

DOI: 10.5846/stxb201403280580

孙才志, 奚旭, 董璐. 基于 ArcGIS 的下辽河平原地下水脆弱性评价及空间结构分析. 生态学报, 2015, 35(20): - .

Sun C Z, Xi X, Dong L. An ArcGIS-based analysis of groundwater spatial structure and groundwater vulnerability in the lower reaches of the Liaohe River Plain. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(20): - .

基于 ArcGIS 的下辽河平原地下水脆弱性评价及空间结构分析

孙才志^{1,2,*}, 奚旭¹, 董璐²

1 辽宁师范大学城市与环境学院, 大连 116029

2 辽宁师范大学海洋经济与可持续发展研究中心, 大连 116029

摘要: 本文以下辽河平原为研究区, 通过选取 1991、2000 和 2010 年三个代表年的相关参数, 在 DRASTIC 模型基础上构建评价指标体系进行地下水脆弱性评价, 并以地下水中氮元素浓度为响应指标通过显著性检验, 在此基础上借助 GS⁺、ArcGIS 和 Geoda095i 等软件的制图功能和空间统计分析功能, 对下辽河平原地下水脆弱性的空间分布特征、变异规律以及空间关联格局进行研究分析, 结果表明: ①1991—2010 年下辽河平原地下水脆弱性总体上呈先增后减趋势, 空间分布上以沈阳市为中心的地下水高脆弱区向南部沿海方向扩散; ②1991—2010 年研究区地下水脆弱性 Moran's *I* 表现为较强正相关现象, 且关联程度呈略微下降趋势; ③1991—2010 年研究区地下水脆弱性局部空间自相关和显著性水平均发生了明显的变化; ④研究区内地下水脆弱性受结构性因素和随机性因素共同作用, 且随机性因素在三个时期内有逐步上升趋势。研究成果反映了研究区地下水脆弱性空间结构的变异规律及驱动机制, 为决策者在未来地下水污染防治方面提供相关参考依据。

关键词: 下辽河平原; 地下水脆弱性; 地统计学; 空间自相关分析; 空间关联格局

An ArcGIS-based analysis of groundwater spatial structure and groundwater vulnerability in the lower reaches of the Liaohe River Plain

SUN Caizhi^{1,2,*}, Xi Xu¹, DONG Lu²

1 College of Urban and Environment, Liaoning Normal University, Dalian 116029, China

2 KRI-Center for Studies of Marine Economy and Sustainable Development of Liaoning Normal University, Dalian 116029, China

Abstract: High-quality groundwater bodies with relatively stable water volumes, good water quality, and a high resistance to pollution are widely distributed throughout the world. They play an important role in, among other things, the domestic water supply, economic development, and maintaining the integrity of the geological environment and ecological balance. However, with rapid socio-economic development, increasing human demand for water has resulted in increasing pressure on, and unreasonable use of, groundwater bodies. Consequently, groundwater systems throughout the world are subject to varying degrees of pollution and destruction, one result of which is an increasing disequilibrium between the supply of and demand for water resources.

The field of international hydrogeology is concerned with evaluation of groundwater vulnerability, which is considered a basic task in the development and protection of groundwater resources. Currently, groundwater vulnerability is thought to result from characteristics of the groundwater system itself and anthropogenic factors; research into groundwater vulnerability can support groundwater protection. GIS, together with the contraposed index method, is the most popular tool for

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: 2014-00-00; 网络出版日期: 2014-12-18

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: suncaizhi@lnnu.edu.cn

calculating groundwater vulnerability indices. Because the hydrogeological environment is not under the complete control of human activities, a thorough understanding of groundwater vulnerability and the causes of its variation is necessary for environmental managers to enact preventive and pollution control measures.

This study was based on the DRASTIC model. Groundwater parameters for 3 years (1991, 2000, and 2010) were used to calculate the distribution of groundwater vulnerability in the lower reaches of the plain of the Liaohe River, using ArcGIS. Groundwater nitrogen concentration was used as a response index to test the reliability of results. Using the mapping and spatial statistical analysis functions in GS⁺, ArcGIS, and Geoda095i, we evaluated and analyzed the spatial distribution, variation, and spatial correlation patterns of groundwater vulnerability in the tested area. Results showed that: 1) Overall groundwater vulnerability initially decreased but then showed a trend of increase from 1991 to 2010, and high-vulnerability areas were distributed from the regions around Shenyang to the south coast. 2) From 1991 to 2010, groundwater vulnerability showed a strong positive autocorrelation (Moran's I), the degree of which showed a slight downward trend. 3) Over the study period, marked changes have occurred in local spatial autocorrelation of groundwater vulnerability and its significance levels. 4) Groundwater vulnerability in the study area was influenced by a combination of structural and random factors. While the random factors have gradually increased over time, structural factors remain important. This study highlights the causes of variation in groundwater vulnerability and the mechanisms that drive its spatial structure in the study area and can provide a reference for policy makers to support development of groundwater pollution control and protection plans.

Key Words: lower Liaohe River Plain; groundwater vulnerability; geo-statistics; spatial autocorrelation; spatial correlation patterns

自 20 世纪以来,随着人口的不断增加与社会经济的高速发展,人类对水资源的需求量越来越大,导致供需矛盾日益突出,社会经济的发展因此受到制约。地下水以其储量丰富、水质良好、易于开采等优点被大量开发利用,然而人类活动的过度影响致使世界各国各地区面临不同程度的地下水环境污染与破坏问题,因此重视地下水污染防治和保护已经成为世界各国提高社会与经济效益的一项重要战略任务^[1]。

地下水脆弱性评价作为地下水合理开发利用与保护的一项基础性工作,已经成为国际水文地质领域的热点研究问题。自 1968 年 Margat^[2] 提出“地下水脆弱性”这一术语以来,其概念和研究方法不断得到丰富和发展。在国外,DRASTIC 模型与地理信息系统相结合评价区域地下水脆弱性是目前研究热点^[3-7],该方法可以直观明了地反映研究区地下水脆弱性具体分布状况,但需要大量数据支撑,对人力物力需求比较大;此外,Rupert 等许多学者^[8-12] 利用地下水脆弱性与氮元素成线性关系,通过分析研究区硝酸盐氮和亚硝酸盐氮的实测资料,对 DRASTIC 方法的评价结果进行了校正,该方法适用于农业活动区,评价结果比较精确。我国学者分析了 DRASTIC 方法的不足之处^[13-16],并为其科学理论性的提升做出了较大贡献,如陈守煜等^[17] 提出脆弱性十级语气算子,孟宪萌、束龙仓等^[18] 引入模糊集与信息熵理论,都丰富了 DRASTIC 指标权重确定的理论依据不足;张小凌等^[19]、孙才志等^[20]、赵春红等^[21] 运用模糊综合评价法,契合地下水脆弱性的模糊性特征,使评价结果更为细致合理;在实际应用中,许多学者在 DRASTIC 模型的理解基础上,根据研究区具体水文地质条件和数据的可得性做出改变,如范琦等^[22] 提出的 DRUA 模型,黄冠星等^[23] 提出了 DRTALGC 模型,孙爱荣等^[24] 根据实际情况用降雨入渗补给量替代 DRASTIC 模型中地下水净补给量,均取得了科学合理的评价结果。

多元化的研究方法使评价结果更加科学合理,但地下水是个开放的系统,地下水环境具有地域性、时效性和可变性特点^[25],且受土地利用、污染物排放、人口变化等人为因素的长期影响,地下水脆弱性在时空分布上具有不确定性、复杂性和动态变化性,决策者如果单凭现状年的评价结果提出保护方案是不具有针对性的。下辽河平原是辽宁省最重要的工农业生产基地和经济发展中心,也是东北最缺水的地区^[26],长期的不合理开

发利用地下水导致了一系列的水文地质问题,如地下水位下降、地下水漏斗、海水入侵等,目前关于下辽河平原地下水方面的研究有地下水脆弱性评价^[20]、地下水硝酸盐氮的特殊脆弱性评价^[27]以及地下水生态系统的敏感性^[28]和恢复力^[26]评价等,这些研究对于下辽河平原地下水的管理与保护具有一定意义,但其研究都侧重于地下水某方面的评价,而对相关现象的时空演变及空间结构分析的成果比较少。

鉴于此,本次研究在参考前人研究基础上,结合 DRASTIC 模型和人为影响因子构建地下水脆弱性评价指标体系,通过选取下辽河平原 1991 年、2000 年和 2010 年的相关参数数据进行多阶段地下水脆弱性评价,并以地下水中氮元素浓度为响应指标对地下水评价结果进行合理性分析。在此基础上利用 GS⁺、ArcGIS、Geoda095i 等软件对下辽河平原地下水脆弱性进行地统计学分析和空间自相关分析,通过反映研究区整体和局部地下水脆弱性的空间分异规律及关联格局演变情况,揭示其内在变化规律及驱动机制,研究结果可以为决策者提出地下水环境污染防治方案提供参考和决策依据。

1 研究方法 with 数据来源

1.1 地下水脆弱性评价方法——DRASTIC 模型

DRASTIC 模型是 1985 年由美国环境保护署(USEPA)提出的^[29],该模型由 7 项对地下水脆弱性影响比较大的水文地质参数组成:地下水位埋深 D (Depth to Water)、净补给量 R (Net Recharge)、含水层介质类型 A (Aquifer Media)、土壤介质类型 S (Soil Media)、地形坡度 T (Topography)、渗流区介质类型 I (Impact of the Vadose Zone Media)以及含水层水力传导系数 C (Hydraulic conductivity of the Aquifer)。7 项参数按其对于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,进行标准化:0.217、0.174、0.131、0.087、0.043、0.217、0.131。本次研究在 DRASTIC 模型基础上,根据指标数据的可获得性与代表性,参考文献^[20]、^[30],选取 P (人均水资源量)、 X (耕地比)、 F (施肥强度)、 G (单位面积工业废水排放量)4 项对当地地下水脆弱性影响很大的人为影响因子作为特殊脆弱性指标,并参考 DRASTIC 权重,根据对地下水脆弱性影响程度不同赋予相对权重值:6、7、6、7,进行标准化:0.231、0.269、0.231、0.269。DRASTIC 模型中每个指标根据其变化范围和内在属性进行等级划分,并给出相应脆弱性评分值,评分值越大则脆弱性等级越高,见表 1、表 2 和表 3。根据文献^[20],考虑到地下水受人类活动影响比较大,将本质脆弱性与特殊脆弱性分别赋予 0.4 和 0.6 的权重,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):

$$VI=0.4(D_w D_r+R_w R_r+A_w A_r+S_w S_r+T_w T_r+I_w I_r+C_w C_r)+0.6(P_w P_r+X_w X_r+F_w F_r+G_w G_r) \quad (1)$$

式中,下标 w 表示权重, r 表示评分。由公式 1 可得,计算得到的地下水脆弱性综合指数介于 1—10 之间,与脆弱性分级评分意义相一致。

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 Depth to water		净补给量 Net recharge		地形坡度 Topography		含水层水力传导系数 Hydraulic conductivity of the aquifer	
分级/ m Rank/ m	评分 Rating	分级/ mm Rank/ mm	评分 Rating	分级/ $\%$ Rank/ $\%$	评分 Rating	分级/ (m/d) Rank/ (m/d)	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						

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 Classification and rating for aquifer media, soil media and impact of the vadose zone media

含水层介质类型 Aquifer media		土壤介质类型 Soil media		渗流区介质类型 Vadose zone media	
分类 Classification	评分 Rating	分类 Classification	评分 Rating	分类 Classification	评分 Rating
块状页岩	2	非胀缩或非凝聚性粘土	1	承压层	1
变质岩/火成岩	3	垃圾	2	粉砂/粘土	3
风华变质岩/火成岩	4	粘土质亚粘	3	变质岩/火成岩	4
冰碛物	5	粉砂质亚粘	4	灰岩	6
层状砂岩、灰岩及页岩	6	亚粘土	5	砂岩	6
块状砂岩	6	砂质亚粘土	6	层状灰岩、页岩、砂岩	6
块状灰岩	6	胀缩或凝聚性粘土	7	含较多粉砂和粘土的砂砾	6
砂砾石	8	泥炭	8	砂砾	8
玄武岩	9	砂	9	玄武岩	9
岩溶灰岩	10	薄层或裸露土壤、砾	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 Water resources of per people		耕地比 Cultivated 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) Rank/(m ³ /p)	评分 Rating	分级 Rank	评分 Rating	分级/(t/km ²) Rank/(t/km ²)	评分 Rating	分级/(t/m ²) Rank/(t/m ²)	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

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 空间统计学方法

1.2.1 地统计学方法

地统计学是空间统计学的一门重要分支,它是以区域化变量为基础,借助变异函数,研究既具有随机性又具有结构性,或空间相关性和依赖性的自然现象的一门科学。半方差分析是地统计学中一个重要组成部分,它包括三个重要参数:块金值(Nugget)、基台值(Sill)、变程(Range),详细的参数意义与函数公式见相关文献^[31],本文不再赘述。本次研究利用地统计学中的半方差函数理论模型解释地下水脆弱性的空间变异结构,变异函数理论模型最优选择用决定系数 R^2 来决定,并综合考虑 RSS 、块金值和有效距离^[32]。

1.2.2 空间自相关分析

空间自相关分析是一系列空间数据分析方法和技术的集合^[33],用于定量分析事物在空间上的依赖关系,应用到地下水脆弱性评价中,可通过可视化分布图揭示地下水脆弱性的空间集聚特征,揭示其内在变化的驱动机制。空间自相关性指标包括全局指标和局部指标两种:全局 Moran's I 指数用于验证整个研究区域某一要素的空间模式,而局部 Moran's I 指数则表示整个区域中一个单元区域上的某一属性与邻近单元区域同一属性值的相关程度。全局空间自相关指数的计算公式如下^[34]:

$$Global\ Moran's\ I = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m W_{ij} (x_i - \bar{x})(x_j - \bar{x})}{S^2 \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m W_{ij}} \quad (2)$$

式中, $S^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2$, $\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$, x_i 表示第 i 地区的观测值, n 为栅格数, W_{ij} 为二进制的邻接空间权重矩阵, 表示空间对象的邻接关系。 $i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, m$; 当区域 i 和区域 j 相邻时, $W_{ij} = 1$; 当区域 i 和区域 j 不相邻时, $W_{ij} = 0$ 。 Moran's I 在 $-1-1$ 之间, 小于 0 时为负相关, 等于 0 为不相关, 大于 0 时为正相关。

局部空间自相关是将 Moran's I 分解到各个空间单元, 其公式为^[34]:

$$\text{Local Moran's } I_i = \left(\frac{x_i - \bar{x}}{m} \right) \sum_{j=1}^n W_{ij} (x_j - \bar{x}) \quad (3)$$

式中, $m = \left(\sum_{j=1, j \neq i}^n x_j^2 \right) / (n-1) - \bar{x}^2$, I_i 值为正时表示该单元区域周围相似值(高值或低值)的空间集聚, I_i 值为负时表示非相似值之间的空间集聚。

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)的相关指标数据进行计算分析。水文地质参数数据来自《辽宁省水资源公报》、《辽宁省国土资源地图集》、《辽宁国土资源》、《辽宁省水资源》、DEM 提取数据以及多年多测点实测资料。人为因素的参数数据来自《中国统计年鉴》、《中国城市统计年鉴》、《辽宁统计调查年鉴》、《辽宁省统计年鉴》、《辽宁水资源公报》等资料。

应用 ArcGIS 软件, 将各年指标数据按其查找精度导入各县、市、调查样区、水文地质研究区等形成各指标图层, 并将所有图层按同一单元格大小进行栅格化, 然后进行加权叠加计算, 得到脆弱性分布网格图, 每个网格中心属性值即该单元区的脆弱性评分值, 最后将网格数据导出进行空间统计分析。

2 研究区概况与网格划分

2.1 研究区概况

下辽河平原呈北东—南西方向斜卧在辽宁省的中南部, 地理坐标为东经 $120^{\circ}42'$ 至 $124^{\circ}45'$, 北纬 $40^{\circ}43'$ 至 $43^{\circ}27'$ 之间, 南北长约 240 km, 东西宽 120—140 km, 面积约 2.65 万 km^2 , 是辽宁省最大的平原。平原地势东西两侧向中部地区倾斜, 北南方向上逐渐低平, 平均海拔低于 50 m, 是区域地表水和地下水的汇集中心。地下水的总径流方向与地势趋同, 由东西两侧山前到中部平原呈放射状, 至中部平原后, 总的径流方向是从东北到西南, 最后进入辽东湾。该区是辽宁省地理和经济发展中心, 也是最重要的商品粮基地, 人类活动对当地地下水脆弱性影响比较大。行政区划隶属于辽宁省铁岭市、阜新市、沈阳市、抚顺市、辽阳市、鞍山市、营口市、盘锦市、锦州市, 总跨 9 市 22 县(图 1)。

2.2 单元网格的划分

为了尽量精确地表达研究区内地下水脆弱性的空间关联特征, 需要对研究区进行合理的网格划分。在保证每个尺度内信息的完整性及定量评价的准确性基础上, 综合研究区面积大小与采样工作量, 本次研究将研究区划分成 6028 个 $2 \text{ km} \times 2 \text{ km}$ 的正方形网格, 每个网格即地下水脆弱性单元区, 采样方式为等间距, 计算每一个样区的地下水脆弱性指数, 并把这个值作为样区中心点的属性值进行分析。

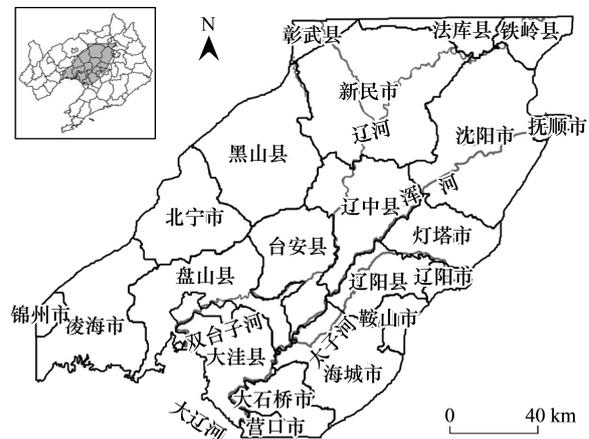


图 1 下辽河平原地理位置图

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

3 地下水脆弱性评价结果与分析

3.1 地下水脆弱性时空演变分析

通过公式 1 以及 ArcGIS 技术,得到研究区 1991 年、2000 年和 2010 年在 2 km×2 km 格网下的地下水脆弱性分布图(图 2),对研究区内脆弱性评分进行统计分析可得地下水脆弱性的时空演变状况(表 4)。

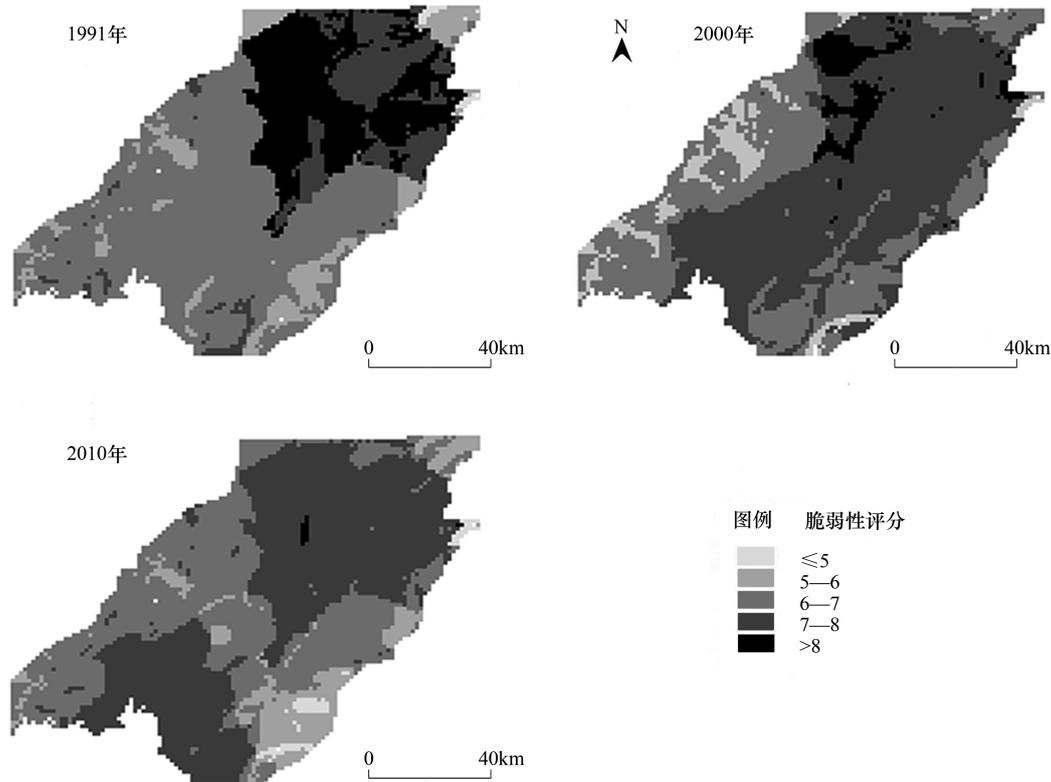


图 2 下辽河平原 2 km×2 km 格网上的地下水脆弱性分布图

Fig.2 Groundwater vulnerability distribution of lower reach of Liaohe River Plain under 2 km×2 km grid

表 4 地下水脆弱性评分分区各年比例及变化

Table 4 The percentage and variation of the groundwater vulnerability area in different years

时期 Period	脆弱性评分 Vulnerability rating				
	≤5	5—6	6—7	7—8	8<
1991 年	0.56%	9.96%	53.26%	14.07%	22.14%
2000 年	0	6.29%	33.30%	54.78%	5.63%
2010 年	1.46%	10.14%	38.78%	49.37%	0.25%

地下水脆弱性指数越高,地下水环境形势越严峻,由图 2 和表 4 可得,1991 至 2010 年期间,地下水脆弱性整体水平上呈现出先上升后下降的趋势,高脆弱区的面积比例明显减少,低脆弱区的面积比例明显增大。在空间格局上变化较为显著,高脆弱性集中区从以沈阳市为中心的周边城市向沿海城市方向扩散,而沈阳市等地区的地下水脆弱性明显得到改善。

1991 年脆弱性指数主要集中在 6—7 范围内,占研究区总面积的 53.26%,属于较高范围,主要分布在锦州市、鞍山市和盘锦市,这些区域是整个研究区中工农业发展最早的地区,在早期开发过程中人们地下水环境的污染防范意识薄弱,致使整体地下水脆弱性较高。以沈阳为中心向四周扩散的地区地下水脆弱性最高,其中最高级别脆弱区(脆弱性评分值大于 8)占 22.14%,主要分布在新民市和辽中县,这些地区均属于沈阳市,早期以农业为主,耕地面积比达到 0.46,单位面积施肥量更是达到 41.24 t/km²,为研究区最高。高强度的农业

种植与化肥施用致使当地地下水环境污染非常严重。

到 2000 年地下水脆弱性评分主要集中在 7—8 范围,面积占 54.78%,主要分布在盘锦市、鞍山市和沈阳市等地。1991 年到 2000 年期间,沈阳市的耕地面积进一步扩大,耕地比达到 0.52,但工业废水排放从原先的 11422.78 t/km²降到了 6403.69 t/km²,整体上取得了改善效果;鞍山市作为工业城市,2000 年的单位面积工业废水排放量达到 12207.09 t/km²,领先于其他城市,以工业发展为主的人类活动影响当地地下水环境恶化;盘锦市工农业均十分发达,而近海地带地质条件非常薄弱,资源开发与沿海养殖业兴起致使当地地下水脆弱性等级升高。锦州市的地下水脆弱性得到明显改善,可见当地建设风景旅游城市与港口城市,实施优先开发与优先保护政策得到显著效果。

2010 年的主要脆弱区仍然集中在 7—8 范围内,但比例明显下降,主要集中在沈阳市和盘锦市等地,其中沈阳市高脆弱性区比例进一步改善,人们环保意识的增强与管理工作的有效成果;盘锦市位于出海口,地下水水文地质条件薄弱,伴随东北老工业基地的振兴、能源开采以及沿海养殖业等活动的加强,该地区人均 GDP 连续多年排在辽宁省第一,但同时地下水环境面临巨大挑战,需加强地下水管理与保护工作,实现可持续发展。其他低脆弱区比例均得到提升,最高级别脆弱区进一步得到改善,仅为 0.25%。

3.2 评价结果合理性分析

利用地下水脆弱性等级与地下水中氮元素浓度成正比关系这一原理,对本次地下水脆弱性评价方法得到的结果进行检验分析。将多年平均水文地质参数数据与人为因子数据代入公式 1,结合 ArcGIS 制图功能得出多年平均地下水脆弱性分布图,并以此为底图,标出研究区中 31 个监测井的地理位置以及研究期内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)浓度资料(图 3),并对各监测点的氮元素浓度与对应的地下水脆弱性评分进行线性分析(图 4)。

由图 3 可得,氮元素浓度较高的监测井一般分布在地下水脆弱性评分较高地区,浓度较低的监测井一般分布在地下水脆弱性评分较低地区,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一定正比关系。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),拟合直线方程为 $y = 0.028x + 5.3864$,并将两组数据通过 SPSS 进行显著性检验,得到在 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,本次研究方法计算出的地下水脆弱性指数具有良好的科学应用性。

4 地下水脆弱性空间结构分析

4.1 空间结构变异性分析

根据已经计算出的采样区地下水脆弱性数值,用地统计学软件 GS+ 完成样本变异函数理论模型的拟合,

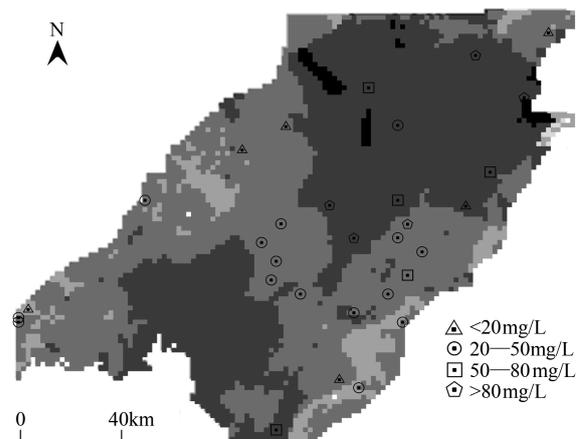


图 3 下辽河平原多年平均地下水脆弱性分布及氮元素浓度水平对应图

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

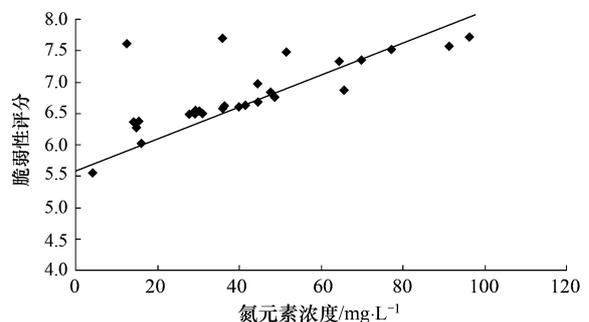


图 4 监测点氮元素浓度对应脆弱性评分值散点图

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

结果见表 5。由表可知,1991 年和 2000 年的地下水脆弱性指数模型拟合效果最佳,2010 年以球形拟合效果最好。

地下水脆弱性的空间异质性受结构性因素和随机性因素影响,结构性因素主要包括 DRASTIC 七个参数在内的水文地质条件,而随机性因素主要包括特殊脆弱性指标在内的人类活动因子。块金值 C_0 的大小表明地下水脆弱性变化受随机性因素影响的程度,本次研究中, $C_0/(C_0+C)$ 在 1991、2000 和 2010 年分别为 4%、5.9% 和 12.1%,呈不断上升趋势,说明在 2 km 的采样间距内,人类活动对地下水环境的影响程度越来越深。从表 5 中可得,1991 年、2000 年和 2010 年的地下水脆弱性空间分异变程分别为 5.32 km、1.77 km 和 5.40 km,所以在 2 km 的采样间距内地下水脆弱性具有高度的空间相关性。

表 5 下辽河平原地下水脆弱性理论变异函数

Table 5 The variogram of groundwater vulnerability degree in the lower reaches of Liaohe River Plain

时期 Period	模型 Model	C_0	C_0+C	A_0	$C_0/(C_0+C)$	R^2	RSS
1991	球形	0.118000	1.311000	1.93	0.090	0.998	2.462×10^{-3}
	指数	0.085000	2.108000	5.32	0.040	0.999	1.835×10^{-3}
	线性	0.161897	1.209168	1.33	0.134	0.994	8.757×10^{-3}
	高斯	0.241000	1.189000	1.40	0.203	0.984	2.3×10^{-2}
2000	球形	0.065000	0.480000	1.09	0.135	0.986	3.523×10^{-3}
	指数	0.033000	0.561000	1.77	0.059	0.994	1.569×10^{-3}
	线性	0.142126	0.559298	1.33	0.254	0.991	2.24×10^{-2}
	高斯	0.110000	0.477000	0.88	0.231	0.982	1.569×10^{-3}
2010	球形	0.065000	0.537000	5.40	0.121	0.990	2.917×10^{-3}
	指数	0.00100	0.559000	0.92	0.002	0.969	8.663×10^{-3}
	线性	0.239338	0.624800	1.33	0.383	0.695	8.57×10^{-2}
	高斯	0.125000	0.536000	0.64	0.233	0.986	3.819×10^{-3}

C_0 为块金值、 C 为偏基台值、 C_0+C 为基台值、 A_0 为变程、 R^2 为复相关系数、RSS 为残差

4.2 空间结构关联性分析

4.2.1 全局自相关分析

根据 1991 年、2000 年和 2010 年地下水脆弱性的空间分布数据,利用 Geoda095i 软件统计分析得出 Moran's I 散点图(图 5)。如图 5 所示,全局 Moran's I 值在 1991 年、2000 年和 2010 年时分别为 0.9171、0.9009 和 0.8869,表明研究区地下水脆弱性存在较强正相关关系,即地下水脆弱性在空间分布上存在集群现象,即高脆弱区与高脆弱区相邻,低脆弱区与低脆弱区相邻,而随着时间推移,总体呈现出略微下降趋势。

4.2.2 局部自相关分析

全局 Moran's I 指数可检验研究区内地下水脆弱性的整体空间分布模式,却不能反映相邻区域间的空间关联模式以及局域显著性水平,因此需要进一步研究局部小区的地下水脆弱性与相邻局部小区上的地下水脆弱性的相关程度。通过对研究单元的地下水脆弱性进行局域空间关联格局分析,得到 LISA 集聚图(图 6)与 LISA 显著性检验图(图 7)。

从图 6 中可以看出,1991 年“高一高”值分布集中,主要分布在沈阳市区、新民市和辽中县等地,这部分地区为高脆弱性地下水集中区,行政隶属于沈阳市。沈阳位于辽宁省中部,被钢铁基地鞍山,煤炭基地抚顺,化纤基地辽阳,煤铁基地本溪,石油基地盘锦,煤粮基地铁岭,电力基地阜新等 7 座大型工商业城市所包围,构成了经济联系特别紧密,结构性很强的工农业城市群,沈阳市作为中心地区,对周边城市工农业具有较强吸收力与辐射力,该地区地下水环境受人类活动影响很大,地下水脆弱性呈不断增强的趋势。“低—低”值区分布零散,主要分布在大洼县、海城市和铁岭县等地,这与同一时期的地下水脆弱性分布图基本一致。

2000 年研究区地下水脆弱性的“高一高”值地区基本没有发生变化,但是区域范围变小,沈阳市区已经不在范围以内,作为辽宁省省会城市,地理与经济发展中心,沈阳市的可持续发展具有重大意义,应实现优先

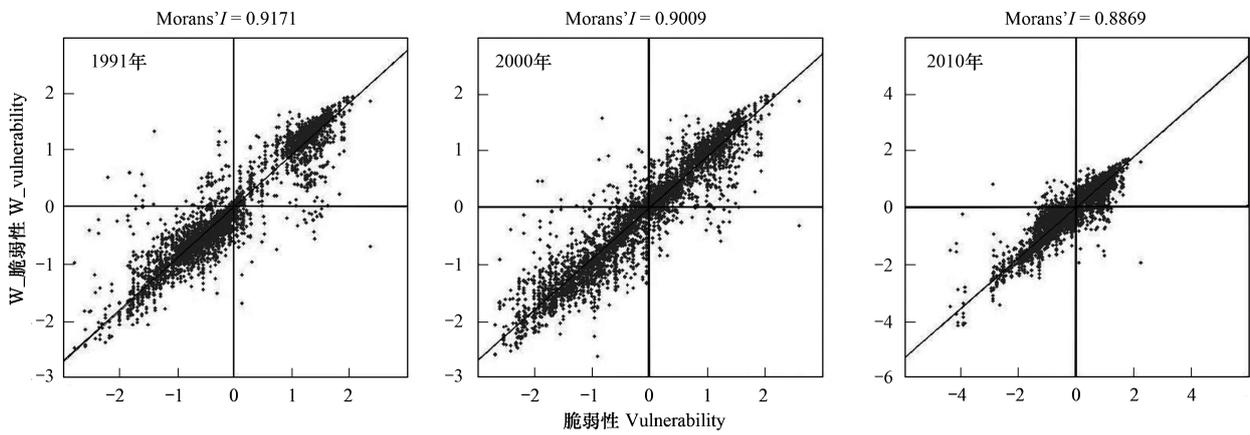


图 5 地下水脆弱性 Moran 散点图

Fig.5 The Moran scatter of the groundwater vulnerability degree

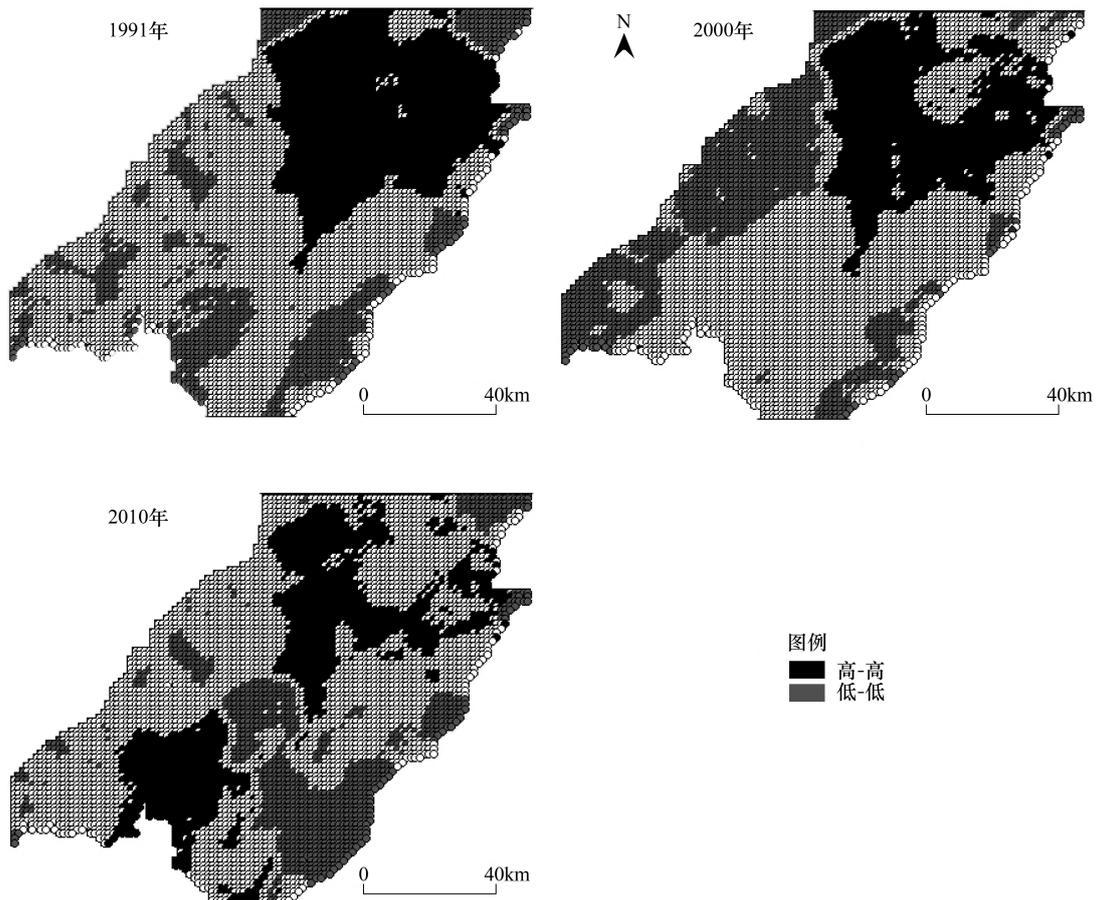


图 6 下辽河平原 3 个时期地下水脆弱性局部空间自相关 LISA 集群图

Fig.6 The LISA cluster graph of local spatial autocorrelation in the lower reaches of Liaohe River Plain in 1991, 2000 and 2010

保护与重点保护本区地下水环境,收到了显著成效。而“低—低”值区大部分面积从随机分布转变为集群分布格局,主要分布在下辽河平原西部地区。

2000 年至 2010 年研究区地下水脆弱性的集群结构发生了明显变化,位于沈阳各县市的“高一高”值区进一步变小,位于滨海三角洲的盘锦市、大洼县等地出现“高一高”集群,这与当地高速发展的经济发展活动是

紧密联系的。“低—低”值区则主要分布在下辽河平原的东南部,这部分地区地下水水资源丰富,有较强调节功能。

从图 7 中局部自相关显著性水平看,1991 年地下水脆弱性的“高一高”值区大部分为 0.01 的显著性水平,部分地区达到了 0.05,而“低—低”值区域大部分达到了 0.05,东南角地区的“低—低”值以 0.01 为主。而到了 2000 年,“高一高”值地区和“低—低”值地区的显著性水平都有下降趋势,均以 0.01 的显著性水平为主。2010 年显著性水平明显增强,滨海三角洲地区的“高一高”值分布区与位于台安县以及周边的“低—低”值地区以 0.05 的显著性水平为主,而位于研究区西北部和中部的“高一高”区与东南部的“低—低”区大部分都能达到 0.01。

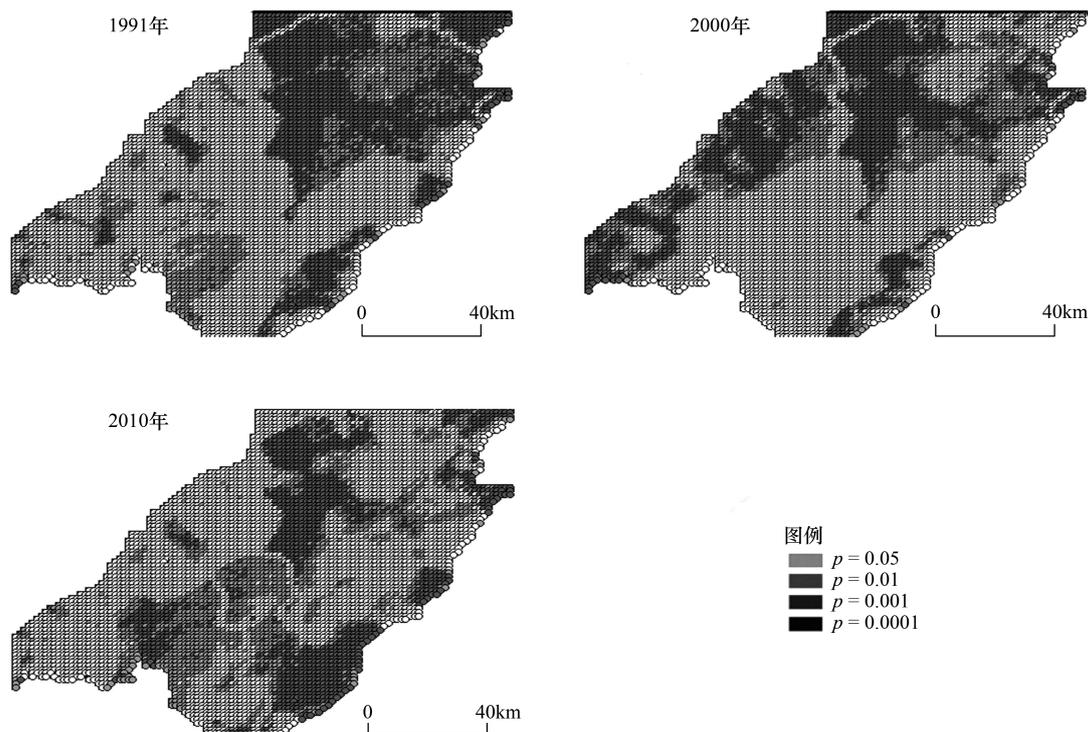


图 7 下辽河平原 3 个时期地下水脆弱性局部空间自相关 LISA 显著性水平图

Fig.7 The LISA significance level graph of local spatial autocorrelation in the lower reaches of Liaohe River Plain in 1991, 2000 and 2010

5 结论

本次研究以下辽河平原为研究区,综合 DRASTIC 模型与人为影响因子构建评价指标体系计算地下水脆弱性指数,通过空间自相关分析的 *Morans'I* 指数和空间变差函数为刻度指标,以 3 个时间断面为基础,分析自 1991 年到 2010 年下辽河平原地下水脆弱性及其空间结构的演变状况。研究结果表明:

(1)综合 DRASTIC 模型中水文地质参数与人为影响因子,以指数加权叠加法得到地下水脆弱性指数,通过地下水脆弱性与地下水水质中氮元素成线性关系这一原理对地下水脆弱性的评价结果进行合理性检验,结果显示出较好的线性拟合性,表明评价方法与评价结果结果具有一定说服力。

(2)通过 ArcGIS 的加权叠加功能得到下辽河平原地下水脆弱性的分布图,可直观清晰地看出三个时间段地下水脆弱性具体分布情况以及空间演变状况。在三个时间段内,地下水脆弱性整体呈现出先上升后下降的趋势,高脆弱区的面积比例明显减少,低脆弱区的面积比例明显增大。在空间分布上变化明显,由沈阳市为中心的高脆弱性区域向南方沿海城市方向扩散,而沈阳市等地的地下水脆弱性情况得到控制与改善。

(3)利用 GS⁺ 软件进行模型拟合分析得出 1991 年和 2000 年的地下水脆弱性指数模型拟合效果最佳,

2010 年以球形拟合效果最佳。 C_0 值比例在三个时期比例不断上升,人类活动对地下水脆弱性的影响程度不断加大。变程的变化趋势表明,本文采取的 2 km 采样区间具有较强空间自相关性。

(4) 全局 Moran's I 值在 1991 年、2000 年和 2010 年分别为 0.9171、0.9009 和 0.8869,表明研究区地下水脆弱性存在较强正相关关系,即地下水脆弱性在空间分布上存在集群现象,是存在一定内在联系的,非随机的。局部空间自相关分析表明,从 1991—2010 年间地下水脆弱性的空间集群结构发生了显著变化。“高一高”值地区从下辽河平原北部逐步向南部滨海三角洲地区集聚,而原先的“高一高”值地区范围逐步变小。“低—低”值地区由零散变集聚,由西部向东南部方向集聚。而地下水脆弱性的集群分布的显著性水平均发生明显变化。

在利用 DRASTIC 指数叠加法综合计算本质脆弱性和特殊脆弱性时,部分指标的脆弱性等级范围划分并无严格标准,本次研究结合研究区实情与前人研究基础进行经验性划定,权重确定为 DRASTIC 自带固定权重,均受主观因素影响较大,因此,采用更加科学合理的计算方法地下水脆弱性是有待进一步完善的。

参考文献 (References):

- [1] 王言鑫. 基于 GIS-WOE 法的下辽河平原地下水脆弱性研究 [D]. 大连:辽宁师范大学, 2009.
- [2] Vrba J, Zaporozec A. Guidebook on Mapping Groundwater Vulnerability. Castany G, Groba E, Romijn E. International Contributions to Hydrogeology Founded, 1987, 16.
- [3] Thirumalaivasan D, Karmegam M, Vengopal K. AHP-DRASTIC: Software for specific aquifer vulnerability assessment using DRASTIC model and GIS. Environmental Modeling & Software, 2003, 18:645-656.
- [4] Babiker I S, Mohamed M A A, Hiyama T, Kato K. A GIS-based DRASTIC model for assessing aquifer vulnerability in Kakamigahara Heights, Gifu Prefecture, central Japan. Science of the Total Environment, 2005, 345(1/3):127-140.
- [5] Saidi S, Bouri S, Dhia H B. Groundwater vulnerability and risk mapping of the Hajeb-jelma aquifer (Central Tunisia) using a GIS-based DRASTIC model. Environmental Earth Sciences, 2010, 59(7):1579-1588.
- [6] Panagopoulos G P, Antonakos A K, Lambrakis N J. Optimization of the DRASTIC method for groundwater vulnerability assessment via the use of simple statistical methods and GIS. Hydrogeology Journal, 2006, 14(6):894-911.
- [7] Kumar S, Thirumalaivasan D, Radhakrishnan N. GIS based assessment of groundwater vulnerability using drastic model. Earth Science, 2014, 39(1):207-216.
- [8] Rupert M G. Calibration of the DRASTIC ground water vulnerability mapping method. Ground Water, 2001, 39(4):625-630.
- [9] 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.
- [10] Antonakos A, Lambrakis N. 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(2/4):288-304.
- [11] Javadi S, Kavehkar N, Mousavizadeh M H, Mohammadi K. Modification of DRASTIC model to map groundwater vulnerability to pollution using nitrate measurements in agricultural areas. Journal of Agricultural Science and Technology, 2011, 13(2):239-249.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] 杨庆, 栾茂田. 地下水易污性评价方法: DRASTIC 指标体系. 水文地质工程地质, 1999, 26(2):4-9.
- [15] 鄂建, 孙爱荣, 钟永新. DRASTIC 模型的缺陷与改进方法探讨. 水文地质工程地质, 2010, 37(1):102-107.
- [16] 唐立强, 赵伟玲. 基于 DRASTIC 模型的地下水脆弱性评价方法评述. 安徽农业科学, 2012, 40(34):16782-16785.
- [17] 陈守煜, 伏广涛, 周惠成. 含水层脆弱性模糊分析评价模型与方法. 水利学报, 2002(7):23-30.
- [18] 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.
- [19] 张小凌, 李峰, 刘红战. 云南曲靖盆地地下水脆弱性模糊评价. 水资源与水工程报, 2013, 24(4):57-61.
- [20] 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):943-948.
- [21] 赵春红, 梁永平, 卢海平, 王维泰. 娘子关泉域岩溶水脆弱性模糊综合评价. 水文, 2013, 33(5):52-57.
- [22] 范琦, 王贵玲, 蒯文静, 陈浩. 地下水脆弱性评价方法的探讨及实例. 水利学报, 2007, 38(5):601-605.
- [23] 黄冠星, 孙继朝, 荆继红, 刘景涛, 陈玺. 珠江三角洲地区浅层地下水天然防污性能评价方法探讨. 工程勘察, 2008, (11):44-49.

- [24] 孙爱荣, 周爱国, 梁合诚, 马振兴, 鄂建. 南昌市地下水易污性评价指标体系探讨. 人民长江, 2007, 38(6):10-12.
- [25] 董华, 张发旺, 程彦培, 黄志兴, 倪增石, 高响. 论地下水环境系统内涵及其编图. 南水北调与水利科技, 2008, 6(6):44-46.
- [26] 孙才志, 胡冬玲, 杨磊. 下辽河平原地下水系统恢复力研究. 水利水电科技进展, 2011, 31(5):5-10.
- [27] 孙才志, 王言鑫. 基于 WOE 法的下辽河平原地下水硝酸盐氮特殊脆弱性研究. 水土保持研究, 2009, 16(4):80-84.
- [28] 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(21):7428-7440.
- [29] Aller L, Bennett T, Lehr J H, Petty R J, Hackett G. DRASTIC: A standardized system for evaluating groundwater potential using hydrogeological settings. Ada Oklahoma: Environmental Research Laboratory, 1985.
- [30] Hammerlinck J D, Arneson C S. Wyoming Ground Water Vulnerability Assessment Handbook. Latamie: University of Wyoming, 1998.
- [31] 李哈尔滨, 王政权, 王庆成. 空间异质性定量研究理论与方法. 应用生态学报, 1998, 9(6):651-657.
- [32] 王政权. 地统计学及在生态学中的应用. 北京: 科学出版社, 1999.
- [33] 张燕, 徐建华, 曾刚. 中国区域发展潜力与资源环境承载力的空间关系分析. 资源科学, 2009, 31(8):1328-1334.
- [34] 王劲峰, 廖一兰, 刘鑫. 空间数据分析教程. 北京: 科学出版社, 2010.