DOI: 10.5846/stxb201411202304
奚旭,孙才志,吴彤,郑德凤.下辽河平原地下水脆弱性的时空演变.生态学报,2016,36(10): - .
Xi X, Sun C Z, Wu T, Zheng D F.Spatial-temporal Evolution of Groundwater Vulnerability in the Lower Reaches of the Liaohe River Plain.Acta Ecologica Sinica,2016,36(10): - .

下辽河平原地下水脆弱性的时空演变

奚　旭,孙才志*,吴　彤,郑德凤
辽宁师范大学城市与环境学院,大连　116029

摘要:地下水脆弱性受相关因子变化的影响,在时空分布上具有动态变化性,因此分析地下水脆弱性的时空演变及结构变化规律对于地下水有针对性地污染防治具有重要意义。以下辽河平原为研究区,选取 1991、2000 和 2010 年的相关人为因子参数,结合 DRASTIC 模型计算这三个年份的地下水脆弱性综合指数,利用 ArcGIS 的地理统计工具分析地下水脆弱性的演变状况。在此基础上计算 G 指数得到地下水脆弱性的空间热冷点分布,结合重心和标准差椭圆对热点的变动情况进行定量分析。研究结果表明:(1)1991 年地下水脆弱性以较低脆弱性和高脆弱性区为主,分别占研究区面积的 36.5%和 31.3%,到 2000 年以一般脆弱性和较高脆弱性区为主,面积比例分别达到 31.6%和 25.9%,发展到 2010 年主要以较高脆弱性为主,面积比例占 41.71%;(2)1991—2010 年下辽河平原地下水脆弱性总体上呈现先增后减的趋势,沈阳市及周边长期处于高值状况,南部沿海地区逐步演化为高值脆弱性区;(3)1991 和 2000 年的热点集中区主要分布在新民市和辽阳县的西部地带,期间变化较小,2010 年的滨海地区也发展成热点集中区,各时期内冷点分布面积比较少,且零散;(4)1991 年至 2000 年,热点重心向西南方向位移了 2.264 km,热点分布格局进一步趋于东-西方向;2000 年到 2010 年,热点重心向西南方向位移了 30.787km,标准差椭圆长轴旋转角逆时针转动了 32.44 度,整体热点分布格局为东北—西南方向。

关键词:下辽河平原;地下水脆弱性;时空演变;热点;重心

Spatial-temporal Evolution of Groundwater Vulnerability in the Lower Reaches of the Liaohe River Plain

XI Xu, SUN Caizhi, WU Tong, ZHENG Defeng
College of Urban and Environment, Liaoning Normal University, Dalian 116029, *China*

Abstract: A study was carried out to assess groundwater vulnerability in the lower reaches of the Liaohe River Plain over a number of years. Groundwater bodies with a relatively stable quantity of water, good water quality, and a high degree of resistance to pollution are widely distributed throughout the world, and they have many different roles, including as domestic water supply, in economic development, integrity maintenance of the geological environment, and ecological balance. The rapid development of the social economy and subsequent increased demand for natural resources has resulted in an increased pressure on groundwater and has led to its over use. Consequently, groundwater systems in many regions and countries all over the world are exposed to varying degrees of pollution and destruction, resulting in an increasingly pronounced contradiction between supply and demand for water resources. Due to changes in the parameters affecting ground water, the spatial-temporal distribution of groundwater vulnerability is dynamic; hence, the analysis of spatial-temporal evolution and its structural variation is important when attempting to prevent groundwater pollution. The parameters affecting ground water, combined with the DRASTIC model and human factors, were used to calculate groundwater vulnerability in the lower reaches of the Liaohe River Plain in 1991, 2000, and 2010. We also analyzed the evolution of groundwater

基金项目:教育部高等学校博士点基金(2012123611000);国家自然科学基金(40501013)
收稿日期:2014-11-20;　　**网络出版日期**:2015-00-00
* 通讯作者 Corresponding author.E-mail: suncaizhi@lnnu.edu.cn

vulnerability using ArcGIS and the change in the proportion of different levels of groundwater vulnerability. The hot and cold spots for groundwater vulnerability were calculated using Getis-Ord G_i^*, and the dynamic changes in hotspots were quantitatively analyzed using gravity and the standard deviational ellipse method. In 1991, the groundwater vulnerability was low in 36.5% of the study area and high in 31.3% of the study area. In 2000, the moderate and high groundwater vulnerability areas reached 31.6% and 25.9% of the study area, respectively, while in 2010, groundwater vulnerability was high in 41.71% of the study area. Groundwater vulnerability in the study area showed a decreasing trend from 1991 to 2010 High groundwater vulnerability areas were diffused from the center of Shenyang to South coast. Hotspots were mainly distributed in the western zone of Xinmin City and Liaoyang County in 1991 and 2000, and only small changes occurred during this period, whereas the coastal areas became hotspots in 2010. Cold spots were relatively small and fragmented from 1991 to 2000. During the same period, the gravity center of hotspots shifted 2,264 km southwest, and the hotspot distribution pattern had an east-west direction. From 2000 to 2010, the gravity center of hotspots shifted 30,787 km southwest, the long axis of standard deviation ellipse was rotated counterclockwise by 32.44°, and the overall distribution pattern for hotspots had a northeast-southwest direction. In addition, the improved DRASTIC method that was used to investigate nitrogen concentration at the monitoring points and calculate the corresponding vulnerability ratio proved to be an important analysis tool. Spatial-temporal evolution of groundwater vulnerability, when investigated through the assessment of groundwater vulnerability and hot-spot distribution, may improve the utilization of groundwater and lead to the development of a protection plan for the study area.

Key Words: lower reaches of Liaohe River Plain; groundwater vulnerability; temporal and spatial evolution; hot spot; gravity center

地下水是工农业生产和人畜生活的重要水源,在干旱、半干旱地区具有战略安全保障作用,且是维持水土质量、河流湖泊、地质环境、植被以及湿地生态系统安全的关键因素[1]。随着国民经济建设的快速发展与人们生活水平的提高,水资源供需矛盾日益突出。地下水作为丰富的自然资源被大量开发利用,从而导致地下水环境污染与破坏问题日益严重。地下水脆弱性作为地下水污染防治的基本工作由此展开,成为近年来水文地质领域的热点研究方向。

自 Margat 于 1968 年最先提出地下水脆弱性概念以来,经过各国学者多年研究发展,其概念和研究方法不断得到丰富与发展[2,3],目前大多数学者认为,地下水脆弱性是指污染物从主要含水层顶部以上某位置进入后,到达地下水系统的某个特定位置的倾向或可能性。近年来,伴随 GIS 等辅助工具的应用,国内外在地下水脆弱性研究方向都取得了丰富的研究成果,国外开展研究较早,目前研究内容非常多元化,如 Li 和 Merchant[4]用 DRASTIC 模型和硝酸盐浓度资料研究了气候变化和土地利用对地下水脆弱性的影响;Ducci 和 Sellerino[5]根据指标所在地层中的深度不同,采用多种评价方法建立了地下水脆弱性的三维分布图;Güler 等[6]同时采用通用 DRASTIC 模型和农药 DRASTIC 模型对土耳其的地中海沿海岸地带由土地利用与海水入侵引起的地下水脆弱性进行了对比评价;此外,模糊评价[7]、敏感性分析[8]、逻辑回归模型[9]等多种数学方法被应用到地下水脆弱性评价过程中。我国学者目前主要致力于区域地下水脆弱性评价,并在评价过程中注重科学理论性的提升,如李定龙等[10]根据敏感性分析方法遴选了研究区主要影响因子;孟宪萌、束龙仓等[11]将熵值法引入 DRASTIC 模型使权重确定更合理;陈守煜等[12]、孙才志等[13]、张小凌等[14]等用模糊综合评价法使评价结果更加客观合理。

多元化的评价方法使评价结果更加科学合理,但地下水系统是个开放的系统,受土地利用、人口变化、污染物排放等人为因素的长期影响,致使影响地下水脆弱性的相关因子的状况发生变化,因此地下水脆弱性在时空分布上具有复杂性、随机不确定性和动态变化性等特点,决策者如果仅从现状年或多年平均地下水脆弱性分布状况提出地下水保护方案是片面的,且地下水脆弱性在空间分布上具有连续性,受人类活动、自然变化

等因素的影响,地下水脆弱性在不同时期具有不同规模和不同程度的空间集聚性。鉴于此,对地下水脆弱性评价时考虑时间效应,分析其时空演变状况以及热点分布格局的动态变化具有重要的现实意义。

下辽河平原是辽宁省老工业基地的核心地区,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[15],地下水环境治理与保护迫在眉睫。孙才志等[13,16]在水文地质分区的基础上多角度对下辽河平原进行了地下水脆弱性评价,曾庆雨等[17]在考虑水量因素的基础上建模对下辽河平原进行了地下水脆弱性评价,这些研究对当地地下水管理与保护具有一定意义,但没有考虑时间因素的影响,研究成果比较片面。

鉴于此,本研究在 DRASTIC 模型基础上结合人为影响因子构建地下水脆弱性评价指标体系,选取研究区内 1991、2000 和 2010 这三年的相关参数计算出地下水脆弱性指数。利用 ArcGIS 的空间分析与制图功能得出下辽河平原在不同年份的地下水脆弱性空间分布状况,在此基础上通过计算 G 指数得到地下水脆弱性的冷热点分布图,结合重心与标准差椭圆方法定量分析热点格局的变动。研究成果对研究区地下水有针对性地开发利用和保护以及地下水环境污染治理具有实际意义。

1　研究方法与数据来源

1.1　地下水脆弱性评价方法——DRASTIC 模型

DRASTIC 模型[18]是国际上应用最广泛的地下水脆弱性评价方法,该模型由 7 项水文地质参数组成:地下水位埋深(D)、净补给量(R)、含水层介质类型(A)、土壤介质类型(S)、地形坡度(T)、渗流区介质类型(I)以及含水层水力传导系数(C),7 项参数按其对地下水脆弱性的影响程度不同,分别被赋予固定权重值:5、4、3、2、1、5、3。参考文献[13]、[19],本次研究在 DRASTIC 模型基础上,根据指标数据的可得性与代表性,选取人均水资源量(P)、耕地比(X)、施肥强度(F)和单位面积工业废水排放量(G)作为特殊脆弱性指标,并赋予相对权重值:6、7、6、7。每个指标根据其变化范围和内在属性进行脆弱性等级划分,见表 1、表 2 和表 3。将本质脆弱性与特殊脆弱性分别赋予 0.4 和 0.6 的权重[13](考虑地下水受人类活动影响比较大),各项指标脆弱性评分值加权叠加得到地下水脆弱性综合指数 VI(Vulnerability Index):

$$VI = 0.4(D_wD_r + R_wR_r + A_wA_r + S_wS_r + T_wT_r + I_wI_r + C_wC_r) + 0.6(P_wP_r + X_wX_r + F_wF_r + G_wG_r) \quad (1)$$

式中:下标 w 为权重,r 为评分。

表 1　含水层埋深、含水层净补给量、地形坡度、含水层水力传导系数分级与评分

Table 1　Ranks and rating for aquifer buried depth、topographic slope、hydraulic conductivity of aquifer

地下水位埋深 Groundwater depth		含水层净补给量 Net aquifer recharge		地形坡度 Terrain slope		含水层水力传导系数 Aquifer hydraulic conductivity	
分级/m Ranks	评分 Rating	分级 Ranks /mm	评分 Rating	分级/% Ranks	评分 Rating	分级/(m/d) Ranks	评分 Rating
0—1.5	10	0—51	1	<0.5	10	0—4.1	1
1.5—4.6	9	51—102	3	0.5—1	9	4.1—12.2	2
4.6—9.1	7	102—178	6	1—1.5	5	12.2—28.5	4
9.1—15.2	5	178—254	8	1.5—2	3	28.5—40.7	6
15.2—22.9	3	>254	9	>2	1	40.7—81.5	8
22.9—30.5	2					>81.5	10
>30.5	1						

耕地比是指行政区内耕地面积比当地总面积;施肥强度为研究区内单位面积上的施肥量。

1.2　空间冷热点及变动分析方法

1.2.1　G 指数

空间冷热点检测是通过检测空间数据的总体模式和趋势来进行热点评估[20],通过对数据集中的每一个

要素计算 Getis′G 统计,得到 z 得分和 p 值,可知高值或者低值要素在空间发生聚类的位置。本次研究为了检查研究分区内不同时期的地下水脆弱性集聚程度,比较研究区内地下水脆弱性的演变状况和密集程度,计算地下水脆弱性的 Getis′G 指数,其计算公式为:

$$G_i(d) = \sum_{j=1}^{n} W_{ij}(d)x_j / \sum_{j=1}^{n} x_j \tag{3}$$

表 2 含水层介质类型、土壤介质类型、渗流区介质类型的分级与评分

Table 2 Ranks and rating for aquifer media, soil media and impact of the vadose zone media

含水层介质类型 Aquifer media types		土壤介质类型 Soil media types		渗流区介质类型 Vadose zone media types	
分类 Classification	评分 Rating	分类 Classification	评分 Rating	分类 Classification	评分 Rating
块状页岩 Massive shale	2	非胀缩或非凝聚性黏土	1	承压层	1
变质岩/火成岩 Metamorphic/ Igneous	3	垃圾	2	粉砂/黏土	3
风华变质岩 Fenghua metamorphic	4	黏土质亚黏土	3	变质岩/火成岩	4
冰碛物 Moraine	5	粉砂质亚黏土	4	灰岩	6
层状砂岩/灰岩 Layered sandstone/ Limestone	6	亚黏土	5	砂岩	6
块状砂岩 Massive sandstone	6	砂质亚黏土	6	层状灰岩、页岩、砂岩	6
块状灰岩 Massive limestone	6	胀缩或凝聚性黏土	7	含较多粉砂和黏土的砂砾	6
砂砾石 Sand and gravel	8	泥炭	8	砂砾	8
玄武岩 Basalt	9	砂	9	玄武岩	9
岩溶灰岩 Karst limestone	10	薄层或裸露土壤、砾土	10	岩溶灰岩	10

表 3 特殊脆弱性指标的分级与评分

Table 3 Ranks and rating for special vulnerability index

人均水资源量 Per capita water resources		耕地比 Arable land proportion		施肥强度 Fertilization intensity		单位面积工业废水排放量 Industrial wastewater emissions per unit area	
分级/(m^3/人) Ranks	评分 Rating	分级 Ranks	评分 Rating	分级/(t/km^2) Ranks	评分 Rating	分级/(t/m^2) Ranks	评分 Rating
>1100	1	<0.05	1	<5	1	<1000	1
1000—1100	2	0.05—0.1	2	5—10	2	1000—2000	2
900—1000	3	0.1—0.15	3	10—15	3	2000—3000	3
800—900	4	0.15—0.2	4	15—20	4	3000—4000	4
700—800	5	0.2—0.25	5	20—25	5	4000—5000	5
600—700	6	0.25—0.3	6	25—30	6	5000—6000	6
500—600	7	0.3—0.35	7	30—35	7	6000—7000	7
400—500	8	0.35—0.4	8	35—40	8	7000—8000	8
300—400	9	0.4—0.45	9	40—45	9	8000—9000	9
<300	10	>0.45	10	>45	10	>9000	10

对 $G_i(d)$ 进行标准化处理,可得式 3 的标准形式:

$$Z[G_i(d)] = \frac{G_i(d) - E[G_i(d)]}{\sqrt{VAR[G_i(d)]}} \tag{4}$$

式中,n 为空间单元的数量;x_j为空间单元 j 的属性值;$E[G_i(d)]$和 $VAR[G_i(d)]$分别为数学期望和方差;$W_{ij}(d)$为空间权重矩阵。如果 $Z[G_i(d)]$为正值,且显著,表明位置 i 周围的值都相对比较高,为高值空间集聚区,即热点区;反之,如果 $Z[G_i(d)]$为负,且显著,表明位置 i 周围的值相对较低,为低值空间集聚区,即冷

点区。

1.2.2　热点重心

重心是指物体内各个点所受重力产生合力的作用点,可视为空间分布的平均中心,在社会经济、旅游资源、土地利用等领域应用广泛[21]。本次研究运用重心原理分析地下水脆弱性空间热点的变动特征,重心计算公式为:

$$M(x_j, y_j) = \left[\frac{\sum_{i=1}^{n} u_i x_i}{\sum_{i=1}^{n} u_i}, \frac{\sum_{i=1}^{n} u_i y_i}{\sum_{i=1}^{n} u_i} \right] \tag{5}$$

式中,n 表示下辽河平原热点空间单元数量,$m_i(x_i, y_i)$ 为第 i 个热点小区域的中心坐标,其热点属性值为 u_i,$M(x_j, y_j)$ 则表示整个下辽河平原第 j 年的热点重心坐标。

1.3　数据来源与处理

本文以下辽河平原为研究区,选取 1991 年、2000 年和 2010 年下辽河平原所跨市、县(区)以及水文地质单元区的相关指标数据进行计算分析。水文地质参数数据主要来自《辽宁省水资源》、《辽宁省国土资源地图集》、《辽宁国土资源》、《辽宁省水资源公报》、DEM 数据以及测点实测资料。人文因素的参数数据来自《中国城市统计年鉴》、《中国统计年鉴》、《辽宁水资源公报》、《辽宁统计调查年鉴》、《辽宁省统计年鉴》等资料。

利用 ArcGIS 软件,将各年指标数据按其查找精度导入各县、市、监测区以及水文地质研究区形成指标图层,在综合考虑研究区范围以及数据的疏密程度、工作效率等基础上,将网格大小定为 1km×1km 进行统一栅格化,采样方式为等间距,共划分为 24110 个单元网格,通过对指标图层的加权总和,每个网格可得到一个地下水脆弱性指数,并把这个值作为单元格中心值进行计算分析。

2　研究区概况

下辽河平原位于辽宁省的中南部,辽河的中下游地带,其地理坐标跨度为东经 120°42′至 124°45′,北纬 40°43′至 43°27′之间,南北长约 240 km,东西宽 120—140 km,总面积约 2.65 万 km^2。下辽河平原东部为长期缓慢上升的辽东低山丘陵区,西临间隙性掀斜上升隆起区——辽西低山丘陵区,北接康法低山丘区,南濒渤海湾,总平原地势由东西两侧向中间倾斜,从北至南逐渐低平,平均海拔低于 50 m,是区域地表水和地下水的汇集中心。平原内行政区包括阜新市、铁岭市、沈阳市、抚顺市、辽阳市、鞍山市、锦州市、盘锦市、营口市,共 9 市 22 县(图 1),是东北老工业基地城市的集中区,工农业发达,人类经济活动强烈。

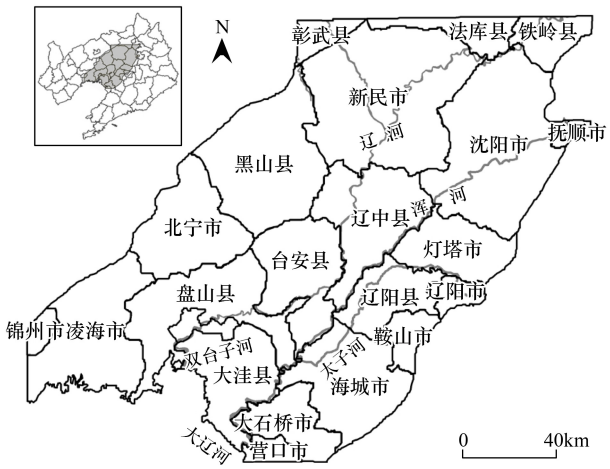

图 1　下辽河平原地理位置图

Fig. 1　The geographic location map of the lower reaches of Liaohe River Plain

3　地下水脆弱性时空演变分析

3.1　各时期地下水脆弱性分布

在公式(1)基础上,运用 ArcGIS 的空间分析与制图功能,得出下辽河平原 1991、2000 和 2010 年在 1km×1km 格网下的地下水脆弱性分布图(图 2)。图中取五个时期自然断点法的断点数值的折中数划分脆弱性等级,根据脆弱性指数由低到高分为 5 个级别,分别为低脆弱性、较低脆弱性、一般脆弱性、较高脆弱性、高脆弱性,统计出各时期各个级别脆弱性区所占下辽河平原总面积的比例进行空间分布与演变分析(表 4)。

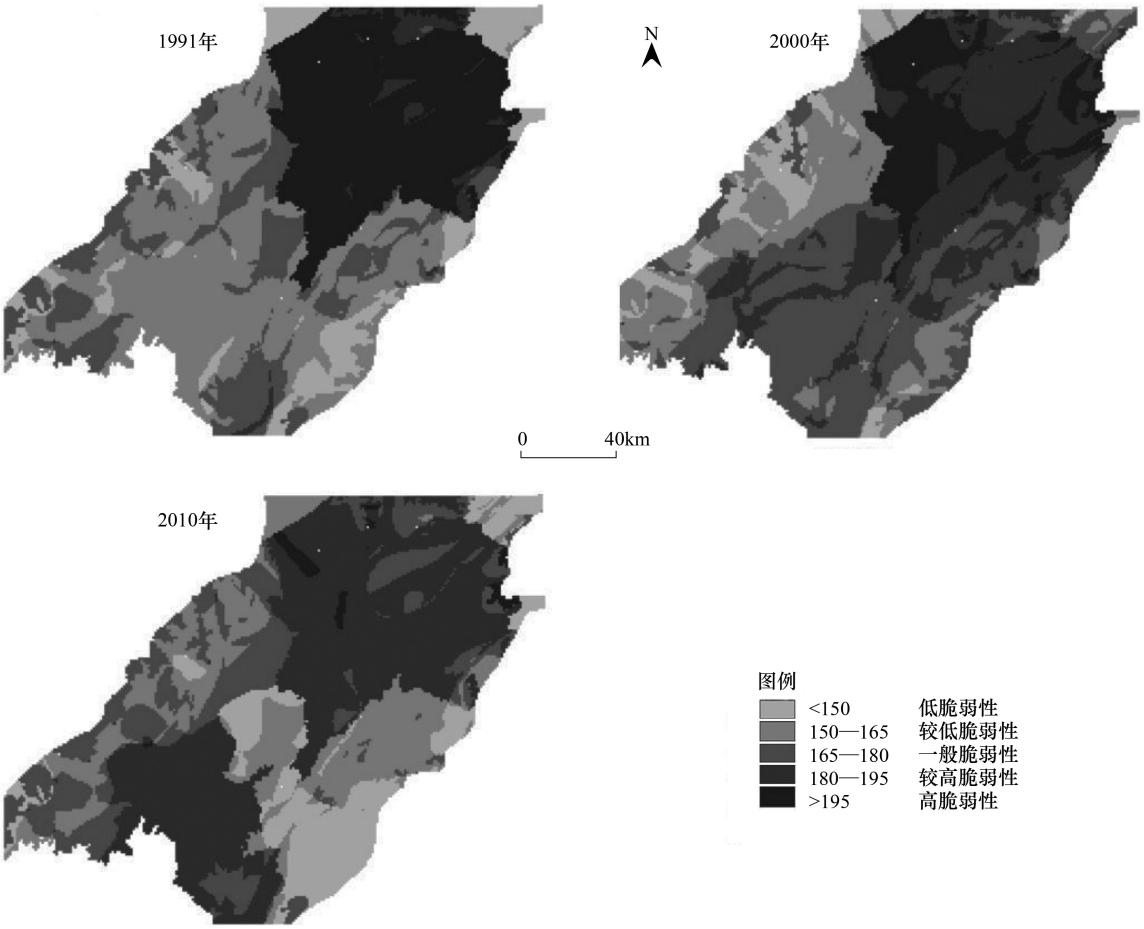

图 2 下辽河平原 1991 年、2000 年与 2010 年地下水脆弱性分布

Fig.2 The distribution of groundwater vulnerability in the lower River Plain in 1991, 2000 and 2010

表 4 下辽河平原各等级地下水脆弱性区面积比例(%)

Table 4 The percentage of different ranks of groundwater vulnerability in lower Liao River Plain (%)

年份 Year	低脆弱性区 Low	较低脆弱性区 Low-Moderate	一般脆弱性区 Moderate	较高脆弱性区 Moderate-High	高脆弱性区 High
1991	10.15	36.50	19.03	2.99	31.32
2000	6.55	19.98	31.60	25.90	15.96
2010	13.26	22.12	21.55	41.71	1.36

由图 2 可以看出,在整体分布上,下辽河平原地下水脆弱性具有明显的空间集聚性,脆弱性比较高的地区从下辽河平原以沈阳市为中心的北部地区单独集聚逐渐向南部滨海地区扩散,而原先的高脆弱性集中区不断得到改善,变成较高脆弱性集聚,最终演变成南北两端较高脆弱性各自集中;而脆弱性较低的地区从广泛分布在下辽河平原南部演变为主要集聚在下辽河平原东南部地区。

1991 年下辽河平原的脆弱性级别主要为较低脆弱性,占研究区总面积的 36.5%,这些地区主要分布在锦州市、盘锦市和鞍山市,在振兴东北老工业基地之前,这些地区经济发展比较慢,资源环境开发强度较低,当地地下水环境受污染与破坏程度较低,相应的脆弱性级别也较低;其次是高脆弱性地区,面积比例达到 31.3%,主要集中分布在以沈阳市为中心的下辽河平原北部,早期经济发展过程中,人们对资源的大量开发利用以及污染物的大量排放,致使当地地下水环境污染严重,地下水脆弱性级别也最高。

到 2000 年,地下水脆弱性级别中一般脆弱性占比例最高,达到 31.6%,主要分布在下辽河平原滨海地带

的盘锦市和中部地区的台安县,可见 1991 年到 2000 年期间,这些地区社会经济得到快速发展,工农业污染物的排放量增加致使当地地下水环境开始恶化;其次是较高脆弱性区,占 25.9%,主要分布在辽中县和沈阳市区等地,这些地区在当地政府与民众的保护下,相较 1991 年地下水环境得到明显改善,但是结合图 2 可以看出,当地地下水环境仍然很严峻。

2010 年的主要地下水脆弱性级别为较高脆弱性,达到 41.7%,主要集中在沈阳市和盘锦市,其中沈阳市是由高脆弱性区进一步改善致使较高脆弱性区面积持续增加;而盘锦市从 2000 年的以一般脆弱性为主进一步恶化为以较高脆弱性为主,可见伴随东北老工业基地的振兴,该地区的地下水环境面临巨大压力,从而使当地地下水脆弱性级别不断升高。改善最明显的下辽河平原的东南部地区,包括台安县和海城市等地,这些地区水资源丰富,人均水资源量高于下辽河平原其他地区,起到良好的自我调节作用,配合有效的治理与保护措施,地下水环境得到显著改善。

3.2　评价结果合理性分析

地下水脆弱性大小与地下水中氮元素浓度呈正比关系[22-24],利用这一特性可以用监测井实测资料检验本次地下水脆弱性评价结果的合理性。取各个指标的多年平均数值得到下辽河平原多年平均地下水脆弱性分布图,以此为底图标出 31 个监测井的地理位置(图 3),取各监测井的多年平均实测氮元素(氨氮、硝酸盐氮与亚硝酸盐氮浓度之和)的浓度资料与其所在位置的地下水脆弱性评分值进行线性分析(图 4)。

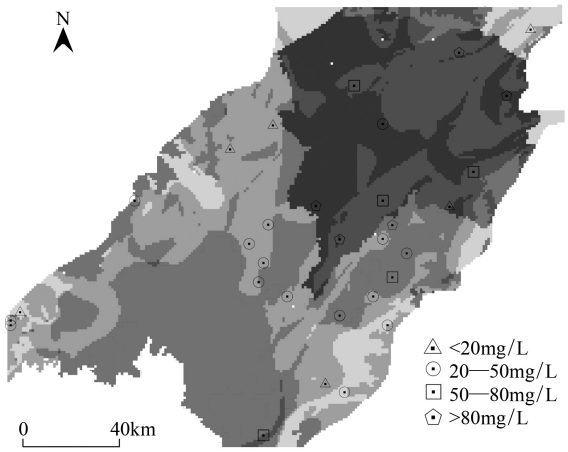

图 3　下辽河平原多年平均地下水脆弱性分布及氮元素浓度水平对应图

Fig. 3　The corresponding map of many years average groundwater vulnerability distribution and nitrogen concentration in lower reach of Liaohe River Plain

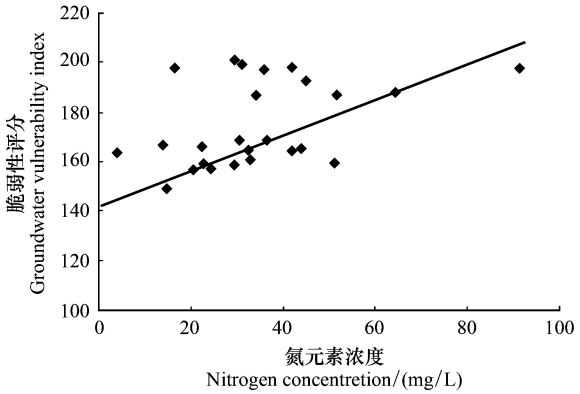

图 4　监测点氮元素浓度对应脆弱性评分值散点图

Fig.4　The scatterplot of nitrogen concertration from monitoring points and the corresponding vulnerability rating

从图 3 中可以看出,氮元素浓度较高的点一般分布在地下水脆弱性评分值较高的地区,浓度较低的点一般分布在地下水脆弱性评分值较低的地区,可见本次地下水脆弱性评价结果与监测井的实测氮元素浓度数据存在线性关系。将各监测井的地下水脆弱性评分与氮元素浓度置于 XY 坐标系(图 4),并将两组数据通过 SPSS 线性相关性与显著性检验,图中拟合趋势线的 R^2 为 0.715,在 0.01 水平上显著性相关,表明两者之间具有较强线性关系。综上可以得出,本次研究提出的计算方法得到的结果具有一定科学应用性。

4　热冷点空间分布及热点变动分析

4.1　下辽河平原地下水脆弱性热冷点空间分布

运用 ArcGIS 的空间统计模块得到下辽河平原三个时期地下水脆弱性的 G 指数分布情况,对数据进行处理以便进一步可视化,用自然断点法将数值由低到高划分为 5 类,同类数值的集中区分别为:冷点区、次冷区、

温点区、次热区和热点区(图 5)。

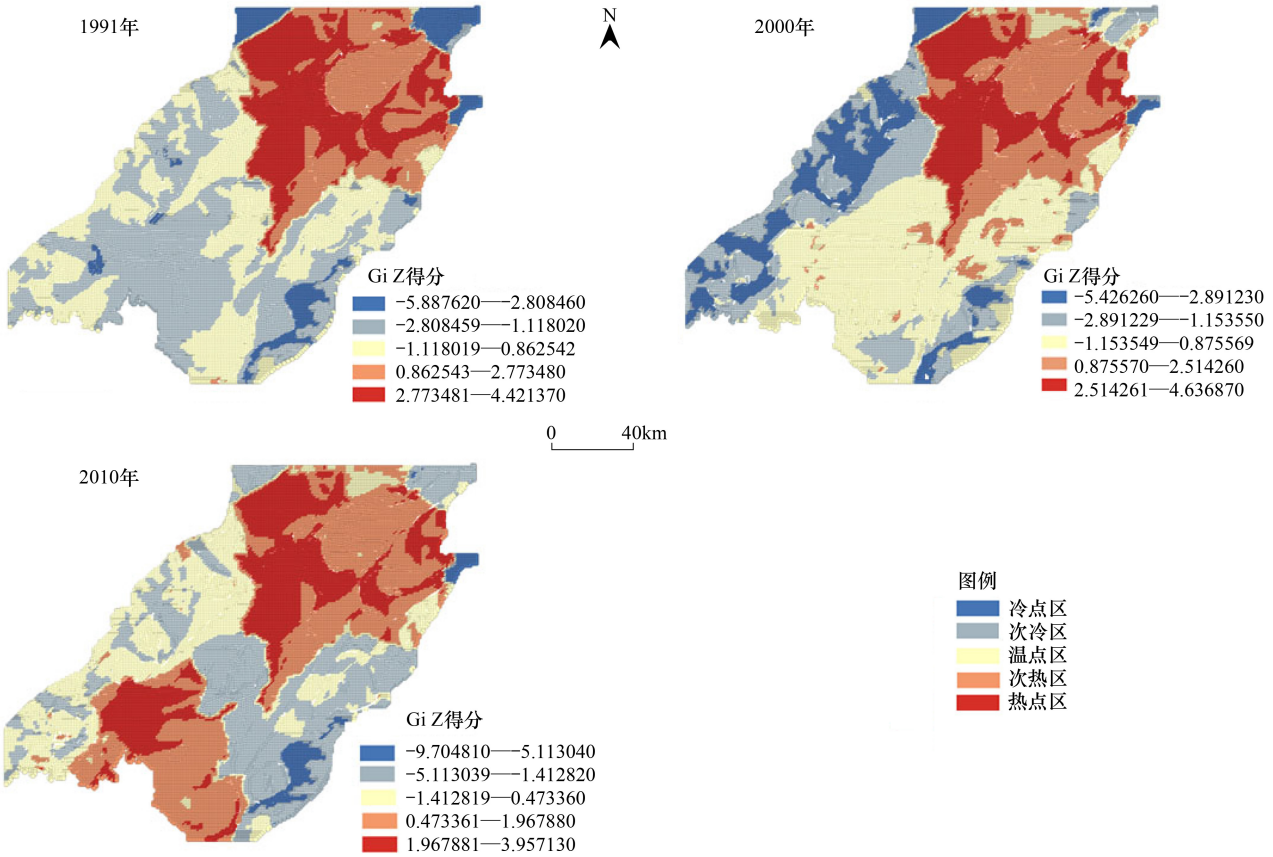

图 5 下辽河平原 1991 年、2000 年与 2010 年地下水脆弱性热冷点分布图

Fig.5 Distribution of groundwater vulnerability hot and cold spots in the lower River Plain in 1991, 2000 and 2010

从图 5 中可以看出,3 个时期的地下水脆弱性热点分布比较集中,1991 年和 2000 年主要分布在沈阳市的新民地区和辽阳县的西部地区,1991 年的热点区面积稍大于 2000 年,减少的部分基本都演变成次热区,这与沈阳市与辽阳县的经济发展模式具有紧密关系。沈阳市作为辽宁省省会城市是当时开发最早的城市,也是下辽河平原早期经济水平最发达的地区,在沈阳市的早期发展中,主要以工农业为主,1991 年的耕地面积比为 0.46,是研究区所有城市中最高的,而施肥强度更是达到 41.24 t/km^2。而沈阳市从建国初期起,就成为全国重工业基地之一,工业建设发达,与之伴随的工业污染也较其他城市大,高强度的农业种植与化肥使用以及工业污染致使当地地下水环境污染非常严重。辽阳县除了农业发展较快,也是全省矿产资源最丰富的地区,早期对煤、铁、石灰石等资源的高强度开采活动对当地地下水水文地质造成严重破坏。且早期开发过程中人们对地下水环境保护意识薄弱,从 1991 至 2000 年期间,当地政府与民众的地下水环境保护意识增强,在经济活动进一步展开的基础上,做好了相应保护措施,防止地下水环境进一步恶化,但是该地区地下水脆弱性形势依然很严峻。

发展到 2010 年,南部滨海的盘山县附近成为热点区,加上原先存在的热点区形成两块大的热点集中区。从图中可以看出,原先的热点集中区分布变动不大,而南部滨海地带由原先的以次冷区为主发展成温点区,最后演变为以次热区和热点区为主。结合图 2 可以看出,虽然下辽河平原北部地区地下水脆弱性形势有所改善,但依旧处于较高状态,持续稳定的高强度人类活动与缓慢的自然调节能力致使这些地区恢复起来很慢,人为保护措施仍需加强。南部滨海地区以盘锦市为代表,盘锦市人均 GDP 多年排辽宁省第一,从 1991 年到 2010 年,是当地经济飞快发展的阶段。作为我国商品粮基地、新兴石油化工城市,耕地比从 1991 年的 0.23 发

展到 2010 年的 0.36,施肥强度从 24.98 t/km^{2}增长到 34.52 t/km^2,同时盘锦拥有中国最大的稠油、超稠油、高凝油生产基地,农业的迅速发展与资源开发致使当地地下水脆弱性越来越高,而滨海地区脆弱的地质结构不能提供良好的自我调节作用,以致下辽河平原滨海地带形成地下水脆弱性热点集中区。而相较热点,冷点区分布比较离散,所占面积比例很小,且伴随时间的推移,范围呈不断减小趋势,说明地下水脆弱性低的地区分布比较离散,在人为保护与治理措施下,改善后的低脆弱性分布比较随机。

4.2　热点重心与标准差椭圆

以各时期地下水脆弱性空间热点分布以研究对象,运用 ArcGIS 中的度量地理分布功能,得到下辽河平原 1991、2000 和 2010 年地下水脆弱性热点区的重心与标准差椭圆(图 6)。各时期的标准差椭圆以重心为中心,表现出不同的空间分布态势,通过重心变动距离可以得到地下水脆弱性整体空间热点的变化大小,而标准差椭圆的长轴与竖直方向形成的夹角称为旋转角度,旋转角度的变动能够定量分析热点变化的方向大小。

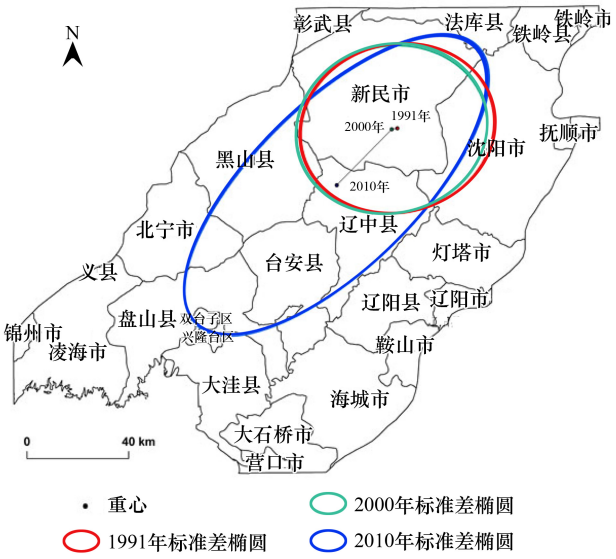

图 6　热点重心与标准差椭圆分布

Fig.6　Distribution of hot spots gravity and standard diviation ellipse

从图 6 和表 5 可得,1991 年和 2000 年的热点标准差椭圆重叠率很高,分布在下辽河平原北部,热点重心都在新民市内,相距很近,直线距离约为 2.264 km,标准差椭圆的长轴旋转角度从 74.56 度变为 77.95 度,即整体热点向顺时针方向倾斜了 3.39 度,更进一步向东—西方向分布。可见 1991 至 2000 年期间,热点重心的位置变化不大,在此时期内,地下水高脆弱性地区主要集聚在下辽河平原北部,且横向发展,但变动很小。因此,在此时段之后应对下辽河平原北部地区的地下水环境优先治理,其他地区相对较好,应较强防范。

2010 的热点标准差椭圆几乎纵观整个研究区,地下水高脆弱性集聚区演变趋势由北部单一集聚向整体发展。热点重心在辽中县内,位于下辽河平原的中间地带,相距 2000 年的热点重心距离为 30.787 km,变化幅度较大。变动方向由平原北部向西南方向移动,标准差椭圆的长轴旋转角度由 2000 年的 77.95 度变为 45.51 度,即空间热点的整体分布趋势逆时针变动了 32.44 度,地下水脆弱性的热点分布格局呈现为东北—西南方向。这与南部滨海地区逐渐成为热点区有关,北部地区依然是地下水脆弱性的高值聚集区,但北部热点分布较 2000 年进一步改善。在 2010 年之后,下辽河平原应整体提升地下水防治保护措施,在此基础上,北部与南部滨海地区的地下水环境应重点治理,控制热点地区的进一步蔓延。

表 5　各年份热点重心及标准差椭圆变化

Table 5　Change of hot spots gravity and standard diviation ellipse

年份 Year	经度/(°E) Longitude	纬度/(°N) Latitude	位移/km Displacement	旋转角度/(°) Rotation angle
1991	122.5531	41.5243	—	74.56
2000	122.5355	41.5228	2.264	77.95
2010	122.3820	41.4036	30.787	45.51

5　结论

本文在 DRASTIC 模型基础上综合人为因子建立地下水脆弱性综合指数,利用 ArcGIS 的空间分析与统计功能,得出下辽河平原 1991、2000 和 2010 年的地下水脆弱性分布状况,通过氮元素浓度资料检验出本次评价

结果较为科学合理,并借助 ArcGIS 的空间分析功能分析了地下水脆弱性分布的时间演变状况。在此基础上,通过 G 指数分析各区内冷点和热点分布格局,用标准差椭圆和重心等方法,分析地下水脆弱性空间热点的变动情况,结果表明:

(1)由图表统计可得,1991 年以较低脆弱性和高脆弱性为主,两者分别在南、北地区集中,呈区域对立分布;2000 年以一般脆弱性和较高脆弱性为主,分别在南部和东北部地区集中分布;2010 年以较高脆弱性为主,集中分布在沈阳市和盘锦市两块北南部地区。其中沈阳市的地下水环境长期处于高脆弱性或较高脆弱性状态。

(2) 1991、2000 和 2010 年内热点分布较为集中,其中 1991 年和 2000 年的热点主要集中分布在新民市和辽阳县的西部地区等地,期间变动不大,而到 2010 年,滨海地区也发展成热点集中区,呈南北两大块各自聚集。相较热点,各时期的冷点分布面积较小,且分布零散。

(3)1991 年至 2000 年,热点重心仅向西南方向位移了 2.264km,标准差长轴旋转角顺时针变动了 3.39 度,热点分布格局呈东—西方向分布;2000 年到 2010 年,热点重心向西南方向位移了 30.787km,标准差椭圆长轴旋转角逆时针转动了 32.44 度,整体热点分布格局为东北—西南方向。

DRASTIC 模型中的自带固定权重和人为影响因子等级范围的自行划定等均具有主观性,本文所计算出的地下水脆弱性结果具有相对比值效果,但并没有全面反映研究区的地下水脆弱性状况,实际中的地下水脆弱性十分复杂,影响因素众多,因此地下水脆弱性综合指数的计算仍需完善。

参考文献(References):

[1] 张光辉. 区域地下水功能可持续性评价理论与方法研究. 北京: 地质出版社, 2009: 1-5.
[2] 孙才志, 潘俊. 地下水脆弱性的概念、评价方法与研究前景. 水科学进展, 1999, 10(4): 444-449.
[3] Vrba J, Zaporožec A. Guidebook on mapping groundwater vulnerability // Castany G, Groba E, Romijn E, eds. International Contributions to Hydrogeology Founded. Vol. 16.Hannover: Verlag Heinz Heise, 1987.
[4] Li R P, Merchant J W. Modeling vulnerability of groundwater to pollution under future scenarios of climate change and biofuels-related land use change: A case study in North Dakota, USA. Science of the Total Environment, 2013, 447: 32-45.
[5] Ducci D, Sellerino M. Vulnerability mapping of groundwater contamination based on 3D lithostratigraphical models of porous aquifers. Science of the Total Environment, 2013, 447: 315-322.
[6] Güler C, Kurt M A, Korkut R N. Assessment of groundwater vulnerability to nonpoint source pollution in a Mediterranean coastal zone (Mersin, Turkey) under conflicting land use practices. Ocean & Coastal Management, 2013, 71: 141-152.
[7] Rezaei F, Safavi H R, Ahmadi A. Groundwater vulnerability assessment using fuzzy logic: a case study in the Zayandehrood Aquifers, Iran. Environmental Management, 2013, 51(1): 267-277.
[8] Pavlis M, Cummins E. Assessing the vulnerability of groundwater to pollution in Ireland based on the COST-620 Pan-European approach. Journal of Environmental Management, 2014, 133: 162-173.
[9] Mair A, El-Kadi A I. Logistic regression modeling to assess groundwater vulnerability to contamination in Hawaii, USA. Journal of Contaminant Hydrology, 2013, 153: 1-23.
[10] 李定龙, 王宗庆, 杨彦. 基于综合方法的区域浅层地下水脆弱性评价——以常州市为例. 环境化学, 2013, 32(11): 2099-2108.
[11] 孟宪萌, 束龙仓, 卢耀如. 基于熵权的改进 DRASTIC 模型在地下水脆弱性评价中的应用. 水利学报, 2007, 38(1): 94-99.
[12] 陈守煜, 伏广涛, 周惠成, 王国利. 含水层脆弱性模糊分析评价模型与方法. 水利学报, 2002, 33(7): 23-30.
[13] 孙才志, 左海军, 栾天新. 下辽河平原地下水脆弱性研究. 吉林大学学报: 地球科学版, 2007, 37(5): 943-949.
[14] 张小凌, 李峰, 刘红战. 云南曲靖盆地地下水脆弱性模糊评价. 水资源与水工程学报, 2013, 24(2): 57-61.
[15] 孙才志, 杨磊, 胡冬玲. 基于 GIS 的下辽河平原地下水生态敏感性评价. 生态学报, 2011, 31(24): 7428-7440.
[16] 孙才志, 奚旭. 不确定条件下的下辽河平原地下水本质脆弱性评价. 水利水电科技进展, 2014, 34(5): 1-7.
[17] 曾庆雨, 田文英, 王言鑫. 基于复合权重-GIS 的下辽河平原地下水脆弱性评价. 水利水电科技进展, 2009, 29(2): 23-26.
[18] Aller L, Bennett T, Lehr J H. DRASTIC: A Standardized System for Evaluating Groundwater Potential Using Hydrogeological Settings. USEPA Report Ada Oklahoma: Environmental Research Laboratory, 1985.
[19] Hammerlinck J D, Arneson C S. Wyoming Ground Water Vulnerability Assessment Handbook. Latamie: University of Wyoming, 1998.
[20] 晏王波, 张晓祥, 姚静, 徐盼, 余其鹏. 基于 GIS 的盐城市区域发展时空特征研究. 地理空间信息, 2013, 11(2): 104-110.
[21] 方叶林, 黄震方, 余凤龙, 涂玮. 省际旅游资源相对效率的演化分析. 地理科学, 2013, 33(11): 1354-1361.
[22] Rupert M G. Calibration of the DRASTIC ground water vulnerability mapping method. Ground Water, 2001, 39(4): 625-630.
[23] Antonakos A, Lambrakis N J. Development and testing of three hybrid methods for the assessment of aquifer vulnerability to nitrates, based on the drastic model, an example from NE Korinthia, Greece. Journal of Hydrology, 2007, 333(2): 288-304.
[24] Assaf H, Saadeh M. Geostatistical Assessment of Groundwater Nitrate Contamination with Reflection on DRASTIC Vulnerability Assessment: The Case of the Upper Litani Basin, Lebanon. Water Resources Management, 2009, 23(4): 775-796.