

基于模糊数学的北京城区地下空间 地质适宜性评价

孙文洁¹⁾, 杨文凯^{2)*}, 邓岳飞³⁾, 李文杰¹⁾

1) 中国矿业大学(北京)国家煤矿水害防治工程技术研究中心, 北京 100083;

2) 中国矿业大学(北京)机电与信息工程学院, 北京 100083;

3) 建设综合勘察研究设计院有限公司, 北京 100007

摘 要: 以北京六环以内的核心城区为例, 在系统分析研究区地质条件的基础上, 综合考虑敏感因素对地下空间开发地质适宜性的影响, 从而构建地下空间适宜性评价指标体系, 并利用层次分析法确定评价指标权重, 最后采用模糊数学综合评判法对研究区地下空间开发适宜性进行了评价。结果表明: 研究区地下空间开发适宜性以适宜性好和较好为主, 占比 60.11%, 地质环境条件较好, 总体比较适宜地下空间开发, 活动断裂、水源地分布和古河道分布 3 个敏感因素是制约研究区地下空间开发的主要地质因素。

关键词: 适宜性评价; 地下空间; 敏感因素; 模糊数学

中图分类号: TU42 文献标志码: A doi: 10.3975/cagsb.2023.051001

Geological Suitability Evaluation of Underground Space in Beijing Urban Area Based on Fuzzy Mathematics

SUN Wenjie¹⁾, YANG Wenkai^{2)*}, DENG Yuefei³⁾, LI Wenjie¹⁾

1) National Coal Mine Water Hazard Prevention Engineering Technology Research Center,
China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083;

2) School of Mechanical Electronic and Information Engineering, China University of Mining and Technology (Beijing),
Beijing 100083;

3) China Institute of Geotechnical Investigation and Surveying Limited, Beijing 100007

Abstract: Taking the core urban area within the sixth ring road of Beijing as the study area, this study examined the influence of sensitive factors on the development of underground space, based on a system analysis of regional geological conditions. An appropriate suitability assessment index system for the exploitation and use of the underground space was established. The weights of indexes were determined using the analytic hierarchy process, and a fuzzy mathematics comprehensive evaluation method was used to evaluate the suitability of underground space as a resource in this region. The results show that 60.11% of the underground space in the study area is suitable for development; therefore, the geological conditions are relatively favorable for underground space development. Three sensitive factors—active fault, distribution of water source and distribution of palaeochannel—were found to be the main geological factors restricting the development of underground space in the study area.

Key words: suitability evaluation; underground space; sensitive factors; comprehensive fuzzy mathematics

本文由国家自然科学基金项目(编号: 42172282; 42372285)、煤炭资源与安全开采国家重点实验室开放基金项目(编号: SKLCRSM22KFA16)

和华北科技学院应急管理部工业安全事故分析与监测预警重点实验室开放基金项目(编号: OF2301)联合资助。

收稿日期: 2022-10-09; 改回日期: 2023-04-25; 网络首发日期: 2023-05-11。责任编辑: 张改侠。

第一作者简介: 孙文洁, 女, 1979 年生。博士, 副教授。主要从事矿山环境及煤矿防治水方面的研究。E-mail: swj@cumt.edu.cn。

*通信作者: 杨文凯, 男, 1994 年生。硕士, 讲师。研究方向为矿井水害防治与矿山环境。E-mail: kevinyoung_nuli@163.com。

随着我国社会经济的迅速发展和城市化水平的不断提高,城市范围不断扩大,对城市空间的需求日益增加。城市摊大饼式的迅速发展引起了一系列诸如资源短缺、交通拥堵、环境污染恶化、高房价等“大城市病”问题,严重制约了城市的健康可持续发展。为了缓解人口规模增加与地面空间资源相对短缺的局面,从根本上解决“大城市病”问题,不再单一地向高处和城市周边发展,向地下要空间、向深地要资源,对城市地下空间资源进行开发利用已经成为现代城市发展的必然趋势(童林旭, 2005; 王桂新, 2011; 范剑才等, 2016; 宋迎昌, 2016; 谢和平等, 2017; 雷升祥等, 2019)。

北京市作为我国的政治文化中心和首都,经济发展极快,人口密度大,城市化水平高,其“城市病”问题也是十分严重。本文以北京六环范围内的核心城区为例,对研究区地下空间开发适宜性展开评价,旨在为城市规划建设和合理开发城市地下空间资源提供科学的指导依据。

1 研究区地质环境概况

1.1 地形地貌条件

研究区西部与山地毗邻,山区多属中低山地形,山前有少量残山分布。研究区主要为冲洪积作用形成的平原地貌,依据地貌成因、形态特征可划分为:山前坡洪积倾斜平原和冲洪积平原。地势整体呈现西高东低的趋势。

1.2 水文地质条件

研究区主要分布 4 个地下水系统,赋存特征如下(鲍亦冈等, 2001; 黄栋, 2009; 李世君等, 2014; 王丽亚, 2014; 蔡向民等, 2016):

(1)永定河地下水子系统:主要分布在北京城近郊区、大兴北部和通州西部等地区。顶部和中上部砂、卵砾石十分裸露,主要划分为潜水和承压水区,含水层表现为单层和双层砂卵砾石结构,颗粒粗厚度大,富水性好,单井出水量一般可达 $5\,000\text{ m}^3/\text{d}$ 以上。

(2)潮白河地下水子系统:分布在研究区顺义西南部和通州西北部区域。中上部含水层主要为砂卵砾石,累计厚度 $50\sim 70\text{ m}$ 不等,局部可达百余米,富水性较好,单井出水量在 $5\,000\text{ m}^3/\text{d}$ 以上。

(3)温榆河冲洪积扇地下水子系统:分布在海淀山后和昌平区,以冲洪积扇群为特征,由分布在昌平—南口—北安河一带的南口冲洪积扇、西峰山冲洪积扇和白洋城冲洪积扇连接形成,统称为南口冲洪积扇。

(4)拒马河—大石河冲洪积扇地下水子系统:

主要分布在西南的房山区,最主要为大石河冲洪积扇,在窦店—石楼—东营一线北部为潜水区,主要为单一的砂卵砾石含水层;南部为承压水区,含水层主要为多层砂和砂砾石结构,含水层颗粒变细,厚度增大。

1.3 工程地质条件

研究区下伏基岩地层主要为各类岩浆岩、沉积岩和变质岩,多出露于山区地带,第四系松散堆积物岩性主要为各类砂、卵砾石,沙壤土和壤土等,在山前以洪积、冲积物为主,在扇中地带表现为由牛轭湖形成的河湖相堆积(北京市地质矿产局, 1991; 王迎迎, 2011; 谢振华等, 2011; 王新娟等, 2015)。从东南到西北,沉积厚度逐渐变薄,沉积物颗粒逐渐变粗。在河流冲洪积扇的中上部以及西、北部山前地带为潜水区,含水层主要表现为砂卵砾石结构,顶部覆盖薄层黏性土。在冲积平原地区和冲洪积扇的中下部处于承压水与潜水并存区域,主要表现为亚黏土和砂卵砾石多层交互。

1.4 地质构造

研究区位于北京迭断凹陷、京西迭隆起和大兴迭隆起三个构造单元上,主要发育永定河断裂、南口—孙河断裂 2 条北西向断裂,以及八宝山断裂、黄庄—高丽营断裂、顺义断裂、南苑—通县断裂 4 条北东向断裂。

2 地下空间开发地质适宜性评价

2.1 建立评价指标体系

地下空间地质环境适宜性评价是根据地质背景条件、地质环境质量差异及其变化趋势,以合理开发利用地下空间,保证地下空间开发利用的科学性、安全性、可持续性为目的,结合工程建设规划要求,按照一定的评价标准和评价方法对特定区域内地质环境适宜程度进行分区评价,以此为依据,结合研究区地质背景和北京市地下空间资源利用规划,并依照评价指标选取和指标体系构建的“综合评价原则”“典型科学性原则”“成果实用原则”和“生态原则”,本次研究选取地形地貌、水文地质条件和工程地质条件作为一级评价指标,并在一级指标下选取地貌类型、地形坡度、地下水埋深、含水层富水性、渗透系数、含水介质类型和土壤岩性介质共 7 个二级评价指标。

除以上因素外,还应考虑到敏感因素对地下空间开发利用的影响。敏感因素是指对研究区地下空间开发适宜性有一定限制作用的地质环境因素(夏友等, 2014; 刘森等, 2019),当进行地下空间开发时,应该尽可能避开敏感地质因素存在的区域以及

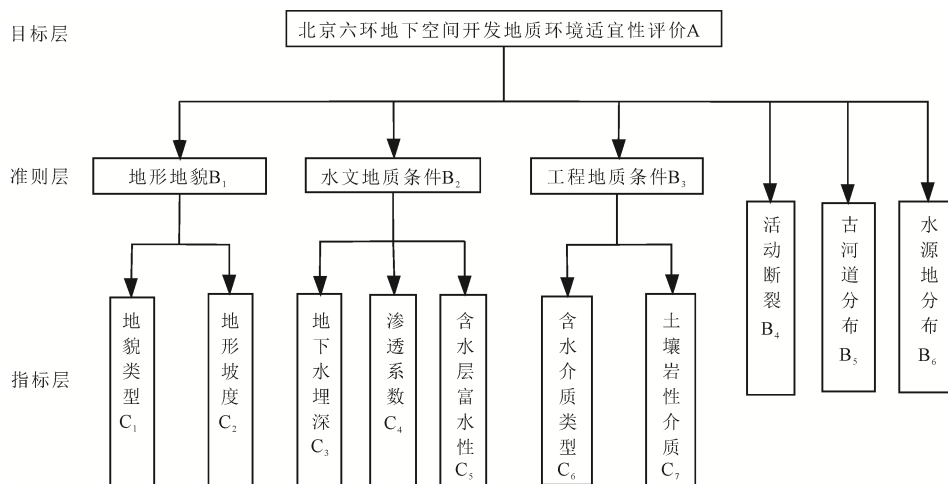


图1 基于敏感因素控制条件下层次分析结构模型图

Fig. 1 Hierarchical analysis structure model based on sensitivity factors

周边受其影响的区域。结合研究区实际情况,选取活动断裂、水源地分布和古河道分布作为本次研究的敏感因素,并将其作为一级评价指标展开评价研究。

最终构建北京市六环研究区地下空间地质环境适宜性评价指标体系,如图1所示。

2.2 评价方法与模型

本文采用 1: 66.66 万地形底图,剖分网格单元大小为 $1\text{ km} \times 1\text{ km}$,将研究区剖分为 2 091 个评价单元,并利用模糊综合评判模型对基于敏感因素控制条件下的研究区地下空间开发适宜性进行评价。

根据研究区地下空间开发适宜性评价指标体系,一级模糊评判指标个数 $n=10$,二级模糊评判指标个数 $n=6$,本文将研究区地下空间开发适宜性划分为四个等级,即一级和二级模糊评判等级 m 取值均为 4。据图 1,建立第一层评价指标因素集 $U=(\text{地形地貌}, \text{水文地质条件}, \text{工程地质条件}, \text{活动断裂}, \text{古河道分布}, \text{水源地分布})$,第二层评价指标分别为 $B_1=(\text{地貌类型}, \text{地形坡度})$, $B_2=(\text{地下水埋深}, \text{渗透系数}, \text{含水层富水性})$, $B_3=(\text{含水介质类型}, \text{土壤岩性介质})$, $B_4=(\text{活动断裂})$, $B_5=(\text{古河道分布})$, $B_6=(\text{水$

源地分布),建立研究区对应的适宜性评语集 $V=(\text{适宜性好}, \text{适宜性较好}, \text{适宜性较差}, \text{适宜性差})$ 。

2.3 确定评价指标因素权重

据层次分析结构模型图,结合专家给定的评价因子标度,构建目标层 A —准则层 $B_i(i=1, 2, 3, 4, 5, 6)$ 以及准则层 $B_i(i=1, 2, 3)$ —指标层 $C_j(j=1\sim 7)$ 判断矩阵,分别计算一级评价指标和二级评价指标的权重值,并计算二级评价指标权重总序,层次单排序和层次总排序及其一致性检验结果见表 1—表 5 所示。其中, CI 为一致性指标, RI 为随机一致性指标, CR 为一致性比率, $\lambda_{\max}$ 为最大特征根, W 为特征向量。

(1)目标层 A —准则层 B_i 判断矩阵及一致性检验见表 1。

(2)准则层 B_i —指标层 C_j 判断矩阵及一致性检验
地形地貌、水文地质条件和工程地质条件三个一级评价指标与目标层的判断矩阵及一致性检验结果见表 2 至表 4;活动断裂、古河道分布和水源地分布三个一级评价指标无二级指标层,或者可以处理成二级指标为其本身,二级指标权重即为 1,因此一级评价指标权重即为总排序权重。

表1 判断矩阵 $A-B_i$ 及一致性检验Table 1 Judgment matrix and consistency test of $A-B_i$

$A-B_i$	地形地貌 B_1	水文地质条件 B_2	工程地质条件 B_3	活动断裂 B_4	古河道分布 B_5	水源地分布 B_6
地形地貌 B_1	1	1/2	1/3	1/5	1/4	1/5
水文地质条件 B_2	2	1	1/2	1/3	1/3	1/3
工程地质条件 B_3	3	2	1	1/3	1/2	1/3
活动断裂 B_4	5	3	3	1	3	1
古河道分布 B_5	4	3	2	1/3	1	1/3
水源地分布 B_6	5	3	3	1	3	1
一致性检验	$\lambda_{\max}=6.202\ 8$, $CI=0.040\ 6$, $RI=1.24$, $CR=0.032\ 7<0.1$ $W=(0.046\ 6, 0.080\ 2, 0.113\ 6, 0.298\ 5, 0.162\ 6, 0.298\ 5)^T$					

(3)层次总排序及一致性检验

地下空间开发适宜性评价指标总排序权重如表 5 所示。

由表 5, 最终一级指标对研究区地下空间开发适宜性评价的权重向量, 即 $A=\{a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, a_6\}=\{0.046\ 6, 0.113\ 6, 0.080\ 2, 0.298\ 5, 0.162\ 6, 0.298\ 5\}$, 二级评价因素相对一级指标重要性的权重向量: $A_1=\{a_{11}, a_{12}\}=\{0.500\ 0, 0.500\ 0\}$, $A_2=\{a_{21}, a_{22}, a_{23}\}=\{0.400\ 0, 0.200\ 0, 0.400\ 0\}$, $A_3=\{a_{31}, a_{32}\}=\{0.666\ 7, 0.333\ 3\}$, $A_4=\{a_{41}\}=\{1\}$, $A_5=\{a_{51}\}=\{1\}$, $A_6=\{a_{61}\}=\{1\}$ 。

2.4 确定评价因子隶属度函数及隶属度

利用模糊综合评价模型进行单因素模糊评判、确定模糊关系矩阵时, 主要通过隶属度函数来确定隶属度(潘朝等, 2013)。为克服评判等级之间的突跃性, 考虑等级之间的过渡性, 对于定量指标将采用三角形分布线性隶属函数, 数学模型见

图 2。对于定性指标将采用经验值法确定。其中式(1)至式(4)为四个评价等级的三角隶属度函数计算公式。

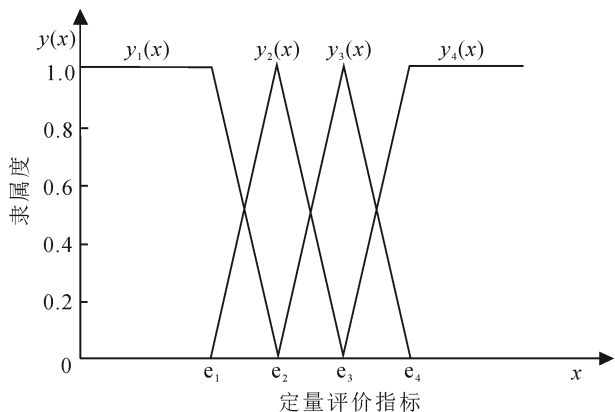


图 2 三角形隶属度函数模型
Fig. 2 Model of triangular membership function

表 2 判断矩阵 B_1-C_j 及一致性检验
Table 2 Judgment matrix and consistency test of B_1-C_j

B_1-C_j	地貌类型 C_1	地形坡度 C_2
地貌类型 C_1	1	1
地形坡度 C_2	1	1
一致性检验	$\lambda_{\max}=2, CI=0$, 完全一致 $W=(0.500, 0.500)^T$	

表 3 判断矩阵 B_2-C_j 及一致性检验
Table 3 Judgment matrix and consistency test of B_2-C_j

B_2-C_j	地下水埋深 C_3	渗透系数 C_4	含水层富水性 C_5
地下水埋深 C_3	1	2	1
渗透系数 C_4	1/2	1	1/2
含水层富水性 C_5	1	2	1
一致性检验	$\lambda_{\max}=3, CI=0, RI=0.58, CR=0<0.1$ $W=(0.400\ 0, 0.200\ 0, 0.400\ 0)^T$		

表 4 判断矩阵 B_3-C_j 及一致性检验
Table 4 Judgment matrix and consistency test of B_3-C_j

B_3-C_j	含水介质类型 C_6	土壤岩性介质 C_7
含水介质类型 C_6	1	2
土壤岩性介质 C_7	1/2	1
一致性检验	$\lambda_{\max}=2, CI=0$, 完全一致 $W=(0.666\ 7, 0.333\ 3)^T$	

表 5 基于敏感因素控制的评价指标权重分配表
Table 5 Evaluation index weight allocation table based on sensitivity factors

目的	一级指标	权重	二级指标	权重	总排序权重
研究区地下空间开发适宜性评价	地形地貌	0.046 6	地貌类型	0.500 0	0.023 3
			地形坡度	0.500 0	0.023 3
	水文地质条件	0.113 6	地下水埋深	0.400 0	0.032 0
			渗透系数	0.200 0	0.016 0
			含水层富水性	0.400 0	0.032 0
	工程地质条件	0.080 1	含水介质类型	0.666 7	0.075 8
			土壤岩性介质	0.333 3	0.027 9
	活动断裂	0.298 5	活动断裂	1	0.298 5
	古河道分布	0.162 6	古河道分布	1	0.162 6
	水源地分布	0.298 5	水源地分布	1	0.298 5

通过公式(1)至式(4)计算确定每个因素对应不同评价等级的隶属度, 从而构成单因素模糊关系矩阵 R , 结合评价因素权重和隶属度, 计算得到一级、二级模糊评判向量 $B = A \circ R = \{b_1, b_2, b_3, b_4\}$, 依据最大隶属度原则, 确定评价单元的适宜性结果。

$$y_1(x) = \begin{cases} 1 & x < e_1 \\ \frac{e_2 - x}{e_2 - e_1} & e_1 < x < e_2 \\ 0 & x < e_2 \end{cases} \quad (1)$$

$$y_2(x) = \begin{cases} 0 & x < e_1, x > e_3 \\ \frac{x}{e_2} & e_1 < x < e_2 \\ 0 & x > e_2 \end{cases} \quad (2)$$

$$y_3(x) = \begin{cases} 0 & x < e_2, x > e_4 \\ \frac{x}{e_3 - e_2} & e_2 < x < e_3 \\ \frac{-x}{e_4 - e_3} + e_4 & e_3 < x < e_4 \end{cases} \quad (3)$$

$$y_4(x) = \begin{cases} 0 & x < e_3 \\ \frac{x}{e_4 - e_3} - e_4 + 1 & e_3 < x < e_4 \\ 1 & x > e_4 \end{cases} \quad (4)$$

一级、二级模糊评判向量计算过程如下所示。现以研究区平原区处编号为 1259 的网格单元为例, 该网格单元影响因子值如表 6 所示。

$$B_1 = A_1 \circ R_1 = \{0.50 \quad 0.50\} \otimes \begin{Bmatrix} 0.75 & 0.25 & 0 & 0 \\ 0.75 & 0.25 & 0 & 0 \end{Bmatrix} = \{0.75 \quad 0.25 \quad 0 \quad 0\}$$

$$B_2 = A_2 \circ R_2 = \{0.40 \quad 0.20 \quad 0.40\} \otimes \begin{Bmatrix} 0.80 & 0.20 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.20 & 0.80 \\ 0 & 0 & 0.70 & 0.30 \end{Bmatrix} = \{0.32 \quad 0.08 \quad 0.32 \quad 0.28\}$$

$$B_3 = A_3 \circ R_3 = \{0.67 \quad 0.33\} \otimes \begin{Bmatrix} 0 & 0 & 0.10 & 0.90 \\ 0.85 & 0.15 & 0 & 0 \end{Bmatrix} = \{0.28 \quad 0.05 \quad 0.67 \quad 0.60\}$$

$$B_4 = A_4 \circ R_4 = \{1\} \otimes \begin{Bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 \end{Bmatrix} = \{0.00 \quad 0.00 \quad 0.00 \quad 1.00\}$$

$$B_5 = A_5 \circ R_5 = \{1\} \otimes \begin{Bmatrix} 0 & 0.50 & 0.50 & 1 \end{Bmatrix} = \{0.00 \quad 0.50 \quad 0.50 \quad 0.00\}$$

$$B_6 = A_6 \circ R_6 = \{1\} \otimes \begin{Bmatrix} 0 & 0.50 & 0.50 & 1 \end{Bmatrix} = \{0.00 \quad 0.50 \quad 0.00 \quad 1.00\}$$

$$B = A \circ R = \begin{Bmatrix} 0.0466 \\ 0.1136 \\ 0.0802 \\ 0.2985 \\ 0.1626 \\ 0.2985 \end{Bmatrix} \otimes \begin{Bmatrix} 0.75 & 0.25 & 0.00 & 0.00 \\ 0.32 & 0.08 & 0.32 & 0.28 \\ 0.28 & 0.05 & 0.07 & 0.60 \\ 0.00 & 0.00 & 0.00 & 1.00 \\ 0.00 & 0.50 & 0.50 & 0.00 \\ 0.00 & 0.50 & 0.50 & 0.00 \end{Bmatrix} = \{0.09 \quad 0.25 \quad 0.27 \quad 0.39\}$$

表 6 编号 1259 网格单元影响因子值

Table 6 Grid unit impact factor values of number 1259

条件层	影响因子层	影响因子值
地形地貌条件	地貌类型	二级阶地
	地形坡度/%	2~4
水文地质条件	地下水埋深/m	>30.5
	渗透系数/(m/s)	>81.5
	含水层富水性 /(m ³ /d)	富水性不均一
工程地质条件	含水介质类型	卵砾石
	土壤岩性介质	黏土质亚黏土
活动断裂	活动断裂	断裂内
古河道分布	古河道分布	古河道外
水源地分布	水源地分布	保护区外

依据最大隶属度原则, 该网格单元评价等级为适宜性差。

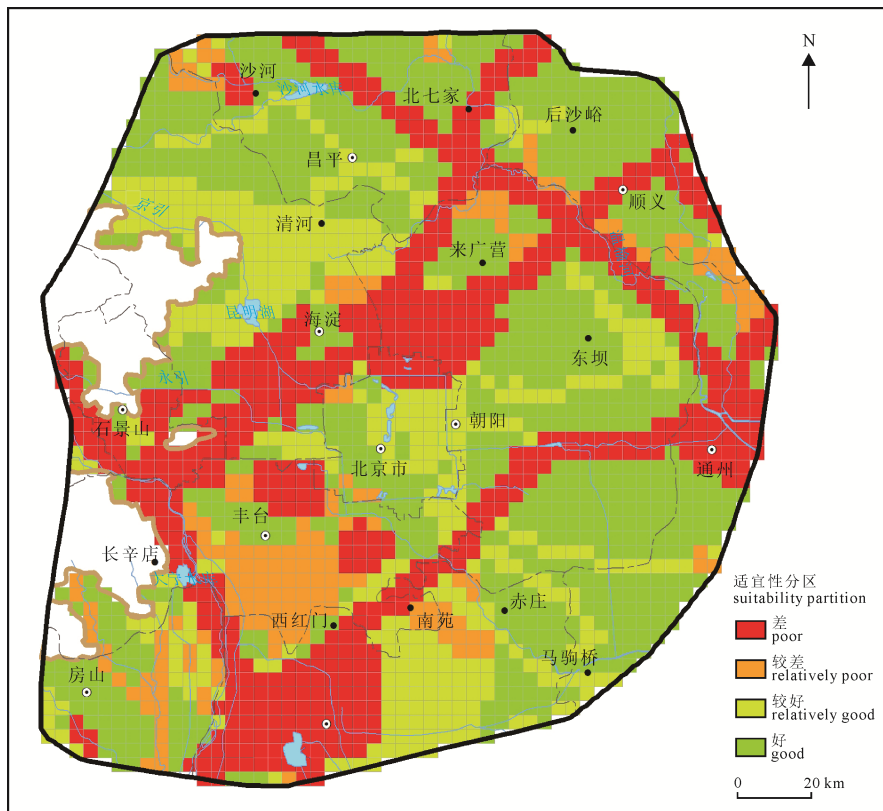


图 3 基于模糊数学评价的适宜性综合评价分区图

Fig. 3 Partition map of comprehensive suitability evaluation based on fuzzy mathematics

2.5 模糊综合评判与分区

根据以上方法和流程,结合 MATLAB 计算得到每个网格单元的二级模糊评判向量,依据最大隶属度原则,确定网格单元评价等级。将网格单元计算结果导入 GIS 地理信息系统,与属性数据库进行连接,根据属性的不同将研究区地下空间开发适宜性划分为四个评价等级,通过设置不同的颜色参数进行显示,最终得到研究区地下空间开发适宜性评价等级分区图,如图 3 所示。

2.6 评价结果

研究区评价面积为 $2\,091\text{ km}^2$,适宜性好区域面积 874 km^2 ,占比 39.74%,主要分布在东南部四海庄—亦庄一线和王四营—次渠镇一线、东部的东坝、南十里居附近、东北部的后沙峪以及西北部的上庄—沙河一线。适宜性较好区域面积 426 km^2 ,占比为 20.37%,主要分布在研究区南部的瀛海庄、孙村和金星庄附近、中部的北京市区以及中西部的白家疃和清河镇附近。适宜性较差区域分布面积为 228 km^2 ,分布占比 10.91%,主要分布在西南部的榆树庄—马场—土岗—羊坊一带。适宜性差区域面积 606 km^2 ,占比 28.98%。受 2 条北西向断裂和 4 条北东向断裂的影响,适宜性差区域分布也呈现出北西向和北东向的条带状交叉分布;同时海淀和通州两区还分布有水源地保护区和古河道,导致其多数区域不适宜地下空间开发利用。

3 结论

(1)将活动断裂、水源地保护区和古河道分布作为一级评价指标展开研究,增强了其对地下空间开发利用的影响程度,评价结果更符合敏感地质因素对地下空间开发的制约性。

(2)研究区地下空间开发适宜性以适宜性好和较好为主,占比 60.11%,地质环境条件较好,总体比较适宜地下空间开发。

(3)研究区不适宜地下空间开发的区域主要受活动断裂、水源地保护区和古河道分布的影响,尤其在活动断裂的影响下,呈现北西向和北东向交叉分布。

Acknowledgements:

This study was supported by National Natural Science Foundation of China (Nos. 42172282 and 42372285), Open Fund of State Key Laboratory of Coal Resources and Safe Mining (No. SKLCRSM22KFA16), and Open Fund of Hebei State Key Laboratory of Mine Disaster Prevention, North China Institute of Science and Technology (No. OF2301).

参考文献:

- 北京市地质矿产局, 1991. 北京市区域地质志[M]. 北京: 地质出版社.
- 鲍亦冈, 刘振锋, 王世发, 等, 2001. 北京地质百年研究——北京地区基础地质研究的历史与最新成果[M]. 北京: 地质出版社.
- 蔡向民, 张磊, 郭高轩, 等, 2016. 北京平原地区第四纪地质研究新进展[J]. 中国地质, 43(3): 1055-1066.
- 范剑才, 赵坚, 赵志业, 2016. 新加坡 NTU 深层地下空间规划探讨[J]. 地下空间与工程学报, 12(3): 600-606.
- 黄栋, 2009. 北京市平原区地下水脆弱性研究[D]. 北京: 首都师范大学.
- 刘森, 董志良, 2019. 雄安新区城市地下空间资源开发适宜性评价[J]. 河北地质大学学报, 42(6): 57-62.
- 李世君, 孙少游, 于洋, 2014. 水文地质测绘报告[R]. 北京: 北京市地质工程勘察院.
- 雷升祥, 申艳军, 肖清华, 等, 2019. 城市地下空间开发利用现状及未来发展理念[J]. 地下空间与工程学报, 15(4): 965-979.
- 潘朝, 吴立, 左清军, 等, 2013. 基于模糊数学的武汉市地下空间开发地质适宜性评价[J]. 安全与环境工程, 20(2): 19-23.
- 宋迎昌, 2016. 治理大城市病需要新思维[J]. 中国党政干部论坛, (7): 76-78.
- 童林旭, 2005. 地下空间与未来城市[J]. 地下空间与工程学报, (3): 323-328.
- 王桂新, 2011. 中国“大城市病”预防及其治理[J]. 南京社会科学, (12): 55-60.
- 王丽亚, 2014. 北京平原区地下水可持续利用模型研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京).
- 王新娟, 李志萍, 刘凯, 2015. 基于新水情下的北京地下水资源可持续利用调查评价及保护规划建议成果报告[R]. 北京: 北京市水文地质工程地质大队.
- 王迎迎, 2011. 北京市平原区地下水回灌数值模拟研究[D]. 北京: 清华大学.
- 谢和平, 高明忠, 张茹, 2017. 地下生态城市与深地生态圈战略构想及其关键技术展望[J]. 岩石力学与工程学报, 36(6): 1301-1313.
- 夏友, 马传明, 2014. 郑州市地下空间资源开发利用地质适宜性评价[J]. 地下空间与工程学报, 10(3): 493-497.
- 谢振华, 李志萍, 刘凯, 2011. 地下水防污性能及环境容量评价成果报告[R]. 北京: 北京市水文地质工程地质大队.

References:

- Beijing Municipal Bureau of Geology and Mineral Resources, 1991. Regional Geology of Beijing[M]. Beijing: Geological Publishing House(in Chinese).
- BAO Yigang, LIU Zhenfeng, WANG Shifa, et al., 2001. Centennial study of Beijing geology: History and Latest Achievements of Basic Geological Research in Beijing Area[M]. Beijing: Geological Publishing House(in Chinese).

- CAI Xiangmin, ZHANG Lei, GUO Gaoxuan, et al., 2016. New Progress in the study of Quaternary geology in Beijing Plain[J]. *Geology in China*, 43(3): 1055-1066(in Chinese with English abstract).
- FAN Jiancai, ZHAO Jian, ZHAO Zhiye, 2016. Planning of Deep Underground Space in NTU Campus[J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 12(3): 600-606(in Chinese with English abstract).
- HUANG Dong, 2009. Study on groundwater vulnerability in Beijing plain[D]. Beijing: Capital Normal University(in Chinese with English abstract).
- LIU Sen, DONG Zhiliang, 2019. Suitability Evaluation of Urban Underground Space Resources Development in Xiongan New Area[J]. *Journal of Hebei GEO University*, 42(6): 57-62(in Chinese with English abstract).
- LI Shijun, SUN Shaoyou, YU Yang, 2014. Hydrogeological mapping report[R]. Beijing: Beijing Institute of Geological Engineering Investigation(in Chinese).
- LEI Shengxiang, SHEN Yanjun, XIAO Qinghua, et al., 2019. Present Situations of Development and Utilization for Underground Space in Cities and New Viewpoints for Future Development[J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 15(4): 965-979(in Chinese with English abstract).
- PAN Chao, WU Li, ZUO Qingjun, et al., 2013. Geological Suitability Evaluation of the Development of Underground Space in Wuhan City Based on Fuzzy Mathematics[J]. *Safety and Environmental Engineering*, 20(2): 19-23(in Chinese with English abstract).
- SONG Yingchang, 2016. New thinking is needed to cure diseases in big cities[J]. *Chinese Cadres Tribune*, (7): 76-78(in Chinese).
- TONG Linxu, 2005. Underground Space and Future City[J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, (3): 323-328(in Chinese with English abstract).
- WANG Guixin, 2011. China's Megacity Problems and Prevention[J]. *Nanjing Journal of Social Sciences*, (12): 55-60(in Chinese with English abstract).
- WANG Liya, 2014. A model study of groundwater sustainability in Beijing plain[D]. Beijing: China University of Geosciences(in Chinese with English abstract).
- WANG Xinjuan, LI Zhiping, LIU Kai, 2015. Report on the results of the investigation and evaluation of the sustainable utilization of groundwater resources in Beijing based on the new water regime and the recommendations for protection planning[R]. Beijing: Beijing Hydrogeology Engineering Geology Brigade(in Chinese).
- WANG Yingying, 2011. Study on numerical simulation of groundwater recharge in plain area of Beijing[D]. Beijing: Tsinghua University(in Chinese with English abstract).
- XIE Heping, GAO Mingzhong, ZHANG Ru, et al., 2017. The subversive idea and its key technical prospect on underground ecological city and ecosystem[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 36(6): 1301-1313(in Chinese with English abstract).
- XIA You, MA Chuanming, 2014. Geo-environmental Suitability Assessment of Underground Space Resources Exploitation and Utilization in Zhengzhou City[J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 10(3): 493-497(in Chinese with English abstract).
- XIE Zhenhua, LI Zhiping, LIU Kai, 2011. Report on Assessment Results of Groundwater Anti pollution Performance and Environmental Capacity[R]. Beijing: Beijing Hydrogeology Engineering Geology Brigade(in Chinese).