

下辽河平原浅层地下水环境风险评价 及空间关联特征

孙才志, 朱 静

(辽宁师范大学城市与环境学院, 辽宁 大连 116029)

摘 要:以下辽河平原浅层地下水为研究对象,将自然灾害风险理论引入地下水环境风险评价,从脆弱性、功能性、胁迫性、适应性4个方面选取指标,构建地下水环境风险评价指标体系和模型。运用GIS空间分析方法对地下水环境风险进行评价,并对风险值进行空间关联特征研究。结果表明:①研究区内地下水环境中度以上风险区占整个研究区面积的63.12%,其中高风险区占6.79%,较高风险区占18.96%,中等风险区占37.37%;较低风险区占21.98%,低风险区占14.90%。②地下水环境风险最高的地区主要位于下辽河平原中部的新北市东北部、灯塔市、辽中县西部、黑山县部分地区及凌海市东南部。③研究区内地下水环境风险呈现较高的正相关性,相似性高的区域主要分布在中东和中西部风险高值区,以及东北和东南部风险低值区。研究成果丰富了地下水环境风险理论,对下辽河平原地下水环境保护实践具有一定的理论和实践意义。

关键词:浅层地下水;环境风险;空间自相关分析;下辽河平原

doi: 10.11820/dlkxjz.2014.02.013

中图分类号:K903

文献标识码:A

1 引言

地下水是珍贵的淡水资源,在保障居民生活用水、保护地质环境和维持生态平衡方面发挥着不可替代的作用(程莉蓉等, 2009)。随着人口的快速增长,城市规模不断扩大,地下水开采量不断增加,人类活动造成的环境水文地质问题也日益严重(滕彦国等, 2012)。地下水系统内部结构不均一,外部环境复杂,当受到外界不确定因素的干扰时,会加剧地下水系统的不稳定性,增大地下水资源开发利用的风险(杜朝阳等, 2011),严重制约地下水功能的正常发挥。因此,开展地下水环境风险研究,对于地下水环境的保护与水资源的可持续开发利用极为重要。

当前,国内外对于风险评价的研究热点多集中在灾害风险(Chen et al, 2003; 黄崇福等, 2005; 廖永丰等, 2012)和生态风险(Landis, 2003; 陈辉等, 2006)等方面,形成了相对比较完善的理论基础。对于地下水风险的评价多集中于地下水污染风险评价(江剑等, 2010; 张学刚等, 2009)、地下水健康风

险评价(韩冰等, 2006; 张妍等, 2013)、地下水开发风险评价(Serageldin et al, 1995; 冶雪艳等, 2007)等,而对地下水环境综合风险评价的研究相对较少。

现有研究成果中,李绍飞等(2007)结合地下水水质和水量提出地下水环境风险评价的指标体系,但其评价指标中并未涉及人类对于地下水水质和水量所采取的保护措施;冯平等(2007)将突变理论引入到地下水环境风险评价,减少了地下水环境风险评价中权重赋值的主观性影响,为地下水环境风险评价提供了新途径,但其评价更多的是基于原有地下水评价思路,没有突出风险原理。李如忠等(2010)从水文地质条件与人类活动两方面构建指标体系,并将地下水风险定义为风险等级与风险重要性的乘积;金菊良等(2011)在其风险定义的基础上,运用模糊数学随机模型对地下水环境进行评价,以置信区间作为评价结果,更加符合实际情况,但其风险等级和风险重要性的划分多是基于自身经验和专家评判,导致等级和重要性划分的主观性较强。

地下水资源在人类不合理的开发利用下,会产

收稿日期:2013-05; 修订日期:2013-11。

基金项目:教育部博士点基金项目(20122136110003);国家自然科学基金项目(40501013)。

作者简介:孙才志(1970-),男,山东烟台人,教授,博导,主要从事地下水资源评价与管理研究,E-mail: suncaizhi@lnnu.edu.cn。

生一系列水文地质环境问题,导致生态环境的恶化,还会对人类生存和发展造成威胁,具有鲜明的自然、社会与经济属性,因此可将灾害理论应用到地下水相关研究中。下辽河平原作为辽宁省老工业基地的核心地区,虽地下水资源较为丰富,但长期不合理的开发利用,已导致地下水水质下降,并产生了一系列地质环境问题,如地下水位下降、湿地萎缩、地下水漏斗和海水入侵等。目前,有关下辽河平原地下水的研究主要有脆弱性研究(孙才志等, 2007)、恢复力研究(孙才志等, 2011a)、功能性评价(孙才志等, 2013)、敏感性评价(孙才志等, 2011b)和健康评价(孙才志等, 2009)等,这些研究对于下辽河平原地下水的管理和保护具有一定意义,但其研究都侧重于地下水评价的某些方面,应用灾害风险理论进行地下水环境风险评价的成果相对少见。

基于此,借鉴现有自然灾害风险理论,科学的界定地下水环境风险的概念和内涵,在前人研究基础上,构建符合现代风险分析模式的地下水环境风险评价指标体系和模型。综合考虑水文地质因素和人类活动因素,从地下水脆弱性、功能性与人类活动的胁迫性和适应性4个方面,对下辽河平原浅层地下水进行环境风险评价及其空间关联特征分析,以期丰富地下水环境风险理论,并为下辽河平原地下水环境保护提供决策依据。

2 数据与方法

2.1 研究区概况

下辽河平原作为辽宁省最大的平原,地处辽河中下游,在辽宁省中部呈北东—南西向分布。行政

区划上隶属于辽宁省铁岭市、沈阳市、抚顺市、辽阳市、鞍山市、营口市、盘锦市、锦州市和阜新市(图1a)。南北长约240 km,东西宽约为120~140 km,面积为 $2.65 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。本区三面环山,东依千山山脉,西靠医巫闾山,北部隔铁法波状丘陵与松辽平原相望,南临渤海的辽东湾。境内地貌类型多样,自北至南,从山前到中间,依次分布着剥蚀堆积地形的山前坡洪积扇裙和山前坡洪积倾斜平原、堆积地形的山前冲洪积微倾斜平原、河间冲积平原、海冲积三角洲平原等。地处温带半湿润半干旱季风气候区,多年平均降水量自南东向北西递减,由700~750 mm减至550 mm。

下辽河平原地表水网密集,主要有辽河—双台子河水系、浑河—太子河水系及大小凌河水系,是区域地下水汇聚的中心,最丰富的是大小凌河扇、浑河扇和太子河扇(图1b)。地下水资源丰富,是一座天然的地下水库,地下水天然补给量为 $51.20 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$,可采资源量为 $47.79 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ (水利部水资源司等, 2004),其中最具经济意义的是第四纪孔隙地下水。

区内地下水类型复杂,含水层结构层次较多,各个层次的地下水相互依存、相互补充,共同组成一个由补给区、径流区到排泄区的完整的大型地下水系统。按照水文地质单元划分为西部山前平原区、东部山前平原区、中部平原区和南部滨海平原区(图1b)。平原上部广泛分布有第四系松散岩类孔隙含水层,其含水层厚度大、分布稳定、水量丰富、开采方便,是区内最主要的地下水类型。东、西两侧山前倾斜平原的含水岩组以上更新统和全新统冲洪积层为主,含水层为中粗砂、砂砾石、砾卵石

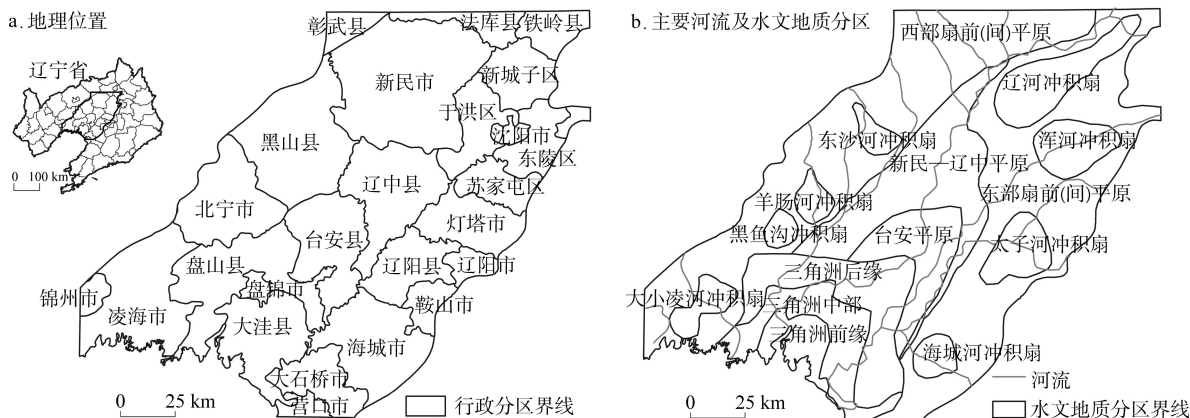


图1 下辽河平原地理位置(a)、主要河流及水文地质分区(b)

Fig.1 Location(a), main rivers, and divisions of hydrogeology(b) of the lower reach of Liao River Plain

层,其上为亚砂土、亚黏土覆盖。腹部平原的浅层地下水以上更新统冲积细砂、中细砂、中粗砂为主,表层覆盖亚砂土、粉砂或亚黏土层。

2.2 地下水环境风险概念界定及其属性内涵

地下水环境风险分析是近年在地下水污染风险、地下水健康风险评估的基础上发展起来的,目前有关地下水环境风险的概念还在不断探讨之中。地下水环境风险通常是指在地下水开发利用过程中,由于含水层之上的自然条件变化和人类活动而产生不利事件的可能性,以及由此造成的地下水系统本身及其周围环境的不确定性(杜朝阳等, 2011),是地下含水层固有脆弱性、功能性以及人类活动的胁迫性和适应性相互作用的综合结果,可以表示为以下函数关系:地下水环境风险= f (脆弱性, 功能性, 胁迫性, 适应性)。

地下水的脆弱性是污染物到达最上层含水层之上某特定位置的倾向性与可能性。地下水脆弱性分为本质脆弱性和特殊脆弱性(郑西来, 2009)。前者是指不考虑人类活动和污染源,只考虑水文地质内部因素的脆弱性,后者是指地下水对某一特定污染源或人类活动的脆弱性。评价的为地下水本质脆弱性。在国内也被称为地下水的易污染性(孙才志等, 1999)。含水层对于人类活动产生的污染物进入地下水具有自然保护作用,但由于自然保护能力的差异,地下水在有些地方更易遭受污染,地下水易污性就是反映这种自然保护能力的大小(董殿伟等, 2010)。地下水的功能性体现了地下水的价值,主要有以下3种价值:地下水的地质环境价值,地下水的生态环境维持价值和地下水的资源价值(陈超, 2012)。

地下水的胁迫性是指外界干扰(自然环境的变化和人类活动)作用于地下水系统的压力。地下水的适应性是指地下水系统对外界环境变化而进行的调整能力,包括地下水系统的恢复能力和人类的响应。脆弱性评价中已经包含了对地下水系统本身的评价,而在胁迫性及适应性评价中则侧重对人类活动的评价。

地下水环境有地域性、时效性和可变性的特点(董华等, 2008),因而地下水环境风险的属性内涵主要包括:① 自然属性。地下水系统本身对污染和人类开发利用所造成的破坏具有恢复能力,其能力因地制宜,主要取决于地下水系统的含水层厚度、净补给量等自然特性;② 社会属性。地下

水环境风险是由于人类不合理开发利用地下水所产生的地下水污染以及诱发的环境地质问题等;③ 不确定性。地下水系统本身是一个复杂的巨系统,加之人类活动干扰的不确定性,导致地下水环境风险具有不确定性;④ 动态性。地下水系统是一个开放的动态系统,它受到诸多不确定因素的影响而存在风险,影响系统的随机因素也是动态变化的。

2.3 研究方法和模型

2.3.1 地下水环境风险计算模型

在关于地下水污染风险(Civita et al, 2006)及自然灾害风险研究(Davidson et al, 2001)的基础上,对地下水环境风险采用如下模型计算:

$$R=V \times F \times S/A \quad (1)$$

式中: R 为地下水环境风险指数; V 为地下水的本质脆弱性(intrinsic vulnerability)指数; F 为功能性(function)指数; S 为胁迫性(stress)指数; A 为适应性(adaptability)指数。脆弱性、功能性、胁迫性和适应性指数皆采用加权综合指数法进行计算:

$$P=\sum_{i=1}^n w_i z_i \quad (2)$$

式中: P 为指数得分,无量纲; w_i 是因子 i 的权重,无量纲; z_i 是因子评分(标准化数据),无量纲。

权重作为评价时的参数,是不确定性研究的重要部分,如何确定权重对于降低风险评价中的不确定性至关重要。层次分析法是一种定性与定量相结合的主观赋权法,但它没有考虑到权重本身随样本数据的动态变化,使得评价结果的客观性受到影响;而熵值法是对不确定性的度量,它根据数据信息量的大小来判定其不确定性。因此,采用AHP和熵值法相结合对评价指标赋权,取其平均值来确定各指标的权重(丁晓静等, 2010)。

2.3.2 地下水环境风险空间自相关模型

近年来,空间自相关分析作为空间统计分析的重要组成部分,得到快速发展并应用到地理事物的空间关系分析中。空间自相关分析主要是研究地理现象在空间上的相关特性,包括正相关、负相关和随机。空间自相关主要有全局自相关和局部自相关(卢亚灵等, 2010)。

为更好地反映下辽河平原地下水环境风险的分布规律及集聚程度,采用空间统计学中的空间自相关分析进行分析,通过计算Moran's I 值来表示地下水环境风险的空间集聚特性:

$$I = \frac{n \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} (x_i - \bar{x})(x_j - \bar{x})}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$$

(3)

式中: n 为空间单元总数目; x_i 是观测值; \bar{x} 为 x_i 的平均值; w_{ij} 为研究范围内空间单元*i*与空间单元*j*($i, j=1, 2, 3, 4, \cdots, n$)的空间连接矩阵(卢亚灵等, 2010)。空间自相关分析在ArcGIS 10.0中完成。

2.4 指标体系的构建

以往的地下水环境风险评价主要从地下水水质、水量及水文地质因素和人类活动因素方面构建评价指标体系,但是这些研究主要是针对压力进行的风险评估,而忽略了系统对于风险的反馈作用。在综合考虑压力和响应的基础之上,结合下辽河平原的实际情况以及前人的相关研究,依据全面性、简明性、可操作性及灵活性等原则,共选取26个指标,建立下辽河平原地下水环境风险评价指标体系(表1)。

2.5 数据来源及处理

文中基础地理数据主要来自2010年Landsat ETM遥感影像解译数据、以及《辽宁省水资源公报》(2000-2012年)、《辽宁省水资源》和辽宁省水文水资源局提供的多年监测数据(主要监测数据包括辽宁省21个站点的地下水水位、各市地下水水质资料)。评价过程中,为弥补数据的不足,从《辽宁省国土资源地图集》中收集了相应的专题地图,如土壤类型分布图等。社会经济统计数据主要来自《辽宁省统计年鉴》(2012年)、《辽宁年鉴》(2012年)及研究区内各县统计年鉴。

文中有关地下水的数 据均采用多年平均值进行计算,遥感影像解译以ENVI 4.7软件为平台,以解译数据为基础计算植被覆盖指数、生物丰富度指数等。应用GIS软件,首先将各评价因子的数据层进行栅格化,然后对各指标数据层进行加权叠加计算,最后进行空间自相关分析研究,将研究区分为5 km×5 km的网格共1078个,运用空间连接功能进行格网赋值,将最终的风险结果数据加载到格网中进行分析。

3 结果与分析

3.1 地下水环境风险评价结果

全面揭示区内地下水环境风险的空间差异,是

表1 地下水环境风险评价指标体系

Tab.1 Evaluation index system of groundwater environmental risk

目标层	准则层	指标类型	指标层
地下水环境风险	脆弱性	含水层特性	渗透系数
			含水层岩性
			保护层厚度
		区域自然条件	地形坡度
			天然总补给量
			地下水埋深
	功能性	资源功能	土壤类型
			地下水供水比
			地下水开采模数
		生态功能	植被覆盖指数
			生物丰富度指数
			湿地占有面积
	胁迫性	地质环境功能	地下水漏斗面积比例
			海水入侵面积
		水质胁迫	工业废水排放总量
			生活污水排放总量
	适应性	水量胁迫	化肥施用折纯量
			水土流失程度
			水资源紧缺程度
			地下水超采模数
			干旱指数
			工业废水排放达标率
	人类响应		生活废水排放达标率
			废水治理设施数
			水土保持措施
			水利环保投资比重

科学地编制区内地下水污染防治规划的重要基础。依据相关数据对下辽河平原地下水脆弱性、功能性、胁迫性、适应性进行评价。运用公式(2)计算得到各指数大小及分布图(图2),其中脆弱性是在DRASTIC模型的基础上,参照郑西来(2009)关于脆弱性各指标的评分标准进行评分,其他指标均采用Min-Max标准化方法,将指标值转换为0~1区间的无量纲值进行计算,最后运用ArcGIS中的Natural Breaks(Jenks)功能将其划分为高、较高、中等、较低和低5级,并计算各等级的面积比例(表2)。

(1) 脆弱性

根据图2a及表2,地下水脆弱性指数高和较高地区主要分布在南部滨海三角洲地区、中部新民—辽中平原、辽中—台安平原部分地区、彰武县及大

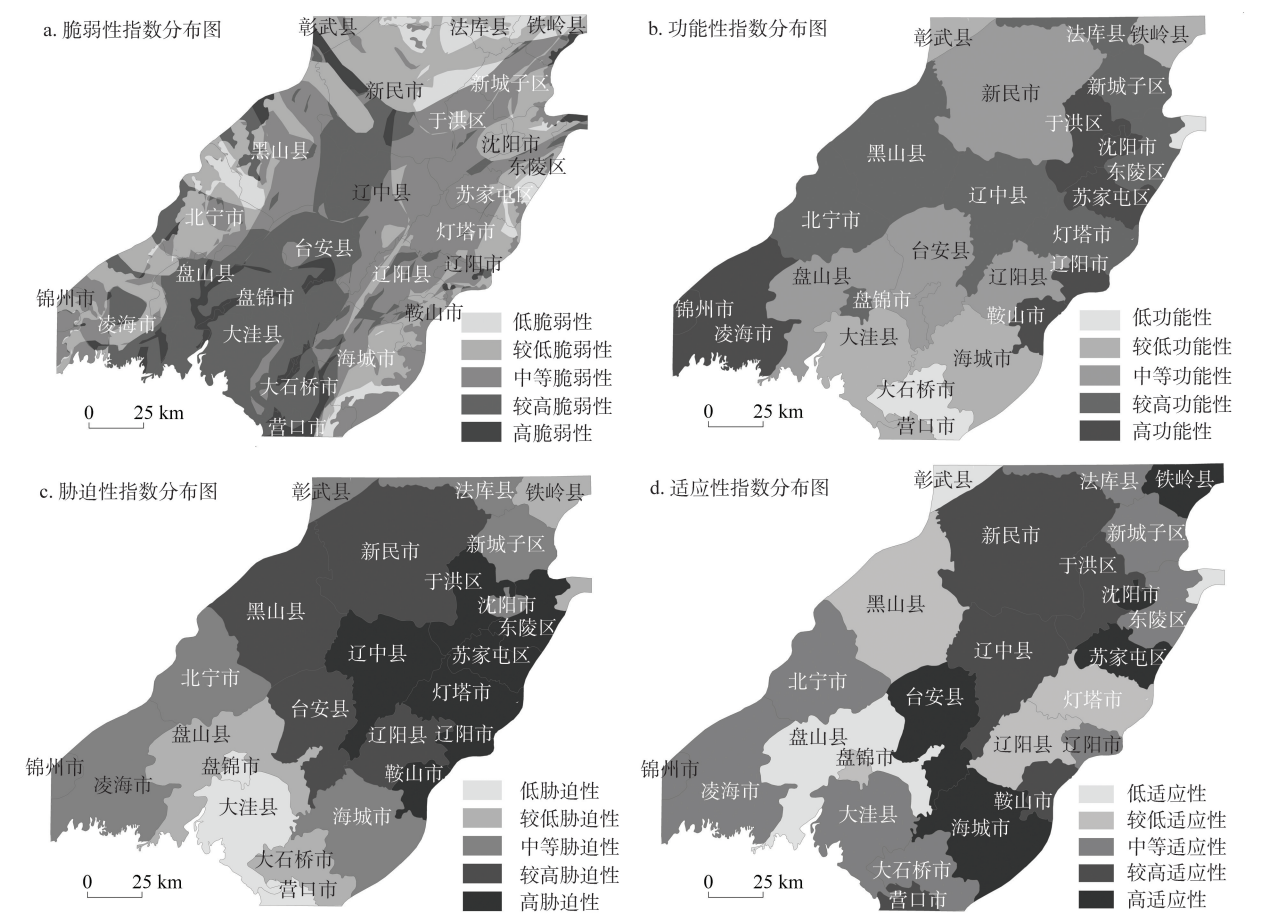


图2 下辽河平原地下水环境风险各指数分布图

Fig.2 Distribution of different index of groundwater environmental risk in the lower reach of Liaohe River Plain

表2 下辽河平原地下水环境风险各指数等级面积比例

Tab.2 Percentage of areas with different index grades of groundwater environmental risk in the lower reach of Liaohe River Plain

指数分类	等级大小				
	高/%	较高/%	中等/%	较低/%	低/%
脆弱性指数	5.04	33.35	35.25	17.64	8.72
功能性指数	17.00	28.53	37.00	13.98	3.59
胁迫性指数	21.31	31.23	27.65	12.76	6.85
适应性指数	16.91	26.34	33.96	13.87	8.92
地下水环境风险	6.79	18.96	37.37	21.98	14.90

小凌河冲积扇北部,其面积占总面积的38.39%。平原区土壤为亚砂土和亚粘土,尽管含水层渗透系数(地下水水力梯度等于1时的渗透速度,表征含水层的透水能力)小,但地下水位埋深较浅,污染物质渗入地下含水层的可能性极大;南部沿海地区及下辽河周边地区保护层厚度较小,自净能力差,致该区地下水污染敏感性较高。

脆弱性指数中等地区,主要分布于黑山县东部和北部、锦州市、浑河下游平原区及基岩裸露的外围低山丘陵区,占总面积的35.25%;这类地区大多为河流冲积平原,地下水资源模数(单位地下水盆地面积上单位时间内的地下水资源量)高,保护层厚且自净能力强,是地下水脆弱性处于中等水平的重要原因。

脆弱性指数低和较低地区,主要分布于辽河冲积扇、海河冲积扇、东沙河冲积扇和羊肠河冲积扇地区,占研究区总面积的26.36%;由于该类区内多河流,大大降低了污染物的浓度,含水层和保护层厚度较大,污染物质的渗入时间较长,大大削减了污染物向下的迁移量。

全区地下水脆弱性高值及中等地区所占面积较大,整体上处于脆弱区。

(2) 功能性

根据图2b及表2,地下水功能性指数高和较高区主要位于沈阳市及其各区,辽中县、辽阳市、灯塔

市、鞍山市、盘锦市、锦州市及其所辖县区,面积占研究区总面积的45.53%。该区地下水功能指数较高主要是由于其资源功能及生态功能。沈阳市作为下辽河平原的经济中心,其经济和人口密度都较高,地下水的开发利用率也较高,致使该区地下水具有较高的资源功能;盘锦作为著名的湿地之都,湿地面积占市域面积的80%,地下水具有较高的生态功能。

地下水功能性指数中等的地区主要位于新城子区、新民市、法库县、铁岭县、盘山县、台安县、辽阳县,占总面积的37%,由于这些地区地下水开发利用程度较高,且在辽阳县等地已形成地下水超采漏斗。

功能性指数较低区主要位于彰武县、抚顺县、大洼县、海城市、营口市、大石桥市,占研究区总面积的17.57%,这些地区大部分位于沿海,生活和工业用水主要来自地表水,减少了对地下水的消耗及其功能价值。

(3) 胁迫性

根据图2c及表2,地下水胁迫性指数高和较高地区主要分布在于洪区、苏家屯区、东陵区、辽中县、新民市、鞍山市、台安县、黑山县、辽阳市、灯塔市和辽阳县,约占总面积的52.54%。这一地区是下辽河平原区经济最发达的地区,人口密集,工矿企业较多,生产和生活污水排放量均较高,且地下水开发利用程度亦较高。

胁迫性指数中等区主要分布在北宁市、凌海市、锦州市、海城市、沈阳市、新城子区、法库县和彰武县,占总面积的27.65%。其中海城地区工业污水排放量居研究区首位。

地下水胁迫性指数较低和低区主要分布在营口市、大石桥市、盘锦市、大洼县、盘山县,占面积的19.61%,主要是由于污水排放量较低。虽部分沿海地区有海水入侵,地下水矿化度较高,水质胁迫相对较高,但并没有造成水量胁迫。

总体看,地下水胁迫指数值以沈阳为中心,向四周逐渐减小,且城市一般高于乡镇,这与城市人口密集,需水量大和废污水排放量大直接关系。

(4) 适应性

根据图2d和表2,地下水适应性高和较高的地区主要位于沈阳市、苏家屯区、于洪区、新民市、辽中县、铁岭县、台安县、鞍山市、海城市和营口市,其面积约占研究区总面积的43.25%。这些区域对水利环保建设比较重视,其中鞍山市水利环保投资比重位居研究区首位。

适应性中等的地区主要位于大石桥市、法库县、东陵区、新城子区、大洼县、锦州市、凌海市、北宁市和辽阳县,面积占研究区总面积的33.96%,环保设施投资建设比重处于一般水平。

适应性低和较低的地区有彰武县、黑山县、盘锦市、盘山县、灯塔市和抚顺县,占研究区总面积的22.79%,其地下水保护措施相对较落后,水利环保投资比重亦较低。

将地下水脆弱性、功能性指数、胁迫性、适应性指数代入公式(1)进行计算,得到下辽河平原地下水环境风险指数值和分布图(表2,图3a)。

根据图3a和表2,地下水环境风险等级高和较高的地区主要分布于于洪区、苏家屯区、东陵区、辽阳县、灯塔市、辽阳市、盘山县、黑山县及凌海市,占研究区总面积的25.75%。这类区域均为脆弱性较

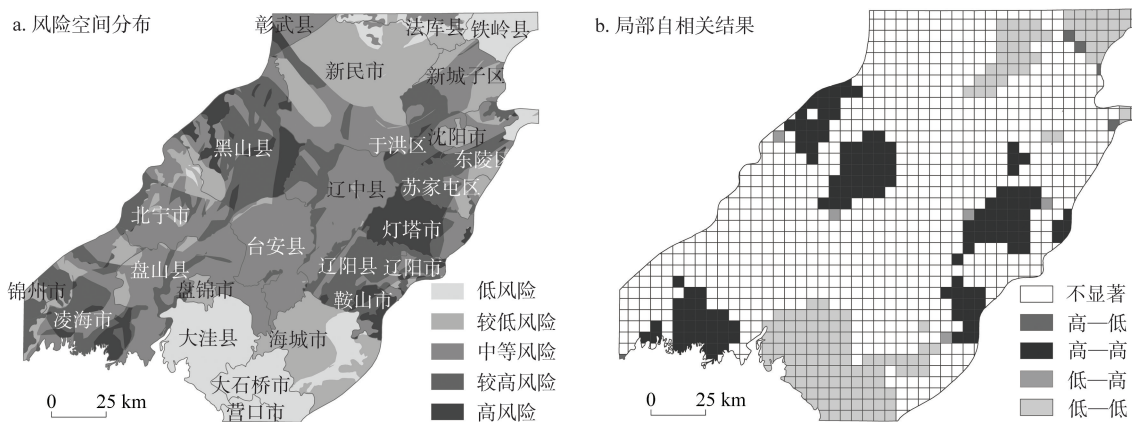


图3 下辽河平原地下水环境风险空间分布(a)及其局部自相关结果(b)

Fig.3 Distribution of groundwater environmental risk(a) and its local autocorrelation(b) in the lower reach of Liaohe River Plain

高,功能性较强区,其中苏家屯区、新民市适应性指数较高,但脆弱性和胁迫性指数较大;苏家屯区地下水综合功能强是导致其风险较大的主要原因。

风险等级中等的地区主要分布彰武县、新城子区、辽中县、台安县、北宁市、盘山县,占研究区总面积的37.37%。这类地区大部分地下水适应性处于低或较低水平,对于地下水造成的一系列问题没有及时有效的采取措施。

风险等级低和较低的地区主要分布于营口市、大石桥市、大洼县、盘锦市、海城市、铁岭县、法库县、沈阳市区、新城子区西部,占研究区总面积的36.88%,这类地区虽脆弱性较高,但其环保意识亦较强,能合理有效地开发利用地下水,因此降低了地下水环境的风险。

3.2 地下水环境风险的空间自相关分析

运用ArcGIS中空间统计工具进行空间自相关计算,下辽河平原地下水环境风险全局Moran's I 值为 $0.8167 < 1$,反映研究区内的地下水环境风险在空间上具有较高的正相关性。

局部空间自相关分析结果(图3b)显示,研究区内地下水环境风险高一高值区明显集聚在下辽河平原中部的新民市东北部、灯塔市、辽中县西部与黑山县部分地区,以及凌海市东南部。这些地区和相邻地区的地下水环境风险较高。主要是由于当地经济的快速发展,城市化水平提高,大量人口和工业开始从沈阳市老城区向于洪区、新民市等地迁移。一方面,沈阳市城区及近郊由于土壤粘性较差,地表植被破坏严重,地下水污染也较严重;另一方面,新民市则逐渐由农业大县转变为工农业并重地区,工业废水的污染及农业不合理灌溉导致地下水水质下降,增大了地下水环境的风险。

地下水环境风险的低—低值区明显集聚分布在研究区东北部的法库地区、南部大洼县与东南部的海城市部分地区,以及大石桥地区,这类区域和相邻地区的地下水环境风险指数均较低。法库地区地表水丰富,不仅能够满足生活和工农业用水,还可以补给地下水;而营口地区虽然水资源短缺,但较重视水资源的保护,建立了多处污水处理厂,关闭了多处地下水取水工程,转而引大辽河上游地表水,并加强中水利用,有效地减轻了地下水环境风险。

总体来看,相关性显著的地区大都具有较强的正相关性(高一高、低—低),而负相关性较强的区域

(高一低、低—高)仅零星分布。

地下水作为一个动态的开放系统,其演变与相邻圈层存在密切联系。地下水环境风险的形成与人类活动对地下水的开发利用有关,而人类活动在空间上存在一定的集聚现象,从而导致地下水环境风险在空间上存在集聚现象。

4 结论及建议

下辽河平原作为一个完整的水文地质单元,区域水文地质条件比较复杂(李凯等,2009),治理和修复难度大、成本高、周期长,一旦破坏,所造成的环境与生态破坏往往难以逆转。将风险理论引入地下水环境风险评价,通过建立地下水环境风险的指标体系和模型,计算不同地区地下水系统环境的相对风险大小,并运用ArcGIS技术计算和绘制下辽河平原地下水系统环境风险分布图,直地表达区域内地下水环境风险的空间分异,其评价结果可为地下水的开发利用及保护管理提供科学依据。根据研究结果,提出以下建议:

(1) 在地下水水质保护方面,应加大对生产和生活用水所产生的废污水的处理力度和范围;要研究合理的化肥、农药施用量和施用方法;科学种田,采取循环经济和集约化的农业生产方式,减少农业、种植业和养殖业对地下水及整个水资源的污染。在水量分配上,要将地下水资源量进行合理定额分配,确定各区域生活、生产消耗的地下水取水量份额。

(2) 对于地下水本质脆弱性指数较高的地区,即易污染地区,要严格控制其开发利用量,应首先确定地下水可持续利用条件下的可开采量,按照可开采量进行地下水配置和严格管理。对于已造成地下水不可持续利用并引发生态、环境破坏的超采地区,在地表水可替代的情况下,应优先使用地表水。

(3) 对于目前人类不合理开发利用地下水造成的邻近辽河、浑河取水的沈阳漏斗区,邻近太子河取水的首山漏斗区,以及沿海的海水入侵地区,应严格控制其周围地区地下水的开采量,调整开采布局,运用人工回灌及地下水库等措施补给地下水,防止漏斗区及海水入侵区的面积进一步扩大,并对其周围的地表水进行保护,以防止污染地表水补给地下含水层,造成地下水的再次污染。

不确定评价是环境风险分析的重要环节。但限于资料,没有考虑各指标的随机性和模糊性,将其作为确定性指标处理,在一定程度上影响到评价结果的科学性与可靠性,随着资料的不断完善,将进一步开展基于不确定指标的地下水环境风险评价。

参考文献(References)

- 陈超. 2012. 基于GIS的第四系地下水资源价值研究: 以北京市为例[D]. 北京: 中国地质大学. [Chen C. 2012. Research on the value of quaternary groundwater based on GIS: with Beijing as the example[D]. Beijing, China: China University of Geosciences.]
- 陈辉, 刘劲松, 曹宇, 等. 2006. 生态风险评价研究进展. 生态学报, 26(5): 1558-1566. [Chen H, Liu J S, Cao Y, et al. 2006. Progresses of ecological risk assessment. *Acta Ecologica Sinica*, 26(5): 1558-1566.]
- 程莉蓉, 王金生, 李云生. 2009. 关于我国地下水水质保护的思考与建议. 北京师范大学: 自然科学版, 45(5-6): 564-567. [Cheng L R, Wang J S, Li Y S. 2009. On the groundwater protection strategies in China. *Journal of Beijing Normal University: Natural Science*, 45(5-6): 564-567.]
- 丁晓静, 王耕. 2010. 基于AHP和熵值法的辽宁省城市生态安全评价. 环境科学与管理, 35(12): 172-174. [Ding X J, Wang G. 2010. Ecological security assessment of urban eco-system in Liaoning Province based on AHP and the entropy method. *Environmental Science and Management*, 35(12): 172-174.]
- 董殿伟, 江剑, 周磊, 等. 2010. DRASTIC方法在北京平原区地下水易污性评价中的应用. 北京水务, (6): 22-25. [Dong D W, Jiang J, Zhou L, et al. 2010. The DRASTIC method application in the Beijing plain groundwater pollution evaluation. *Beijing Water*, (6): 22-25.]
- 董华, 张发旺, 程彦培, 等. 2008. 论地下水环境系统内涵及其编图. 南水北调与水利科技, 6(6): 44-46. [Dong H, Zhang F W, Cheng Y P, et al. 2008. Groundwater environmental system connotation and its mapping. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 6(6): 44-46.]
- 杜朝阳, 钟华平. 2011. 地下水系统风险分析研究进展. 水科学进展, 22(3): 437-444. [Du C Y, Zhong H P. 2011. Advance in risk analysis of groundwater system. *Advances in Water Science*, 22(3): 437-444.]
- 冯平, 李绍飞, 李健柱. 2007. 基于突变理论的地下水环境风险评价. 自然灾害学报, 17(2): 13-18. [Feng P, Li S F, Li J Z. 2007. Catastrophe theory-based risk evaluation of groundwater environment. *Journal of Natural Disasters*, 17(2): 13-18.]
- 韩冰, 何江涛, 陈鸿汉, 等. 2006. 地下水有机污染人体健康风险评价初探. 地学前缘, 13(1): 224-229. [Han B, He J T, Chen H H, et al. 2006. Primary study of health-based risk assessment of organic pollution in groundwater. *Earth Science Frontiers*, 13(1): 224-229.]
- 黄崇福. 2005. 自然灾害风险评价: 理论与实践. 北京: 科学出版社. [Huang C F. 2005. Risk assessment of natural disaster: theory & practice. Beijing, China: Science Press.]
- 江剑, 董殿伟, 杨冠宁, 等. 2010. 北京市海淀区地下水污染风险性评价. 城市地质, 5(2): 14-18. [Jiang J, Dong D W, Yang G N, et al. 2010. Risk assessment of groundwater pollution of Haidian District of Beijing. *Urban Geology*, 5(2): 14-18.]
- 金菊良, 刘丽, 汪明武, 等. 2011. 基于三角模糊数随机模拟的地下水环境系统综合风险评价模型. 地理科学, 31(2): 143-147. [Jin J L, Liu L, Wang M W. 2011. Comprehensive risk assessment method for groundwater environment system based on stochastic simulation and triangular fuzzy numbers. *Scientia Geographica Sinica*, 31(2): 143-147.]
- 李凯, 卞玉梅, 杨静, 等. 2009. 下辽河平原地下水多年动态变化特征分析. 地质与资源, 18(2): 140-143. [Li K, Bian Y M, Yang J, et al. 2009. Analysis on the multi-year variations of groundwater in lower Liaohe Plain. *Geology and Resources*, 18(2): 140-143.]
- 李如忠, 汪明武, 金菊良. 2010. 地下水环境风险的模糊多指标分析方法. 地理科学, 30(2): 229-234. [Li R Z, Wang M W, Jin J L. 2010. Multivariable fuzzy analysis method for groundwater environmental risk. *Scientia Geographica Sinica*, 30(2): 229-234.]
- 李绍飞, 冯平, 林超. 2007. 地下水环境风险评价指标体系的探讨与应用. 干旱区资源与环境, 21(1): 38-43. [Li S F, Feng P, Lin C. 2007. Investigation on the index system of groundwater environment risk and its application. *Journal of Arid Resources and Environment*, 21(1): 38-43.]
- 廖永丰, 聂承静, 杨林生, 等. 2012. 洪涝灾害风险监测预警评估综述. 地理科学进展, 31(3): 361-367. [Liao Y F, Nie C J, Yang L S, et al. 2012. An overview of the risk assessment of flood disaster. *Progress in Geography*, 31(3): 361-367.]
- 卢亚灵, 颜磊, 许学工. 2010. 渤海地区生态脆弱性评价及其空间自相关分析. 资源科学, 32(2): 303-308. [Lu Y L, Yan L, Xu X G. 2010. Ecological vulnerability assessment and spatial auto-correlation analysis over the Bohai

- Rim Region. *Resources Science*, 32(2): 303-308.]
- 水利部水资源司, 南京水利科学研究院. 2004. 21世纪初期中国地下水资源开发利用. 北京: 中国水利水电出版社. [Water Resources Department of Water Resources Ministry of China, Nanjing Hydraulic Research Institute. 2004. Development and utilization of groundwater resources in the early 21 century in China. Beijing, China: China Water & Power Press.]
- 孙才志, 潘俊. 1999. 地下水脆弱性的概念、评价方法与研究前景. *水科学进展*, 10(4): 444-449. [Sun C Z, Pan J. 1999. Concept and assessment of groundwater vulnerability and its future prospect. *Advances in Water Science*, 10(4): 444-449.]
- 孙才志, 左海军, 栾天新. 2007. 下辽河平原地下水脆弱性研究. *吉林大学学报: 地球科学版*, 37(5): 943-948. [Sun C Z, Zuo H J, Luan T X. 2007. Research on groundwater vulnerability assessment of the lower Liaohe River Plain. *Journal of Jilin University: Earth Science Edition*, 37(5): 943-948.]
- 孙才志, 刘玉玉. 2009. 地下水生态系统健康评价指标体系的构建. *生态学报*, 29(10): 5665-5674. [Sun C Z, Liu Y Y. 2009. Construction of evaluation index system for groundwater ecosystem health assessment. *Acta Ecologica Sinica*, 29(10): 5665-5674.]
- 孙才志, 胡冬玲, 杨磊. 2011a. 下辽河平原地下水恢复力研究. *水利水电科技进展*, 31(5): 5-10. [Sun C Z, Hu D L, Yang L. 2011a. Recovery capacity of groundwater system in lower Liaohe River Plain. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 31(5): 5-10.]
- 孙才志, 杨磊, 胡冬玲. 2011b. 基于GIS的下辽河平原地下水生态敏感性评价. *生态学报*, 31(21): 7428-7439. [Sun C Z, Yang L, Hu D L. 2011b. Groundwater ecological sensitivity assessment in the lower Liaohe River Plain based on GIS technique. *Acta Ecologica Sinica*, 31(21): 7428-7439.]
- 孙才志, 李秀明. 2013. 基于ArcGIS的下辽河平原地下水功能评价. *地理科学*, 33(2): 174-180. [Sun C Z, Li X M. 2013. Groundwater function assessment based on ArcGIS in the lower reach of the Liaohe River Plain. *Scientia Geographica Sinica*, 33(2): 174-180.]
- 滕彦国, 苏洁, 翟远征, 等. 2012. 地下水污染风险评价的迭置指数法研究综述. *地球科学进展*, 27(10): 1140-1146. [Teng Y G, Su J, Zhai Y Z, et al. 2012. A review on the overlay and index method for groundwater pollution risk assessment. *Advances in Earth Science*, 27(10): 1140-1146.]
- 冶雪艳, 赵坤, 杜新强, 等. 2007. 突变理论在地下水开发风险评价中的应用研究. *人民黄河*, 29(10): 47-48. [Ye X Y, Zhao K, Du X Q, et al. 2007. The application of catastrophe theory in risk assessment of groundwater development. *Yellow River*, 29(10): 47-48.]
- 张学刚, 毛媛媛, 李致家, 等. 2009. 张集地区地下水易污性及污染风险评价. *水文地质工程地质*, 36(1): 51-55. [Zhang X G, Mao Y Y, Li Z J, et al. 2009. Assessment of groundwater vulnerability and risk to pollution in Zhangji. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 36(1): 51-55.]
- 张妍, 李发东, 欧阳竹, 等. 2013. 黄河下游引黄灌区地下水中金属分布及健康风险评估. *环境学报*, 34(1): 121-128. [Zhang Y, Li F D, Ouyang Z, et al. 2013. Distribution and health risk assessment of heavy metals of groundwater in the irrigation district of the lower reaches of Yellow River. *Environment Science*, 34(1): 121-128.]
- 郑西来. 2009. 地下水污染控制. 武汉: 华中科技大学出版社. [Zheng X L. 2009. Groundwater pollution control. Wuhan, China: Huazhong Science and Technology Publishing House.]
- Civita M V, Maio M D. 2006. Assessment groundwater contamination risk using ArcInfo via GRID function[J/OL]. May 2, 2006 [December 20, 2012]. <http://proceedings.esri.com/library/userconf/proc97/proc97/to600/pap591/p591.htm>
- Chen K, Blong R. 2003. Towards an integrated approach to natural hazards risk assessment using GIS: with reference to bushfires. *Environmental Management*, 31(4): 546-560.
- Davidson R A, Lamber K B. 2001. Comparing the hurricane disaster risk of US coastal counties. *Natural Hazards Review*, 2(3): 132-142.
- Serageldin I. 1995. Towards sustainable management of water resource. Washington DC: World Bank.
- Landis W G. 2003. The frontier in ecological risk assessment at expanding spatial and temporal scales. *Human and Ecological Risk Assessment*, 9(6): 1415-1424.

Environmental risk evaluation of shallow groundwater and its spatial auto-correlation in lower reach of Liaohe River Plain

SUN Caizhi, ZHU Jing

(Urban and Environmental College, Liaoning Normal University, Dalian 116029, Liaoning, China)

Abstract: As the economies are in the fast development, disasters occur more frequently. Evaluation, monitoring, and early warning of disaster risks are an important way to reduce the losses caused by the disasters. So it is one of the key topics in the current disaster research. As a major source of water in northern China, groundwater provides resource and ecological and geo-environmental functions. However, groundwater systems in northern China are being threatened by high population density, rapid urbanization and industrialization. Generally speaking, groundwater has been damaged to different degrees, which resulted in the decrease or complete loss of the functions of groundwater systems. So the research of groundwater environmental risk has great practical significance. In this article, the lower reach of Liaohe River Plain was chosen as a study area, and the shallow groundwater system was taken as a research object. The study area contains a large Quaternary groundwater system with characteristics typical of northern China. Social-economic and water environmental data of the Liaohe River Plain in 2012 were used in the study. Although many studies on groundwater have been conducted, few theories of groundwater environmental risk and methods of protection were developed at the groundwater system scale. Drawing lessons from modern hazard and environmental risk theories and methods, based on the definitions of groundwater environmental risks, we built an evaluation index system and an evaluation model for groundwater environmental risks from the aspects such as vulnerability, functionality, stress and adaptability. Using GIS spatial analysis method to evaluate the groundwater environmental risks in this region, we carried out spatial auto-correlation analysis. The results show that: 63.12% of the whole groundwater environment is facing a mid-level risk. In detail, the areas with extreme high risk accounts for 6.79%, the areas with high risk 18.96%, the areas with moderate risk 37.37%, the areas with light risk 21.98%, and the areas with slight risk 14.90%. Most high risk areas are mainly in the northeast of Xinmin City, Dengta City, west of Liaozhong County, parts of Heishan County and southeast of Linghai City. The risk of the study area shows a relatively high degree of positive correlation. The high correlation areas are mainly distributed in mid-east and mid-west of the high-risk areas and the northeast and southeast of low-risk areas. Uncertainty evaluation is an important part of the environmental risk analysis. But due to limited data, we didn't consider the indexes of randomness and fuzziness, which to a certain extent affects the scientific nature and reliability of the evaluation results. With constant improvement on the information sources, more studies will be done to include uncertainty index of groundwater environmental risk evaluation. The specific purpose of this study is to investigate measures to protect the three functions of the groundwater systems based on groundwater system risk evaluation. This study is of great significance to the enrichment of groundwater environmental risk theories and methods, and it also helps with making scientific decisions for the protection of the groundwater system of the lower reach of Liao River Plain and similar areas.

Key words: shallow groundwater; environmental risk; spatial auto-correlation; lower reach of Liaohe River Plain