

基于 AHP 的 DRASTIC 模型在银川市潜水 防污性能评价中的应用

刘乃静, 赵银鑫, 吴文忠, 张晓东, 王改平, 张勇, 田硕丰

(宁夏回族自治区地质调查院, 宁夏 银川 750001)

摘要: [目的] 探讨银川市区域地下水防污性能, 为都市圈的建设、规划以及地下水资源的保护等方面提供科学依据。[方法] 以银川市绕城高速内的城区为研究区, 综合水文地质条件, 选取地下水埋深、净补给量、含水层富水性、土壤类型、包气带岩性和水力传导系数等 6 个评价因子, 利用层次分析法(AHP)确定因子权重, 建立适合银川市当地的地下水防污性能 DRASTIC 评价模型, 对银川市地下水防污性能进行了分区评价。[结果] ①银川市地下水防污性能整体表现为中等—弱, 防污性能弱区位于西夏区一带, 防污性能强区位于金凤区的北部地区; ②防污性评分与 NO_3^- 的污染特征存在一致性。[结论] 地下水防污性能评价是预防和保护地下水资源的重要手段。金凤区北部阅海湖区域可作为今后城市扩建的首选区域。

关键词: 防污性能评价; 地下水; DRASTIC 模型; 层次分析法; 银川市

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2021)01-0212-07

中图分类号: P641

文献参数: 刘乃静, 赵银鑫, 吴文忠, 等. 基于 AHP 的 DRASTIC 模型在银川市潜水防污性能评价中的应用[J]. 水土保持通报, 2021, 41(1): 212-218. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2021.01.030; Liu Naijing, Zhao Yinxin, Wu Wenzhong, et al. Application of DRASTIC model based on AHP in assessment of groundwater vulnerability in Yinchuan City [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2021, 41(1): 212-218.

Application of DRASTIC Model Based on AHP in Assessment of Groundwater Vulnerability in Yinchuan City

Liu Naijing, Zhao Yinxin, Wu Wenzhong, Zhang Xiaodong, Wang Gaiping, Zhang Yong, Tian Shuofeng

(Ningxia Institute of Geological Survey, Yinchuan, Ningxia 750001, China)

Abstract: [Objective] The vulnerability of regional groundwater in Yinchuan City was examined to provide a scientific basis for the construction, planning, and protection of groundwater resources in cities. [Methods] The urban area of Yinchuan City inside the beltway was considered as the study area. According to local hydrogeological conditions, six evaluation factors, such as depth to water, recharge of precipitation, water yield properties, soil type, impact of the vadose zone, and aquifer hydraulic conductivity, were selected. The corresponding weight was calculated by the analytic hierarchy process (AHP) to establish the DRASTIC model for groundwater vulnerability assessment. [Results] ① The overall performance of groundwater vulnerability in Yinchuan City was medium-weak. The weak area was located in Xixia District, and the strong area was located in the northern part of Jinfeng District. ② The evaluation results were consistent with the pollution characteristics of NO_3^- . [Conclusion] Groundwater vulnerability assessment is an important means to protect groundwater resources. The Yuehai Lake area in the northern part of Jinfeng District can be used as the preferred area for urban expansion in the future.

Keywords: groundwater vulnerability; groundwater; DRASTIC model; analytic hierarchy process (AHP); Yinchuan City

收稿日期: 2020-09-21

修回日期: 2020-10-20

资助项目: 宁夏财政厅财政专项“宁财(预)发银川市都市圈城市地质调查项目”[2017]320号); 宁夏回族自治区自然科学基金项目(2020AAC03444)

第一作者: 刘乃静(1990—), 女(汉族), 宁夏回族自治区盐池县人, 硕士, 助理工程师。主要从事水文地质调查评价工作。Email: yclnjj@163.com。

通讯作者: 张晓东(1980—), 男(汉族), 宁夏回族自治区固原市人, 博士, 高级工程师。主要从事遥感地质灾害研究工作。Email: 33131692@qq.com。

地下水资源作为银川市城市生活和工业用水主要来源^[1],自 20 世纪 80 年代以来,需求量不断扩大。由于不合理的机井布局,水井的布设密度、开采深度及开采层位等没有得到统一的规划管理,集中开采承压水已造成当地地下水降落漏斗半径逐年扩张、浅层地下水污染、污染的潜水越流补给承压水等环境地质问题的出现^[2],银川市的饮用水安全受到威胁。因此,有必要查明地下水在自然或人类活动的影响下引起污染的难易程度,即定量分析研究银川市地下水的防污性能。

目前,国内外在防污性能研究的过程中所采用的评价法有模糊数学法^[3]、GOD 模型法^[4]、SIGA 模型法^[5]、LSD 模型法等^[6],运用最为广泛的方法是 DRASTIC 模型法^[7-9]。中国最早于 1996 年与欧盟合作引入该模型,对大连和广州的地下水进行了地下水资源及其污染势评价^[10-11],之后经历了模型的改进^[12-18]、结合 GIS^[19-23]、AHP^[24-27]等技术手段的改良,成为目前在全国范围内使用最广泛、成熟的一种评价地下水防污性能的方法。任小荣^[28-29]等在 2007 年对银川平原的脆弱性进行了评价,崔秀凌等^[30]在 2013 年利用经验法评价了银川平原中部地下水防污性能,上述研究存在研究年代早、评价尺度大、主观性强等问题,本研究基于 AHP 法和 GIS 平台,在银川市绕城范围内进行精细化的地下水防污性能评价,期为银川市的地下水资源防治、保护及规划利用等工作提供最新的科学依据。

本文的研究方法层次分析法(analytic hierarchy process,简称 AHP)是一种可将定性与定量分析结合起来^[31]的系统分析法,常用于地下水防污性能评价的因子权重确定^[25-27]。通过对影响因子的两两对比,采用给出的 1—9 标度法构造判断矩阵,利用归一化确定各层次各因素之间的权重,判断矩阵的结果可通过随机一致性比率(consistency ratio,CR)来衡量,它是判断矩阵的一致性与平均随机一致性的综合指标,其计算公式为^[32]

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (1)$$

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - N}{N - 1} \quad (2)$$

式中: λ_{\max} 为最大特征值;CR 为判断矩阵的随机一致性比率; N 为判断矩阵的阶数;CI 为判断矩阵一致性指标;RI 为判断矩阵的平均随机一致性指标。当 $CR < 0.10$ 时,则认为判断矩阵具有满意的一致性。

DRASTIC 模型是一种用来评价区域地下水的

污染潜力的水质模型,最早是由美国的水井协会(NWWA)和美国环境保护局(USEPA)于 1987 年共同开发成型^[33],成功应用于当地县区尺度范围内的地下水易污性评价,该模型先后被加拿大、南非、欧盟、中国等国家广泛推广使用^[5]。模型一般选取地下水埋深(D)、地下水净补给量(R)、含水层介质(A)、土壤类型(S)、地形坡度(T)、包气带影响(I)和水力传导系数(C)等 7 个对潜水含水层的防污性有不同程度影响的评价因子。基于 AHP 获取各评价因子的权重与其分级评分加权构建地下水防污性综合指数 DI。计算公式:

$$DI = D_W D_R + R_W R_R + A_W A_R + S_W S_R + I_W I_R + C_W C_R \quad (3)$$

式中:下标为 W 的变量表示各评价因子的权重,下标为 R 的变量表示单项评价因子的分级评分值,范围为 1~10。DI 值越高,地下水防污性能相对越差,即地下水越易遭受污染;反之则地下水防污性能相对越好,地下水越不易遭受污染。

1 研究区概况及数据

1.1 自然地理

银川市位于中国西北部银川平原腹地,因西倚贺兰山、东临黄河,本次区内地貌单元有洪积扇、冲湖积平原(黄河二级阶地)以及洪积扇与冲积层过渡带的风积类地貌。属中温带干旱区,多年平均降水量 196.0 mm,多年平均蒸发量 1 558.7 mm。

1.2 水文地质条件

区内水文地质条件明显受地貌、岩性结构的控制,呈现出砂性土与黏性土互层的多层结构,在勘探深度 370 m 以浅一般有 4 个含水层:潜水(I)、第一承压水(II)、第二承压水(III)、第三承压水(IV),各含水层水力联系密切。

银川市的潜水类型主要为第四系松散岩类孔隙水(表 1)。潜水含水层岩性以细砂、粉细砂为主,厚 30~70 m,自南向北逐渐变薄,中部向东、西部变薄;水位埋深 1~8 m;单井涌水量一般大于 1 000 m³/d,水化学类型多为 HCO₃·Cl-Mg·Ca 型, HCO₃·SO₄-Mg·Na·Ca 型, Cl·SO₄-Na·Ca 型,水溶性总固体 282~3 581 mg/L,水质一般,个别区域受工业活动污染。补给来源以引黄渠系渗漏补给、灌溉入渗补给为主(80%),降雨入渗补给和侧向径流补给各占总补给量 10%左右,总体径流方向自西南向东北沿黄河流向汇入黄河,排泄方式以蒸发排泄为主(52%)^[34]。

表 1 银川市潜水类型及特征

地下水类型	含水岩组	含水层(自西向东)	地层代号	含水层主要岩性
第四系松散岩类孔隙水	I	全新统下部洪积层	Qh ^{1p}	卵石、砂卵砾石、含泥砂砾石、细砂、粉砂
		上更新统洪积层	Qp ^{3p}	
		风积层	Qh ^{2e}	
		全新统灵武组含水层	Qh ^{1l}	
		上更新统萨拉乌苏组含水层	Qp ^{3s}	
	II	上更新统洪积层	Qp ^{3p}	细砂、粉细砂
		上更新统萨拉乌苏组含水层	Qp ^{3s}	
	III	中更新统洪积层	Qp ^{2p}	细砂、粉砂
		中更新统贺兰组含水层	Qp ^{2h}	
	IV	下更新统银川组上部含水层	Qp ^{1yc}	细砂、粉砂

1.3 数据来源

本次研究使用的各评价因子数据大都来源于 2018 年《银川都市圈城市地质调查项目》的实测与调查结果,地下水水位埋深、土壤类型、包气带岩性、渗透系数、含水层单孔涌水量均源于 2018 年项目组成员调查的 200 口(0~5 m 深土石井)浅井、50 个双环渗水试验及 53 个水文钻孔试验结果,大气降雨量利用银川、贺兰降雨站 2018 年数据,降雨入渗系数采用《银川平原地下水资源合理配置调查评价报告》^[35]中的数值,土地利用类型数据为研究区 2017 年土地利用图。

2 DRASTIC 评价模型的建立

本文根据银川市实际情况,将中国地质调查局 2008 年发布的《地下水污染地质调查评价规范》(DD2008-01)中推广的 DRASTIC 模型进行适当改进,建立银川市浅层地下水防污性能评价 DRASTIC 指标体系,并借助 GIS 技术将有关参数进行综合。

2.1 评价因子

根据银川市的地质背景、水文地质条件及数据获取的程度,科学合理的选取评价因子。银川市位于平原区,地形平坦,地面坡度小于等于 2°,地形坡度在本次评价中不作考虑;区内潜水水位普遍较浅,调查过程中近一半的浅井水位埋深小于 2 m,表明银川市的

的潜水水面距离地表较近,易受污染;银川市的地下水补给来源除大气降水外,主要受大面积的农业灌溉产生的灌溉水补给,不同的土地利用类型对应的补给量差异明显;受地质、地貌及岩性结构的控制,银川市含水层的富水性具有明显的自西南向东北渐变特征;银川平原既有洪积物堆积,也有河流、湖沼相的交替沉积,造成区内土壤类型较多,包气带结构多样,含水层在空间上错综复杂等特征。因此,本文选定地下水埋深(D)、净补给量(R)、含水层富水性(A)、土壤类型(S)、包气带岩性(I)和渗透系数(C)等 6 个评价因子反映地质背景及人类活动对污染的影响。

2.2 基于 AHP 的因子权重

本次基于 AHP 的因子权重确定步骤:根据研究区的具体情况,在“1—9”的比较标度法的基础上两两对比评价因子的重要程度来创建 6 阶判断矩阵(表 2);利用归一化确定权重,计算判断矩阵的特征值,算出对应的特征向量,进而求得各评价因子的权重;对权重的合理性进行一致性检验,该判断矩阵的 $\lambda_{\max} = 6.4468$, $CR = 0.0709 < 0.10$,故判断矩阵一致性检验合格,所得权重值合理可靠^[32]。

2.3 因子的分级评分

本次 DRASTIC 模型中评价因子的评分值范围为 1~10,评分越高说明防污性能越差,按照该要求确定各因子分级评分及其分区(表 3,图 1)。

表 2 判断矩阵、AHP 确定的因子权重

评价因子	D	R	A	S	I	C	权重
D	1	7	9	6	1	8	0.3929
R	1/7	1	5	1/3	1/8	3	0.0710
A	1/9	1/5	1	1/5	1/9	1/3	0.0247
S	1/6	3	5	1	1/3	4	0.1249
I	1	4	6	4	1	8	0.3458
C	1/8	1/3	3	1/4	1/8	1	0.0407

注: D 为地下水埋深; R 为净补给量; A 为含水层富水性; S 为土壤类型; I 为包气带岩性; C 为渗透系数。下同。

表 3 银川市潜水防污性能各评价因子的分级及评分值

D/m	R/mm	A/(m ³ ·d ⁻¹)	土壤类型	岩性	C/(m·d ⁻¹)	评分值	防污性
0~1.5	>500		砾石	砾石	≥80	10	极难
1.5~3.0					40~80	9	很难
3.0~4.5	400~500	1 000~3 000		砂土	20~40	8	较难
4.5~9.0			砂土	砂性土夹黏土	8~20	7	略难
	300~400	500~1 000				6	稍难
9.0~15.0			砂壤土	上层砂土下层黏土		5	稍易
	150~300	<500	壤土		6~8	4	略易
15.0~22.0				上层黏土下层砂土	4~6	3	较易
22.0~30.0			黏壤土	黏性土夹砂土	2~4	2	很易
≥30.0	<150		非胀缩性黏土	黏土	0~2	1	极易

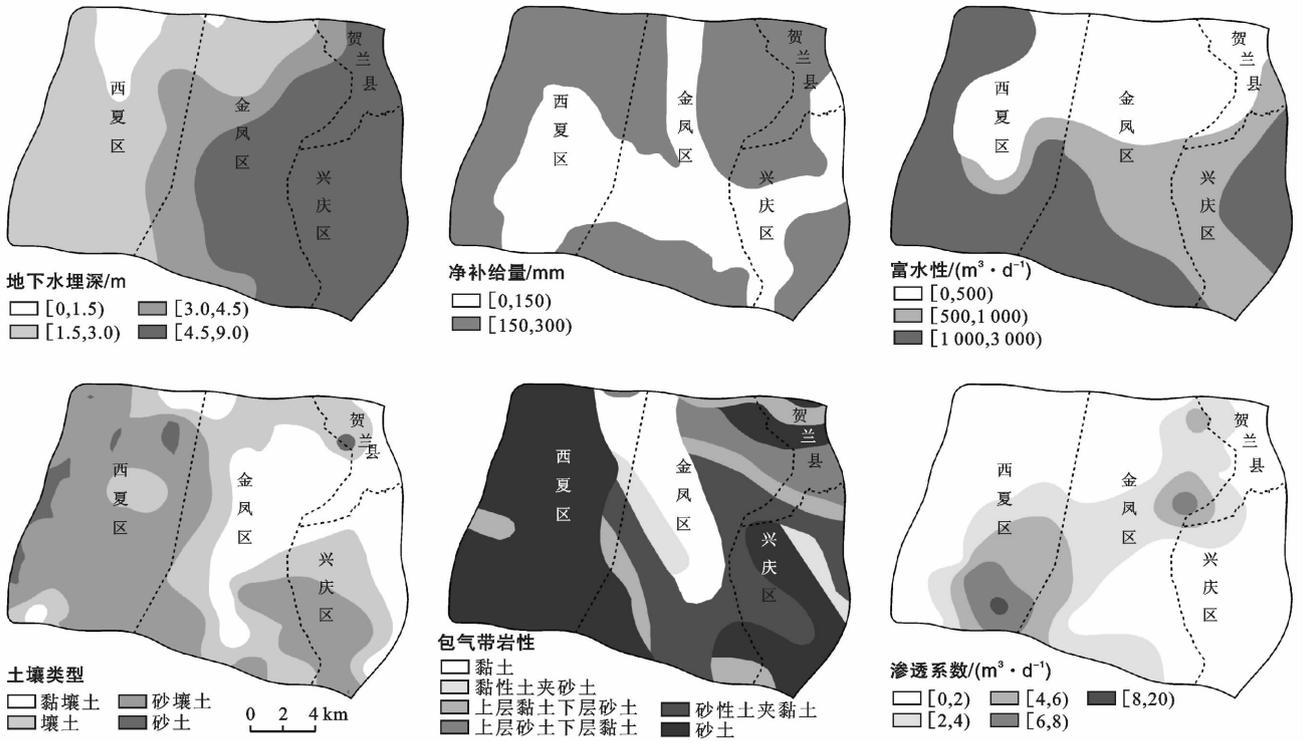


图 1 银川市潜水防污性能单因子分区特征

2.4 地下水防污性能综合指数分级

将以上各评价因子权重及评分代入公式(3)可定量得出银川市各区域的地下水综合防污指数(DI)。

防污性能是一个相对的概念^[12],本次用自然间断点分级法(Jenks)将防污性能计算结果分为 5 级来表示含水层防污性的相对高低(见表 4)。

表 4 银川市潜水防污性能分级标准

DI	<4.4	4.4≤DI<5.4	5.4≤DI<6.2	6.2≤DI<6.9	>6.9
等级	防污性能强	防污性能较强	防污性能中等	防污性能较弱	防污性能弱

3 结果与分析

3.1 评价结果

在掌握了各个评价因子的空间分布情况后,利用 ArcGIS 的空间分析功能将各单因子图的矢量数据转

化为栅格数据,再利用空间分析功能中的地图代数—栅格计算器叠加上 DRASTIC 模型的银川市地下水防污性能分区结果(见图 2)。

结合本次研究的成果(图 2,表 5),可以得出银川市地下水防污性能表现为中等—弱等。

(1) 防污性能强—较强区域主要位于研究区中部的金凤区及东北部的兴庆区、贺兰县,所占面积为 108.70 km², 占总面积的 27.28%, 污染物较难进入含水层, 综合各影响因素为不易受到污染区。

(2) 地下水防污性能弱—较弱地区分布广泛, 防污性较弱区面积为 73.96 km², 约占总面积的 18.56%, 防污性弱区域面积为 133.38 km², 占总面积的 33.47%, 污染物较易进入含水层, 综合各影响因素为较易受到污染区。

(3) 防污性能中等的地区在研究区内的金凤区与兴庆区均有分布, 所占面积为 82.42 km², 占总面积的 20.68%, 整体对外界污染物的敏感性一般。

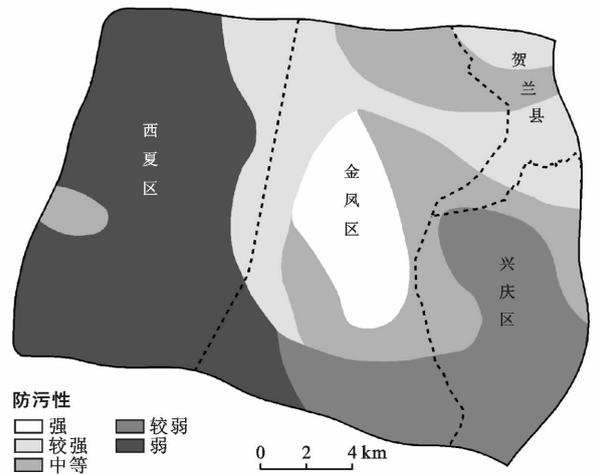


图 2 银川市地下水防污性能分区

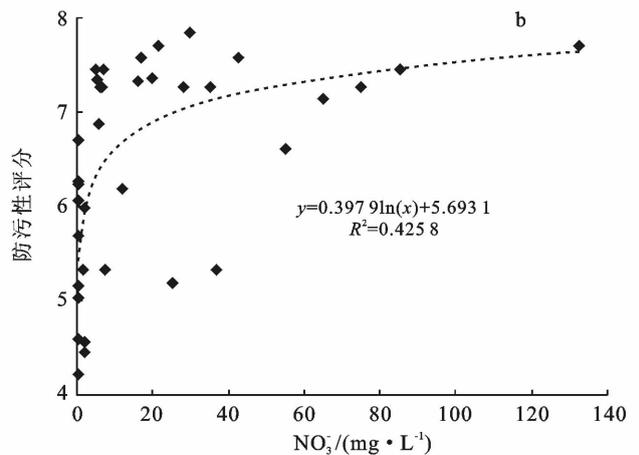
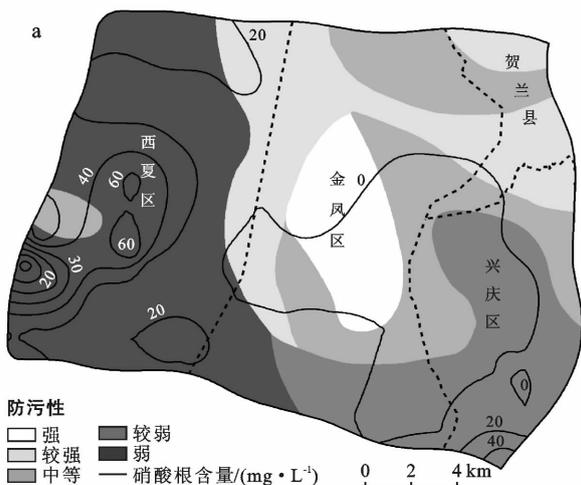
表 5 银川市地下水防污性等级面积统计结果

等级	防污性能强	防污性能较强	防污性能中等	防污性能较弱	防污性能弱
面积/km ²	31.65	77.05	82.42	73.96	133.38
比例/%	7.94	19.34	20.68	18.56	33.47

3.2 防污性评分可靠性分析

研究表明, 人类活动产生的污染物是导致地下水体中的 NO₃-N 含量升高的主要原因^[28], 说明可以利用 NO₃⁻ 的等值线图来验证本次评价结果的可靠性。将《银川都市圈城市地质调查项目》在研究区内调查所得的地下水中 NO₃⁻ 含量的等值线图叠加到防污性能评价分区图上进行比较(图 3a), 可以看出 NO₃⁻ 浓度大于 20 mg/L 的区域大都位于西夏区及兴庆区南部的地下水防污性能弱—较弱区; 同时, 利用 ArcGIS 的空间分析模块提取各采样点对应的防污性评分, 绘

制各点 NO₃⁻ 含量和防污性评分相关性曲线(图 3b), 可以看出两个变量存在一定的正相关关系, ($p < 0.01$) $R^2 = 0.4258$, 随着地下水中 NO₃⁻ 含量的增加, 防污性评分也跟着增大, 防污性能逐渐减弱, 说明地下水防污性能分区与 NO₃⁻ 的污染特征存在一致性。这证明了本文中所采用的基于层次分析法(AHP)的 DRASTIC 地下水防污性能评价方法具有一定的科学性, 可作为银川市地下水防污性能评价的一种有效手段。评价结果对当地的水资源保护、城市发展具有一定的指导和参考作用。



注: 图 3a 中细实线旁数值为硝酸根浓度值(mg/L)。

图 3 银川市地下水中 NO₃⁻ 含量和防污性评分关系

3.3 评价结果与分析

结合区内地下水类型特征(表 1)及《银川都市圈城

市地质调查项目》自西向东方向的水文地质剖面成果可以发现: 防污性能弱区的地下水在西部洪积扇前缘

的洪积层含水层中,如 Yg32 孔的水位埋深 2.04 m,含水层岩性以细砂为主,个别区域含砾石,含水层介质颗粒大、分选好,细砂孔隙度(n)为 38.33%,具有孔隙大、透水性强等特征,可以储存相对较多的地下水;该区域地貌类型以洪积扇和风积地貌为主,主要特征是地下水水位埋深浅,土壤类型以砂壤土为主,包气带岩性为砂土,渗透系数在风积地貌处明显较大,说明此区域地表污染物容易进入地下水,对外界污染物的敏感度高,进入水体后更容易迁移扩散,污染面易增大。防污性强区位于金凤区阅海湖附近,拥有较厚层的湖积相沉积层,如 Yg28 孔的水位埋深 4.70 m,土壤类型以黏壤土为主,包气带岩性以黏土为主,是良好的地下水保护屏障,阻隔地表污染物进入地下水中。对于银川市不同地区地下水防污性能的差异性,应采取相应的措施,在最大程度上防止地下水发生污染。

对比银川市土地利用类型(图 4),可以看出人类活动对当地地下水的防污性影响主要表现为西、南部的农业活动,受农业灌溉的影响,一定程度降低了该区域地下水防污性能。而研究区内金凤区北部阅海湖附近为防污性强—较强区,该区域土地利用类型以水体湖泊、水田为主,这说明在多年地质沉积作用的影响下,湖积相沉积是潜水的良好保护屏障,建议相关政府部门在规划今后的城市扩建区及工矿居民地时优先考虑此区域。

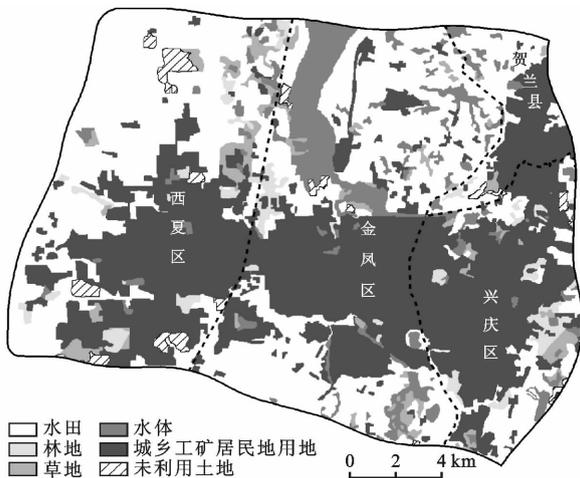


图 4 银川市土地利用类型

4 结论与讨论

本文在调查清楚研究区的水文地质条件的基础上,建立了适合银川市的基于 AHP 的地下水防污性能 DRASTIC 评价模型。

(1) 研究区内的地下水防污性能总体表现为中

等—弱,其中,地下水防污性能强—较强区面积 108.70 km²,占总面积的 27.28%,污染物较难进入含水层;地下水防污性能弱—较弱区面积 207.34 km²,占总面积的 52.03%,污染物较易进入含水层;地下水防污性能中等区面积 82.42 km²,占总面积的 20.68%,整体对外界污染物的敏感性一般。

(2) 评价结果与实地调查的地下水 NO₃⁻ 污染情况一致,说明评价方法科学,结果可靠,为银川市都市圈的建设和规划以及地下水资源的保护均具有重要的参考意义。

(3) 研究区防污性能弱区地下水在洪积扇前缘的洪积层含水层中,具有孔隙大、透水性强等特征,可储存较多的地下水;地貌类型决定了该区水位埋深浅、渗透系数大、包气带岩性和土壤类型都以砂性土为主等特征,地表污染物易进入地下水中。防污性强区位于阅海湖附近,拥有较厚层的湖积相沉积层,包气带岩性和土壤类型都以黏性土为主,阻隔地表污染物进入地下水中。对于不同地区地下水防污性的差异性,应采取相应的防治措施。结合区内土地利用现状,建议相关政府部门在规划今后的城市扩建区及工矿居民地时优先考虑金凤区北部阅海湖区域。

本文在选取评价因子时虽考虑到人为影响因素,但只限于农业活动的影响,未考虑在城市扩张过程中城市建设用地对地面入渗和污染物污染地下水的影响,尽管银川市区内工业活动较少,但对评价结果还是有一定的影响。此外,地下水防污性能评价的结果具有一定时效性,鉴于地下水资源需要长期的监管和保护,一段时间之后还需进一步更新研究。

[参 考 文 献]

- [1] 薛凤玲,丁伟.银川市地下水资源的合理开发、保护和利用[J].城市建设理论研究,2011(27):2095-2104.
- [2] 曹峰.浅析银川市地下水资源开发利用与保护[J].科学时代,2014(7):1-2.
- [3] 刘淑芬,郭永海.区域地下水防污性能评价方法及其在河北平原的应用[J].河北地质学院学报,1996,19(1):41-45.
- [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):482-486.
- [5] Ibe K M, Nwankwor G I, Onyekuru S O. Assessment of ground water vulnerability and its application to the development of protection strategy for the water supply aquifer in Owerri, Southeastern Nigeria [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2001, 67(3): 323-360.
- [6] Rupert M G. Calibration of the DRASTIC ground water vulnerability mapping method [J]. Groundwater, 2001,

- 39(4):625-630.
- [7] 李爱军,张丰. 基于 DRASTIC 的山东省丘陵山区地下水防污性能评价[J]. 山东国土资源,2015,31(5):62-66.
- [8] 谢朝福. 基于 DRASTIC 模型的地下水脆弱性评价方法及应用:以荆泉断块为例[J]. 西部资源,2016(1):32-33,37.
- [9] 袁春鸿,王阳,焦丽香. 基于 DRASTIC 的济南北跨新城浅层地下水防污性能评价[J]. 山东国土资源,2017,33(4):41-46.
- [10] 杨庆,栾茂田. 地下水易污性评价方法:DRASTIC 指标体系[J]. 水文地质工程地质,1999(2):4-9.
- [11] 杨庆,栾茂田,崇金著,等. DRASTIC 指标体系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):684-688.
- [12] 张泰丽,冯小铭,刘红樱,等. 基于 DRASTIC 的丽水市地下水防污性能评价[J]. 地球与环境,2012,40(1):115-120.
- [13] 郭正法. 基于改进的 DRASIC 泗阳城区浅层地下水防污性能评价[J]. 西部探矿工程,2015,27(1):92-94.
- [14] 钟佐桑. 地下水防污性能评价方法探讨[J]. 地学前缘,2005,12(S1):3-11.
- [15] 孙闪闪,贺玉龙. 地下水易污性评价方法-DRASTIC 指标体系及改进方法[J]. 中国新技术新产品,2011(22):11.
- [16] 姜志群,朱元甦. 地下水污染敏感性评价中 DRASTIC 法的应用[J]. 河海大学学报(自然科学版),2001,29(2):100-103.
- [17] 王焰新. 浅层孔隙地下水系统环境演化及污染敏感性研究:以山西大同盆地为例[M]. 北京:科学出版社,2004.
- [18] 陈守煜,伏广涛,周惠成,等. 含水层脆弱性模糊分析评价模型与方法[J]. 水利学报,2002,33(7):23-30.
- [19] 马力,冯波,谭文清,等. 基于 GIS 的吉林省西部平原区浅层地下水防污性能评价[J]. 水文地质工程地质,2009,36(1):60-62.
- [20] 王存政,于武军,李建萍,等. 基于 GIS 技术的湛江市浅层地下水防污性能分析与评价[J]. 环境工程,2012,30(S2):582-585.
- [21] 赵旭,陈曦. 基于 GIS 的 DRASTIC 下辽河平原地区地下水防污性评价[J]. 地质与资源,2015,24(4):394-398.
- [22] 冯加远,刘博榕. 基于 GIS 叶尔羌河流域地下水防污性能评价[J]. 地下水,2016,38(1):85-86.
- [23] 李平平,薛雅彬,郎涛,等. 基于 GIS 与 DRASTIC 模型的嘉峪关市平原区地下水防污性能评价[J]. 中国水土保持,2018(6):65-68.
- [24] 崔健,李霄,都基众,等. 基于 GIS 的浑河冲洪积扇地浅层地下水防污性能评价[J]. 地质与资源,2011,20(2):137-140.
- [25] 黄晓燕,李朗,姚炳魁. AHP 在地下水防污性能评价中的应用:以江苏浅层孔隙地下水为例[J]. 地下水,2014,36(2):51-53.
- [26] 管后春,李运怀,彭苗枝,等. 基于 Mapgis 和 AHP 的 DRASTIC 模型在黄山市中心城区地下水防污性能评价中的应用[J]. 地球与环境,2016,44(2):255-260.
- [27] 王松,管后春. 基于 Mapgis 和 AHP 的 DRASTIC 模型的合肥市地下水防污性能评价[J]. 西部资源,2018(6):92-96.
- [28] 任小荣. 银川平原地下水脆弱性评价[D]. 陕西 西安:长安大学,2007:55-57.
- [29] 郁冬梅,吴学华,赵青. 银川平原地下水脆弱性评价在防止污染中的应用[J]. 农业科学研究,2011,32(2):22-25.
- [30] 崔秀凌,李庚阳. 银川市地下水防污性能研究[J]. 农业科学研究,2013,34(3):14-18.
- [31] 许树柏. 实用决策方法:层次分析法原理[M]. 天津:天津大学出版社,1988.
- [32] 张晓东,刘湘南,赵志鹏,等. 基于层次分析法的盐池县地质灾害危险性评价[J]. 国土资源遥感,2019,31(3):183-192.
- [33] Aller L, Bennett T, Lehr J H, et al. DRASTIC: A system to evaluate the pollution potential of hydrogeologic settings by pesticides [M]// ACS Symposium Series. Washington, DC: American Chemical Society, 1986:141-158.
- [34] 方华山. 银川地区水文地质条件分析及地下水水源地保护区划分[D]. 陕西 西安:长安大学,2009.
- [35] 吴学华,钱会,郁冬梅. 银川平原地下水资源合理配置调查评价[M]. 北京:地质出版社,2008.