地上地下工程建设地质环境适宜性一体化评价

——以连云港城市规划区为例

www.geojournals.cn/georev

苟富刚, 李明亮, 欧健, 顾春生, 蔡田露, 毛磊

江苏省地质调查研究院, 自然资源部地裂缝地质灾害重点试验室,南京, 210049

内容提要: 工程建设地质环境适宜性评价是国土空间规划编制的基础。以江苏连云港城市规划区为例,探索地上地下工程建设适宜性一体化评价指标体系和方法。一体化评价是一个空间综合决策问题,涉及多个层次多种因素。借鉴经济领域的负面清单模式,基于自然因素的负面清单建立一体化评价指标体系。一体化评价地上和地下评价指标差异性较为明显,地上评价考虑地形坡度、地基承载力、桩基埋深等11因素,而地下空间评价则不考虑地形坡度、桩基埋深等因素。基于层次分析法与熵权系数法的综合评价方法来确定评价指标的权重,采用GIS平台采用多目标线性加权函数模型进行了工程建设一体化分区评价。评价结果显示:工程建设适宜性好区和较好区分布广泛,占比73.94%~93.22%。随着竖向深度增加,地下空间开发地质适宜性好的区域面积显著增加。地上空间适宜性主要受软土、腐蚀性土及地质灾害影响。浅层(0~15 m)地下空间开发地质适宜性主要受浅埋厚层软土的影响,地下空间开发面临软土变形的风险。次浅层(15~30 m)与次深层(30~50 m)地下空间开发地质适宜性主要受砂层涌水量和岩土结合面的影响。从评价结果看,地下空间工程建设适宜性优于地上,建议地下空间分为3个竖向分层进行开发,充分开发利用15 m以浅的地下空间,超前规划次浅层与次深层地下空间,工程建设应尽量避开适宜性一般区和差区。适宜性好区和较好区国土空间规划编制时应着重考虑。

关键词: 城市地质;地质环境;适宜性;建设用地;负面清单;一体化评价

随着我国经济的快速发展,城镇化水平越来越高,截至2020年年底,全国城镇化率达到63.89%,江苏连云港市区城镇化率已达到74.07%(国家统计局,2021)。2050年我国城镇化率将靠近或超过80%的上限口,城镇人口的增多导致了浅部资源短缺、环境污染、交通拥堵等城市综合症,严重制约城市的可持续发展(谢和平,2011; 谢和平等,2013;梁武等,2016)。《东京宣言》认为21世纪是开发利用地下空间的世纪(Zhao Jingwei et al., 2015)。地下空间开发利用被一致公认为具有国家核心战略意义(Wang Xia et al., 2013)。地下空间资源开发利用是解决"城市病问题"的重要途径(Broere, 2016)。相关地下空间开发利用成功的经典案例也不少,比如地下医疗,以乌克兰索罗特维盐矿地下空间为例,深达地下300 m(李爱民, 2015);地下农业,以前苏联乌克兰利用废弃矿井试种蔬菜最为典型(苗苗, 2015);地下城市以蒙特利尔地下城最为有名(Zacharias,2007)。截至2017年底, 上海已建成地下工程数量为4.1万个,建筑面积约1.04亿 m^2,地下空间开发规模和速度均位居世界前列(Chen Zhilong et al., 2018; Liu Yi and Zhu Liangcheng, 2020)。美国、瑞典、新加坡及香港等发达国家和地区已形成较为完善的地上地下一体化规划理念和地下空间开发体系(Tengborg et al., 2016; Wallace and Ng, 2016)。有学者预估可开发利用的地下空间资源量巨大,可开发量一般为可开发面积乘以开发深度的40%(童林旭,2005)。李晓昭等(2019)通过对城市需求等级的分级,根据对各级人口规模的预测以及人均地下空间指标的选取,推测出2030年我国地下空间需求量约为34.8亿 m^2,近10年年均建设量需要达到2.4亿 m^2。

江苏省城市地下空间开发利用区域差异明显,连云港开发利用等级位于第三梯队,已开发规模小于1000万 m^2。目前运营市域快轨线路1条,线路

注:本文为江苏省自然资源厅、连云港市人民政府项目连云港城市地质调查(编号:20170821);中国地质调查局,江苏省人民政府项目江苏沿海地区综合地质调查(编号:20120223)的成果。

收稿日期:2022-03-22;改回日期:2022-05-27;网络首发:2022-06-20;责任编辑:章雨旭。Doi: 10.16509/j.georeview.2022.06.035

作者简介:苟富刚,男,1985年生,硕士,高级工程师,主要从事工程建设工程地质条件和特殊土体工程特性研究;Email: gfggfg@foxmail.com。

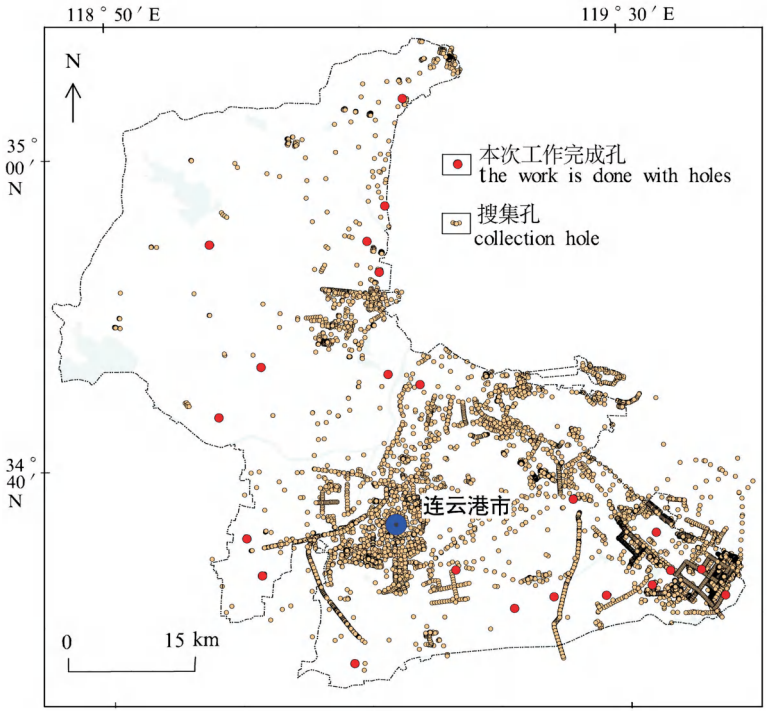


图 1 江苏连云港城市规划区钻孔分布图

Fig. 1 Distribution of boreholes in Lianyungang urban planning area, Jiangsu

总长度为 35.1 km;开展了电力电缆隧道建设;已建成综合管廊 15.3 km。已开展了轨道交通规划、人防设施规划、综合管廊规划、管线综合规划。地下综合管廊建设规划超 200 km,位列江苏省前四。连云港地下水封洞库规划建设总容量超过 9500 万 m^3。目前,矿地融合规划尚未开展(黄富民,2021)。

目前,有关地上工程建设适宜性评价的案例很多,比如连云港市区建设用地(苟富刚等,2022b)、云南山区城镇建设用地(杨子生,2016)、农村居民点用地(曲衍波等,2010)、岩溶地区建设用地(江思义等,2019)、海绵城市(黄敬军等,2018)等的适宜性评价。相关评价方法和因子选取已经规范化(CJJ132-2009; CJJ 57-2012)。地下空间开发地质适宜评价的案例也很多,比如南昌市中心城区(蒋杰等,2021)、青岛主城区(夏伟强等,2019)、上海(史玉金等,2016)、杭州市(邢怀学等,2021)等的地下空间开发地质适宜性评价。但地上地下空间一体化评价的案例很少(郝爱兵等,2018),且上述文献的相关研究多采用层次分析法进行影响因子权重的赋值,存在较强的主观性,影响适宜性评价结果的可靠性与客观性。地上地下一体化开发的关键难点在地下空间,有关地下空间工程建设地质适宜性评价指标的选取不是太成熟。

连云港市是“一带一路”交汇点,也被称为新亚欧大陆桥东方桥头堡,具有重要的战略意义。连云港城市规划区濒临大海,地势与地形多变,江苏省的最高峰就分布在规划区内,地质条件较为复杂,特别是区内的厚层浅埋海相软土,工后沉降量大(苟富刚等,2018,2021a)且具有腐蚀性(苟富刚等,2021b,2022a),严重制约该区工程建设。本次通过梳理影响地上地下一体化开发的地质影响因素,建立地上地下一体化地质适宜性评价指标体系。采用综合评价法(层次分析法与熵权系数法确定的权重)确定属性层权重,基于 GIS 平台建立综合指数模型进行地上地下一体化地质适宜性分区评价,可为连云港城市规划区工程建设和新一轮国土空间规划提供基础资料。

表 1 连云港城市规划区一体化评价工作基础

Table 1 Basis of integrated evaluation work in the urban planning area of Lianyungang City

序号	技术手段		工作量	主要成果
1	钻探	钻孔数量 进尺	10857 个 291117 m	工程地质标准层
2	原位测试	标准贯入试验 剪切波速试验 十字板剪切试验	26506 次 10001 次 1500 次	地基承载力和砂土液化等级
3	土工测试	土工试验 易溶盐	35914 条 954 个	地基土层物理力学性质,土体腐蚀性
4	专项调查	工程地质调查 地质灾害调查 INSAR 调查	3024 km^2 3024 km^2 3024 km^2	崩滑、地面沉降及塌陷的分布特征

1　数据采集及评价方法

1.1　技术手段与数据

评价区位于连云港城市规划区,面积为 3 024 km^2,包括海州区、连云区、赣榆区,不包括东海县、灌云县及灌南县(图 1)。以服务连云港城市规划区社会与经济可持续发展为宗旨,在充分整合已有地质成果基础上,开展多学科、多方法、多手段的连云港城市规划区综合地质调查,查明规划区地质环境条件,勘察和搜集钻孔 10 857 个,总进尺达 291 117 m。土工测试数据包括基本物理指标(密度、含水率、塑液限、液性指数、塑性指数等)和力学指标(压缩、剪切、回弹等),合计 35 914 条(表 1)。进行了

大量原位试验和地质灾害调查工作。这些数据为一体化评价打下了坚实的基础。

1.2 一体化评价方法

首先根据规划区的环境地质条件,筛选出适合规划区的评价因子,建立评价指标体系。评价因子可以根据实际情况分为属性层指标和要素层指标,比如属性层指标为工程地质条件,工程地质条件可以细分为地基承载力、土体腐蚀性、桩端埋深等要素指标层。无论是定性指标和定量指标,在评价分析中都需要通过标准化的方法,将指标转化为决策者在某一方案某一属性下的满意值。对本次评价指标,分别采用下述方法对指标进行分级处理:对于可度量的指标,建议将指标分为 4 个等级。对于无法直接量化的定性指标,采用专家法确定等级。

评价指标权重的确定是一体化评价工作中十分重要的环节,评价指标的权重直接关系到评价结果的科学性和准确性。笔者等采用层次分析法(AHP)、熵权系数法及综合评价法确定各级指标权重。

1.2.1 层次分析法(AHP)

层次分析法(AHP)是典型的主观赋权法。通过各指标之间两两对比重要性来构建判断矩阵,判断矩阵必须进行一致性检验,不能通过一致性检验,则需要重新构建判断矩阵,直至通过一致性检验。根据通过一致性检验的矩阵计算各级指标权重(苟富刚,2012)。

1.2.2 熵权系数法

熵权系数法可以消除主观因素的影响,是一种客观赋权法。指标的熵值越大,则指标的权重反而越小。计算步骤如下:

根据评价要素(m)与评价对象(n)构建特征值矩阵$\boldsymbol{\chi}$:

$$\boldsymbol{\chi}=\begin{pmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1m} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2m} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ x_{n1} & x_{n2} & \cdots & x_{nm} \end{pmatrix} \tag{1}$$

H_i 为第 i 个评价指标的熵值,可将式(2)带入求解。

$$H_i=-\frac{1}{\ln n}\sum_{i=1}^{n} f_{ij}\ln(f_{ij}) \tag{2}$$

$$f_{ij}=\frac{x_{ij}}{\sum_{i=1}^{n} x_{ij}} \tag{3}$$

式中,i 为评价指标,j 为评价对象;χ_{ij} 为观测数值;f_{ij} 第 i 个评价指标中在第 j 个评价对象中的比重。

w_i 为第 i 个指标的熵权;w_i 数值介于 0 ~ 1;对全部 w_i 求和,数值等 1。

$$w_i=\frac{1-H_i}{m-\sum_{i=1}^{n} f_{ij}} \tag{4}$$

1.2.3 综合评价法

层次分析法能充分利用专家经验,但无法克服主观偏差。熵权系数法是一种客观评价方法,但不能反映决策者的偏好。综合评价法采用层次分析法与熵权系数法确定的权重进行线性加权,这种方法具有层次分析法与熵权系数法两者的优点(唐韵,2013),不仅能突出客观性,又能反映决策者的偏好,兼具层次分析法与熵权系数法的优点。主观偏好系数 β 的求取:首先构建以层次分析法权重、熵权系数法权重与综合评价法权重差值的平方和为最小值的目标函数(式 6),将式(5)带入式(6)可以求得主观偏好系数 β 等于 0.5。笔者等评价 β 取 0.5。

$$w_i^{*}=w'_i+(1-\beta)w_i \tag{5}$$

$$Z_{\min}=\sum_{i=1}^{m}[(w_i^{*}-w'_i)^2+(w_i^{*}-w_i)^2] \tag{6}$$

式中,w_i 为层次分析法确定的因子权重;w_i' 为层次分析法确定的因子权重;w_i^{*} 为综合权重法确定的因子权重;$Z_{\min}$ 为目标函数最小值。

1.2.4 评价模型

本次地上地下工程建设地质适宜性一体化评价采用的数学模型为:

$$S=\sum_{i=1}^{n}\left(\sum_{j=1}^{m} A_{ij}B_j\right)C_j \tag{7}$$

式中,S 为评价目标适宜性等级得分($0\leqslant S\leqslant 10$),n 为级因子总数,m 为隶属于第 i 项属性层的要素层指标总数,C_i 为第 i 项属性层指标权重,A_{ij} 为隶属于第 i 项属性层下的第 j 项要素指标层的权重;B_j 为隶属于第 i 项属性层下的第 j 项要素层指标的量化值。

1.3 工程建设竖向分层

城市地下空间分层是保障地下空间有序开发与合理利用的基础。不同国家对城市地下空间的竖向层次划分有所差异,如日本把地下空间划分为:浅层(50 m 以浅)和大深度地下空间(50~100 m)(贾建伟和彭芳乐,2012)。史玉金等(2016)将城市地下空间的竖向层次划分为浅层(30 m 以浅)、中层(30~100 m)、深层(100 m 以下)三个层次。上海地下空间开发实行分层规划和建设,将地下空间划分为浅层(0~15 m)、中层(15~40 m)和深层(40 m 以下)3 个层次(顾承兵,2005)。陈大平(2014)将上

海地下空间的开发建设分为四个层位:0~3 m 为表层,主要用于市政管线;3~15 m 为浅层,其中 3~7 m 建设地下综合体、民防工程等,7~15 m 建设地铁、地下综合体、仓库等;15~30 m 为中层,建设物流管道、污水处理设施、危险品库等;30 m 以下为深层,用于建设特种工程等。国内在城市规划中均对地下空间进行了竖向分层。青岛(智庆玺等,2014)、广州、厦门、扬州、珠海、镇江及昆明等市将地下 0~10 m 称为浅层,10~30 m 为次浅层,30~50 m 为次深层,50~100 m 为深层。泰州、徐州、淮安、宿迁、苏州等市将地下 0~15 m 称为浅层,15~30m 为次浅层,次深层和深层划分同上(笔者等总结)。谢和平等(2017)提出地下生态城市与深地生态圈战略构想:0~50 m 用来建设地下轨道交通系统及避难设施;50~100 m 为地下宜居城市;100~500 m 为地下生态圈;500~2000 m 为地下能源循环带;2000m 以下为深地科学实验室。

根据文献(郑辉和国立志,2010;GB/T 51358-2019)将连云港城市规划区地下 0~15 m 划分为浅层,15~30 m 为次浅层,30~50 m 为次深层,50~100 m 为深层。

2　工程实例

2.1　地质背景

根据区域构造单元分阶段划分特征,连云港地区地层分属洋陆阶段的苏鲁造山带及陆内阶段的中—新生代盖层。苏鲁造山带地层主要为高压、超高压变质地层。连云港地区新生代构造以继承中生代的构造活动为特征,数条断裂在中生代前已经形成,印支运动以来,开始了叠加于不同老构造单元之上、并形成了北北东向为主线的构造。区域构造部位、活动断裂及其活动强度见图 2。在新近纪以来的新构造运动期间,断裂运动方式以正断层为主,有少量逆断层。中新世以来区内新构造运动总体以沉降运动为主,形成现今隆坳格局(陈安定,2010)。白埠地区曾发生 4.1 级地震,为周边有记载以来最大地震。规划区历史地震以 4 级以下为主,最近一次监测到的地震活动为 2001 年(图 2)。但当规划区未来遭遇自于郯庐断裂带等外围地区强震,遭受的地震动峰值加速度最大可达 0.30 g,烈度可达Ⅷ度,局部甚至更高。

区域内新地层(N+Q)的产状为水平或微倾,无明显褶皱,表明新构造运动具有以块断差异升降运动为主的特征。南东部为平原,地面海拔标高一般在 3 m 以内,南东部新生代沉积(N+Q)厚度分布在 120~160 m 之间,发育多个沉积旋回。50 m 以浅分布 3 个软黏土层,其中第一软土层(全新世软土,埋深 2 m,层厚约 15 m)与第三软黏土层广泛分布(埋深约 30 m,层厚 10~15 m,图 3)。50 m 以浅砂层不发育。根据最新规划,工程建设区分布浅埋厚层全新世海相软土和盐渍土,对工程影响大(苟富刚等,2018,2021b)。

2.2　评价指标体系建立

目前,地上地下工程建设地质环境适宜性一体化评价指标没有统一的标准,笔者等建立的评价指标体系主要考虑以下几个方面综合考虑。

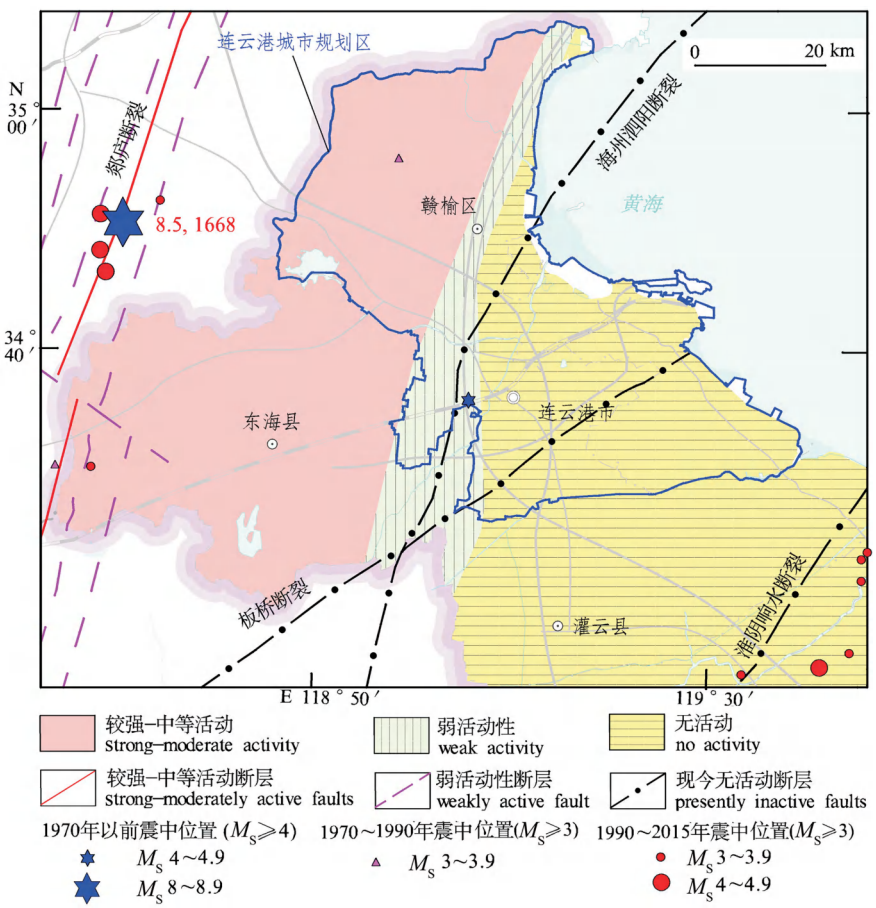


图 2 连云港城市规划区构造纲要图

Fig. 2 Outline plan of the structure in Lianyungang urban planning area

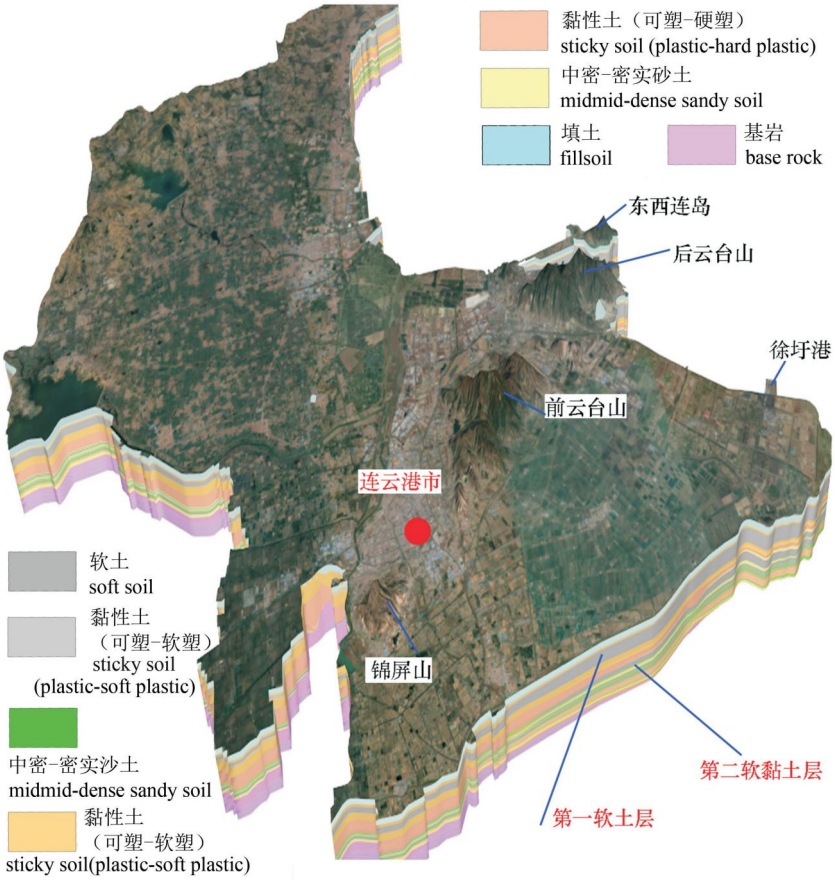


图 3 连云港城市规划区三维地质结构图

Fig. 3 Three-dimensional geological structure map of Lianyungang urban planning area

(1)考虑评价指标获取的便捷性。如含水砂层涌水量的获取不太方便,可考虑用砂层厚度代替。

(2)地上地下指标具有很明显的差异性。地上工程建设适宜性评价主要面向地表构筑物。以地形地貌为例,地形地貌对地上工程影响很大,但对地下工程影响较小。

(3)同一指标在不同竖向分层的评价意义完全不同。比如富水砂层,若作为桩基持力层,内摩擦角大,是优良工程地质层。但对于不同竖向层次的地下空间开发来说,易出现涌水等工程事故。

(4)地下空间开发相较于地上建筑,具有一定优越性。规划区砂土不发育,特别是次浅层和次深层,硬塑黏性土发育,适宜地下空间开发利用。

笔者等以“一体化”评价为创新点,系统梳理了以往地上空间与地下空间开发地质适宜性评价指标,并汇总于表 2。

连云港城市规划区地质条件较为复杂,经综合考虑,评价因子体系由属性层(A,Attribute)和要素指标层(F,Factor)组成。属性层包括地形地貌、工程地质条件、水文地质条件、地质灾害及地震效应。要素指标层包括坡度(图 4a)、地基承载力(图 4b)、桩端持力层埋深(图 4c)、土体腐蚀性(图 4d)、不同空间域软土厚度(图 4e、f、g)、不同空间域岩土结合面分布情况(图 4h、i、g)、潜水位埋深(图 4k)、潜水涌水量(图 4l)、不同空间域砂土厚度(图 4m、n、o)、地面沉降速率分区评价(图 4p)、滑坡崩塌易发性分区(图 4q)、地面塌陷易发性分区(图 4r)、地震烈度分区(图 4s)、砂土液化分区评价(图 4t)等 20 个要素。

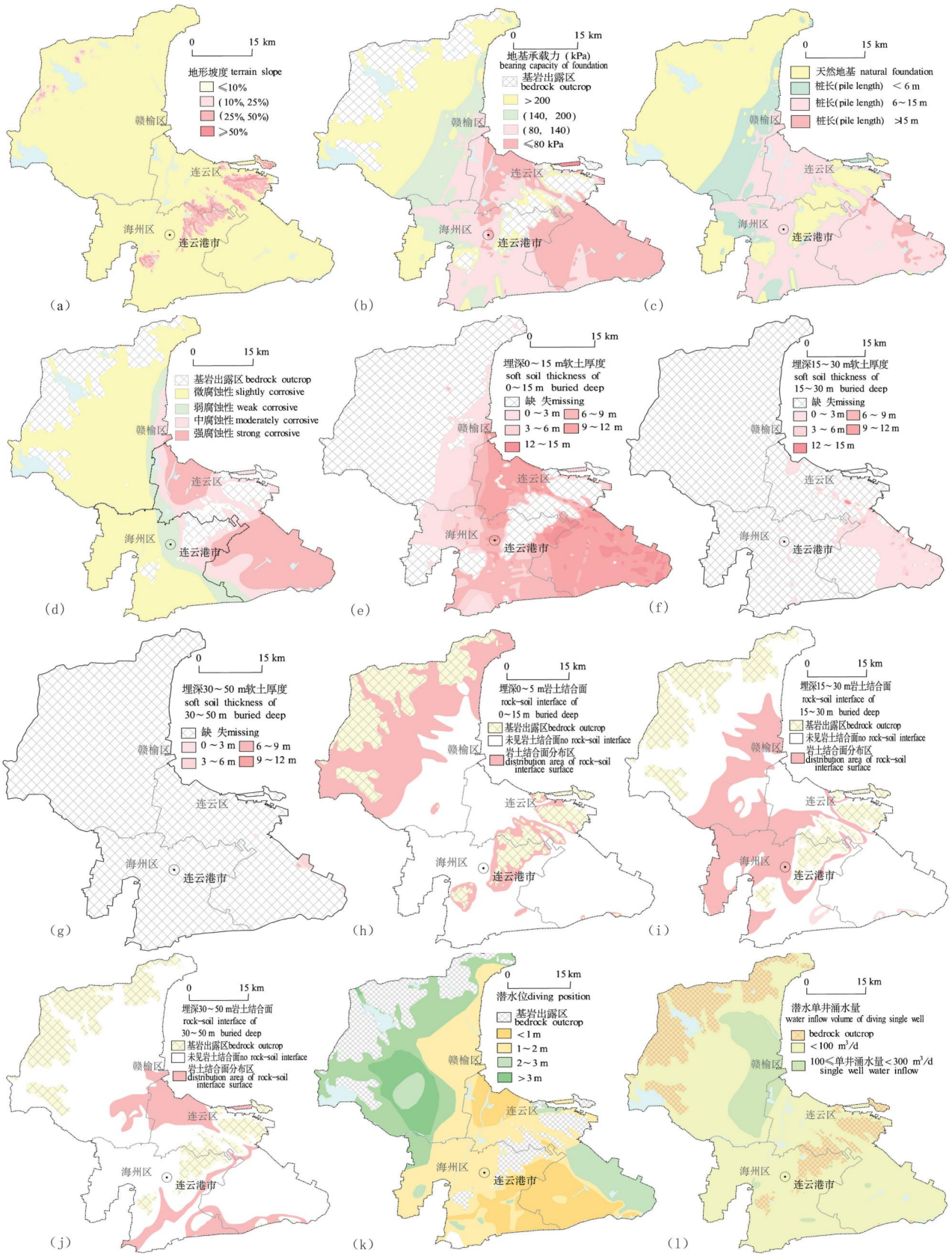
表 2 地上空间与地下空间开发地质适宜性评价指标体系汇总

Table 2 Summary of the geological suitability evaluation index system for above-ground and underground space development

一级指标	二级指标	影响层位	一级指标	二级指标	影响层位
工程地质条件	软土厚度	L_0、L_1、L_2	地质灾害	崩塌、滑坡、地面坍陷、地裂缝、地面沉降	L_0、L_1、L_2、L_3
	基岩埋深	L_0、L_1、L_2、L_3	活动断裂与地震效应	砂土液化	L_0、L_1、L_2
	地基承载力	L_0、L_1、L_2、L_3		抗震设防烈度	L_0、L_1、L_2
	水土腐蚀性	L_0、L_1、L_2、L_3		活动断裂	L_0、L_1、L_2、L_3
水文地质条件	水位埋深(潜水、承压水)	L_0、L_1、L_2、L_3		场地类别	L_0、L_1、L_2
	含水层厚度或含水层富水性	L_0、L_1、L_2、L_3	地形地貌	地貌类型	L_0
	洪水淹没可能性	L_0、L_1、L_2、L_3		地面坡度	L_0

注:L_0、L_1、L_2、L_3 分别为地上空间、0~15 m、15~30 m、30~50 m 的地下空间域。

借鉴经济领域的负面清单模式,基于自然因素的负面清单建立一体化评价指标体系(张茂省等,2019)。将负面因素分为限制因素和影响因素,以清单的方式罗列出一体化评价的负面因素,明确负面因素的赋值评判标准,理清规划区内存在的环境地质问题,建立连云港城市规划区一体化评价指标体系(表 3)。



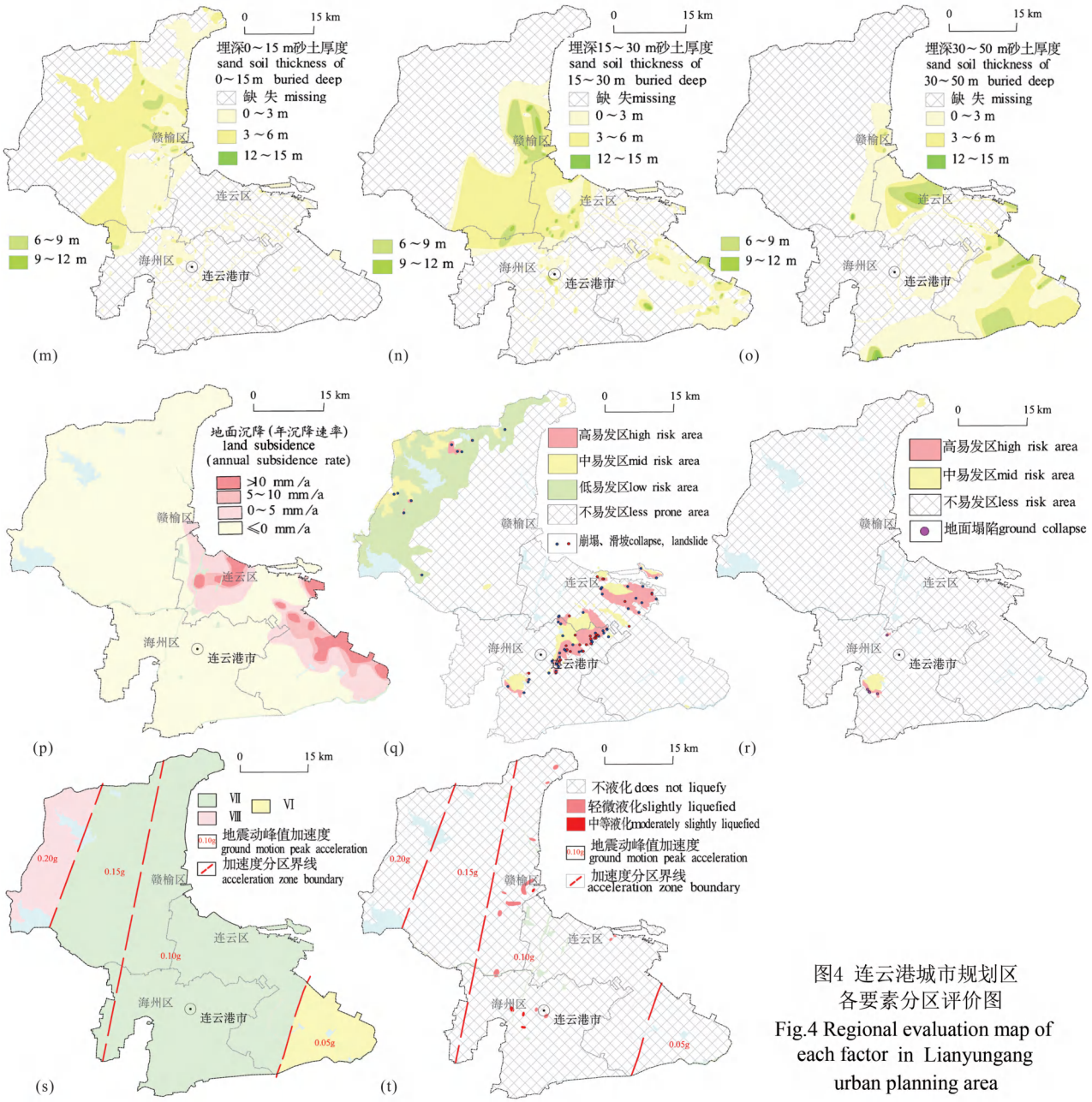


图4 连云港城市规划区各要素分区评价图

Fig.4 Regional evaluation map of each factor in Lianyungang urban planning area

2.3 要素权重计算

2.3.1 基于层次分析法的属性层及要素层的权重确定

分别构建不同竖向开发层次的判断矩阵，地上空间评价指标体系构建 5 个判断矩阵，其中属性层 1 个判断矩阵，要素层构建 4 个判断矩阵（由于地形地貌仅一个指标，不构建判断矩阵），求出矩阵特征向量计算权重；求出矩阵最大特征值判断构建矩阵合理性，一致性不通过，则从新构造判断矩阵计算权重，直至一致性通过检验（苟富刚，2012）。地下空间评价指标体系权重确定类似地上空间。下面以地上空间为例进行说明。

$$\boldsymbol{A}=\begin{pmatrix}1 & 1/7 & 1/3 & 1/5 & 1/3\\ 7 & 1 & 3 & 2 & 3\\ 3 & 1/3 & 1 & 1/2 & 1\\ 2 & 1 & 2 & 5 & 1/2\\ 1 & 1/2 & 1 & 3 & 1/3\end{pmatrix} \tag{8}$$

式(8)为属性层的判断矩阵，经验算一致性比率为 0.0032，小于 0.1，满足一致性要求。根据 $\boldsymbol{A}$ 确定的权重为 0.050（地形地貌），0.419（工程地质条件），0.139（水文地质条件），0.253（地质灾害），0.139（地震效应）。

$$\boldsymbol{F}=\begin{pmatrix}1 & 2 & 4\\ 1/2 & 1 & 2\\ 1/4 & 1/2 & 1\end{pmatrix} \tag{9}$$

式(9)为地上空间工程地质条件要素层的判断矩阵,经验算一致性比率为 8.28×10^{-11},小于 0.1,满足一致性要求。根据 $\boldsymbol{F}$ 确定的权重为 0.638,0.319,0.159。

工程地质条件要素层的最终权重为 0.149 乘以 $\boldsymbol{F}$ 确定的权重,即为最终权重(0.267,0.134,0.067)。其他要素层权重确定依次类推。

地下空间要素层权重确定方法同地上空间。

2.3.2　基于熵权系数法的要素层权重确定

以地上空间为例进行说明。计算步骤如下,首先采用原始数据构建基础矩阵(式 10),再采用极值法对基础矩阵进行标准化处理。采用极值法时,当评价指标大者为优时,采用式(11);当评价指标小者为优时,采用式(12)。比如地基承载采用式(11),土体腐蚀性采用式(12)。

$$\boldsymbol{x}=\begin{pmatrix}4 & 7 & \cdots & 8 & 5\\ 3 & 2 & \cdots & 6 & 8\\ 9 & 7 & \cdots & 4 & 7\\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots\\ x_{4058,1} & \cdots & \cdots & \cdots & x_{4058,11}\end{pmatrix} \tag{10}$$

$$r_{ij}=\frac{x_{ij}-\min_j\{x_{ij}\}}{\max_j\{x_{ij}\}-\min_j\{x_{ij}\}} \tag{11}$$

$$r_{ij}=\frac{\max_j\{x_{ij}\}-x_{ij}}{\max_j\{x_{ij}\}-\min_j\{x_{ij}\}} \tag{12}$$

熵权的计算采用式(2)、式(3)及式(4),计算结果见表 4。

把层次分析法与熵权系数法取得要素权重代入式(5),得到最终要素层评价权重。

2.4　评价结果分析

基于 GIS 平台采用式 7 计算适宜性指数 S,根据适宜性指数进行适宜性分区,给出适宜性判定标准(表 5)。

连云港市规划区地上空间工程建设适宜性好区分布广泛(表 6),占比高达 53.33%,区内工程建设条件好,适宜建设各类工民建项目,对于多层建筑,可以选择天然地基,对于高层建筑、桥梁以及其他需要选择桩基础的工程,区内多个桩基持力层可供选择(图 5a)。适宜性较好的区域分布相对集中,占比 20.61%,区内分布有薄层软土、局部分布轻微液化砂土,总体来说工程建设施工难度和风险不大,工程建设条件总体较好。适宜性一般的区域分布有浅埋厚层软土、腐蚀性土及局部分布深层软黏土。故在该区进行工程建设,宜采取桩基础或地基处理等

表 3 连云港城市规划区适宜性一体化评价因子及量化标准

Table 3 Suitability integrated evaluation factors and quantitative standards in Lianyungang urban planning area

负面清单	属性层 A	要素指标层 F	量化标准 1	量化标准 4	量化标准 7	量化标准 10	考虑层位
地质问题防范类的负面清单	地形地貌	坡度	>0.5	0.25~0.5	0.1~0.25	0~0.1	地上
	工程地质条件	地基承载力(kPa)	≤80	80<fa≤140	140<fa≤200	>200	地上
		桩端持力层埋深(m)	d>15	6<d≤15	0<d≤6	天然地基	地上
		土体腐蚀性	强腐蚀性	中腐蚀性	弱腐蚀性	微腐蚀性	地上
		L_1 软土厚度(m)	0~3	3~6	6~9	>9	L_1
		L_2 软土厚度(m)	0~3	3~6	6~9	>9	L_2
		L_3 软土厚度(m)	0~3	3~6	6~9	>9	L_3
		L_1 岩土结合面	是	/	/	否	L_1
		L_2 岩土结合面	是	/	/	否	L_2
		L_3 岩土结合面	是	/	/	否	L_3
	水文地质条件	地下水埋深(m)	<1.0	1.0~2.0	2.0~3.0	>3.0	地上
		潜水涌水量 m^3/D	/	/	100~300	<100	地上
		L_1 砂土厚度(m)	0~3	3~6	6~9	>9	L_1
		L_3 砂土厚度(m)	0~3	3~6	6~9	>9	L_2
		L_3 砂土厚度(m)	0~3	3~6	6~9	>9	L_3
	地质灾害	地面沉降速率 mm/a	>10	5~10	0~5	0	地上、L_1、L_2、L_3
		崩塌、滑坡	高易发区	中等易发区	低易发区	平原区	地上、L_1、L_2、L_3
		地面塌陷	高易发区	中等易发区	低易发区	平原区	地上、L_1、L_2、L_3
	地震效应	抗震设防烈度	Ⅸ	Ⅷ	Ⅶ	Ⅵ	地上、L_1、L_2、L_3
		砂土液化	严重液化	中等液化	轻微液化	不液化	地上、L_1、L_2

注:L_1、L_2、L_3 分别为 0~15 m、15~30 m、30~50 m 的地下空间域。

表 4 连云港城市规划区适宜性一体化评价指标权重

Table 4 Suitability integrated evaluation indicator weights for Lianyungang urban planning area

属性层 A	要素指标层 F	地上空间			浅层(0~15m)			次浅层			次深层		
		层次分析法	熵权系数	综合评价	层次分析法	熵权系数	综合评价	层次分析法	熵权系数	综合评价	层次分析法	熵权系数	综合评价
地形地貌	坡度	0.100	0.163	0.131	/		/	/	/	/	/	/	/
工程地质条件	地基承载力	0.219	0.086	0.152	/		/	/	/	/	/	/	/
	桩端持力层埋深	0.118	0.074	0.096	/		/	/	/	/	/	/	/
	土体腐蚀性	0.163	0.091	0.127	0.165	0.011	0.088	/	/	/	/	/	/
	L_1 软土厚度(m)	/	/	/	0.253	0.300	0.276	/	/	/	/	/	/
	L_2 软土厚度(m)	/	/	/	/	/	/	0.172	0.204	0.188	/	/	/
	L_3 软土厚度(m)	/	/	/	/	/	/	/	0.000	0.000	0.195	0.108	0.152
	L_1 岩土结合面	/	/	/	0.108	0.146	0.127	/	0.000	0.000	/		
	L_2 岩土结合面	/	/	/	/	/	/	0.215	0.226	0.221	/		
	L_3 岩土结合面	/	/	/	/	/	/	/	/	/	0.243	0.268	0.255
水文地质条件	地下水埋深(m)	0.104	0.189	0.146	/	/	/	/	/	/	/	/	/
	潜水涌水量 m^3/d	0.046	0.082	0.064	/	/	/	/	/	/	/	/	/
	L_1 砂土厚度(m)	/	/	/	0.127	0.227	0.177	/	/	/	/	/	/
	L_3 砂土厚度(m)	/	/	/	/	/	/	0.300	0.333	0.317	/	/	/
	L_3 砂土厚度(m)	/	/	/	/	/	/	/	/	/	0.389	0.373	0.381
地质灾害	地面沉降速率 mm/a	0.083	0.079	0.081	0.076	0.087	0.081	0.086	0.088	0.087	0.042	0.070	0.056
	崩塌、滑坡	0.038	0.095	0.067	0.051	0.091	0.071	0.029	0.023	0.026	0.021	0.077	0.049
	地面塌陷	0.079	0.086	0.083	0.076	0.080	0.078	0.086	0.069	0.078	0.042	0.080	0.061
地震效应	砂土液化	0.024	0.024	0.024	0.082	0.024	0.053	0.043	0.030	0.037	/	/	/
	抗震设防烈度	0.026	0.032	0.029	0.062	0.034	0.048	0.070	0.027	0.048	0.068	0.023	0.046

表 5 连云港城市规划区一体化评价适宜性等级划分简表

Table 5 Summary table for the classification of suitability for integrated assessment in Lianyungang urban planning area

评价得分	$S\geqslant7.5$	$5.0<S\leqslant7.5$	$2.5<S\leqslant5.0$	$S<2.5$
适宜性等级	适宜性好	适宜性较好	适宜性一般	适宜性差

表 6 连云港城市规划区适宜性一体化评价分区统计表

Table 6 Zoning statistics table of suitability integrated evaluation for Lianyungang urban planning area

建设层位	面积(km^2)			
	适宜性好区	适宜性较好区	适宜性一般区	适宜性差区
地上空间	1613	623	488	300
浅层	1450	855	596	122
次浅层	2019	800	84	121
次深层	2392	396	108	128

方式消除软土等对工程建设的影响,一般工程投资较大,又存在一定风险,工程建设条件相比较而言条件一般。适宜性差的区域为地质灾害高易发区或软土厚度大于 15 m 的区域,工程建设条件相比较而言条件最差。

浅层地下空间开发地质适宜性好的区域占比 47.96%,土层结构简单,地质灾害不发育,开发难度小(图 5b)。适宜性较好的区域占比 28.29%,主要受岩土结合面、地质灾害和砂层影响,开发难度较小。适宜性一般的区域主要分布在连云港新城和徐圩新区,浅埋软土厚度大,地下空间开发面临软土变形的风险,开挖支护代价高,这是最主要的影响因素。适宜性差的区域仅分布在地质灾害高易发区。

次浅层地下空间开发地质适宜性好的区域分布最为广泛,占比 66.77%,土层结构简单,主要为基岩和黏性土,未见岩土结合面,开发难度小(图 5c)。适宜性较好的区域占比 26.45%,受岩土结合面的影响、砂层涌水的影响,开发难度较

小。适宜性一般的区域分布不连续,分布区域小,砂层厚度大,涌水量大,此外还受岩土结合面的影响,开发难度较大。适宜性差的区域仅分布在地质灾害高易发区,开发难度大。次深层地下空间开发地质适宜性好的区域面积显著增加,占比高达 79%,主要是由于埋深 30~50 m 地下空间围岩中岩体所占比例加大,开发难度小(图 5d)。适宜性较好的区域占比 13.10%,开发难度较小。适宜性一般的区域占比 3.57%,砂层厚度大,涌水量大,此外还受岩土结合面的影响。适宜性差的区域仅分布在地质灾害高易发区和连云港新城,开发难度大。

2.5　讨论

地上地下一体化开发能够给与规划区相当的中等发达城市带来新的发展机遇,但是由此也会引发许多问题。早期由于对规划区内浅埋厚层软土的工程地质特性认识不足,陇海线东段中云一带自 1987 年 4 月 26 日建成通车以来,工后沉降严重,至 2002 年,最大沉降达到了 2.94 m,成为全国铁路软土路基下沉的典型区域。也发生了多起基坑边坡失稳工程事故。根据 2017 年 InSAR 监测数据,连云港沉降速率超过 30 mm/a 的区域面积超过 100 km^2,徐圩港区及其围填海区域最大沉降年速率达 130 mm/a。2018 年地面沉速率达到 40 mm/a 的面积在 52 km^2 左右。新浦磷矿历史上曾多次发生塌陷,1970~1980 年代发生多次软土层和流砂溃入坑道,总溃入量约 27 300 m^3。2013 年与 2016 年又有塌陷发生,均为历史上塌陷的发展和延续。目前浦发路变形迹象明显,最大变形量超过 10 cm,同时路面产生多条平行裂缝,与 2017、2018 年相比,地表变形加剧,稳定性进一步变差,再次发生大规模塌陷的可能性较大。同时,连云港地势与地形多变,崩滑高易发区面积达 106 km^2,由此可以看出连云港地区地质条件复杂多变。连云港早期的地下空间开发主要致力于人防工程,近期典型地下工程为综合管廊建设,一般采用明挖法进行施工,应防范软土导致的基坑侧壁破坏失稳与基底变形。采用盾构法进行施工时,应注意防范软土带来的坑底沉降和变形。对于区内已有构筑物,开发深度及影响范围内工程建设开发需设置一定的避让距离并确保原有构筑物的安全稳定。目前,市区重点规划建设区域位于徐圩新区与连云新城(连云港滨海地区)。但基于自然因素评价的评价结果显示,这些地区建设用地质环境地适宜性一般,空间冲突较为强烈,重点建设区域与生态环境脆弱区具有空间一致性。本次的适宜分区评价结果将上述地质条件差的区域进行了圈定,能够指导工程建

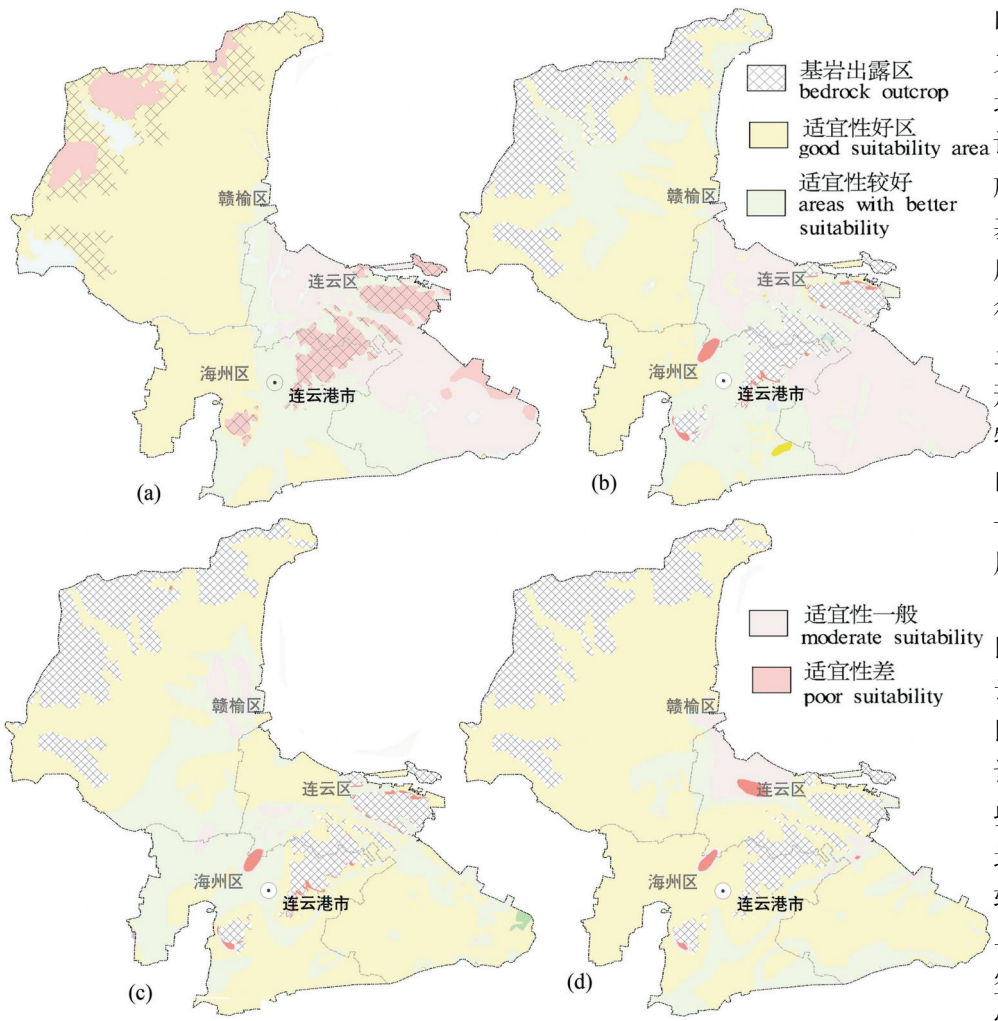


图 5 连云港城市规划区一体化评价适宜性分区图

Fig. 5 Suitability zoning map of integrated evaluation for Lianyungang urban planning area

设,降低诸如此类的事故风险。

本次研究目的是推进连云港市地上地下一体化开发,同时支撑连云港城市规划区地下空间开发专项规划的编制。连云港上一轮的地下空间专项规划编制已经是 10 年前了,且 2014 年赣榆县撤县设区,连云港市区面积增加了 1 514 km^2,上一轮的地下空间专项规划已不能指导城市一体化建设,本次的研究成果能支撑新一轮地下空间开发专项规划的编制。本次研究构建的评价方法体系,也可为其它城市或地区开展地上地下一体化开发地质适宜性评价提供参考。本次评价对于已开展建设的地上、地下空间的情况掌握程度不足,未能将已有构筑物的空间分布特征加入评价指标体系中。本次的评价局限在二维静态评价,后续工作已准备向三维动态评价发展。

3 结论

(1)目前地上地下一体化开发地质环境适宜性评价还处于探索阶段。以往的研究有关地上空间的评价较多,有相关规范可以参考;有关地下空间的评价没有统一的评价标准,本次研究建立了统一的地上地下一体化评价指标体系,并给出了统一的适宜性等级划分标准,可以为与连云港城市规划区相当的中等发达城市一体化评价提供参考。

(2)一体化评价地上和地下评价指标差异性较为明显,地上评价考虑地形坡度、地基承载力、桩基埋深等 11 因素,而地下空间评价则不考虑地形坡度、桩基埋深等因素。采用综合评价法(线性加权层次分析法与熵权系数法确定的权重)确定属性层权重,既突出了评价指标的实际重要性,又能体现评价结果的客观性。评价结果显示:地上空间工程建设适宜性好区和较好区分布广泛,合计占比 73.94%;适宜性一般区和差区主要受软土、腐蚀性土及地质灾害影响。浅层(0~15 m)地下空间开发地质适宜性好和较好区合计占比 76.25%;适宜性一般的区域主要受浅埋软土厚影响,地下空间开发面临软土变形的风险。适宜性差的区域仅分布在地质灾害高易发区。次浅层(15~30 m)地下空间开发地质适宜性好和较好区合计占比 93.22%。适宜性一般的区域仅仅占比 2.78%,主要受砂层涌水量和岩土结合面的影响。次深层(30~50 m)地下空间开发地质适宜性好的区域面积显著增加,占比高达 79%;适宜性一般区与适宜性差的区域合计仅占比 7.80%。

(3)地下空间工程建设适宜性优于地上,建议地下空间分为 3 个竖向分层进行建设。充分开发利用 15m 以浅的地下空间,可以规划为综合管廊建设、仓储购物、地下交通等。超前规划次浅层与次深层地下空间。适宜性好区和较好区国土空间规划编制时应优先考虑。

参 考 文 献 / References

(The literature whose publishing year followed by a "&" is in Chinese with English abstract; The literature whose publishing year followed by a "#" is in Chinese without English abstract)

陈安定. 2010. 苏北盆地构造特征及其箕状断陷形成机理. 石油与天然气地质, 31(2): 140~149.

陈大平. 2014. 上海深部地下空间开发关键地质问题分析. 上海国土资源, 35(3): 73~77.

苟富刚, 龚绪龙, 宋玉明, 沈辰, 蔡田露. 2022a. 中全新世以来的海相沉积物的化学特性及其对古环境变化的响应机制. 地球化学, DOI: 10.19700/j.0379-1726.2022.01.011

苟富刚, 龚绪龙, 王光亚. 2018. 连云港海相软土不排水强度特征. 吉林大学学报(地球科学版), 48(4): 1165~1173.

苟富刚, 卢毅, 李明亮, 陆徐荣, 李进. 2021a. 连云港海相软土固结状态及地质成因. 工程地质学报, DOI: 10.13544/j.cnki.jeg.2021-0664

苟富刚, 陆徐荣, 龚绪龙, 杨露梅, 刘明遥. 2021b. 连云港滨海地区沉积物含盐特征及其对工程基础的影响化. 工程地质学报, DOI: 10.13544/j.cnki.jeg.2021-0448

苟富刚, 李明亮, 陆华, 瞿婧晶, 蔡田露, 李明. 2022b. 基于负面清单的连云港市区建设用地适宜性评价. 城市地质, 17 (1): 56~64.

苟富刚. 2012. 汶川地震滑坡发育规律及危险性分析. 成都: 成都理工大学: 71~80.

顾承兵. 2005. 上海市地下空间概念规划简介. 上海城市规划, 9(2): 22~27.

国家统计局. 2021. 中国统计年鉴——2021. 北京: 中国统计出版社: 1~37.

郝爱兵, 吴爱民, 马震, 柳富田, 夏雨波, 谢海澜, 林良俊, 王涛, 白耀楠, 张竞, 孟庆华. 2018. 雄安新区地上地下工程建设适宜性一体化评价. 地球学报, 39(5): 513~522.

黄富民. 2021. 江苏省地下空间发展报告. 南京: 江苏省地下空间学会: 1~137.

黄敬军, 武鑫, 姜素, 崔龙玉, 魏永耀, 张丽, 陆华. 2018. 海绵城市建设的地质影响及适宜性评价——以徐州为例. 地质论评, 64(6): 1472~1480.

贾建伟, 彭芳乐. 2012. 日本大深度地下空间利用状况及对我国的启示. 地下空间与工程学报, 8(S1): 1340~1343.

江思义, 吴福, 刘庆超, 李海良, 潘晓丽. 2019. 岩溶地区建设用地地质环境适宜性评价——以广西桂林规划中心城区为例. 中国地质灾害与防治学报, 30(6): 84~93.

蒋杰, 葛伟亚, 马青山, 田福金, 贾军元. 2021. 南昌市中心城区地下空间开发地质适宜性评价. 地质通报, 40(5): 734~744.

李爱民. 2015. 常见病与自然疗法系列(六)奇特的岩洞疗法. 健康人生, 31(4): 38 ~39.

李晓昭, 王睿, 顾倩, 周丹坤, 辛韫潇. 2019. 城市地下空间开发的战略需求. 地学前缘, 26 (3): 32~38.

梁武, 陈美球, 黄宏胜, 罗志军. 2016. 鄱阳湖滨湖地区人口城镇化

与土地城镇化协调性研究. 土地经济研究, 34(1): 47~63.
苗苗. 2015. 英国将地下防空洞变为农场. 科学大观园, (23): 9.
曲衍波, 张凤荣, 姜广辉, 关小克, 郭力娜. 2010. 基于生态位的农村居民点用地适宜性评价与分区调控. 农业工程学报, 26(11): 290~296.
史玉金, 张先林, 陈大平. 2016. 上海深层地下空间开发地质环境条件及适宜性评价. 地质调查与研究, (39): 130~135.
唐韵. 2011. 基于 AHP-熵权法的浙江高校科研项目绩效评价研究. 杭州: 浙江工业大学: 32~36.
童林旭. 2005. 地下空间与未来城市. 地下空间与工程学报, 35(3): 323~328.
夏伟强, 董杰,何鹏, 解永健. 2019. 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. 地质学报, 93(S1): 233~240.
谢和平, 高峰, 鞠杨. 2015. 深地岩体力学研究与探索. 岩石力学与工程学报, 34(11): 2161 ~2177.
谢和平, 高明忠, 张茹, 徐恒, 王勇威, 邓建辉. 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. 岩石力学与工程学报, 36(6): 1301~1313.
谢和平. 2011. 创新低碳技术推进城市绿色发展. 中国城市经济, 13(10): 21~22.
邢怀学, 窦帆帆, 葛伟亚, 华健, 常晓军, 蔡小虎. 2022. 城市地下空间开发利用地质适宜性三维评价指标体系研究——以杭州市为例. 地质论评, 68(2): 607~614.
杨子生. 2016. 山区城镇建设用地适宜性评价方法及应用: 以云南省德宏州为例. 自然资源学报, 31(1): 64~76.
张茂省, 岳东霞, 孙萍萍, 孟兴民, 郭建军, 王东, 苗俊霞, 郑续. 2019. 面向县级国土空间规划的自然资源综合调查与双评价一以延安市延川县为例. 兰州大学学报: 自然科学版, 55(3): 281~289.
郑挥, 国立志. 2010. 连云港市中心城区地下空间开发利用规划(2008~2030). 南京: 解放军理工大学地下空间研究中心, 1~69.
智庆玺, 张可宗, 栾勇鹏, 王天青, 赵景伟. 2014. 新空间格局下青岛城市地下空间开发战略研究. 地下空间与工程学报, 10(S1): 1518~1525.
中国人民共和国住房和城乡建设部. 2009. 城乡用地评定标准(CJJ132-2009). 北京: 中国建筑工业出版社: 1~15.
中国人民共和国住房和城乡建设部. 2013. 城乡规划工程地质勘察规范(CJJ 57-2012). 北京: 中国建筑工业出版社: 19~32.
中华人民共和国住房和城乡建设部. 2019. 城市地下空间规划标准(GB/T 51358-2019). 北京: 中国计划出版社: 5~8.
Broere W. 2016. Urban underground space: solving the problems of today´s cities. Tunnelling and Underground Space Technology, 55: 245~248.
Chen Anding. 2010&. The structural characteristics of the Subei Basin and the formation mechanism of the skip-shaped fault depression. Oil and Gas Geology, 31(2): 140~149.
Chen Daping. 2014&. Analysis of key geological issues in the development of deep underground space in Shanghai. Shanghai Land & Resources, (3): 73~77.
Chen Zhilong, Chen Jiayun, Liu Hong, Zhang Zhifeng. 2018. Present status and development trends of underground space in Chinese cities: Evaluation and analysis. Tunnelling and Underground Space Technology, 71: 253~270.
Gou Fugang, Gong Xulong, Song Yuming, Shen Chen, Cai Tianlu. 2022a&. The chemical properties of marine sediments since the middle Holocene and their response mechanism to paleoenvironmental changes. Geochemistry, DOI: 10. 19700/ J. 0379-1726. 2022. 01. 011
Gou Fugang, Gong Xulong, Wang Guangya. 2018&. Shear strength and failure characteristics of marine soft soil in Lianyungang. Journal of Jilin University(Earth Science Edition), 48(4): 1165~1173.
Gou Fugang, Lu Yi, Li Mingliang, Lu Xurong, Li Jin. 2021a&. Consolidation state and geological origin analysis of Lianyungang marine soft soil. Journal of Engineering Geology, DOI: 10. 13544/ j. cnki. jeg. 2021-0664.
Gou Fugang, Lu Xurong, Gong Xulong, Yang Lumei, Liu Mingyao. 2021b&. Characteristics of Salt Content and Sedimentary Environmental Evolution in Soils Shallower than a Hundred Meters in the Yangtze River Estuary. Chinese Journal of Engineering Geology, DOI: 10. 13544/j. cnki. jeg. 2021-0448
Gou Fugang, Li Mingliang, Lu Hua, Qu Jingjing, Cai Tianlu, Li Ming. 2022b&. Suitability evaluation of construction land in Lianyungang urban area based on negative list. Urban Geology, 17 (1): 56~64.
Gou Fugang. 2012&. Regularity and risk analysis landslides induced by Wenchuan Earthquake. Chengdu: Chengdu University of Technology, 71~80.
Gu Chengbing. 2005&. Introduction to the conceptual planning of underground space in Shangha. Shanghai Urban Planning, 9(2): 22~27.
Hao Aibing, Wu Aimin, Ma Zhen, Liu Fudian, Xia Yubo, Xie Haizhan, Lin Liangjun, Wang Tao, Bai Yaoan, Zhang Jing, Meng Qinghua. 2018&. A study of engineering construction suitability integrated evaluation of surface—underground space in Xiongan new area. Acta Geoscientica Sinica, 39(5): 513~522.
Huang Fumin. 2021#. Jiangsu Province underground space development report. Nanjing: Jiangsu Province underground space learning: 1~137.
Huang Jingjun, Wu Xin, Jiang Su, Cui Longyu, Wei Yongyao, Zhang Li, LU Hua. 2018&. Geological influence and suitability evaluation of the construction of sponge city ——A case of Xuzhou. Geological Review, 64(6): 1472~1480.
Jia Jianwei, Peng Fangle. 2012&. Utilizating of deep underground space in Japan and its enlightenment for Chinese city. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 8(S1): 1340~1343.
Jiang Jie, Ge Weiya, Ma Qingshan, Tian Fujin, Jia Junyuan. 2021&. Geological environment suitability assessment of underground space development in Nanchang City. Geological Bulletin of China, 40(5): 734~744.
Jiang Siyi, Wu Fu, Liu Qingchao, Li Hailiang, Pan Xiaoli. 2019&. Suitability evaluation of construction land development in karst area: taking city planning center of Guilin as an example. The Chinese Journal of Geological Hazards and Control, 30 (6): 84~93.
Li Aiming. 2015&. Common diseases and natural therapy series of six: strange cave therapies. Health Life, 31(4): 38 ~39.
Li Xiaozhao, Wang Rui, Gu Qian, Zhou Dankun, Xin Yunxiao. 2019&. Prediction of strategic demand of urban underground space development. Earth Science Frontiers, 26(3): 32~38.
Liang Wu, Chen Meiqiu, Huang Hongsheng, Luo Zhijun. 2016&. Research on the coordination of population urbanization and land urbanization in Poyang lakeside area. Land Economics Research, 34(1): 47~63.
Liu Yi, Zhu Chengliang. 2020. Current status and future perspectives of urban underground space development in Shanghai. Tunnel Construction, 40(7): 941~952.

Miao Miao. 2015&. The British turned the underground air raid shelter in to a farm. Science Park, (23): 9.

Ministry of housing and urban—rural development of the People´s Republic of China. 2009#. Urban and Rural Land Evaluation Standard (CJJ132-2009). Beijing: China Construction Industry Press: 1~15.

Ministry of housing and urban—rural development of the People´s Republic of China. 2013#. Code for geological survey of urban and rural planning engineering (CJJ 57-2012). Beijing: China Construction Industry Press: 19~32.

Ministry of housing and urban—rural development of the People´s Republic of China. 2019#. Urban Underground Space Planning Standard (GB/T 51358-2019). Beijing: China Planning Press: 5~8.

National Bureau of Statistics. 2021#. China Statistics Yearbook ——2021. China Statistics Press: 1~37.

Qu Yanbo, Zhang Fengrong, Jiang Guanghui, Guan Xiaoke, Guo Lina. 2010&. Suitability evaluation and subarea control and regulation of rural residential land based on niche Transactions of the Csae, 26(11): 290~296.

Shi Yujin, Zhang Xianlin, Chen Daping. 2016&. Geological environmental conditions and suitability evaluation for the development of deep underground space in Shanghai. Geological Survey and Research, (39): 130~135.

Tang Yun. 2011&. Research on the performance evaluation of scientific research projects in Zhejiang universities based on AHP-entropy method. Hangzhou: Zhejiang University of Technology: 32~36.

Tengborg P, Sturk R. 2016. Development of the use of underground space in Sweden. Tunnelling and Underground Space Technology, 55: 339~341.

Tong Linxu. 2005&. Underground space and future city. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 35(3): 323~328.

Wallace M I, Ng K C. 2016. Development and application of underground space use in Hong Kong. Tunnelling and Underground Space Technology, 55: 257~279.

Wang Xia, Zhen Feng, HuangXianjin, Zhang Min, Liu Zehua. 2013. Factors influencing the development potential of urban underground space: structural equation model approach. Tunnelling and Underground Space Technology, 38(3): 235~243.

Xia Weiqiang, Dong Jie, He Peng, Xie Yongjian. 2019&. Evaluation and suitability zoning of geological factors affecting the development and utilization of underground space in the main urban area of Qingdao. Acta Geologica Sinica, 93(S1): 233~240.

Xie Heping, Gao Feng, Ju Yang. 2015&. Research and development of rock mechanics in deep ground engineering. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 34(11): 2161~2177.

Xie Heping, Gao Mingzhong, Zhang Ru, Xu Heng, Wang Yongwei, Deng Jianhui. 2017&. The subversive idea and its key technical prospect on underground ecological city and ecosystem. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 36(6): 1301~1313.

Xie Heping. 2011&. Innovation of low carbon technology to promote urban green development. China Urban Economy, 13(10): 21~22.

Xing Huaixue, Dou Fanfan, Ge Weiya, Hua Jian, Chang Xiaojun, Cai Xiaohu. 2022&. The research on 3D evaluation index system of geological suitability for urban underground space development and utilization. Geological Review, 68(2): 607~614.

Yang Zisheng. 2016&. Land suitability evaluation for urban construction and its application in mountainous areas: A case study in Dehong Daijingpo autonomous prefecture, Yunnan Province. Journal of Natural Resources, 31(1): 64~76.

Zacharias J. 2007. Pedestrian dynamics layout and economic effects in Montreal´s underground city. Urban Planning International, 22(6): 21~27.

Zhang Maosheng, Yue Dongxia, Sun Pingping, Meng Xingmin, Guo Jianjun, Wang Dong, Miao Junxia, Zheng Qing. 2019&. A comprehensive survey of natural resources and double evaluation of county-level land spatial planning: a case study of Yanchuan County in Shaanxi, China. Journal of Lanzhou University: Natural Sciences, 55(3): 281~289.

Zhao Jingwei, Peng Fangle, Wang Tianqing, Zhang Xiaoyun, Jiang Bingnan. 2015. Advances in master planning of urban underground space (UUS) in China. Tunnelling and Underground Space Technology, 55(5): 290~307.

Zheng Hui, Guo Lizhi. 2010#. Lianyungang Downtown Underground Space Development and Utilization Plan (2008~2030). Nanjing: The Underground Space Research Center of the PLA: 1~69.

Zhi Qingxi, Zhang Kezong, Luan Yongpeng, Wang Tianqing, Zhao Jingwei. 2014&. Research on urban underground space development strategy of Qingdao city under new spatial pattern. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 10(Supp. 1): 1518~1525.

Integrated evaluation of the suitability of geological environment for above-ground and underground engineering construction

——Taking the urban planning area of Lianyungang City as an example

GOU Fugang, LI Mingliang, OU Jian, GU Chunsheng, CAI Tianlu, MAO Lei

Geological Survey of Jiangsu Province, Key Laboratory of Earth Fissures Geological Disaster, Ministry of Natural Resources, Nanjing, 210049

Abstract: The evaluation of the suitability of the geological environment for engineering construction is the basis for the preparation of territorial spatial planning. Take Lianyungang as an example to explore the integrated evaluation index system and method for the suitability of above-ground and underground engineering construction. Integrated evaluation is a spatially integrated decision-making problem, involving multiple factors at multiple levels. Drawing on the negative list model in the economic field, an integrated evaluation index system is established based on the negative list of natural factors. The difference is more obvious between above-ground and underground evaluation indexes of integrated evaluation. The above-ground evaluation considers 11 factors such as terrain slope, foundation bearing capacity and pile depth, while the underground space evaluation does not consider factors such as terrain slope and pile depth. Based on the comprehensive evaluation method of hierarchical analysis and entropy weighting coefficient method to determine the weight of evaluation index, the multi-objective linear weighting function model using GIS platform was used to carry out the integrated regional evaluation of engineering construction. The evaluation results show that: the areas of good and better engineering construction suitability are widely distributed, accounting for 73.94%~93.22%. With the increase of vertical depth, the area of the areas with good geological suitability for underground space development increases significantly. The suitability of above-ground space is mainly affected by soft and corrosive soils and geological hazards. The geological suitability of underground space development in the shallow layer (0~15 m) is mainly affected by the s shallow-buried thick layer of soft soil, and the underground space development faces the risk of soft soil deformation. The geological suitability of underground space development in the sub-shallow layer (15~30 m) and the sub-deep layer (30~50 m) is mainly influenced by the influx of water from the sand layer and the rock—soil interface. Judging from the evaluation results, the suitability of underground space construction is better than that above ground. It is recommended that underground space be divided into 3 vertical layers, fully exploiting the above-ground space above 15 m, planning ahead for the sub-shallow and sub-depth underground space, and avoiding the general and poor suitability areas as far as possible. Good suitability areas and better areas should be taken into account when preparing the national spatial planning.

Keywords: urban geology; geological environment; suitability; construction land; negative list; integrated Evaluation

Acknowledgements: This paper was supported by Lianyungang Urban Geological Survey (No. 20170821) and Jiangsu Coastal Area Comprehensive Geological Survey (No. 20120223)

First author: GOU Fugang, male, master, born in 1985, senior engineer, mainly engaged in engineering construction engineering geological conditions and special soil engineering characteristics research work; Email: gfggfg@ foxmail. com

Manuscript received on: 2022-03-22; Accepted on: 2022-05-27; Network published on: 2022-06-20

Doi: 10.16509/j.georeview.2022.06.035　　**Edited by**: ZHANG Yuxu