

DOI:10.19751/j.cnki.61-1149/p.2021.03.022

基于三维 GIS 的第四系古河道沉积区 工程建设适宜性评价研究

杨波,管后春,杨潘,侯香梦

(安徽省地质调查院,安徽 合肥 230001)

摘要:基于皖北楚店集、高炉集、江集和望町集 4 幅 1:5 万综合地质调查成果,划定区内第四系地质结构与工程地质分层,控制茆塘期古河道的空间展布特征,融合多源数据与专家经验联合构建三维地质结构模型。综合考虑基础、工程、水文等地质条件,运用 Delphi 法确定了 9 项工程建设相关评价因子。基于 AHP 层次分析法、多因子综合指数评价法建立了评价指标体系与计算模型。通过三维 GIS 分析评价方法,综合评价区内 50m 以浅工程建设适宜性,分级圈定了适宜性好、较好、一般等各级区域。利用皮尔逊相关系数法对评价结果和单项因子进行关联分析,揭示了因子影响关系,提出了工程建设过程中需重点关注的因素。

关键词:第四系;三维 GIS;变权赋值;古河道;工程建设

中图分类号:P642 文献标志码:A 文章编号:1009-6248(2021)03-0244-09

Research on 3D GIS-Based Suitability Evaluation of Engineering Construction of the Quaternary Paleo-channel Sedimentary Area

YANG Bo, GUAN Houchun, YANG Pan, HOU Xiangmeng

(Geological Survey of Anhui Province, Hefei 230001, Anhui, China)

Abstract: Based on the 1 : 50 000 comprehensive geological survey in Chudianji, Gaoluji, Jiangji and Wangdingji of northern Anhui Province, this paper determines the Quaternary geological structure, the engineering geological stratification, and the spatial distribution characteristics of maotang paleo-channel. It also builds a 3D geological structure model on the basis of multi-source data and experts' experience. Considering the geological conditions of foundation, engineering and hydrology, nine evaluation factors related to engineering construction are used in the Delphi method. Based on AHP and multi factor comprehensive index evaluation method, the evaluation index system and calculation model are established. 3D GIS analysis and evaluation method are used to comprehensively evaluate the suitability of shallow engineering construction within 50 meters in the area, and delineated different levels of suitability. Pearson correlation coefficient method is used to analyze the correlation between the evaluation results and individual factors,

收稿日期:2020-08-19;修回日期:2021-02-03

基金项目:安徽省公益性地质项目“1:5万楚店集、高炉集、江集和望町集覆盖区综合地质调查”(2016-g-3-32)。

作者简介:杨波(1982-),男,硕士,高级工程师,主要从事地质信息技术方面工作。E-mail:yangbo_ah@qq.com。

revealing the influence relationship of factors in the process of engineering construction.

Keywords: Quaternary; 3D GIS; variable weight assignment; paleo-channel; engineering construction

楚店集、高炉集、江集和望町集 4 幅 1:5 万综合地质调查区位于安徽北部亳州市境内。区内主要为第四系厚层松散岩类覆盖,古河道较发育,地下水资源较为丰富,是主要的工业、生活用水来源。随着人类活动加剧,地下水水质、水资源量以及建设用地等自然资源逐渐成为当地建设、发展的限制因素。综合基础、工程、水文地质研究认识,运用三维建模、GIS 等技术手段,开展 50m 以浅的工程建设适宜性定量评价研究,其成果可为当地发展远景规划以及经济开发区、重要城镇建设规划提出指导建议。

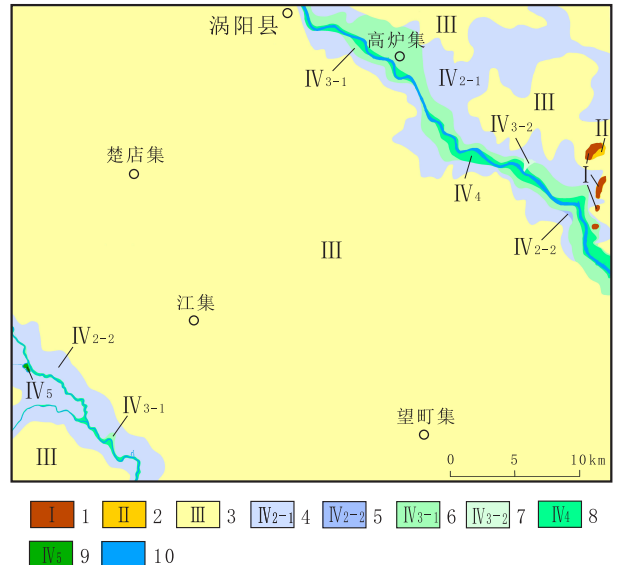
基于 GIS 技术的适宜性评价前人已开展不少研究。如浅层分析大多采用二维网格化技术开展(夏伟强等,2019;蒋旭等,2018;唐鑫等,2019;王振宇等,2019)。在中、深层分析中,地质体与评价因子的三维空间分布具有重要的赋值控制意义,需要通过三维模型进行空间约束。三维建模技术解决了二维平面在纵向上的信息缺失问题(李青元等,2016;屈红刚等,2015),在此基础上发展而来的三维评价技术,通过三维网格化赋值、插值计算等方法,将三维模型由单一属性转为连续变化属性,使其能够更准确的反映因子内部变化趋势(章梦霞,2019;李静等,2016;郝爱兵等,2018;方寅琛等,2017)。

1 研究区地质背景

研究区地处黄淮海平原南缘,淮河二级支流涡河、西淝河呈东南向贯穿全区。区内地形地貌平坦,仅东北部有残丘分布和少量基岩出露,其他地区均为第四系地层覆盖。第四系从老到新依次为早更新世太和中组、中更新世临泉组、中一晚更新世茆塘组以及晚更新世—全新世蚌埠组。地层总体呈北东向南西逐渐增厚,钻孔揭露最厚处达 162.75 m。

地貌主要分构造剥蚀地貌和侵蚀堆积地貌两大类。更新世主要为大面积沉降,中一晚期古河道较发育。全新世以上升为主,基本为冲积,在东部有少量的冲—洪积、残—坡积等(地貌特征见图 1)。区内膨胀土广泛分布,自由膨胀率主要介于 30%~

60%。地下水资源较为丰富,主要为松散岩类孔隙水、碎屑岩类裂隙水。



1. 丘陵;2. 岗地;3. 河间地块;4. 河漫滩;5. 河漫沼泽;6. 天然堤;7. 决口扇;8. 边滩;9. 牛轭湖;10. 河流

图 1 研究区地貌简图

Fig. 1 Landform map of the study area

2 研究数据与技术方法

2.1 主要研究数据

本次研究基于区内 1:5 万综合地质调查开展,数据包括地质调查、钻探、岩土分析、水质分析数据,以及编制的各类图件等,较为全面、准确地控制了区内工程地质结构,反映了松散岩类孔隙水、碎屑岩类裂隙水这两大主要地下水类型的三维空间分布特征。主要研究数据见表 1。

2.2 建模与评价技术路线

(1)基于综合地质调查数据,结合专家经验构建全区 50 m 以浅地质结构模型,全面反映区域地质结构与地质体空间分布特征。

(2)根据实际情况,研究、确定综合评价因子,利用层次分析法对因子权重进行分析,构建综合评价指标体系与分析计算模型。

(3)对评价因子进行无量纲化处理并计算权重值。

表 1 主要研究数据表
Tab. 1 Main research data

| 序号 | 数据类型 | 数据量 |
|----|------------|-----------------------|
| 1 | 1:5万综合地质调查 | 1 760 km ² |
| 2 | 第四系地质钻探 | 7 990 m/59 孔 |
| 3 | 水文地质钻探 | 2 840 m/26 孔 |
| 4 | 工程地质钻探 | 502 m/8 孔 |
| 5 | 岩土分析样 | 326 件 |
| 6 | 水质分析样 | 281 组 |
| 7 | 1:5万区域地质图 | 4 幅 |
| 8 | 1:5万工程地质图 | 4 幅 |
| 9 | 1:5万水文地质图 | 4 幅 |
| 10 | 1:5万岩相古地理图 | 4 幅 |
| 11 | 1:5万基岩地质图 | 4 幅 |
| 12 | 地质剖面图 | 16 幅 |

(4)构建研究区三维网格模型,以地质模型为空间约束,基于单因子评价数据、矢量图数据等对网格单元进行综合赋值。

(5)依据评价指标体系与赋值因子进行计算,得出评价结果并分析。

3 三维地质建模

三维地质模型是地质信息的重要载体与研究对象,需基于多方面调查数据并结合地质认识联合构建。建模方法主要以地质钻孔、地质剖面为纵向约束,地形地质图、岩相古地理图、地层顶、底板等深分区图等为平面约束,分层构建地质单元。对推测区域基于专家认识,通过人机交互建模方式进行补充、完善。建模软件为 MapGIS K9,主要建模流程见图 2。

本次工程地质建模单元划分以区域地质岩性分层为基础,依据《岩土工程勘察规范》GB50021-2001(2009 版),参考以往分层方案并结合调查实际情况确定,划分原则如下。

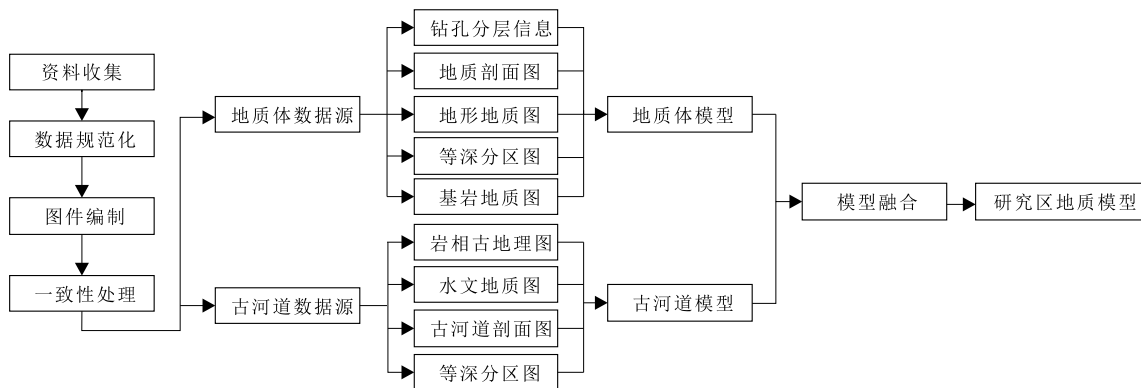


图 2 建模主要流程图

Fig. 2 Main flow chart of modeling

(1)依据岩土体沉积时代和沉积环境,以岩性地层所属组别作为 1 级单元。

(2)基于土体性质和状态,结合土工实验参数,在 1 级单元内划分亚组。

(3)考虑工程地质层组在同一地貌单元内分布的连续性、普遍性,参考岩性地层中各组别内段的划分,对所分亚组的部分土体做进一步划分或合并。

年代岩性分层与工程分层对照见表 2,构建的三维工程地质模型(图 3)。

4 工程建设适宜性评价

4.1 评价因子选取

选取评价因子时,主要考虑以下几方面:一是因子敏感性,根据影响大小分析起主要、次要作用的因子;二是因子差异性,即选择的因子之间保证相互独立,性质不重叠;三是综合分析,研究因子间的相互关系与影响(张彩红,2019)。

表 2 岩性分层与工程分层对照表

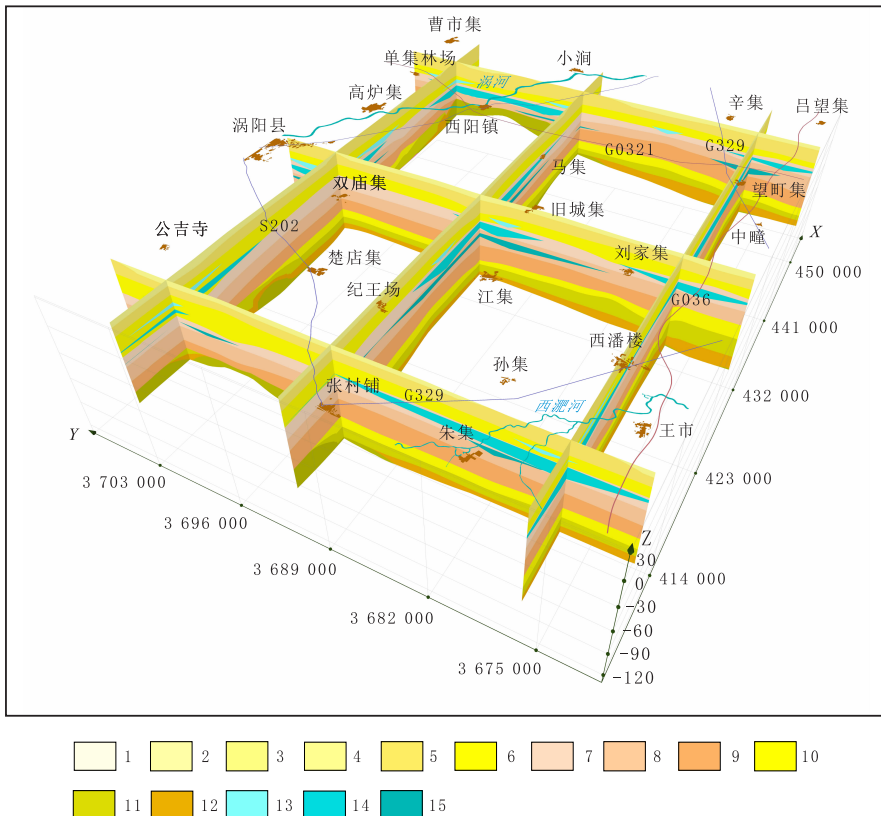
Tab. 2 Comparison table of lithologic stratification and engineering stratification

| 岩性地层 | 工程层 | 亚层 | 分层名称 |
|----------|-----|-----|-------|
| 蚌埠组(Qbl) | 1 | 1-1 | 粉砂夹粉土 |
| | | 1-2 | 粉质黏土 |
| | | 1-3 | 粉细砂 |
| 茆塘组(Qpm) | 2 | 2-1 | 粉质黏土 |
| | | 2-2 | 粉细砂 |
| | | 2-3 | 黏土 |
| | | 2-4 | 粉细砂 |
| | | 2-5 | 黏土 |
| 临泉组(Qpl) | 3 | 3-1 | 粉质黏土 |
| | | 3-2 | 粉细砂 |
| | | 3-3 | 黏土 |
| 太和组(Qpt) | 4 | 4-1 | 粉质黏土 |
| | | 4-2 | 粉细砂 |
| | | 4-3 | 粉质黏土 |

本次评价因子间相对重要性判断及因子选取运用了 Delphi 法进行分析。Delphi 法在 20 世纪 40 年代由 O. 赫尔姆和 N. 达尔克首创,可综合多位专家的独立判断进行定性评价。通过此方法在综合考虑当地的地质条件以及多方面因素对工程建设的影响,设置了基础地质、工程地质、水文地质 3 类共 9 项评价因子。分别为地形地貌、地壳稳定、岩土特征、土体膨胀、水系水域、洪水淹没、地下水位、地下水水质和地下水腐蚀性,共同组成评价指标体系。

4.2 评价因子评分标准

由于不同因子之间存在计量单位、数值范围等差异,为实现不同因子的统一评价计算,采用了无量纲化方式进行处理。评价因子根据实际情况,基于无量纲化标准进行分级赋分(标准见表 3)。因子影响程度分为四级:“好级”(10 分)、“较好级”(8 分)、“一般级”(6 分)、“差级”(3 分),数值越高代表评价因子影响越偏向正面。



1. 粉砂夹粉土(Qbl); 2. 粉质黏土(Qbl); 3. 粉细砂(Qbl); 4. 粉质黏土(Qpm); 5. 粉细砂(Qpm); 6. 黏土(Qpm); 7. 粉质黏土(Qpl); 8. 粉细砂(Qpl); 9. 黏土(Qpl); 10. 粉质黏土(Qpt); 11. 粉细砂(Qpt); 12. 粉质黏土(Qpt); 13. 茆塘期早期古河道; 14. 茆塘期中期古河道; 15. 茆塘期晚期古河道

图 3 研究区工程地质模型剖切图

Fig. 3 Section of geological engineering model in the study area

表3 评价因子无量纲评分与分级标准表
Tab.3 Dimensionless score and grading standard of evaluation factors

| 专业分类 | 评价因子 | 量化标准 | | | |
|------|--------|------------------------------------|---------------------------------|--------------------------------|-----------------------------|
| | | 差 (3分) | 一般 (6分) | 较好 (8分) | 好 (10分) |
| 基础地质 | 地形地貌 | | 残丘 | 河间地块 | 河谷平原 |
| | 地壳稳定 | 距断裂<200 m | 200 m<距断裂<500 m | 500 m<距断裂<1 000 m | 距断裂>1 000 m |
| 工程地质 | 岩土特征 | 岩土类型多,分布不均匀,工程性质差。有严重危害特殊岩土,需做专门处理 | 岩土类型较多,分布较不均匀,工程性质一般。有较严重危害特殊岩土 | 岩土类型较少,分布较均匀,工程性质较好。有轻微危害特殊性岩土 | 岩土类型单一,分布均匀,工程性质良好,无特殊性岩土分布 |
| | 土体膨胀 | | 自由膨胀率>60 | 40<自由膨胀率≤60 | 自由膨胀率≤40 |
| 水文地质 | 水系水域 | 水域 | | | 非水域 |
| | 洪水淹没 | 淹没≥1 m | 0.5 m≤淹没<1 m | 淹没<0.5 m | 无洪水淹没 |
| | 地下水水位 | 32 m≤水位 | 29 m≤水位<32 m | 27 m≤水位<29 m | 水位<27 m |
| | 地下水水质 | 严重污染 | 中度污染 | 轻微污染 | 无污染 |
| | 地下水腐蚀性 | 强 | 中等 | 弱 | 微 |

4.3 评价因子权重分析

因子权重分析采用层次分析法计算,主要步骤为:①按类别构建层次结构。②在同一层次类别上按照重要程度对评价因子进行两两对比,构建判断矩阵。③计算单评价因子权重。④进行一致性检验(郑长远等,2010;龙睿等,2020;Man Hu et al.,2019)。

因子权重计算首先依据 Delphi 法判断得出的因子重要性级别构建矩阵,再运用 AHP 层次分析法进行详细计算(对比判断矩阵见表4、表5、表6)。权重计算结果经分析(计算结果见表7),矩阵一致性检验结果为0.003 6,小于0.1,通过了一致性检验,说明因子权重赋值合理,构建的综合评价体系符合要求。

表4 地质条件评价因子判断矩阵表

Tab.4 Evaluation factor judgment matrix of geological conditions

| 地质条件 | 地形地貌 | 地壳稳定 |
|------|------|------|
| 地形地貌 | 1 | 1/3 |
| 地壳稳定 | 3 | 1 |

表5 工程地质评价因子判断矩阵表

Tab.5 Evaluation factor judgment matrix of engineering geology

| 工程地质 | 岩土特征 | 土体膨胀 |
|------|------|------|
| 岩土特征 | 1 | 5 |
| 土体膨胀 | 1/5 | 1 |

表6 水文地质评价因子判断矩阵表

Tab.6 Evaluation factor judgment matrix of hydrogeology

| 水文地质 | 水系水域 | 洪水淹没 | 地下水水位 | 浅层地下水污染 | 地下水腐蚀性 |
|--------|------|------|-------|---------|--------|
| 水系水域 | 1 | 1/5 | 1/5 | 1/5 | 1/3 |
| 洪水淹没 | 5 | 1 | 1 | 1 | 3 |
| 地下水水位 | 5 | 1 | 1 | 1 | 3 |
| 地下水水质 | 5 | 1 | 1 | 1 | 3 |
| 地下水腐蚀性 | 3 | 1/3 | 1/3 | 1/3 | 1 |

表7 评价因子权重表

Tab.7 Weight of evaluation factors

| 目标层 | 中间要素 | 权重 | 基础要素 | 权重 |
|---------|---------|---------|--------|---------|
| 工程建设适宜性 | 基础地质 | 0.109 6 | 地形地貌 | 0.027 4 |
| | | | 地壳稳定 | 0.082 2 |
| | 水文地质 | 0.581 3 | 水系水域 | 0.029 5 |
| | | | 洪水淹没 | 0.138 |
| | | | 地下水水位 | 0.165 9 |
| | | | 地下水水质 | 0.166 |
| | | | 地下水腐蚀性 | 0.081 9 |
| 工程地质 | 0.309 1 | | 岩土特征 | 0.257 6 |
| | | | 土体膨胀 | 0.051 5 |

对评价因子进一步分析会发现,实际情况中地形地貌、洪水淹没这 2 项因子在近地表区域影响较大,随深度增加其影响会逐渐降低,同时还会影响到其它因子权重变化。因此,本次研究对因子以地表权重值为初始值,随深度变化进行变权处理。地形地貌、洪水淹没等受深度影响较大因子变权赋值按公式(1)计算,其他因子按公式 2 计算。

$$W_{ij} = W_j' \frac{D - D_i}{D} \quad (1)$$

式中: W_j' ——第 j 个评价因子地表权重值;

D ——研究区深度最大值;

D_i ——第 i 个评价单元所处深度;

W_{ij} ——第 i 个单元格中第 j 个因子实际权重值;

$$V_{ik} = V_k' + \frac{V_k'}{\sum_1^n V_k'} \sum_1^m (W_j' - W_{ij}) \quad (2)$$

式中: V_k' ——第 k 个受深度影响较小评价因子地表权重值;

n ——受深度影响较小因子数量;

W_j' ——第 j 个受深度影响较大因子地表权重值;

W_{ij} ——第 i 个单元格中第 j 个因子实际权重值;

m ——受深度影响较大因子数量;

V_{ij} ——第 i 个单元格中第 k 个因子实际权重值。

4.4 评价单元赋值

利用 Surpac 软件根据研究区拐点坐标构建全区 50 m 以浅三维属性模型。网格单元大小设置为 250×250×2 m,共计 986 493 个单元。三维地质模型通过格式转换导入后作为地形地貌、地质结构与工程分层的三维约束条件参与赋值。

将无量纲化处理后的 9 个因子评分数据通过插值计算、空间相交分析、缓冲分析等方式分别赋予三维网格单元。所有单元集成 9 个因子评分数据,作为分析计算基本单位参与全区工程建设适宜性评价。

4.5 适宜性评价

为全面考虑各个因子对工程建设适宜性的影响,本次评价采用多因子综合指数评价法进行计算

(张彩红,2019)。单因子评分指标分别按权重赋值进行加权叠加计算分析,(计算方法见公式 3),得到工程建设适宜性指标综合评分,再根据适宜性分级标准确定适宜性分级。

$$S_i = \sum_{j=1}^n W_j X_{ij} \quad (3)$$

式中: S_i ——第 i 个单元格综合评价最终得分;

W_j ——第 j 个评价因子权重值;

X_{ij} ——第 j 个评价因子在第 i 个单元格的无量纲化赋值。

工程建设适宜性分级标准基于综合评分数据,运用自然间断点分级法(jenks)分五级进行计算(陶春军等,2019),因数据总量庞大,因此采用等间距抽样法进行了适当处理。最终分级标准结合当地实际情况、专家经验以及数据自然断点分布综合考虑划定,分级标准见表 8。

表 8 工程建设适宜性分级标准表

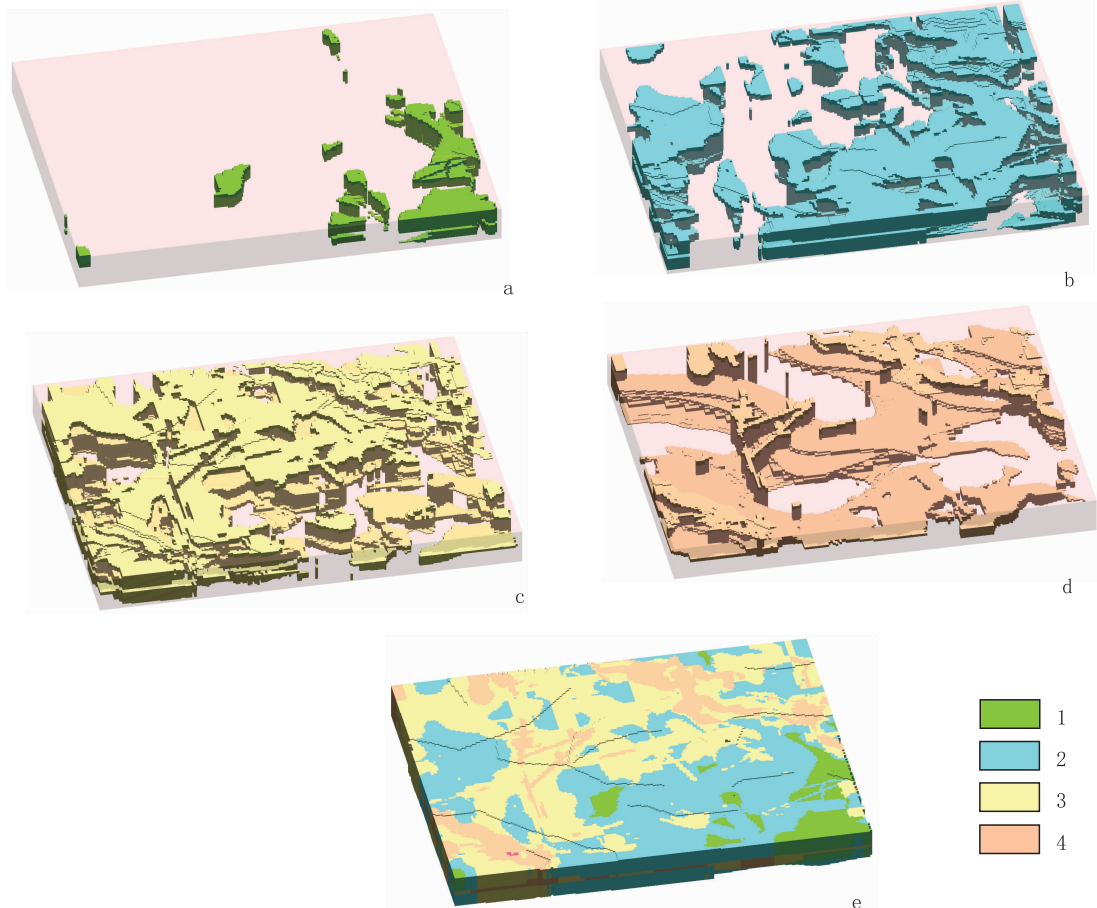
Tab. 8 Classification standard of engineering construction suitability

| 评定单元适宜性指数 | 工程建设适宜性分级 |
|----------------------|-----------|
| $S_i \geq 8.1$ | 适宜性好 |
| $7.0 \leq S_i < 8.1$ | 适宜性较好 |
| $5.8 \leq S_i < 7.0$ | 适宜性一般 |
| $3.5 \leq S_i < 5.8$ | 适宜性较差 |
| $S_i < 3.5$ | 适宜性差 |

4.6 评价结果与分析

对网格单元综合评分进行统计分析,“适宜性好”级单元格 40 760 个,占工作区总体积的 4.13%,“适宜性较好”级单元格 325 561 个,占工作区总体积的 33.01%,“适宜性一般”级单元格 413 365 个,占工作区总体积的 41.90%,“适宜性较差”级单元格 206 807 个,占工作区总体积的 20.96%,“适宜性差”级单元格无。各级区域空间分布见图 4。

对综合评价结果和各单项因子利用皮尔逊相关系数(梁吉业等,2016)进行相关性分析,计算方法见公式(4)。发现综合评价结果与岩土特征因子相关性最强,其次为地下水水位、地下水腐蚀性、地下水水质、地壳稳定等因子,洪水淹没、水系水域、土体膨胀、地形地貌等因子相关性较弱(分析结果见图 5)。



a. 适宜性好级区域; b. 适宜性较好级区域; c. 适宜性一般级区域; d. 适宜性较差级区域; e. 综合适宜性评价;
1. 适宜性好; 2. 适宜性较好; 3. 适宜性一般; 4. 适宜性较差

图4 工程建设适宜性评价三维模型图

Fig. 4 3D model of engineering construction suitability evaluation

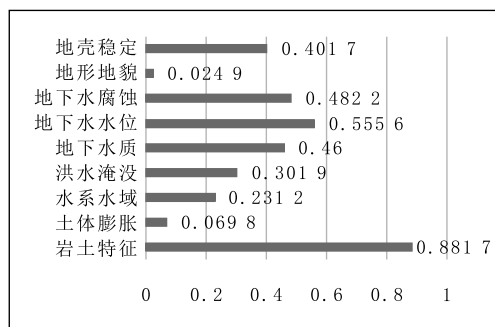


图5 单因子与综合评价结果相关性分析图

Fig. 5 Correlation analysis between single factor and comprehensive evaluation results

$$\text{Correl}(X, Y) = \frac{\sum (x - \bar{x})(y - \bar{y})}{\sqrt{\sum (x - \bar{x})^2 \sum (y - \bar{y})^2}} \quad (4)$$

式中: x ——单项因子计算样本数据;

y ——综合评价结果样本数据;

\bar{x} ——单项因子样本均值;

\bar{y} ——综合评价结果样本均值。

从“适宜性一般”区域模型与古河道模型对比中可以发现(图6),二者的空间分布有着较高的一致性,说明古河道等特殊岩土体对当地工程建设有较大的负面影响。同时“适宜性一般”的部分区域受地下水相关因素影响也较大,导致评分较低,因此在工程规划、建设过程中应重点考虑上述因素。

5 结论

本次研究以皖北第四系古河道沉积区为例,基于三维GIS技术开展了工程建设适宜性评价研究,得出以下结论。

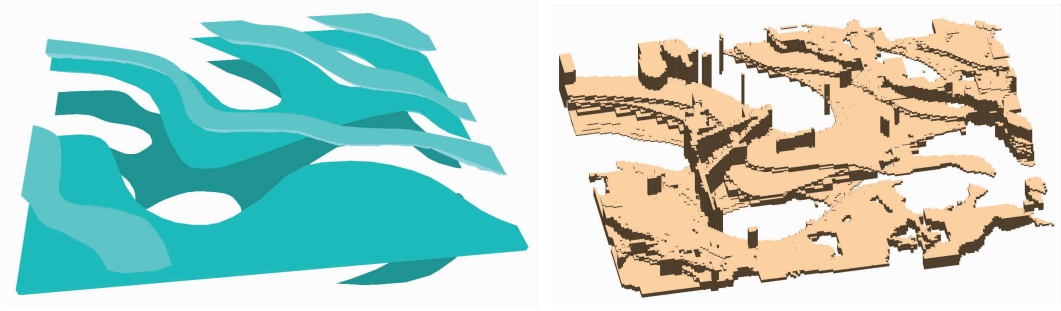


图6 茆塘期古河道与适宜性一般区域对比图

Fig. 6 Comparison map of Maotang paleochannel and the area with general suitability

(1) 研究区 50 m 以浅茆塘期古河道较发育,为评价其对工程建设影响,通过三维地质建模手段,利用多源数据联合专家经验共同约束建模,较为准确地刻画了区内主要地质结构、工程分层与古河道空间展布特征。通过空间相交分析、缓冲分析、插值计算等方法,解决了分析因子在三维空间属性赋值的体边界约束问题。

(2) 运用 Delphi 法与 AHP 层次分析法确定了研究区工程建设相关的 9 项评价因子及其权重,通过多因子综合指数评价法构建了评价模型。借助三维 GIS 空间分析技术,综合评价并分级圈定了 50 m 以浅建设适宜区,通过三维模型进行了直观展示。

(3) 评价结果显示,研究区岩土体工程性质总体较好,适合开展工程建设活动。西淝河、涡河沿岸和西北部分区域建设适宜性一般,主要受河流洪水与地下水影响。地下中、深部的古河道分布区域总体建设适宜性一般,对中、低层建筑工程建设影响不大,但不利于高层建筑开发。

参考文献(References):

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(S1):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(s1):233-240.

蒋旭,王婷婷,穆静. 地下空间开发利用适宜性与资源量的应用研究[J]. 地下空间与工程学报,2018,14(05):1145-1153.

JIANG Xu, WANG Tingting, MU Jing. Research on the Application of Suitability and Resources in Underground Space Development[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2018, 14(05): 1145-1153.

唐鑫,刘健,瞿婧晶,等. 江苏宜兴地下空间开发地质环境适宜性评价[J]. 地质学报,2019,43(04):672-678.

TANG Xin, LIU Jian, QU Jingjing, et al. Evaluation of the suitability of geological environment for the development of underground space[J]. Journal of Geology, 2019, 43(04): 672-678.

王振宇,朱太宜,王星华. 长沙城市地下空间开发利用的适宜性评价体系研究[J]. 铁道科学与工程学报,2019,16(05):1274-1281.

WANG Zhenyu, ZHU Taiyi, WANG Xinghua. Study on suitability evaluation system of Changsha's urban underground space for development and utilization[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2019, 16(05): 1274-1281.

李青元,张洛宜,曹代勇,等. 三维地质建模的用途、现状、问题、趋势与建议[J]. 地质与勘探,2016,52(04):759-767.

LI Qingyuan, ZHANG Luoyi, CAO Daiyong, et al. Usage, Status, Problems, Trends and Suggestions of 3D Geological Modeling[J]. Geology and Exploration, 2016, 52(04): 759-767.

屈红刚,潘懋,刘学清,等. 城市三维地质建模及其在城镇化建设中的应用[J]. 地质通报,2015,34(07):1350-1358.

QU Honggang, PAN Mao, LIU Xueqing, et al. Urban 3-D geological modeling and its application to urbanization [J]. Geological Bulletin of China, 2015, 34(7): 1350-1358.

章梦霞. 三维视角下的城市地下空间开发地质适宜性评价研究[D]. 北京:中国地质大学(北京),2019.

ZHANG Mengxia. Study on Geological Suitability Evaluation

- of Urban Underground Space Development from 3D Perspective[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2019.
- 李静,赵帅. 城市三维地质建模在砂土液化分析中的应用:以通州为例[J]. 中国矿业, 2016, 25(05): 164-168+174.
- LI Jing, ZHAO Shuai. Application of 3D geological modeling in the analysis of sandy soil liquefaction: a case study of Tongzhou[J]. China Mining Magazine, 2016, 25(05): 164-168+174.
- 郝爱兵,吴爱民,马震,等. 雄安新区地上地下工程建设适宜性一体化评价[J]. 地球学报, 2018, 39(05): 513-522.
- HAO Aibing, WU Aimin, MA Zhen, et al. A Study of Engineering Construction Suitability Integrated Evaluation of Surface-underground Space in Xiongan New Area[J]. Acta Geoscientica Sinica, 2018, 39(05): 513-522.
- 方寅琛,龚日祥,李三凤,等. 基于三维地质模型的地下空间开发适宜性评价——以嘉兴城市地质调查工作为例[J]. 上海国土资源, 2017, 38(02): 43-45.
- FANG Yinchun, GONG Rixiang, LI Sanfeng, et al. Suitability evaluation of underground space development based on a three-dimensional geological model, using the Jiaying urban geological survey as an example[J]. Shanghai Land & Resources, 2017, 38(02): 43-45.
- 张彩红. 基于GIS的银川市建设用地适宜性评价研究[D]. 北京:中国地质大学(北京), 2019.
- ZHANG Caihong. Study on Suitability Assessment of Build Landuse in Yinchuan City Based on GIS[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2019.
- 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(04): 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(04): 194-206.
- 郑长远,张启兴,贾君,等. 层次分析法在长江源区生态地质环境质量(脆弱性)评价中的应用[J]. 西北地质, 2010, 43(01): 137-145.
- ZHENG Changyuan, ZHANG Qixing, JIA Jun, et al. The Application of Analytic Hierarchy Process (AHP) in Source Region of the Yangtze River's Geological Environment Quality (Vulnerabilities) Evaluation [J]. Northwestern Geology, 2010, 43(01): 137-145.
- 陶春军,周天健,张笑蓉,等. 安徽岳西翠兰产地土壤环境质量及种植适宜性评价研究[J]. 西北地质, 2020, 53(01): 261-268.
- TAO Chunjun, ZHOU Tianjian, ZHANG Xiaorong, et al. Research on Soil Environmental Quality and Planting Suitability Evaluation of Cuilan Producing Area in Yuexi, Anhui Province [J]. Northwestern Geology, 2020, 53(01): 261-268.
- 梁吉业,冯晨娇,宋鹏. 大数据相关分析综述[J]. 计算机学报, 2016, 39(01): 1-18.
- LIANG Jiye, FENG Chenjiao, SONG Peng. A Survey on Correlation Analysis of Big Data [J]. Chinese Journal of Computers, 2016, 39(01): 1-18.
- Hu Man, Liu Qiuqiang, Liu Pengyu. Susceptibility Assessment of Landslides in Alpine-Canyon Region Using Multiple GIS-Based Models [J]. Wuhan University Journal of Natural Sciences, 2019, 24(3): 257-270.