

基于约束条件的深圳市南山区地下空间开发地质适宜性评价

张晓波, 刘 凯, 蒋 鹏, 贾伍慧

Geological suitability evaluation of underground space development in the Nanshan District of Shenzhen based on constraint conditions

ZHANG Xiaobo, LIU Kai, JIANG Peng, and JIA Wuhui

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202206003>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

城市地下空间开发利用的地质安全评价内容与方法

Methods and contents of geological safety evaluation for urban underground space development and utilization

董英, 张茂省, 李宁, 杨敏, 程秀娟, 朱才辉 水文地质工程地质. 2020, 47(5): 161-168

雄安多要素城市地质标准体系研究

A study of the multi-factor urban geology standard system in Xiongan New Area

林良俊, 韩博, 马震, 张曦, 李红英, 夏雨波, 郭旭, 裴艳东, 李海涛, 李洪强, 王雨山 水文地质工程地质. 2021, 48(2): 152-156

大牛地气田区地下水水质模糊综合评价

Fuzzy comprehensive evaluation of groundwater quality of the Daniudi gas field area

梁乃森, 钱程, 穆文平, 段扬, 朱阁, 张日升, 武雄 水文地质工程地质. 2020, 47(3): 52-59

区域地下水污染调查取样点布设量化分配方法

Quantitative sample distribution in regional groundwater contamination investigation

李颖智, 蔡五田, 耿婷婷, 张涛, 张智印 水文地质工程地质. 2019, 46(5): 24-30

通过永定河渗漏补给地下水的适宜性评估研究

The suitability assessment of groundwater recharge by leakage of the Yongding River

曹欣怡, 翟远征, 李木子, 潘成忠, 郑富新, 芦红, 夏雪莲, 滕彦国, 王金生 水文地质工程地质. 2022, 49(1): 20-29

基于时空维度耦合的地质灾害发育程度评价研究

A study of the evaluation of geo-hazards development degree based on time-space coupling

曲雪妍, 李媛, 房浩, 杨旭东, 谢振桦, 尹春荣, 张艳玲, 佟彬 水文地质工程地质. 2022, 49(1): 137-145



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202206003

张晓波, 刘凯, 蒋鹏, 等. 基于约束条件的深圳市南山区地下空间开发地质适宜性评价 [J]. 水文地质工程地质, 2023, 50(4): 213-224.

ZHANG Xiaobo, LIU Kai, JIANG Peng, *et al.* Geological suitability evaluation of underground space development in the Nanshan District of Shenzhen based on constraint conditions[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2023, 50(4): 213-224.

基于约束条件的深圳市南山区地下空间开发 地质适宜性评价

张晓波¹, 刘 凯¹, 蒋 鹏², 贾伍慧¹

(1. 中国地质科学院, 北京 100037; 2. 深圳市勘察研究院有限公司, 广东 深圳 518026)

摘要: 地下空间资源是城市的重要资源之一, 土地资源有限的深圳市亟需开展地下空间地质适宜性评价以指导地下空间开发利用。地下空间开发地质适宜性受多种地质因素制约, 需采取恰当的评价体系与方法。文章以深圳市南山区为研究区, 结合地质背景与深圳市地下空间资源利用规划, 提出将约束地质因素作为一级评价指标的约束评价体系, 并分别利用经验分值评价法和模糊综合评价法对常规体系和约束体系的浅层(0~15 m)和次浅层(>15~30 m)地下空间进行地质适宜性评价。结果显示: (1) 相对于常规评价体系, 约束评价体系提高了约束性地质因素的总体权重; (2) 约束体系下地质环境适宜性差和不适宜区主要分布在断裂带、地质灾害高发区以及水源地区域, 与研究区实际地质条件更为符合; (3) 规划的地下空间重点开发区在开发利用过程中应该注意不适宜区因砂土液化引起的地层失稳、地面塌陷等问题, 合理规避约束性活动断裂带区域岩体破碎、地下水富集等问题。研究可为深圳市南山区地下空间资源利用规划提供有力支撑。

关键词: 城市地质; 层次分析法; 模糊综合评价法; 适宜性评价; 深圳市南山区

中图分类号: P642.5

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2023)04-0213-12

Geological suitability evaluation of underground space development in the Nanshan District of Shenzhen based on constraint conditions

ZHANG Xiaobo¹, LIU Kai¹, JIANG Peng², JIA Wuhui¹

(1. Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China; 2. Shenzhen Investigation & Research Institute Co. Ltd., Shenzhen, Guangdong 518026, China)

Abstract: Urban underground space resource is one of the vital resources of the city. Shenzhen is the city with limited land resources and urgently needs to carry out geological suitability evaluation of underground space to guide the development and utilization of underground space. However, the development of underground space resource is restricted by a variety of geological factors. It is necessary to use appropriate methods to evaluate the geological suitability of underground space development. Taking the Nanshan District of Shenzhen as the study area, this paper proposes a constraint evaluation system that takes the constrained geological factors as the first-

收稿日期: 2022-06-03; 修订日期: 2022-09-18

投稿网址: www.swdzgcdz.com

基金项目: 中国地质调查局地质调查项目(DD20221677-2); 中央财政基本科研业务费(JKY202004); 国家重点研发计划项目(2019YFB1504102)

第一作者: 张晓波(1982-), 男, 博士, 高级工程师, 主要从事城市地质研究。E-mail: zhangxiaobo@cags.ac.cn

通讯作者: 刘凯(1983-), 男, 硕士, 正高级工程师, 主要从事水文地质调查研究。E-mail: liukai@cags.ac.cn

level evaluation index and combines the geological background of the study area with the planning of underground space resources utilization in Shenzhen. The geological suitability of shallow underground space (0–15 m) and sub-shallow underground space (>15–30 m) in the study area of the conventional system and constrained system is evaluated by using the empirical score evaluation method and fuzzy comprehensive evaluation method. The results show that (1) compared with the conventional evaluation system, the constraint evaluation system improves the overall weight of the constraint geological factors. (2) According to the evaluation results of the constraint system, the poor and unsuitable areas are mainly distributed in the fault zone, high incidence of geological disasters and surface water area, which is more consistent with the actual geological conditions of the study area. (3) Attention should be paid to the geological problems such as stratum instability and ground collapse caused by sand liquefaction in the unsuitable areas during the development and utilization of the key development zones in planning. Meanwhile, geological problems such as rock fragmentation and groundwater enrichment in the region of restricted active faults should be avoided reasonably. This study strongly supports the planning of underground space resource utilization in the Nanshan District of Shenzhen.

Keywords: urban geology; analytical hierarchy process; fuzzy comprehensive evaluation; suitability evaluation; Nanshan District of Shenzhen

随着社会经济的发展和人口的增长,我国城市建设用地的短缺和交通拥堵严重制约了许多新兴城市的可持续发展^[1]。在土地资源有限的情况下,城市地下空间的开发利用已成为城市发展的必然选择^[2–3]。深圳市是粤港澳大湾区的核心城市之一,也是我国最早的经济特区^[4]。改革开放以来,深圳市在产业经济、城市建设和人居环境等方面都取得了巨大的成就。随着城市建设的迅速发展和人口的急剧增长,深圳市土地资源逐渐紧缺,合理开发城市地下空间资源,对提升城市综合承载能力有重要作用^[5]。

城市地下空间的开发与周围地质环境密切相关。因此,科学的地质适宜性评价是规划和利用城市地下空间的必要前提^[6,7]。前人研究显示^[8],地质适宜性评价可通过地质适宜性分区和多个地质指标权重的叠加计算实现。其中,通常利用层次分析法(AHP)、熵权法和梯形模糊数定权法确定评价体系及指标权重^[9–11]。地质适宜性评价模型主要包括经验分值法、模糊综合评价法、优劣解距离法(TOPSIS)和神经网络法等^[12–14]。

科学合理的评价体系是地质适宜性评价的重要条件。在地质适宜性评价过程中,通常会根据研究区实际情况选取相应的评价体系与指标^[15–16]。除地形地貌、地质构造、水文地质、工程地质等常规地质因素,部分约束性地质因素仍在很大程度上制约着城市地下空间的开发利用,且表现出明显的地区差异性。例如北京、郑州地区主要敏感地质因素为地面沉降和断裂带^[7,17];武汉地区主要为砂土液化和河流冲蚀^[11];

昆明地区主要为岩溶和地面塌陷^[18];咸阳地区主要为黄土湿陷、地裂缝等^[19]。然而,以往研究通常将各个约束性地质因素作为一级评价指标不良地质作用下的二级指标^[11,20],一定程度上削弱了各个约束性地质因素对评价结果的制约,使得最终的地质适宜性评价结果不符合实际地质条件的限制。

深圳市地下空间资源开发涉及的约束性地质因素包括地表水体、断裂带、地质灾害易发性等^[21]。地质适宜性评价中,着重考虑约束性地质条件可使评价结果更加符合当地实际情况^[22]。深圳市现有地下空间资源利用规划侧重考虑已有设施等社会经济因素,仍需深入开展地质适宜性评价以指导地下空间的开发利用。为此,本文以深圳市南山区为研究区,结合研究区地质条件,选取恰当的评价指标,将地表水体、断裂带、砂土液化和地质灾害易发性等约束条件作为一级评价指标,建立约束评价体系;采用经验分值法和模糊综合评价法,评价常规体系和约束体系的地下空间地质适宜性;对比分析评价结果,阐明研究区不同区域地下空间开发的地质适宜性,厘清规划中重点开发区地下空间开发时应该注意的地质环境问题,为深圳市南山区地下空间资源开发利用规划提供有力支撑。

1 研究区概况

1.1 地理位置

研究区为深圳市南山区的主要陆域范围,位于广东省深圳市西南部,陆地面积 187.5 km²。地处亚热

带, 年平均气温 22.3 ℃, 年平均相对湿度 79%, 年平均降水量 1 924.7 mm。此外, 南山区是深圳的科研、教育、体育中心。截至 2020 年 11 月, 南山区常住人口约 180 万, 人口密度约 9 700 人/km²。

1.2 地质条件

研究区位于深圳市西南部, 北部高、南部低。地貌类型主要有丘陵、残丘、台地、平原和人工地貌(图 1)。丘陵面积约 34.57 km², 坡度 40°~70°。研究区残丘零散分布, 面积较小, 约 6.33 km², 坡度 10°~30°。台地是一种由平原向丘陵和低山过渡的地形, 主要分布在

研究区中北部平原和丘陵之间, 海拔 10~50 m, 总面积 39.33 km², 该区地形相对平坦, 坡度 0°~10°。平原分布较为广泛, 总面积约 44.54 km²。该地区地貌为以河流冲积、海相冲积和江海相互作用沉积为主的三角洲地貌, 坡度 0°~5°。人工地貌以人工挖填区和填海区为主, 分布在研究区南部沿海地区, 总面积 35.89 km²。

研究区地下水按储存条件可分为松散岩孔隙水和基岩裂隙水。第四系松散岩孔隙水主要分布在中南部平原和人工地貌区, 单井涌水量 10.7~452.74 m³/d, 整体水质较差, 地下水化学类型为 HCO₃·Cl—Na 型。

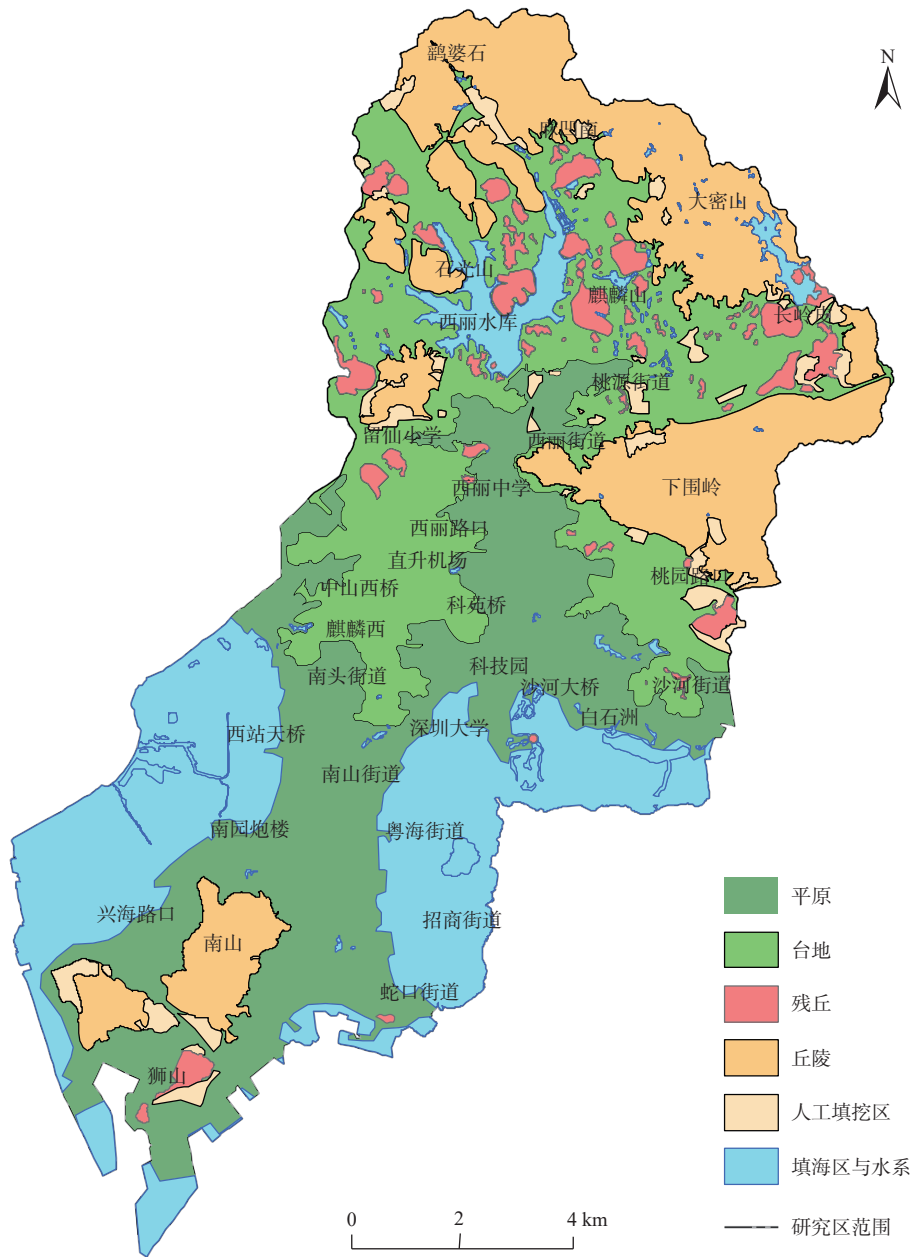


图 1 研究区地貌图

Fig. 1 Landform map of the research area

白垩、奥陶系基岩裂隙水为层状基岩裂隙水和块状基岩裂隙水,主要分布在丘陵、台地地区,水质一般较好。该区地下水类型为 $\text{Cl-HCO}_3\text{—Na}\cdot\text{Ca}$ 型和 $\text{Cl-HCO}_3\text{—Na}\cdot\text{Ca}$ 型。

南山区工程地质条件主要分为 2 个大区,分别为丘陵、台地隆起岩土工程地质区和丘陵、台地平原沉降岩土工程地质区。其中,丘陵、台地隆起岩土工程地质区又分为侵入岩岩土亚区和变质岩岩土亚区。侵入岩岩土亚区在南山区分布较广,为浅肉红色中细粒斑状黑云母二长花岗岩、灰白色片麻状细粒斑状黑云母二长花岗岩。变质岩岩土亚区主要为变粒岩、混合花岗岩。丘陵、台地平原沉降岩土工程地质区又分为丘间谷地冲洪积土亚区和平原海-河冲积土亚区。其中,丘间谷地冲洪积土亚区多为单一结构黏性土。平原海-河冲积土亚区包括软土地段、液化砂土地段和一般沉积土地段。

此外,研究区还存在若干不利于地下空间开发利用的约束性地质因素。例如,该地区潜在的地质灾害广泛分布,现有地质灾害点和地质灾害隐患点共 60 处,包括崩塌、滑坡、不稳定斜坡等;断裂带有 21 个,主要分布在山区和丘陵地区,大部分为活动断裂,宽度以 2~10 m 为主;砂土液化区面积约为 27.19 km²,主要分布在南部平原第四系地区。

2 评价方法

2.1 评价体系

深圳市地下空间资源利用规划提出深层地下空间是资源能源储备与运输、大型物流通道和安全设施等功能空间的预留空间,需要谨慎利用^[21]。因此,本次研究只针对浅层地层(0~15 m)和次浅层地层(>15~30 m)地下空间开展地质适宜性评价。基于研究区地质概况与深圳市地下空间资源利用规划,科学合理的确定评价指标,然后将选取的评价指标因子按照不同属性加权,建立评价体系。本研究分别建立常规评价体系和约束评价体系。

2.1.1 常规体系

结合研究区地质条件,浅层地质适宜性评价是以城市地下空间浅层地质适宜性评价为目标层;以地形地貌、水文地质、工程地质和敏感地质因素为准则层;以地貌类型、地形坡度、水位埋深、地表水体、腐蚀性、水质、工程分区、第四系厚度、软土厚度、土体结构、断裂带、砂土液化、地质灾害易发性为指标层,建立层次评价体系。

次浅层地质适宜性评价是以城市地下空间次浅层地质适宜性评价为目标层;以水文地质、工程地质和敏感地质因素为准则层;以地表水体、腐蚀性、水质、工程分区、第四系厚度、断裂带、砂土液化、地质灾害易发性为指标层,建立层次评价体系。

2.1.2 约束体系

深圳市地下空间资源利用规划中的禁止开采区涉及的主要地质因素为地表水体、断裂带、砂土液化和地质灾害易发性。其中地表水体主要考虑水库等水源地区域。断裂带考虑距断裂带水平距离 300 m 以内,大于 300 m 无影响。砂土液化根据液化程度划分为重度、中度、轻度和无液化区。地质灾害易发性根据易发程度分为高发区、中发区、低发区和不发区。本研究将以上 4 个指标作为约束条件划分到准则层,构建约束评价体系(表 1、表 2)。

表 1 研究区浅层地质适宜性的约束评价体系
Table 1 Constraint system of shallow geological suitability evaluation in the study area

目标层	准则层	指标层
城市地下空间 浅层地质适宜性 评价	地形地貌	地貌类型
		地形坡度
	水文地质	水位埋深
		腐蚀性
		水质
	工程地质	工程分区
		第四系厚度
		软土厚度
		土质结构
	地表水体	地表水体
	断裂带	断裂带
	砂土液化	砂土液化
	地质灾害易发性	地质灾害易发性

表 2 研究区次浅层地质适宜性评价的约束体系
Table 2 Constraint system of sub-shallow geological suitability evaluation in the study area

目标层	准则层	指标层
城市地下空间 次浅层地质适宜性 评价	水文地质	腐蚀性
		水质
	工程地质	工程分区
		第四系厚度
	地表水体	地表水体
	断裂带	断裂带
	砂土液化	砂土液化
	地质灾害易发性	地质灾害易发性

2.1.3 指标权重的确定

各个层次的评价因子对目标层的影响程度不同,

表现为权重不同。对于评价因子权重的确定, 需要依据同一层次中所有评价因子对上一层因素的重要程度两两进行比较, 按照数字 1~9 标度进行衡量, 构造判断矩阵^[20]。采用经验分值法确定比较标度, 经过不断调整, 最终分层次确定判断矩阵。确定判断矩阵后, 计算出矩阵最大特征值对应的特征向量, 将特征向量归一化处理后作为相应的权重值^[20]。

通过构建判断矩阵, 得到了研究区常规体系和约束体系下不同层次指标的权重值(表 3、表 4)。结果显示, 常规体系中浅层的地表水体、断裂带、砂土液化和地质灾害易发性的权重排名分别为 4、1、7 和 3, 而约束体系中其排名分别为 1、3、4 和 2。相对于常

表 3 常规体系下浅层指标权重

Table 3 Index weights of the conventional evaluation system for shallow layers					
准则层因素	准则层权重	指标层因素	指标层权重	总权重	权重排序
地形地貌	0.1070	地貌类型	0.3333	0.0357	10
		地形坡度	0.6667	0.0713	6
水文地质	0.1849	水位埋深	0.2968	0.0549	8
		地表水体	0.4852	0.0897	4
		腐蚀性	0.1090	0.0202	12
		水质	0.1090	0.0202	13
工程地质	0.2926	工程分区	0.1564	0.0458	9
		第四系厚度	0.2938	0.0860	5
		软土厚度	0.4621	0.1352	2
		土体结构	0.0877	0.0257	11
敏感地质因素	0.4155	断裂带	0.6301	0.2618	1
		砂土液化	0.1515	0.0629	7
		地质灾害易发性	0.2184	0.0907	3

注: 总权重=准则层权重×指标层权重。

表 4 约束体系下浅层指标权重

Table 4 Index weights of the constraint system for shallow layers					
准则层因素	准则层权重	指标层因素	指标层权重	总权重	权重排序
地形地貌	0.0381	地貌类型	0.3333	0.0127	12
		地形坡度	0.6667	0.0254	8
水文地质	0.0676	水位埋深	0.6000	0.0406	6
		腐蚀性	0.2000	0.0135	10
		水质	0.2000	0.0135	11
		工程分区	0.1564	0.0147	9
工程地质	0.0942	第四系厚度	0.2938	0.0277	7
		软土厚度	0.4621	0.0435	5
		土质结构	0.0877	0.0083	13
地表水体	0.2268	地表水体	1	0.2268	1
断裂带	0.2136	断裂带	1	0.2136	3
砂土液化	0.1329	砂土液化	1	0.1329	4
地质灾害易发性	0.2268	地质灾害易发性	1	0.2268	2

规体系, 约束体系中砂土液化和地质灾害易发性的权重均有所提升, 使得地表水体、断裂带、砂土液化和地质灾害易发性成为权重最大的 4 个指标。权重计算结果显示, 约束评价体系一定程度上提高了常规评价体系中地表水体、断裂带、砂土液化和地质灾害易发性 4 个指标的权重, 增强了其对地下空间开发利用影响的程度。

2.2 赋值方法

2.2.1 经验分值法

基于相关地质条件, 每个评价指标划分成若干区域。根据各个指标不同分区对地下空间开发的影响程度, 利用经验分值法对评价指标的不同分区进行评分, 评分范围为 1~10 分(表 5)。分数越高, 表明该区

表 5 各个指标不同分区的评分

Table 5 Scores of each index in different zones											
一级指标	二级指标	评分									
		10	9	8	7	6	5	4	3	2	1
地形地貌	地貌类型	填海	人工挖填	丘陵		残丘		台地			平原
	地形坡度	>80°	>70°~80°	>60°~70°	>50°~60°	>40°~50°	>30°~40°	>20°~30°	>10°~20°	5°~10°	<5°
水文地质	水位埋深	<2 m	2~<3 m	3~<4 m	4~<5 m	5~<6 m	6~<7 m	7~<8 m	8~<9 m	9~11 m	
	地表水体	有									无
	腐蚀性	强腐蚀性			中腐蚀性			弱腐蚀性			无腐蚀性
	水质	较差				较好			良好		
工程地质	工程分区	人工填土地段		丘间谷地		侵入岩岩土亚区		一般沉积地段	变质岩岩土亚区		
	第四系厚度	>15 m			>10~15 m			5~10 m			<5 m
	软土厚度	>16 m	>14~16 m	>12~14 m	>10~12 m	>8~10 m	>6~8 m		>4~6 m	>2~4 m	0~2 m
	土体结构		多层						单层		
敏感地质因素	断裂带	≤300 m							>300m		
	砂土液化	严重			中等			轻微			其他
	地质灾害易发性	高发			中发			低发			不发

域越不利于地下空间的开发利用;反之,该区域越适宜地下空间的开发利用。

根据评分规则对所有指标的不同区域进行了赋分。然后将各个指标图层剖分成 250 m×250 m 的栅格图,利用栅格叠加功能将各个指标图层按照权重进行叠加计算,每个栅格将会得到一个最终得分。最后,将各个栅格分数值进行聚类分析,重新划分为 4 类,根据分值从小到大,将 4 类区域的地下空间开发地质适宜性依次评定为适宜、较适宜、适宜性差和不适宜。

2.2.2 模糊综合评价法

模糊综合评价是根据模糊数学的隶属度原理,把定性评价转化为定量评价的一种方法,是用模糊数学对受到多种因素制约的对象做出总结评价^[15]。城市地下空间地质适宜性评价中,通常采用梯形隶属函数确定各个区域在不同等级的隶属度,再根据最大隶属度原则综合评价各区域的地质适宜性等级。上述评价指标有定量指标和定性指标 2 种。其中,地形坡度、水位埋深、第四系厚度和软土厚度为定量指标,其梯形隶属函数如式(1)所示,按照赋值标准给出评定值,并采用梯形隶属函数计算隶属度。

$$u(x) = \begin{cases} 0 & x \leq a_1 \\ \frac{x-a_1}{a_2-a_1} & a_1 < x \leq a_2 \\ 1 & a_2 < x \leq a_3 \\ \frac{a_4-x}{a_4-a_3} & a_3 < x \leq a_4 \\ 0 & x > a_4 \end{cases} \quad (1)$$

式中: a_1 、 a_2 、 a_3 、 a_4 ——不同指标隶属度分区临界值;

x ——各网格的分值;

u ——隶属度。

其他指标为定性指标,需要按照分级法进行量化处理。按照以下标准将指标不同区域分为 4 个等级并附分值:适宜 I (0.2 分)、较适宜 II (0.4 分)、适宜性差 III (0.7 分) 和不适宜 IV (0.9 分)。并采用梯形隶属函数计算隶属度,具体见式(2)~(5)。

按照 250 m×250 m 的网格精度,本次将研究区剖分为 2 899 个网格。将每个网格对应的所有二级指标量化值代入对应的隶属函数,均得到相应的隶属度评价矩阵。其中,浅层 13 个指标得到的隶属度评价矩阵为 $B_{13 \times 4}$,权向量矩阵为 $A_{1 \times 13}$;次浅层 8 个指标得到的隶属度评价矩阵为 $B_{8 \times 4}$,权向量矩阵为 $A_{1 \times 8}$,则综合评价结果为 $C_{1 \times 4} = AB$ 。根据最大隶属度原则,在 $C_{1 \times 4}$ 矩阵中取最大值对应的评价等级 i 为相应网格的适宜性等级,即 $C_i = \max(C_I, C_{II}, C_{III}, C_{IV})$ 。

$$u_I(x) = \begin{cases} 1 & x \leq 0.2 \\ 3-10x & 0.2 < x \leq 0.3 \\ 0 & x > 0.3 \end{cases} \quad (2)$$

$$u_{II}(x) = \begin{cases} 0 & x \leq 0.2 \\ 10x-2 & 0.2 < x \leq 0.3 \\ 1 & 0.3 < x \leq 0.5 \\ 6-10x & 0.5 < x \leq 0.6 \\ 0 & x > 0.6 \end{cases} \quad (3)$$

$$u_{III}(x) = \begin{cases} 0 & x \leq 0.5 \\ 10x-5 & 0.5 < x \leq 0.6 \\ 1 & 0.6 < x \leq 0.8 \\ 9-10x & 0.8 < x \leq 0.9 \\ 0 & x > 0.9 \end{cases} \quad (4)$$

$$u_{IV}(x) = \begin{cases} 0 & x \leq 0.8 \\ 10x-8 & 0.8 < x \leq 0.9 \\ 1 & x > 0.9 \end{cases} \quad (5)$$

式中: u_I ——隶属于适宜区的程度;

u_{II} ——隶属于较适宜区的程度;

u_{III} ——隶属于适宜性差区的程度;

u_{IV} ——隶属于不适宜区的程度。

3 评价结果

3.1 经验分值法评价结果

常规评价体系的经验分值法评价结果见图 2(a)(b),研究区以适宜区和较适宜区为主。其中,浅层适宜区域主要为研究区北部麻凹南、大密山、石光山、桃源街道以及中部的直升机场—南山街道,面积约为 78.31 km²,约占研究区总面积的 46%。较适宜区域主要为研究区中南部沙河桥至招商街道、西站天桥和兴海街道,面积约为 35.00 km²,约占总面积的 21%。研究区适宜性差和不适宜区域主要受砂土液化和断裂带影响。其中,适宜性差的区域主要分布在直升机场北部、西站天桥西南和沙河街道,面积约为 39.13 km²,约占总面积的 23%。不适宜区域面积较小,主要位于桃园路口、蛇口街道和南山至狮山区域,面积约为 16.31 km²,约占总面积的 10%。

次浅层地质适宜性评价结果同样以适宜区和较适宜区为主。其中,适宜区域主要分布在研究区北部台地、丘陵地区,包括麻凹南、石光山、麒麟山、下围岭和中山桥区域,面积为 77.81 km²,约占研究区总面积的 46%。较适宜区域主要分布在研究区北部的西丽水库、桃源街道和南部的科技园、西站桥和兴海街区域,面积约为 25.06 km²,约占总面积的 15%。研究区适宜性差和不适宜区域同样主要受砂土液化和断裂带影响。其中,适宜性差的区域主要分布在沙河街道、沙河南至招商街道和西站桥西南区域,面积约为

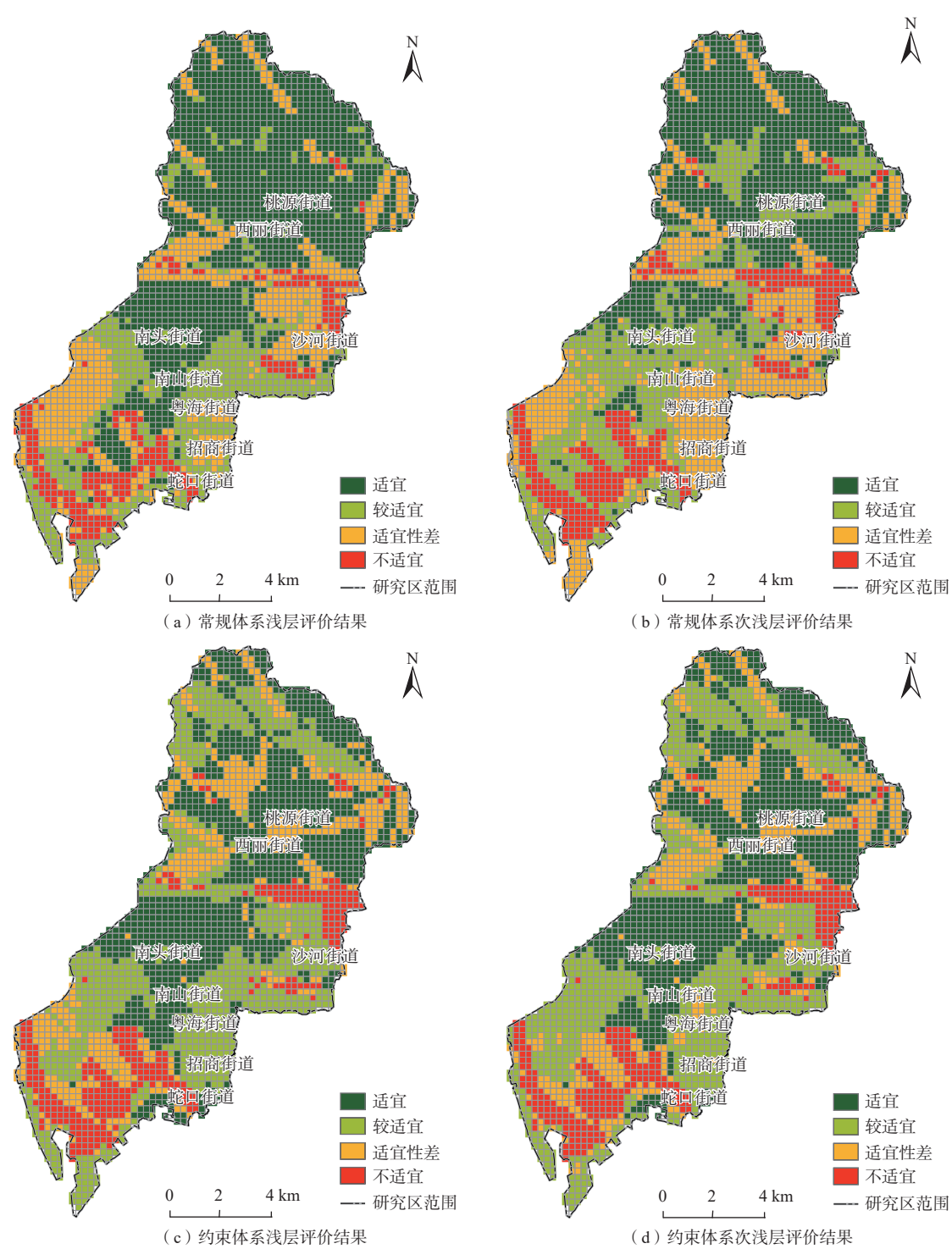


图2 基于经验分值法2种体系的评价结果

Fig. 2 Results of the two systems from empirical score evaluation method

42.38 km², 约占总面积的 25%。不适宜地区主要分布在桃园路口、蛇口街道和南山至狮山区域, 面积约为 23.50 km², 约占总面积的 14%。

而约束评价体系的经验分值法得到的浅层和次浅层地质适宜性评价结果相似, 见图 2(c)(d)。其中,

适宜区域主要为研究区北部麒麟山、桃源街道、西丽中学和中部的中山桥和深圳大学区域, 面积约占研究区总面积的 36%。较适宜区域主要为西站天桥至兴海街、沙河街道至粤海街道以及麻凹南至石光山区域, 约占总面积的 32%。适宜性差和不适宜的区域主

要分布在西丽水库、长岭皮水库、留仙小学南部、桃园路口和南山至狮山区域,面积分别占总面积的20%和12%,该区主要有水库、断裂带分布,且为地质灾害高发区。

3.2 模糊综合法评价结果

常规评价体系的浅层模糊综合评价结果见图3(a),

可知研究区地质适宜性以适宜和较适宜为主。其中地下空间开发适宜区域面积约为71.81 km²,占研究区总面积的43%,主要分布在桃源街道、西丽中学、南头街道、沙河街道和粤海街道区域;较适宜区域面积为73.94 km²,占总面积的44%,分布在大密山、西丽水库、下围岭和西站天桥至兴海街区域,并在研究区

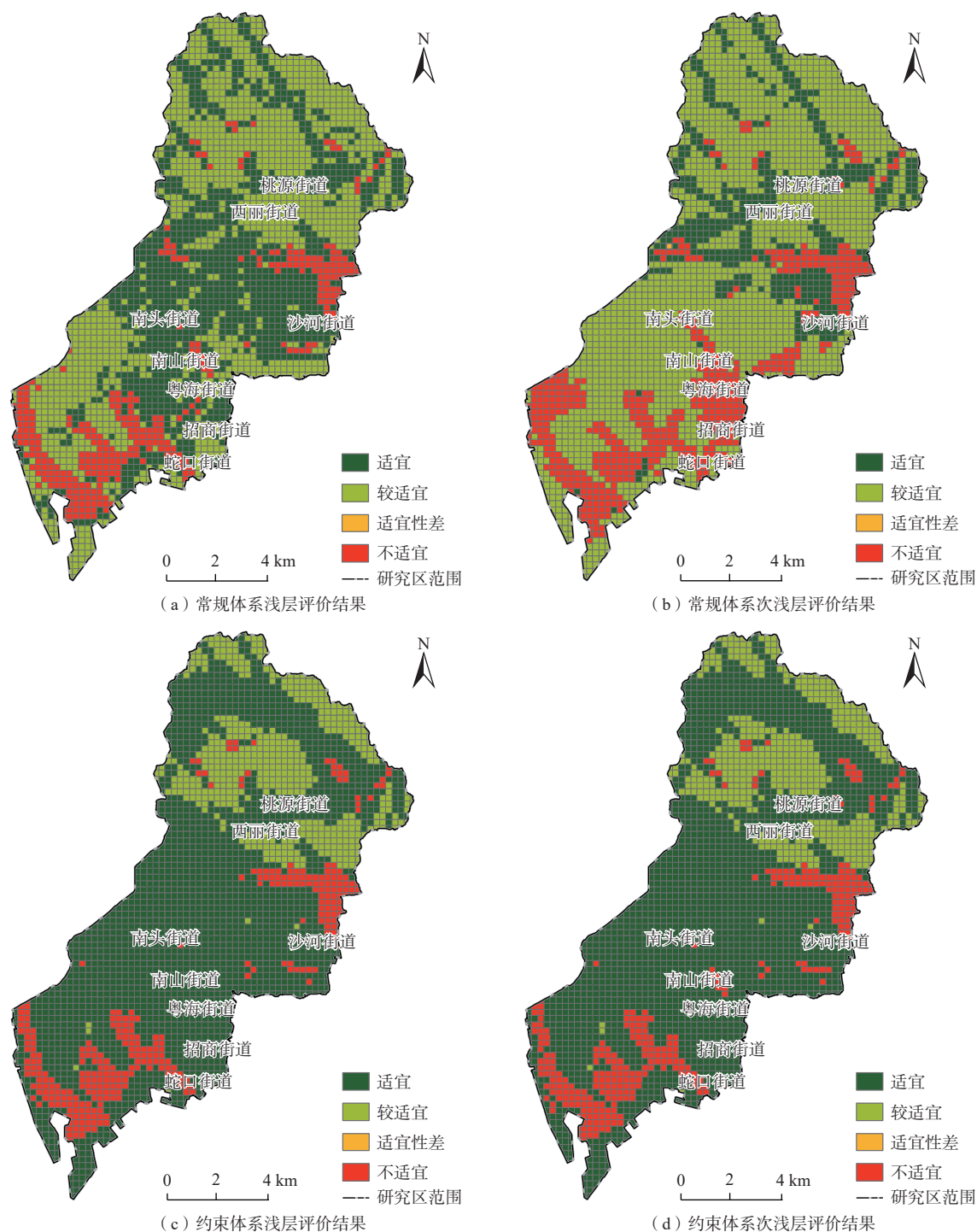


图3 基于模糊综合评价法2种体系的评价结果

Fig. 3 Results of the two systems from fuzzy comprehensive evaluation method

中部有零星分布。适宜性差和不适宜区域面积约为 23.00 km², 占总面积的 13%, 主要分布在桃源路口、南山、狮山和蛇口街道的断裂带分布区。

如图 3(b)所示, 次浅层地下空间开发适宜区域面积较小, 约为 30.63 km², 占研究区总面积的 18%, 主要分布在大密山西部、桃源街道、西丽中学和沙河街道, 呈带状分布。较适宜区域面积较大, 约为 99.81 km², 占总面积的 59%, 主要分布在麻凹南、西丽水库、下围岭、中山桥至兴海街和科技园区域。适宜性差和不适宜区域主要分布在粤海街道东部砂土液化区域、桃园路口和南山至狮山的断裂带分布区, 面积约为 38.31 km², 占总面积的 23%。

如图 3(c)(d)所示, 约束体系下的模糊综合评价结果中, 浅层和次浅层地下空间开发适宜性较为一致。其中适宜性差和不适宜区域面积约为 21.50 km², 占总面积的 13%, 主要分布在桃园路口、南山、狮山和蛇口街道, 为断裂带和地质灾害高发区域。较适宜区域面积约为 32.31 km², 占总面积的 19%, 主要分布在大密山、西丽水库和下围岭。其他区域均为适宜区, 分布面积较大, 约为 114.94 km², 占研究区总面积的 68%。

4 讨论

4.1 约束评价体系的构建

地下空间地质适宜性评价通常是自然因素对地下空间开发的影响, 进一步考虑社会经济因素的影响^[23], 即可得到地下空间综合质量评价结果^[24], 指导城市地下空间资源开发利用。前人研究表明, 针对不同研究区, 选取合适的评价指标和体系是地质适宜性评价的关键^[15, 25]。结合研究区地质特点, 本次将地表水体、断裂带、砂土液化和地质灾害易发性作为一级评价指标, 得到约束评价体系。约束体系中砂土液化和地质灾害易发性的权重相对于常规体系均有所提升, 该体系下地表水体、断裂带、砂土液化和地质灾害易发性为权重最大的四个指标, 增强了约束性地质因素对地下空间开发利用的制约性。

4.2 地质适宜性评价结果对比

本次研究结合常规评价体系和约束评价体系, 利用经验分值法和模糊综合法分别评价了研究区浅层和次浅层地下空间开发的地质适宜性, 如图 4 所示。其中, 经验分值法常规体系和约束体系评价结果有所不同。常规评价体系适宜性差和不适宜区域受地表水体影响较弱, 在禁止开发的西丽水库和长岭皮水库

区域评价结果为适宜和较适宜区, 该结果不符合地下空间开发的地质条件要求。而约束体系下评价结果中适宜性差和不适宜区域主要分布在断裂带、地质灾害高发区以及水库分布区, 例如西丽水库, 长岭皮水库和南山。各个程度的地质适宜性较为符合地表水体等约束性地质因素对地下空间开发的制约性。因此, 约束体系下经验分值法的评价结果更加符合实际地质条件, 更能有效指导研究区地下空间开发利用规划。

此外, 模糊综合法地质适宜性评价结果中, 常规体系和约束体系下均以适宜和较适宜区为主, 占研究区总面的 70% 以上。但各类区域在空间分布上也具有一定差异。其中, 常规体系浅层评价结果显示, 适宜区和较适宜区域分布凌乱, 适宜性差和不适宜区主要受断裂带的影响。常规体系次浅层适宜性差和不适宜区域面积有所增加, 主要分布在断裂带和砂土液化区域。而在考虑约束条件时, 适宜区和较适宜区分布较为集中。研究区以适宜区为主, 较适宜区主要分布在西丽水库、长岭皮水库和下围岭区域。适宜性差和不适宜区主要分布在桃园路口、南山和蛇口街道的断裂带分布区。总体上讲, 模糊综合评价法 2 个体系的适宜性差和不适宜区均受约束条件影响, 而约束体系评价结果能够更集中的圈定不同评价级别的范围, 相比常规体系评价结果更具有指导意义。综上所述, 约束评价体系较常规评价体系更加适用于研究区地质适宜性评价, 可为深圳市地质适宜性规划提供有力支撑。

4.3 地下空间开发利用建议

城市地质适宜性评价阐明了地下空间开发利用过程中地质环境因素的影响, 能够合理指导城市地下空间资源的开发利用^[26]。结合约束体系评价结果, 本次研究阐明了深圳市地下空间资源利用规划中的地下空间重点开发区的地质环境问题。

经验分值法评价结果显示规划中的重点开发区主要位于适宜区和较适宜区, 部分重点开发区包含适宜性差和不适宜区, 见图 4(a)(b)。位于西站天桥、南山街道和科技园南部的重点开发区包含较适宜区, 该区域需注意砂土液化引起的地层失稳、地面塌陷等地质问题。星海街道、蛇口街道、白石洲和西丽中学附近的重点开发区的部分区域为适宜性差和不适宜区, 地下空间开发时应该注意活动断裂带区域岩体破碎和地下水富集等不利于施工的因素。此外, 重点开发区的水位埋深均小于 5 m, 需建造必要的防水工程。

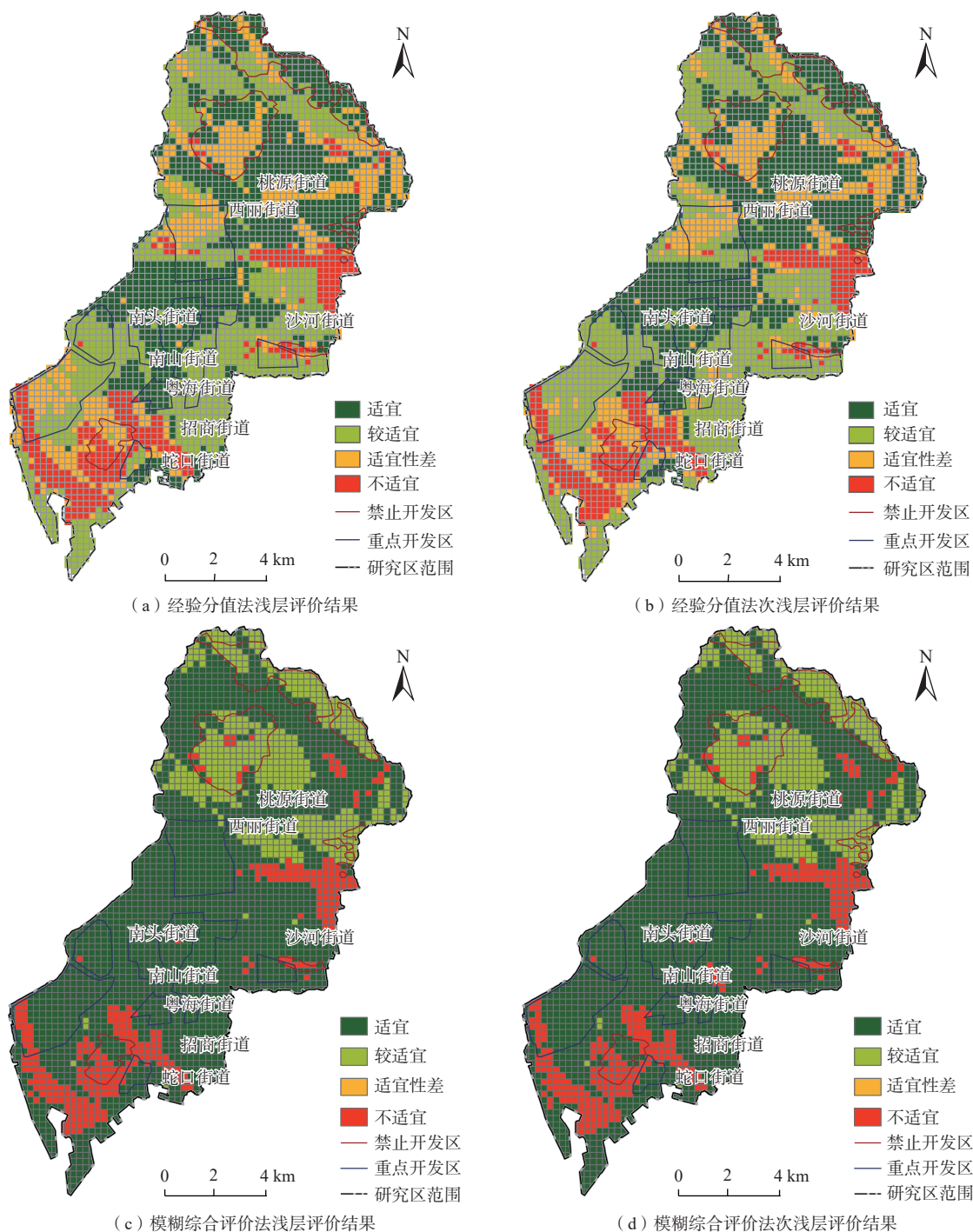


图4 包含禁止开发区和重点开发区的约束体系下2种方法的评价结果

Fig. 4 Results of the two methods of the constraint system, including forbidden development zones and key development zones

位于西站桥和粤海街道以南的重点开发区还需注意防护地下水的强腐蚀作用。

模糊综合评价结果显示规划中的重点开发区域均位于适宜开发区, 见图4(c)(d), 仅有兴海街道西部和蛇口街道的重点开发区包含部分不适宜区, 该区域需注意活动断裂带区域岩体破碎和地下水富集等不

利于施工的因素。但是进一步结合模糊综合评价在大密山、长岭皮水库和西丽水库等禁止开发区的评价结果为较适宜区, 模糊综合评价结果趋于乐观, 在地下空间开发过程中还需根据实际地质条件采取相应防护措施。另外, 地质适宜性评价显示, 除了规划中的禁止开发区, 桃源路口、蛇口街道、小南山和狮山

区域均为不适宜开发区,主要受活动断裂带影响。如无特别需要,该区域地下空间需禁止开发利用。

5 结论

(1)相对于常规体系,约束体系提高了地表水体、断裂带、砂土液化和地质灾害易发性的评价权重。

(2)约束体系下适宜性差和不适宜区域主要分布在断裂带、地质灾害高发区以及水源地区域,比常规体系评价结果更加符合实际约束性地质条件。

(3)深圳市地下空间资源利用规划中地下空间重点开发区在开发利用过程中应该注意不适宜地区约束性砂土液化引起的地层失稳、地面塌陷等地质问题,合理规避约束性活动断裂带区域岩体破碎、地下水富集等地质问题。

参考文献 (References):

- [1] DOU Fanfan, LI Xiaohui, XING Huaixue, et al. 3D geological suitability evaluation for urban underground space development: A case study of Qianjiang Newtown in Hangzhou, Eastern China[J]. [Tunnelling and Underground Space Technology](#), 2021, 115: 104052.
- [2] XU Yajie, CHEN Xiangsheng. The spatial vitality and spatial environments of urban underground space (UUS) in metro area based on the spatiotemporal analysis[J]. [Tunnelling and Underground Space Technology](#), 2022, 123: 104401.
- [3] ZHAO Jingwei, PENG Fangle, WANG Tianqing, et al. Advances in master planning of urban underground space (UUS) in China[J]. [Tunnelling and Underground Space Technology](#), 2016, 55: 290 – 307.
- [4] 彭琦, 罗毅. 深圳城市地下空间开发现状及典型工程案例[J]. 地下空间与工程学报, 2021, 17(3): 673 – 682. [PENG Qi, LUO Yi. Current status and typical case analysis of urban underground space in Shenzhen[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2021, 17(3): 673 – 682. (in Chinese with English abstract)]
- [5] 朱合华, 骆晓, 彭芳乐, 等. 我国城市地下空间规划发展战略研究[J]. 中国工程科学, 2017, 19(6): 12 – 17. [ZHU Hehua, LUO Xiao, PENG Fangle, et al. Development strategy on urban underground space planning in China[J]. Strategic Study of CAE, 2017, 19(6): 12 – 17. (in Chinese with English abstract)]
- [6] 董英, 张茂省, 李宁, 等. 城市地下空间开发利用的地质安全评价内容与方法[J]. 水文地质工程地质, 2020, 47(5): 161 – 168. [DONG Ying, ZHANG Maosheng, LI Ning, et al. Methods and contents of geological safety evaluation for urban underground space development and utilization[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2020, 47(5): 161 – 168. (in Chinese with English abstract)]
- [7] 何静, 周圆心, 郑桂森, 等. 北京市地下空间资源利用地质适宜性评价研究[J]. 地下空间与工程学报, 2020, 16(4): 955 – 966. [HE Jing, ZHOU Yuanxin, ZHENG Guisen, et al. Research on the geological suitability evaluation system of underground space resource utilization in Beijing[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2020, 16(4): 955 – 966. (in Chinese with English abstract)]
- [8] 夏伟强, 董杰, 何鹏, 等. 青岛主城区地下空间开发利用地质因素的影响评价及适宜性分区[J]. 地质学报, 2019, 93(增刊1): 233 – 240. [XIA Weiqiang, DONG Jie, HE Peng, et al. Evaluation and suitability zoning of geological factors affecting the development and utilization of underground space in the main urban area of Qingdao[J]. Acta Geologica Sinica, 2019, 93(Sup 1): 233 – 240. (in Chinese with English abstract)]
- [9] SHI ShaoJian, SHUO Liangxun, CUI Xingtao. The application of the analytic hierarchy process (AHP) in mine geological environment evaluation[J]. [Applied Mechanics and Materials](#), 2013, 416/417: 2020 – 2024.
- [10] HOU Weisheng, YANG Liang, DENG Dongcheng, et al. Assessing quality of urban underground spaces by coupling 3D geological models: The case study of Foshan City, South China[J]. Computers & Geosciences, 2016, 89: 1 – 11.
- [11] 潘朝, 吴立, 左清军, 等. 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](#), 2013, 20(2): 19 – 23. [PAN Zhao, WU Li, ZUO Qingjun, et al. Geological suitability evaluation of the development of underground space in Wuhan City based on fuzzy mathematics[J]. [Safety and Environmental Engineering](#), 2013, 20(2): 19 – 23. (in Chinese with English abstract)]
- [12] 江思义, 王启耀, 李春玲, 等. 基于专家-层次分析法的地下空间适宜性评价[J]. 地下空间与工程学报, 2019, 15(5): 1290 – 1299. [JIANG Siyi, WANG Qiyao, LI Chunling, et al. Evaluation suitability for the underground space using expert-analytic hierarchy process[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2019, 15(5): 1290 – 1299. (in Chinese with English abstract)]

- English abstract)]
- [13] DOU Fanfan, XING Huaixue, LI Xiaohui, et al. 3D geological suitability evaluation for urban underground space development based on combined weighting and improved TOPSIS[J]. *Natural Resources Research*, 2022, 31(1): 693 – 711.
- [14] 范毅, 陈科平, 文武飞. 模糊数学在地下空间开发利用地质环境适宜性评价中的应用——以长沙市为例[J]. *国土资源导刊*, 2020, 17(3): 42 – 47. [FAN Yi, CHEN Keping, WEN Wufei. Application of fuzzy mathematics in the evaluation of the suitability of geological environment development and utilization of underground space: Take Changsha as an example[J]. *Land & Resources Herald*, 2020, 17(3): 42 – 47. (in Chinese with English abstract)]
- [15] 张茂省, 王化齐, 王尧, 等. 中国城市地质调查进展与展望[J]. *西北地质*, 2018, 51(4): 1 – 9. [ZHANG Maosheng, WANG Huaqi, WANG Yao, et al. Progress and prospect of urban geological survey in China[J]. *Northwestern Geology*, 2018, 51(4): 1 – 9. (in Chinese with English abstract)]
- [16] 蒋杰, 葛伟亚, 马青山, 等. 南昌市中心城区地下空间开发地质适宜性评价[J]. *地质通报*, 2021, 40(5): 734 – 744. [JIANG Jie, GE Weiya, MA Qingshan, et al. Geological environment suitability assessment of underground space development in Nanchang City[J]. *Geological Bulletin of China*, 2021, 40(5): 734 – 744. (in Chinese with English abstract)]
- [17] 张晶晶, 马传明, 匡恒, 等. 郑州市地下空间开发地质环境适宜性变权评价[J]. *水文地质工程地质*, 2016, 43(2): 118 – 125. [ZHANG Jingjing, MA Chuanming, KUANG Heng, et al. Geo-environmental suitability assessment with variable weight for underground space exploitation in Zhengzhou[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2016, 43(2): 118 – 125. (in Chinese with English abstract)]
- [18] 段怡青. 基于地质环境影响分析的昆明市地下空间开发适宜性评价[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2021. [DUAN Yiqing. Suitability evaluation of underground space development in Kunming based on geological environment impact analysis[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2021. (in Chinese with English abstract)]
- [19] 李惠, 石卫, 刘延锋, 等. 咸阳市地下空间开发利用影响因素及评价[J]. *地下水*, 2020, 42(3): 9 – 13. [LI Hui, SHI Wei, LIU Yanfeng, et al. Influencing factors and estimate of underground space development and utilization in Xianyang City[J]. *Ground Water*, 2020, 42(3): 9 – 13. (in Chinese with English abstract)]
- [20] 龙睿, 张发旺, 栾崧, 等. 广州市城区地下空间开发利用适宜性评价研究[J]. *西北地质*, 2020, 53(4): 194 – 206. [LONG Rui, ZHANG Fawang, LUAN Song, et al. Evaluation of urban underground space of Guangzhou City: Its development and utilization[J]. *Northwestern Geology*, 2020, 53(4): 194 – 206. (in Chinese with English abstract)]
- [21] 深圳市规划和自然资源局. 深圳市地下空间资源利用规划(2020—2035年)[Z/OL]. (2021-11-19)[2022-05-01]. <http://www.sz.gov.cn/attachment/0/919/919373/9384225.pdf>. [Municipal Bureau of Planning and Natural Resources of Shenzhen. Underground spacer esource utilization plan of Shenzhen City (2020—2035) [Z/OL]. (2021-11-19)[2022-05-01]. (in Chinese)]
- [22] 北京市市场监督管理局. 城市地下空间资源地质评估标准: DB11/T 1895—2021[S]. [Beijing Municipal Administration of Market Supervision. Standard for geological assessment on urban underground space resources: DB11/T 1895—2021[S]. (in Chinese)]
- [23] LI Huanqing, LI Xiaozhao, SOH C K. An integrated strategy for sustainable development of the urban underground: From strategic, economic and societal aspects[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2016, 55: 67 – 82.
- [24] ZHOU Chang'an, CHEN Can, REN Hong. Comprehensive evaluation on multiple constraint elements of city underground space development and utilization based on analytic hierarchy process and fuzzy comprehensive evaluation method[J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2013, 357/358/359/360: 2754–2758.
- [25] 王化齐, 董英, 张茂省. 西安市地下空间开发利用现状与对策建议[J]. *西北地质*, 2019, 52(2): 46 – 52. [WANG Huaqi, DONG Ying, ZHANG Maosheng. Present situation and countermeasures for the underground space utilization in Xi'an City[J]. *Northwestern Geology*, 2019, 52(2): 46 – 52. (in Chinese with English abstract)]
- [26] CHEN Yuru, MA Chuanming. Geological environment suitability evaluation and function regionalization in Zhongyuan urban agglomeration[J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2013, 368/369/370: 340 – 345.