基于综合方法的地下水污染脆弱性评价

——以山东济宁市浅层地下水为例

张树军[1,2)]，张丽君[3)]，王学凤[2)]，姚文峰[2)]，罗陶露[2)]，耿直[2)]

1）北京师范大学，北京，100875；

2）北京中水新华国际工程咨询有限公司，北京，100056；

3）国土资源部信息中心，北京，100812

内容提要：地下水资源在中国北方对社会经济发展起着不可替代的支撑作用。因此，地下水污染防护十分重要。地下水污染脆弱性评价可以识别出地下水污染高风险区，为地下水资源保护提供一个强有力的决策依据。本文以灾害风险理论为基础提出了地下水污染脆弱性评价模式和指标体系。采用实证权重方法和GIS技术对济宁市北部地下水污染脆弱性进行了评价，并将评价成果应用于济宁市地下水水源保护区划研究。

关键词：地下水；污染脆弱性；指标体系；实重权重法；GIS

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。然而，随着城市化、工业化和农业现代化的发展，地下水资源正面临着污染威胁，水质正在恶化。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。采取区域地下水保护战略方针是防治地下水污染最经济有效的办法。地下水污染脆弱性评价与区划正是区域地下水资源保护的重要手段。地下水污染脆弱性评价可以识别出地下水易于污染的高风险区，从而指导人类的土地利用活动(Foster et al.，2002；Martin et al.，2001)。

尽管世界上开展了一些地下水脆弱性评价的案例研究，但大多数研究主要采用了DRASTIC方法，缺少将GIS指数方法、模拟方法和统计方法相结合的集成方法研究。实际上只有采用多种综合方法，才能处理区域地下水脆弱性评价的各种复杂问题。为此，本文研究旨在建立地下水污染脆弱性评价框架模型以及评价指标体系，通过综合评价方法，识别地下水污染的主要影响因素及高风险区，从而提出合理的土地利用和地下水资源保护的对策和建议。选定济宁市为典型研究区，开展地下水污染脆弱性评价研究具有重要的实际意义和示范作用。

1 研究区概况

济宁市位于山东省西南部，地处东经116°26′～116°44′，北纬35°08′～35°32′(图1)。东部丘陵起伏，海拔高度在40～100 m。西部地势平坦，海拔高度在40～60 m。中部低洼，内有中国北方最大的淡水湖——南四湖，由京杭运河连成一系，海拔高度在34～40 m。济宁市地处暖温带大陆性季风气候区，平均降水量为678.5 mm。地下水总资源量17.4×10^8 m^3/a，2003年地下水开采量为16.4×10^8 m^3，占总资源量的94.25%。目前济宁市工业、生活用水主要开采60 m以下至150 m以上的深层含水层地下水。农业用水主要开采60 m以上的浅层地下水。由于济宁城区深层地下水的集中超量开采，导致城区地下水水位多年持续下降和地面沉降[1,2]。

2 理论方法

自1968年法国人Margat首次提出“地下水脆弱性”这一术语以来，对地下水脆弱性概念有不同的释义。比较公认的是美国环保署和国际水文地质学家协会给出的定义，即“地下水脆弱性是地下水系统由于自然条件变化和人类活动影响而受到破坏并带

注：本文为国家节水型社会建设专项研究资金资助成果。

收稿日期：2008-03-12；改回日期：2008-10-19；责任编辑：周健。

作者简介：张树军，男，1962年生。研究员，从事地下水资源研究、保护与管理，北京师范大学在读博士。通讯地址：100056，北京市宣武区南线阁10号基业大厦506室。

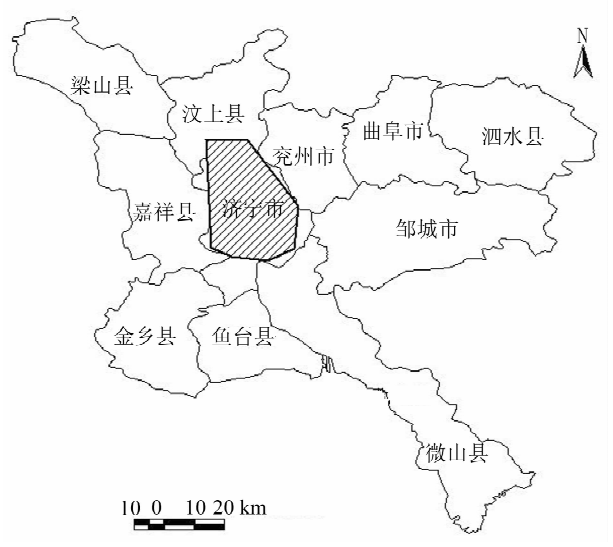


图 1 山东济宁市研究区示意图

Fig. 1 The location of study area in Jining City

来一系列问题的敏感程度”(USNRC, 1993; Vrba et al., 1994)。

从地下水脆弱性的驱动机制看,导致地下水脆弱性因素来自系统内部和外部环境,因此,地下水系统脆弱性包括固有脆弱性和外界胁迫脆弱性。前者指在天然状态下地下水系统对污染和人类开发利用所表现的内部固有的敏感属性,如地形、地貌、地质及水文地质条件;后者指地下水系统对特定的环境因素或人类活动所表现的敏感属性。因此,地下水污染脆弱性是含水层固有脆弱性与外界胁迫脆弱性之间相互作用的结果。据此本文作者构建了地下水污染脆弱性指标体系。

大多数地下水污染脆弱性评价研究将含水层固有脆弱性与外界胁迫脆弱性相互作用的复杂关系简化成单一的叠加关系(董亮,2001;雷静,2002;陈守煜等,2002)。实际上,具有高脆弱性的地区如果没有明显的污染负荷则不存在污染风险;即便在脆弱性较低但污染负荷高的地区仍存在较大的污染风险。因此应有许多种不同的组合关系;在 GIS 计算实现的手段上不是叠加运算(OVERLAY),而是乘积运算(CROSS)。本文正是基于灾害风险理论,构建了地下水污染脆弱性评价框架模型和指标体系,通过固有脆弱性和外界胁迫脆弱性两者的交叉运算(CROSS)获得最终地下水污染脆弱性评价结果。

尽管世界上开展了一些地下水脆弱性评价的案例研究,但大多数研究主要采用了 DRASTIC 方法(杨庆等,1999;姜志群等,2001;朱雪芹等,2001),缺少将 GIS 指数方法、模拟方法和统计方法相结合的集成方法研究。实际上只有采用多种综合方法,才能处理区域地下水脆弱性评价的各种复杂问题(张丽君等,2006)。针对这些问题,本文综合运用了地下水数值模型(Visual MODFLOW)、遥感解译技术、实证权重统计方法和 GIS 技术开展了地下水污染脆弱性评价。

3 地下水污染脆弱性评价结果及讨论

3.1 地下水污染脆弱性评价指标体系及其空间分布

由于研究区地势平坦,因此在本次地下水污染脆弱性评价中不考虑地形坡度的影响。考虑到资料的可获得性,提出了研究区地下水系统污染脆弱性的评价指标体系。地下水污染固有脆弱性评价指标包括含水层厚度、含水层介质类型、含水层给水度、含水层渗透系数、土壤类型,这些指标的评分标准和空间分布见表 1 和图 2;地下水污染外界胁迫脆弱性评价指标包括地下水净补给量、地下水开采强度、地下水埋深、地下水运移速度、土地利用强度。这些指标的评分标准和空间分布见表 2 和图 3。

表 1 济宁市地下水污染固有脆弱性评价指标的评分标准

Table 1 Ratings for intrinsic vulnerability of groundwater pollution in Jining City

评价指标		评价指标的评分标准						
土壤介质	范围	淹育水稻土/水稻土	湿潮土	潮土	脱潮土	砂姜黑土	石灰砂姜黑土	褐土/棕壤等
	得分	1.0	2.0	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0
含水层介质	范围	块状页岩/粘土	风化变质岩/火成岩	冰渍物/粉细砂	层状砂岩/粉砂	中细砂	砂砾石	玄武岩
	得分	2	4	5	6	7	8	9
渗透系数	范围	<5	5～10	10～15	15～20	20～25		
(m/d)	得分	1	2	3	4	5		
含水层厚度	范围	>60	50～60	40～50	30～40	20～30	10～20	<10
(m)	得分	1	2	3	4	6	8	10
给水度	范围	<4.5	4.5～5.5	5.5～6.0	6.0～6.5			
	得分	1	3	5	7			

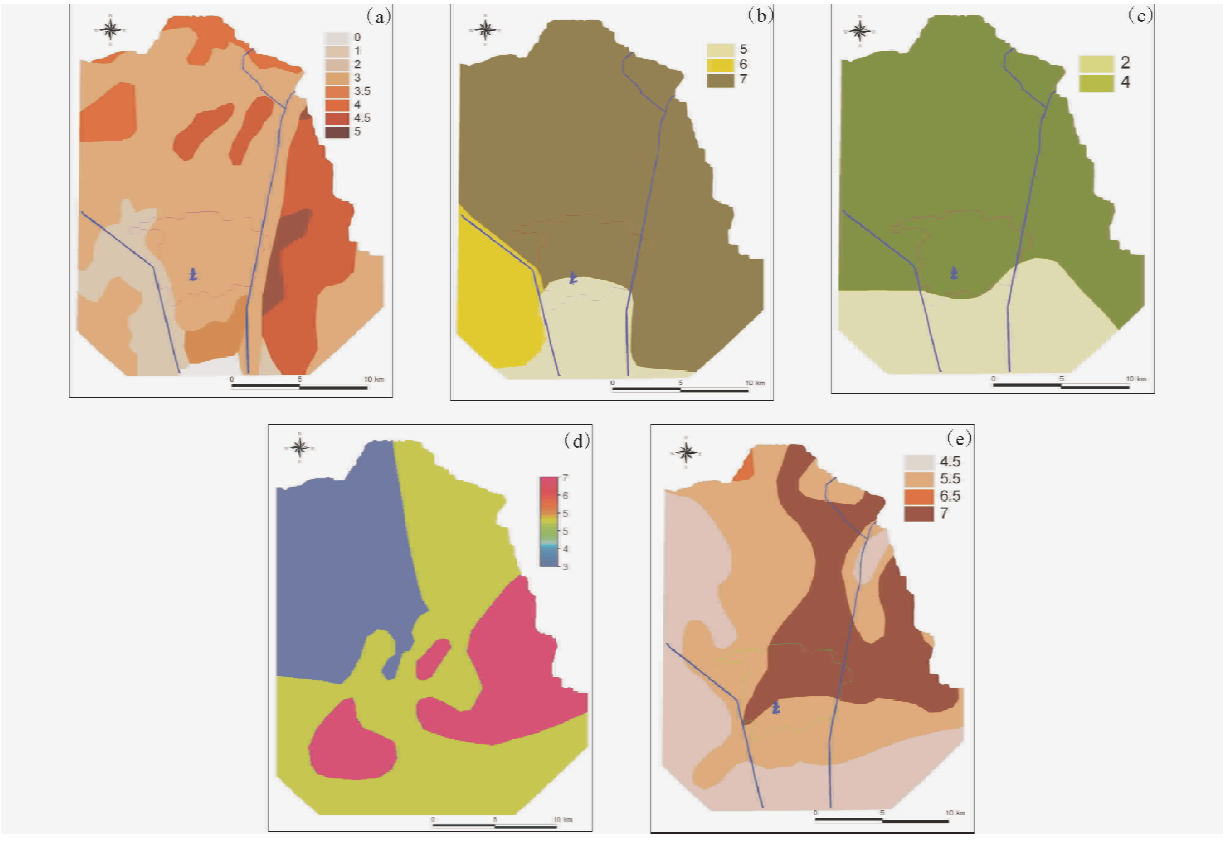


图 2　济宁市地下水污染固有脆弱性评价指标的评分图

Fig. 2　Ratings for intrinsic vulnerability of groundwater pollution in Jining City

(a)—土壤介质;(b)—含水层介质;(c)—含水层渗透系数;(d)—含水层厚度;(e)—给水度

(a)—Soil medium; (b)—aquifer medium; (c)—aquifer permeability; (d)—aquifer thickness; (e)—specific yield of aquifer

根据济宁市水文地质钻孔资料和土壤调查资料[2],确定含水层厚度的空间分布、含水层介质、土壤介质的空间分布。根据济宁市水文局的水文地质抽水试验以及 Visual Modflow 数值模拟结果,得出含水层给水度、地下水水位埋深和地下水运移速度空间分布图。根据降雨/入渗蒸发试验数据得出降雨入渗/蒸发系数,从而确定了地下水净补给量的空间分布。根据 2000 年的遥感图像(SPOT)解译获得济宁市土地利用现状图,确定土地利用活动并给出土地利用评分。本次研究采用的 GIS 平台是荷兰国际地球测量学院(ITC)开发的 ILWIS 软件[3]。

3.2　地下水污染脆弱性评价过程及结果

本文通过建立地下水水质观测数据与地下水污染脆弱性各评价指标之间的空间统计关系,采用实

表 2　济宁市地下水污染外界胁迫脆弱性评价指标的评分标准

Table 2　Ratings for stress vulnerability of groundwater pollution in Jining City

评价指标	评价指标的评分标准										
含水层净补给量	范围	<50	50～75	75～100	75～100	100～150	150～175	175～200	200～250	250～300	>300
(mm/a)	得分	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
地下水埋深	范围	>35.5	35.5～23	23～18	18～11	11～5	<5				
(m)	得分	1	2	3	5	7	9				
地下水开采强度	范围	<50	50～100	100～150	150～200	200～300	300～400				
($m^3/d \cdot km^2$)	得分	1	2	3	4	6	8				
土地利用强度	范围	林地	草地	水田	旱地	农村居民点	城镇及其他建设用地				
	得分	1	2	5	7	9	10				
地下水运移速度	范围	<0.1	0.1～0.2	0.2～0.3	0.3～0.4	0.4～0.5	0.5～0.6	0.6～0.7			
	得分	1	3	5	6	7	8	9			

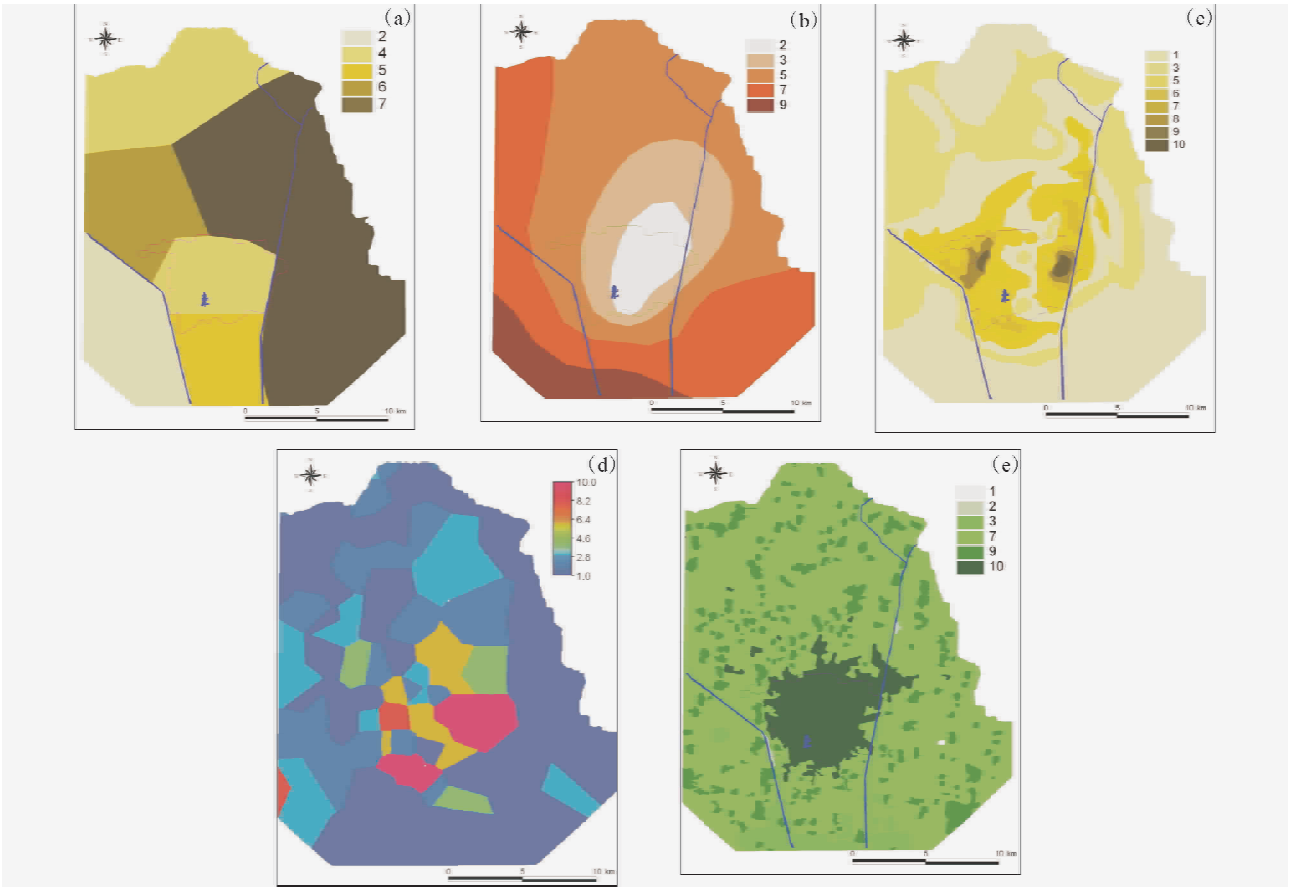


图 3 济宁市地下水污染外界胁迫脆弱性评价指标的评分图

Fig. 3 Ratings for stress vulnerability of groundwater pollution in Jining City

(a)—含水层净补给；(b)—地下水埋深；(c)—地下水运移速度；(d)—地下水开采强度；(e)—土地利用强度

(a)—Net recharge of aquifer; (b)—depth of groundwater; (c)—moving rate of groundwater; (d)—exploitation intensity of groundwater; (e)—land use intensity

证权重法(WOE)进行了地下水污染脆弱性评价。该方法是加拿大数学地质学家 Agterberg 等(1990)基于贝叶斯定理提出的一种定量统计预测方法。Bonham-Carter 等(1989)和 Harris 等(2001)应用 WOE 方法来预测矿产的远景分布。意大利 Alberti 等(2001)应用 WOE 方法开展了地下水硝酸盐污染脆弱性评价。

具体计算步骤如下：

第一步：生成各影响因素的二值图。在 ILWIS GIS 环境中，按给定的地下水污染脆弱性评价指标的阈值生成 10 个评价指标的二值图。

第二步：计算权重和统计参数。将上述二值图分别与地下水污染监测超标点分布图进行交叉运算分别生成交叉运算表，计算(公式省略)统计参数：正权重(W_+)、负权重(W_-)以及离差(C)和标准离差(sigC)，计算结果见表 3 和表 4。

第三步：条件独立性检验。按表 3 和表 4 中的 W_+ 和 W_-，分别生成 10 个地下水污染脆弱性评价二值预测图，通过两两条件交叉运算，得出 Chi 平方值(略)，所有值都低于 3.84(95%的置信度水平)，

表 3 地下水污染固有脆弱性二值模式的权重和统计参数

Table 3 Weights and statistical parameter of binary patterns respect to the intrinsic vulnerability

评价指标	“存在”像元数(Np)	污染样本数(Nd)	W_+	W_-	C	SigC
给水度(cl_geishui)	122484	13	0.3066	−1.489	1.7956	1.7303
含水层介质(cl_hanshuic)	137198	11	0.0273	−0.0942	0.1215	0.1865
含水层厚度(cl_houdu)	127043	12	0.1900	−0.7120	0.9013	1.1800
渗透系数(cl_shentou)	132890	10	−0.0365	0.0976	−0.1341	−0.2267
土壤介质(cl_soil)	158093	12	−0.0276	0.1834	−0.211	−0.2763

表 4　地下水污染外界胁迫脆弱性二值模式的权重和统计参数

Table 4　Weights and statistical parameter of binary patterns respect to stress vulnerability

评价指标	“存在”像元数(Np)	污染样本数(Nd)	W_+	W_-	C	SigC
地下水净补给(cl_jingbuji)	113605	11	0.2156	−0.5371	0.7527	1.1556
地下水开采强度(cl_kaicai)	25822	4	0.6853	−0.1810	0.8663	1.4644
土地利用强度(cl_land01)	41979	8	0.8920	−0.5800	1.4720	2.7260
地下水流速(cl_liusu)	85682	8	0.1785	−0.1972	0.3757	0.6956
地下水埋深(cl_maishen)	168187	12	−0.089	0.8220	−0.9100	−1.1900

这表明所有因素彼此都是具有明显的统计独立性。

第四步:生成地下水污染脆弱性评价图。以表 3 和表 4 中的 SigC 为权重,对上面生成的 10 个评价指标二值预测图进行指数叠加运算,分别生成固有脆弱性评价图(图 4a)和外界胁迫性评价图(图 4b)。,图中数值代表脆弱性分值,值越高表示脆弱性越大。最后对生成的地下水污染固有脆弱性图和外界胁迫脆弱性图进行交叉运算,得到地下水污染综合脆弱性评价图(图 5),图中罗马数值代表脆弱性分值,值越高表示脆弱性越大。

根据表 3 中的 W_+、C 值和 SigC 来看,给水度和含水层厚度对地下水污染影响较大。给水度和含水层介质与地下水污染固有脆弱性呈现正的空间相关关系;而含水层厚度、渗透系数、土壤介质与地下水污染固有脆弱性呈现负的空间相关关系。根据表 4 中的 W_+、C 值和 SigC 来看,土地利用强度和地下水开采强度对于地下水污染外界胁迫脆弱性的影响最大;只有地下水埋深与地下水污染外界胁迫脆弱性呈现负的空间相关关系。所有评价指标的 SigC 都小于 2.96,说明具有 95%水平置信度的统计相关性。

统计表明,污染脆弱性较高地区(Ⅳ和Ⅴ级)所占面积分别为 28.16 km^2 和 65.15km^2,分别占研究面积的 6.29%和 14.55%,主要分布在老城区及其北部地区,在这些地区主要受给水度相对较大以及地下水开采强度大的影响,再加上其他影响因素的综合作用,造成地下水污染的综合脆弱性较高。地下水污染脆弱性中等地区(Ⅲ级)所占面积为 113.5 km^2,占研究面积的 25.35%,地下水污染脆弱性较弱的地区(Ⅰ、Ⅱ级)所占面积为 240.9 km^2,占研究区面积的 53.81%。

3.3　地下水污染脆弱性评价结果的应用—济宁市地下水饮用水源地保护研究

济宁市主要有 5 个地下水水厂,即北水厂、南水厂、高新区水厂、长江水厂和西水厂(图 6)[1]。根据地下水 Visual MODFLOW 模拟的地下水流速的结果,分别计算出 5 个地下水水厂的 750 天和 1500 天运移等时线确定地下水供水的两个防护带,即核心防护带和外围防护带。将划定的这些井源保护带与地下水污染脆弱性图相叠加,可以考察济宁市 5 个地下水水厂污染风险的情况(表 5)。

表 5　济宁市 5 个地下水水厂的污染脆弱性

Table 5　Pollution vulnerability of five groundwater work plants in Jining City

评价指标	北水厂	南水厂	高新区水厂	长江水厂	西水厂
固有脆弱性	5.19	4.77	6.23	6.43	4.56
外界胁迫脆弱性	7.69	7.44	7.77	6.38	5.48
综合脆弱性	39.91	35.45	48.41	40.99	24.96
脆弱性排序	3	4	1	2	5

在济宁市地下水井源保护带区划研究中,通过地下水污染脆弱性评价,对济宁市 5 个地下水水厂进行了排序并针对水厂的不同情况提出了具体的防护措施。结果表明,高新区水厂地下水污染脆弱性最大,依次排序是长江水厂、北水厂、南水厂和西水厂。今后在对各水源保护区进行地下水保护规划时,可参考地下水脆弱性的评价结果,对不同水厂做进一步勘查研究和污染物调查研究,提出不同水厂的具体防护建议。应重点考虑对区内的污染源(如工厂、餐馆和居民区)进行综合治理;在土地利用规划和城市发展规划中,应该对地下水污染高风险区设立林地和绿化缓冲带。

4　结论

(1)地下水污染脆弱性由固有脆弱性和外界胁迫脆弱性两个方面构成。应以灾害理论为基础,通过两者交叉运算(CROSS)而不是叠加运算(OVERLAY)获得地下水污染脆弱性评价结果。只有综合方法才能解决地下水污染脆弱性评价面临的复杂问题。本文采用的方法包括:运用地下水数值模型(Visual MODFLOW)和遥感技术获取了地下水污染脆弱性评价中所需的有关因子的空间分布数据(如地下水渗透系数、含水层给水度、地下水运动速率、地下水埋深、土地利用强度等);采用了实证权重统计方法并与 GIS 技术相耦合,完成了研究区

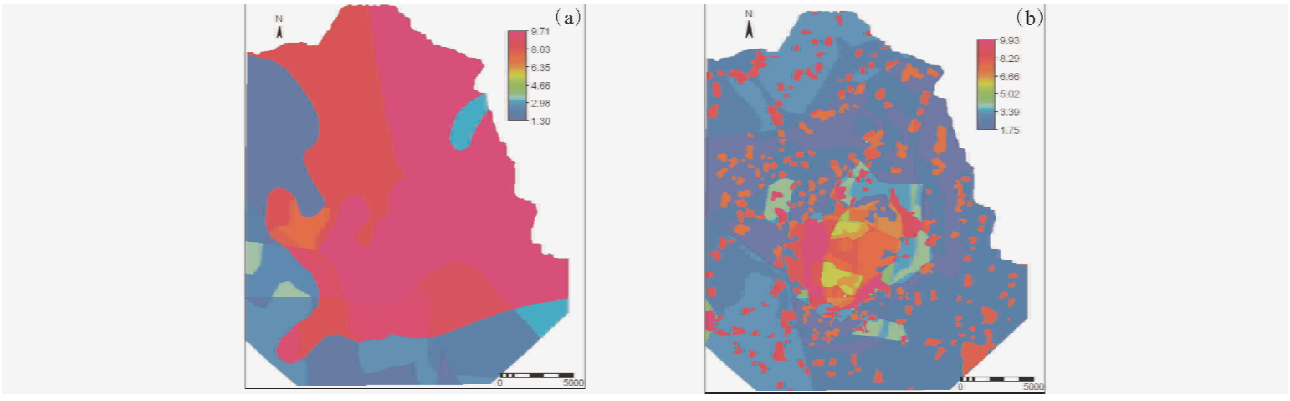


图 4 基于实证权重-指数叠加法的地下水污染固有脆弱性(a)和外界胁迫脆弱性(b)评价图

Fig. 4 Intrinsic (a) and stress vulnerability (b) based on binary weight evidence—index—overlay

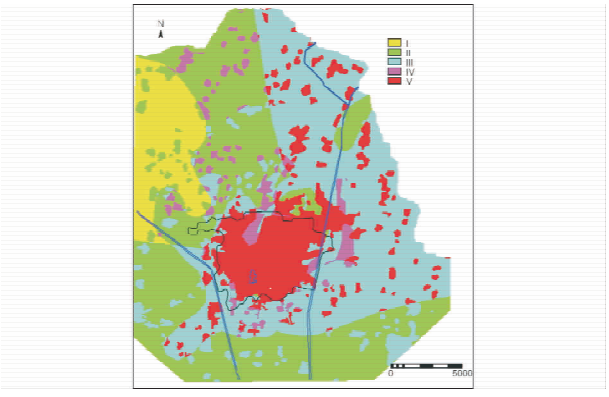


图 5 实证权重-指数叠加法地下水污染综合脆弱性评价

Fig. 5 Integrated groundwater vulnerability based on binary weight evidence-index-overlay

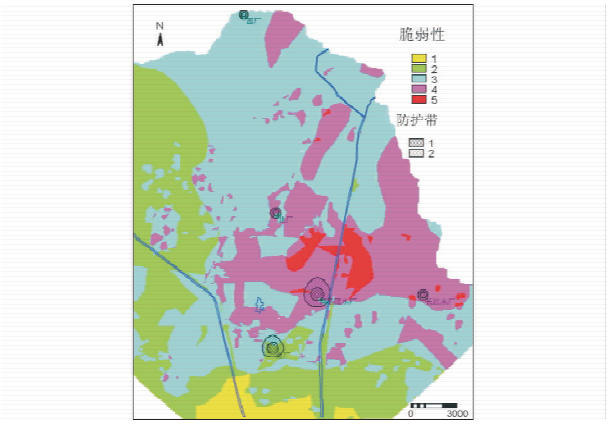


图 6 济宁市地下水水源地污染防护带

Fig. 6 Protecting zones of groundwater pollution from well source in Jining City

地下水污染脆弱性评价计算。

(2)本文采用的实证权重法与一般地下水污染脆弱性评价方法相比的优势在于,评价指标的权重确定不是以专家经验为主要根据,而是通过地下水水质观测数据与地下水污染脆弱性各评价指标之间的空间统计关系确定的,并且经过了统计相关显著性检验。从而克服了人为主观性和以往地下水脆弱性评价缺少统计检验的缺陷。

(3)济宁市地下水污染脆弱性较高(Ⅳ和Ⅴ级)地区,主要分布在老城区及其北部地区,在这些地区主要受给水度相对较大以及地下水开采强度大的影响,再加上其他影响因素的综合作用,造成地下水污染的综合脆弱性较高。统计参数计算结果表明,在济宁市给水度和含水层厚度是地下水污染固有脆弱性的主要影响因素,而土地利用强度和地下水开采强度则是地下水污染外界胁迫脆弱性的主要影响因素。

(4)济宁市平原区地下水污染脆弱性评价结果为该地区地下水资源管理和地下水污染防治指明了方向。必须指出的是使用该地下水脆弱性分布图时必须小心。它们只是在区域尺度上起一定的指导作用。对于特定地点的地下水污染问题,需要开展进一步的详细调查研究。

注 释

❶ 济宁市水利局. 1998. 济宁市地下水开发利用规划及环境问题的定量研究.

❷ 济宁市水利局. 2001. 济宁市地下水环境预测模型研究.

❸ ITC. 2001. ILWIS 3.0 Academic User's Guide.

参 考 文 献

陈守煜,伏广涛,周惠成,王国利. 2002. 含水层脆弱性模糊分析评价模型与方法,水利学报,(7):23~30.

董亮. 2001. GIS 支持下西湖流域水环境非点源污染研究. 浙江大学,博士学位论文.

姜志群,朱元生. 2001. 地下水污染敏感性评价中 DRASTIC 法的应用. 河海大学学报,29 (2):100~103.

雷静. 2002. 地下水环境脆弱性的研究. 清华大学工学硕士学位论文.

杨庆,栾茂田,崇金著,等. 1999. DRASTIC 指标体系法在大连市地下水易污性评价中的应用. 大连理工大学学报,35(9):684～688.

张丽君. 2006. 地下水脆弱性和风险性评价研究进展综述. 水文地质工程地质,33(6):113～116.

朱雪芹,徐秀娟,蒋丽艳,朱雪梅. 2001. 哈尔滨市地下水的易污性评价及计算机编图. 世界地质,20(4):54～58.

Agterberg F P, Bonham-Carter G F, Wright D F. 1990. Statistical pattern integration for mineral exploration. In: Gaal, Gabor and Merriam, Daniel F, eds. Computer Application in Resources Estimation Prediction and Assessment for Metal and Petroleum. Oxford: Pergamon Press.

Alberti L, De Amicis M, Masetti M, et al. 2001. Bayes' rule and GIS for evaluating sensitivity of groundwater to contamination. In: IAMG Annual Conference.

Bonham-Carter G F, Agterberg F P, Wright D F. 1989. Weights of evidence modelling: a new approach to mapping mineral potential. Geological Survey of Canada, Paper89/9, 171～183.

Harris J R, Wilkinson L, Heather K, et al. 2001. Application of GIS processing techniques for producing mineral prospectivity maps — a case study: Mesothermal Au in the Swayze Greenstone Belt, Ontario, Canada. Natural Resources Research, 10(2):91～124.

Martin L C, Abraham J M. 2001. Combined land-use and environmental factors for sustainable groundwater management. Urban Water, (3): 229～237.

Stephen F, Ricardo H, Daniel G, Monica D'E, Marta P. 2002. Groundwater Quality Protection. a guide for water utilities, municipal authorities, and environment agencies, The World Bank, Washington, D. C.

USNRC. 1993. Ground Water Vulnerrability Assessment, Contamination Potential under Conditions of Uncertainty. National Academy Press, Washington, D. C.

Vrba J, Zaporozec A. 1994. Guidebook on Mapping Groundwater Vulnerability, IAH 16. International Association of Hydrogeologists, R. van Acken GmbH, Hanover.

Vulnerability Assessment of Groundwater Pollution Based on Integrative Methods

——A Case Study of Shallow Groundwater in Jining City, Shandong Province

ZHANG Shujun[1,2], ZHANG Lijun[3], WANG Xuefeng[2],
YAO Wenfeng[2], LUO Taolu[2], GENG Zhi[2]

1) *Beijing Normal University*, *Beijing*, 100875;

2) *China Water International Engineering Consulting Co. Ltd*, *Beijing*, 100056;

3) *Information Center of Ministry of Land and Resources*, *Beijing*, 100812

Abstract

Groundwater protection from pollution has been a very important issue in northern China due to its supporting and non-substitutive role in social and economic development. High risk areas of groundwater pollution can be identified by vulnerability assessment and thus it can provide a decision-making basis for groundwater protection. The framework model and indicator system of vulnerability and risk assessment on groundwater pollution based on hazard risk theory were proposed in this paper. Taking Jining city in the northern plain as the study area, this study assessed vulnerability groundwater pollution using weights of evidence modeling and GIS. Assessment results of groundwater pollution vulnerability will be applied to protective zone of drinking well source in Jining City.

Key words: groundwater; pollution vulnerability; indicator system; weights of evidence modeling; GIS