常不依赖于预先设计的评分系统(如DRASTIC或其他指数评价法),而是根据项目具体特点设计分类方案。Vowinkel等^[10]用公共供水井群附近农药使用强度、井与含水层露头(补给区)之间的距离、土壤有机质含量、井的结构、土地利用指标编图区分新泽西州各井对受到农药污染的脆弱性,水质检测证明,农药经常在脆弱性高的地区检出,在脆弱性低的地区很少检出。Nolan等^[15]利用输入负荷、人口密度、土壤水力学特征、林地与农地的比例等因子绘制出地下水N污染的风险图也属此类方法。这类方法中,还有的将指数法同过程模拟模型结合使用,如污染物淋滤模型,这些淋滤模型的结果被用来计算得分,并同其他因素得分共同用来划分地下水脆弱性等级。

3.4 地下水污染脆弱性评价方法改进方向

Gogu等^[16]在总结各种评价方法时,提出了在改进地下水污染脆弱性评价模型时应着重考虑的几个方面:①包气带对地下水脆弱性评价具有重要影响,需要更好地认识并量化包气带中的物理化学作用;②在模型中应考虑地下水的优先流径问题(土壤中的大空隙、岩石中的裂隙网络等);③考虑并避免脆弱性评价的不确定性问题;④定义含义明确的脆弱性分类,并确定在不同空间尺度上评价脆弱性时起控制作用的主要水文地质过程;⑤将土壤和地质信息在模型中一并考虑,建立地球化学数据库,探索出脆弱性的评价方法,利用GIS等工具提高数据管理、分析评价的效率等。

4 关于开展地下水污染脆弱性评价的建议

早在1980年以前,除少数困难地区外,中国区域水文地质普查基本完成,普查面积约 $820 \times 10^4 \text{ km}^2$,同时在北方地区累计完成了近 $130 \times 10^4 \text{ km}^2$ 面积的农牧区供水水文地质勘查。自20世纪70年代末至80年代初,转入重点经济发展区的水文地质调查研究工作,如黄淮海平原、济徐淮地区、长江三角洲、东北经济区、京津唐地区、西北能源基地等,取得了许多重要的研究成果。80年代以来,还开展了多项专题性调查研究,如红层地区、玄武岩地区和黄土地区地下水的富集,以及北方岩溶地下水、典型岩溶区地下水等。自70年代以来,在200多个城市开展了不同程度的水文地质调查工作。1999年以来,国土资源部新一轮国土资源调查开展了主要盆地和平原的地下水资源及其环境问题调查评价工作。所有这些工作对中国主要平原、盆地的区域地下水补、径、排基本条件,地下水系统的特征和地下水环境有了比较深入的认识和了解,积累了丰富的基础资料,为开展地下水污染脆弱性评价奠定了良好的基础。为使地下水污染脆弱性评价更加符合中国工作实际,评价结果更具实用性,提出以下几点建议。

(1)评价目标:地下水脆弱性评价从根本上来讲是为地下水污染防治服务的。地下水污染防治重点在于确定并划分3类地区:天然条件下地下水污染防护性能较差地区(如冲洪积扇顶部地下水的补给区)、地下水水源及其保护区和人类活动对地下水环境造成严重影响的地区。地下水对污染的脆弱性是一个不可直接测量的、相对的概念,评价结果是一个地区比另一个地区更容易受到人类活动的影响而遭受污染。因此,地下水污染脆弱性评价与编图作为地下水污染预防的重要技术手段,其评价目的在于:在社会经济活动的规划阶段,指出哪些地区是地下水易遭受污染的地区(脆弱性高的地区),在规划时予以避让;在建设中和建设后期,在脆弱性分区的基础上,结合污染源分布,指出哪些地方容易受到污染,哪些地方遭受污染的风险大,以指导在进行地下水污染防治时抓住重点地区,集中有限力量解决突出问题。

(2)评价尺度:不同评价尺度,决定地下水脆弱性的关键水文地质过程不同,评价方法不同,评价结果的应用与服务对象也不同。区域评价时,各区之间的相对脆弱性主要受地

下水在区域上的补给、径流、排泄特征的控制,地下水的补给区、主径流区易遭到人类活动的影响,脆弱性较高;反之,在地下水的排泄区、弱径流区,地下水不易受到人类活动的影响,脆弱性较低。区域上地下水脆弱区的划分,在对区域地下水流系统认识的基础上,通过定性分析即可划定。评价结果主要服务于区域规划,污染型社会经济活动的规划布局应避免地下水的补给区和主径流区。局部地区评价时,在认识局部地区所处区域地下水流系统中位置的基础上,根据基本水文地质特征,抓住主要因素进行评价。在地下水的补给和径流区应重点考虑包气带岩性、结构、厚度,兼顾地形、地表水与地下水的关系、含水层的特征等因素,对地下水污染脆弱性做出评价。根据主要影响因子,选用相应的指数评价方法,评价结果可为社会经济活动规划选址提供依据。

(3)评价单元的划分:中国水文地质条件东西南北差异很大,在开展地下水污染脆弱性评价时应按水文地质单元分区来进行。在各水文地质单元分区内应以地下水系统为单元进行地下水脆弱性评价。以地下水系统为单元来评价地下水污染脆弱性符合污染物迁移转化的时空范围,使地下水污染脆弱性的相对评价结论有较明确的理论依据和可比性,也有利于流域地下水污染综合治理,也能很好地与正在开展的新一轮地下水资源及其环境问题的调查相结合。不以流域为单元的地下水污染脆弱性评价结果往往难以对比,缺乏明确的理论支持,使用者难以明白相对脆弱性背后的科学内涵。

(4)评价重点:缺乏明确保护重点的地下水污染脆弱性评价给使用者的指导性对策意见十分有限,使用价值不大。保护重点明确,便于提出明确、可行的地下水污染防治对策建议,可增强评价结论的实用性。中国目前地下水开发利用程度很高,污染形势也很严峻。根据当前地下水的主要用途和使用功能,我们面临的首要任务是保护饮用水井、集中供水水源地、区域含水层系统的补给区,以确保人民基本的生活用水安全。

(5)评价方法:应综合区域地下水流系统的过程分析和指数评价方法,并利用已有的区域水质资料进行检验,增强评价结论的科学性和可靠性。目前,关于评价方法争议最多的就是评价方法的主观性和客观性的问题。通常认为指数法简单、经济,但主观因素太多,影响评价结论的客观科学性;而过程评价方法虽然更具客观科学性,但复杂、费时、代价昂贵。因而,评价方法的选择需要在评价目标、资料的可得性和经费条件之间做很好的权衡。目前,中国主要城市、重要盆地、平原区水文地质条件比较清楚,区域地下水流系统已基本或即将建立起来,这为进一步开展地下水脆弱性评价奠定了很好的基础。在进行地下水污染脆弱性评价时,可在划分区域地下水系统补、径、排区域的基础上,用指数法在补、径、排区域内分别进行地下水污染的相对脆弱性评价,将使地下水污染脆弱性的科学内涵更加明确,更加实用。

结语:脆弱性评价是从预防地下水污染的角度来看待地下水系统对污染事件的敏感程度的。实际上地下水系统是个生态系统,具有一定的抵抗污染的能力,且具有自我调节功

能。不同的地下水系统的防污性能不同。各种污染物在不同的地下水系统中具有不同的迁移转化能力,目前缺乏这方面的系统研究。要有效地控制地下水污染,必须研究不同地下水系统防污染的能力。

参考文献:

- [1] Vrba J, Zaporozec A. Guidebook on mapping groundwater vulnerability[M]. International Association of Hydrogeologists (International Contributions to Hydrogeology 16), Verlag Heinz Heise, Hannover, 1994.1-120.
- [2] 杨晓婷,王文科,乔晓英,等.关中盆地地下水脆弱性评价指标体系的探讨[J].西安工程学院学报,2001,23(2):46-49.
- [3] 杨庆,栾茂田,崇金著,等.DRASTIC指标体系法在大连市地下水易污性评价中的应用[J].大连理工大学学报,1999,39(5):684-689.
- [4] 付素蓉,王焰新,蔡鹤生,等.城市地下水污染敏感性分析[J].地球科学,2000,25(5):482-487.
- [5] Hashimoto T, Stedinger J R, Loucks D P. Reliability, resiliency, and vulnerability criteria for water resource system performance evaluation[J]. Water Resources Research,1982,18(1):14-20.
- [6] Duijvenbooden W Van, Waegeningh H G Van. Vulnerability of soil and groundwater to pollutants[C]. TNO Committee on Hydrological Research, Delft, The Netherlands, 1987.124-1140.
- [7] National Research Council. Ground water vulnerability assessment, contamination potential under conditions of uncertainty[M]. National Academy Press, Washington, D.C., 1993.210.
- [8] Rao P S C, Alley W M. Pesticides: in regional ground-water quality[M]. Van Nostrand Reinhold, New York, 1993.248-249.
- [9] Lena M. Assessing groundwater vulnerability using travel time and specific surface area as indicators[J]. Hydrog. J.,1998,6:441-449.
- [10] Vowinkel E F, Clawges R M, Buxton D E. Vulnerability of public drinking water supplies in New Jersey to Pesticides [M]. USGS Fact Sheet FS-165-96, 1996.2-3.
- [11] Foster S S D. Fundamental concepts in aquifer vulnerability, pollution risk and protection strategy[C]. TNO Committee on Hydrological Research, Delft, The Netherlands, 1987.12-18.
- [12] Aller L, Bennett T, Lehr J H, et al. DRASTIC—a standardized system for evaluating ground water pollution potential using hydrogeologic settings[M]. U.S. Environmental Protection Agency, Robert S. Kerr Environmental Research Laboratory, Office of Research and Development, EPA/600/2-85/018, 1985.163.
- [13] Seiler R L, Zaugg S D, Thomas J M, et al. Caffeine and pharmaceuticals as indicators of waste water contamination in wells[J]. Groundwater, 1999,37(3): 405-410.
- [14] Shelton J L, Burow K R, Belitz K, et al. Low level volatile organic compounds in active public supply wells as groundwater tracers in the Los Angeles Physiographic Basin[M]. 2000.1-5.
- [15] Nolan B T, Ruddy B C, Hitt K J, et al. Risk of nitrate in groundwaters of the United States—a national perspective[J]. Environmental Science and Technology, 1997,31(8):2229-2236.
- [16] Gogu R C, Dassargues A. Current trends and future challenges in groundwater vulnerability assessment using overlay and index methods[J]. Environmental Geology, 2003,39(6):549-561.