

DOI:10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2019.04.05

安徽阜阳中心城区地面沉降灾害风险评价

王齐鑫¹, 王龙平², 王泽宇³

(1. 中国铁路设计集团有限公司, 天津 300251; 2. 安徽省地质环境监测总站, 安徽 合肥 230001; 3. 江苏省地质勘查技术院, 江苏 南京 210008)

摘要: 阜阳市作为地面沉降的典型城市, 近年来, 地面沉降已成为阻碍城市发展的重要地质环境问题。研究结合阜阳市现行地质条件, 从地面沉降现状、自然因素与人类活动三个方面建立适用于阜阳市的地面沉降危险性评价指标体系, 从地面高程、人口密度、单位面积 GDP、工程重要性分布 4 个方面建立易损性评价指标体系共同组建风险性评价指标体系, 引入层次分析法-综合指数法完成阜阳市地面沉降风险评价。依据评价结果提出针对性防控建议, 取得的研究成果可为阜阳市国土空间开发规划与社会经济发展提供地质依据。

关键词: 地面沉降; 危险性; 风险评价

中图分类号: P642.26

文献标识码: A

文章编号: 1003-8035(2019)04-0032-08

Risk assessment of land subsidence in central area of Fuyang City, Anhui Province

WANG Qixin¹, WANG Longping², WANG Zeyu³

(1. China Railway Design Corporation, Tianjin 300251, China; 2. Anhui Institute of Geo-Environment Monitoring, Hefei, Anhui 230001, China; 3. Jiangsu Institute of Geological Exploration Technology, Nanjing, Jiangsu 210008, China)

Abstract: Land subsidence is a typical geological environment problem that hinders urban development of Fuyang city. According to the geological conditions of Fuyang City, the present situation of ground subsidence, natural factors and human activities were mainly taken into consideration to establish the risk evaluation index system of ground subsidence. The vulnerability evaluation index system is established considering the ground elevation, population density, unit area GDP and engineering importance distribution, the risk evaluation index system was also established. Then the analytic hierarchy-composite index method was adopted to assess the risk of land subsidence. Finally specific suggestions on land subsidence prevention and control are put forward, and the research results can provide reference for land space development planning and social and economic development of Fuyang City.

Keywords: land subsidence; risk; risk assessment

0 前言

伴随着城市化水平的不断提高, 所带来的诸如超采地下水、工程建设、地面动静荷载不断加大等人类活

动日益频繁, 其直接加剧地面沉降的诱发, 使得地面沉降现已成为我国城市主要的地质灾害之一^[1]。阜阳市作为全国严重沉降地区之一, 近年来, 地面沉降对阜阳市水利工程、市政工程、以及铁路工程建设等方面都

收稿日期: 2018-11-13; 修订日期: 2019-01-16

第一作者: 王齐鑫(1993-), 男, 安徽安庆人, 水文地质专业, 硕士研究生, 助理工程师, 研究方向为水文地质、工程地质。E-mail: cug_wqx2016@126.com

通讯作者: 王龙平(1965-), 男, 安徽省怀宁县人, 水文地质与工程地质专业, 本科, 教授级高级工程师, 主要从事水文地质、环境地质工作。E-mail: wlpahdz@163.com

产生了不利影响^[2]。因此,开展阜阳市地面沉降风险性评价研究,对于指导阜阳市国土空间科学规划、提高应急防灾减灾水平以及协调人类活动与地质环境可持续发展都有着积极的现实意义。

地面沉降风险评价是指评价一定空间尺度内的地面沉降灾害对社会经济所造成危害的大小及其可能性^[3],包括地面沉降发生的可能性(即易发性或危险性)和造成的后果(即易损性)两个方面^[4]。近些年,国内外学者大多从地面沉降机理、成因分析、模拟计算等方面开展研究^[5-11],并且在风险性评价的研究方向上也主要集中在突发型地质灾害(滑坡和泥石流等)的风险性评价上,而对于地面沉降这类缓变型地质灾害的风险性评价文献较少^[12-14]。

1 研究区概况

本次研究区范围以阜阳市为中心,南北长约 29.4 km,东西长约 34 km,面积约 1 000 km²。地理坐标为:东经 115°37'58"~115°59'46",北纬 32°46'17.6"~33°02'32.5"。行政区划包括阜阳市颍州区、颍泉区、颍东区及阜南县、颍上县(图 1)。阜阳市地处黄淮海大平原南端、淮北平原西部,地形平坦,地面标高一般在 26~36 m。地势总趋势西北高、东南低,平均地面坡降约 1/8 000。阜阳市松散沉积层厚度 650~850 m,上部 135~150 m 为第四系,由松散的亚黏土、亚砂土、粉砂、中细砂相间互层,下部为上第三系,由半固结中粗砂与亚黏土互层^[15]。阜阳市地下水类型为单一的松散岩类孔隙水,按埋藏条件可称其为第一含水层组(浅层);第二含水层组(埋深 50~150 m)、第三含水层组(埋深 150~500 m)和第四含水层组(埋深 500~1 000 m)。根据地下水开采和水准测量等方面的资料推测,阜阳市始于在 20 世纪 70 年代初。至 1980 年,最大累计沉降量仅为 83.7 mm。之后,地面沉降快速发展,到 1999 年,沉降中心累计最大沉降量达到了 1 347.4 mm^[16]。近年来,阜阳市地面沉降增长日趋严重,市区已形成一近椭圆形浅漏斗形态沉降区域,漏斗面积约为 1 200 km²,研究区广泛受到不同程度沉降影响,截止 2017 年底,城市地面沉降中心累计最大沉降量已达 1 838.2 mm,最大沉降速率约为 35 mm/a。

2 评价思路

研究首先基于地面沉降风险评价理论,收集阜阳市地面沉降相关资料,来分析获取所需的地面沉降数据信息。之后,按照相关文献规范,结合研究区实际情

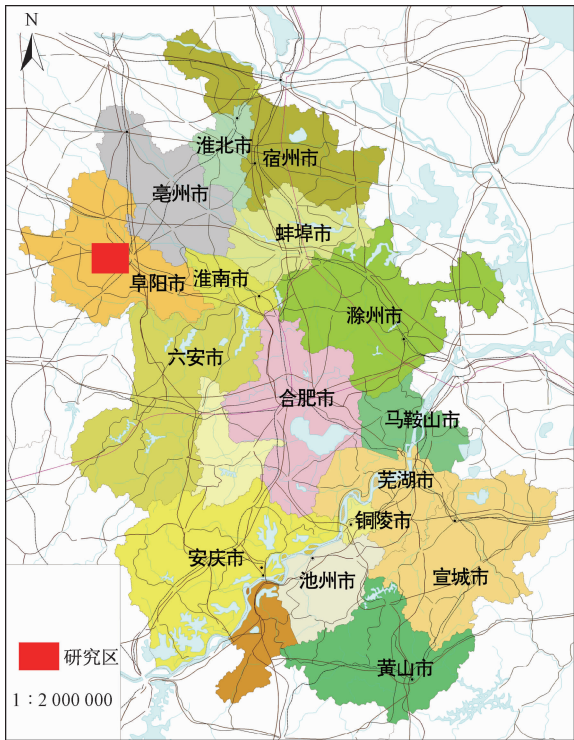


图 1 研究区位置图

Fig. 1 Location of the study area

况,建立地面沉降危险性与地面沉降易损性评价指标体系以及分级标准共同构建地面沉降风险评价指标体系,并引入层次分析-综合指数法对各评价单元进行评分。最终运用 MapGIS 平台,基于地面沉降风险评价模型叠加各单因子指标评价结果得到最终的地面沉降风险性评价成果图,并以此为依据提出相关的防控风险建议(图 2)。

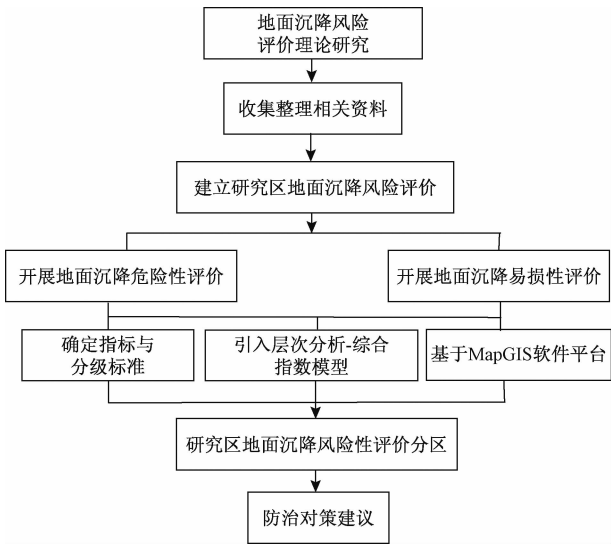


图 2 技术路线图

Fig. 2 Flow chart for land use planning

其中,评价方法具体步骤如下所示:

(1) 层次分析法

层次分析法是将评价指标体系划分为目标、准则、指标等层次,在此基础上进行定性和定量分析的新型多目标决策方法^[17]。其评价步骤如下:

①建立层次结构模型:将决策的目标、考虑的因素(决策准则)和决策对象按它们之间的相互关系分为最高层、中间层和最低层,绘出层次结构图。这其中最高层又称目标层,表示解决问题的目的,即层次分析要达到的总目标。

②确定各层次各因素之间的权重:Santy 等人提出一致矩阵法,即通过对各评价指标进行两两比较相对重要性程度,形成判断矩阵,用 $A = (a_{ij})_{n \times n}$, $a_{ij} > 0$ 表示,判断矩阵的中各元素 a_{ij} 用 1~9 标度方法表示(表 1),容易看出若 X_i 与 X_j 对 Z 的影响之比为 a_{ij} ,则 X_j 与 X_i 对 Z 的影响之比为:

$$a_{ji} = \frac{1}{a_{ij}} \quad (1)$$

表 1 判断矩阵标度及其含义

Table 1 Scale of judgment matrix on AHP

1	表示两个因素相比,具有同等重要性
3	表示两个因素相比,一个比另一个稍微重要
5	表示两个因素相比,一个比另一个明显重要
7	表示两个因素相比,一个比另一个强烈重要
9	表示两个因素相比,一个比另一个极端重要
2,4,6,8	上述两相邻判断之中间值
倒数	若 A_i 与 A_j 的重要性之比为 a_{ij} , 则 A_j 与 A_i 的重要性之比 $a_{ji} = 1/a_{ij}$

③层次单排序及其一致性检验:对应于判断矩阵最大特征根 $\lambda_{\max}$ 的特征向量,经归一化处理排序并进行一致性检验,首先定义一致性指标如下:

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

式中:CI——一致性指标;

$\lambda_{\max}$ ——最大特征根;

n ——矩阵阶数。

CI 为平均随机一致性指标,取值如表 2 所示,CI 为随机一致性比率。只有在 $CI < 0.10$ 时,判断矩阵可以说才具有较为满意的一致性,所获取的权值才是合理的。

表 2 层次分析法的平均随机一致性比率

Table 2 Average random consistency ratio of AHP

矩阵阶数	1	2	3	4	5	6	7	8	9
CI	0	0	0.58	0.89	1.12	1.26	1.36	1.41	1.46

④层次总排序及其一致性检验:计算某一层次所有因素对于最高层(总目标)相对重要性的权值,这一过程是从最高层次到最低层次依次进行,最后得到组合权。

(2) 综合指数法

综合指数法首先接着按权重将属于同一评价单元的各个评价因子的指标值进行加合,得出这个评价单元的评价值。再将各个评价单元的评价值按权重进行加合,最终得到每一个评价单元最终的评价指数,并通过综合分析,进而得到总体评价结果。综合指数法的模型如下式:

$$W_i = \sum_{j=1}^p a_i \cdot b_j \quad (3)$$

式中: W_i ——第 i 单元的综合得分;

p ——评价因子数;

j ——评价因子;

a_i ——第 j 单元评价因子在第 i 评价单元的赋值;

b_j ——第 j 个评价因子的权重。

3 数据来源

危险性指标数据是对现有的地面沉降水准、GPS 监测网点获取掌握地面沉降的速率变化和选取不同时间段的遥感图像进行 D-InSAR 解译分析出区域性累计地面沉降量大小,其他指标数据来源于《阜阳市地面沉降监测报告》。易损性指标数据是从 2017 年社会经济统计年鉴获取人口密度与 GDP 数据,高程数据通过对安徽省高程 DEM 分析获取,以及从现有土地利用现状图整合得出建设工程分布现状。

4 评价过程

4.1 构建评价指标体系及权重确定

依据相关文献^[18-19],风险性评级指标体系是由危险性评价指标体系与易损性评价指标体系组成(表 3)。结合阜阳市地质环境实际条件,分别从地面沉降现状、自然因素与人类活动三个方面构建阜阳市地面沉降危险性评价指标体系。

选取累计地面沉降量与地面沉降速率两个指标表征地面沉降现状。累计地面沉降量可表示经过历史发展,研究区地面沉降现状分布情况,地面沉降速率则可表示对未来研究区地面沉降的预测评估。这两个指标并不体现重要性程度的高低,且指标相互独立,故本次将其分别给予相同权重。

选取黏土厚度与砂土厚度表征自然因素。软弱土

层是地面沉降发生的主导因素,研究区黏土与砂土分布广泛且厚度较大,地下水位下降会产生附加应力并引起黏土与砂性土体颗粒重排列压密沉降。因此,随着粘土厚度与砂土厚度越大的区域,发生地面沉降的可能性就越大。

选取地下水开采漏斗与建筑物荷载表征人类活动。长期以来,超采地下水导致地下水位下降故形成降水漏斗。随着地下水水头压力的消散,土体传递的有效应力相应增大,颗粒之间孔隙度降低,加之水流渗透作用,土体颗粒重新排列变得更密实,同时降低颗粒本身强度,土体被压缩固结^[4]。此外,建筑物上部荷载传递于软类土层上加剧土体发生压密固结,诱发建筑物发生下沉。

易损性评价指标体系则由地面高程、人口密度、单

位面积 GDP 以及工程重要性分级组成,指标权重则通过层次分析法来确定。地势高程对地面沉降危险性评价的影响主要体现在安全高程的损失,阜阳现有地势高程由于历史地面沉降因素呈现中心洼地现象;地面沉降中承灾体易损性取决于承灾体的破坏风险和社会性参数,是预估城市潜在的最大损失,通常是从财产数量和生命数量两方面评价,故此次研究选取人口密度与单位面积 GDP 来表征;由于地面不均沉降导致建筑物产生裂缝和倾斜或倒塌,铁路、公路以及地下管线等线性工程变形甚至断裂,车站、港口等重要设施地下下沉等,尤其是关系到经济民生的重要建设工程,其一旦受损对于社会的负面影响程度大,所以其易损性程度也较大。根据阜阳市现状建设用地所占比重的实际情况,将工程重要性划分三个等级。

表 3 地面沉降风险评价指标体系

Table 3 Risk assessment index system of land subsidence

评价指标		权重	分级标准	分值
危险性	累计地面沉降量/mm	0. 16	0 ~ 300	1
			300 ~ 800	2
			> 800	3
	地面沉降速率/(mm·a ⁻¹)	0. 16	0 ~ 5	1
			5 ~ 10	2
			> 10	3
	黏土厚度/m	0. 151	< 20	1
			20 ~ 50	2
			> 50	3
	砂层厚度/m	0. 187	< 15	1
			15 ~ 35	2
			> 35	3
风险性	地下水埋深/m	0. 251	< 20	1
			20 ~ 50	2
			> 50	3
	建筑物荷载	0. 091	其他	1
			低层建筑物	2
			高层建筑物	3
易损性	人口密度/(人·km ⁻²)	0. 273	小(< 750)	1
			中(750 ~ 950)	2
			大(> 950)	3
	地面高程/m	0. 186	< 30	1
			30 ~ 32	2
			> 32	3
	单位面积 GDP/(亿元·km ⁻²)	0. 195	0. 1 ~ 0. 2	1
			0. 2 ~ 0. 3	2
			> 0. 3	3
	工程重要性分级	0. 346	重要性低(公园绿地等)	1
			重要性中(居住用地、商业用地等)	2
			重要性高(地下管线、车站、铁路、堤坝、机场等)	3

4.2 建立评价模型

根据 1992 年联合国人道主义事务部对自然灾害

风险的定义:风险是指在一定区域和一定时段内,由于特定的自然灾害而引起的人民生命财产和经济活动的

期望损失值,在数值上采用了“风险度(R)=危险度(H) $\times$ 易损度(V)”的表达式^[3]。本次研究将以此模型为基础,通过 MapGIS 平台实现对研究区地面沉降风险性进行评价。具体操作步骤为:

首先按照地面沉降风险性评价指标体系(表3)所示,运用 MapGIS 平台的属性功能对个评价单因子指标赋予属性分值,再通过空间分析功能叠加各单因子指标图得出各相交区的评价结果。之后对各相交区进行统计分析并设置参数,以赋予不同颜色来区分不同评价结果。最终,按照不同颜色表示等级分类信息,成图得到最终成果。

5 评价结果

(1) 地面沉降危险性评价

地面沉降危险性评价结果如图3所示,从图中可分析出,高危险性区域面积为392.7 km²,其位于宁老庄镇-程集镇-辛桥镇,占研究区总面积的39.27%,该区域位于研究区北部、中部和东部,北部为高地势区,中、东部为低地势区,微地貌类型为河漫滩、河间洼地、河间平地。中等危险性区域面积为486.6 km²,占研究区总面积的48.66%。低危险性区域面积120.7 km²,其主要位于三塔镇大部,占研究区总面积的12.07%,该区位于研究区西南部,主要为高地势区,微地貌类型为河间洼地、河间平地。

(2) 地面沉降易损性评价

地面沉降易损性评价结果如图4所示,从图中可分析出,高易损性区域面积为174.6 km²,其位于宁老庄镇-程集镇-辛桥镇,占研究区总面积的17.46%,该

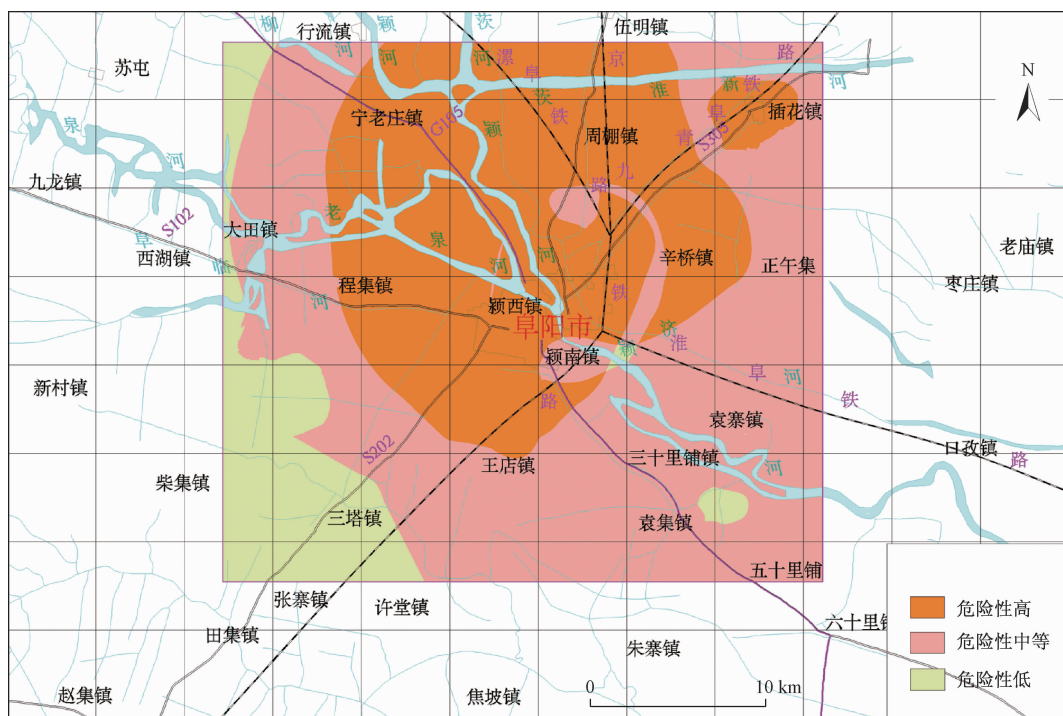


图3 地面沉降危险性分区图

Fig.3 Zoning diagram of land subsidence

区位于研究区中部,为低地势区,微地貌类型为河间洼地、河间平地。中等易损性区域面积为160.4 km²,其位于新桥镇-颍南镇,占研究区总面积的16.04%,该区位于研究区东部和南部,地势主要为中地势,微地貌类型为河间平地。低易损性区域面积为665 km²,其位于插花镇-袁寨镇-三塔镇,占研究区总面积的66.50%。该区位于研究区四周部,主要为高地势区,微地貌类型为河漫滩、河间洼地、河间平地。

(3) 地面沉降风险性评价

地面沉降风险性评价结果如图5所示,从图5中可分析出,高风险性区域面积为203.7 km²,占研究区总面积的20.37%,其中主要分布在阜阳市城区与颍西镇大部分地区,并以此区域为中心向四周扩展。中等风险性区域面积为681.5 km²,占研究区总面积的68.15%,其位于研究区东部和北部。主要分布在程集镇-宁老庄镇-周棚镇-辛桥镇-三十里铺镇-王店镇外围环状区域。此区域地貌类型为平原,微地貌类型为河漫滩、河间洼地、河间平地。低风险性区域面积为

114.7 km²,占研究区总面积的 11.47%,该区位于研究地、河间平地。
区西部、南部。主要为高地势区,微地貌类型为河间洼

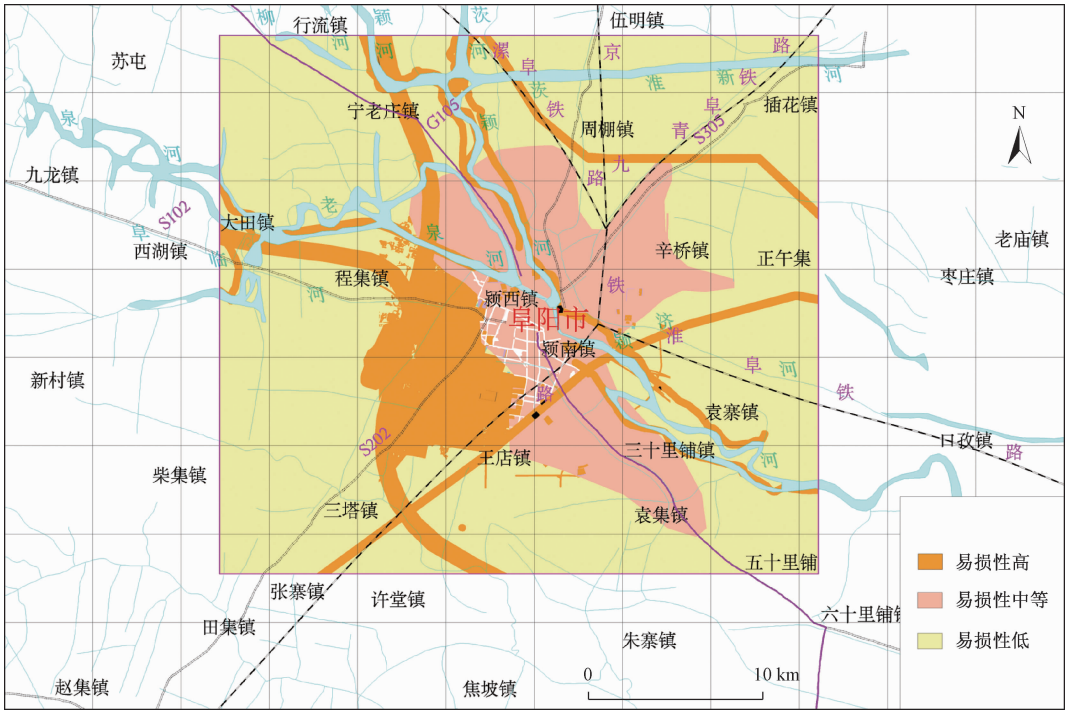


图 4 地面沉降易损性分区图
Fig. 4 Vulnerability zoning diagram of land subsidence

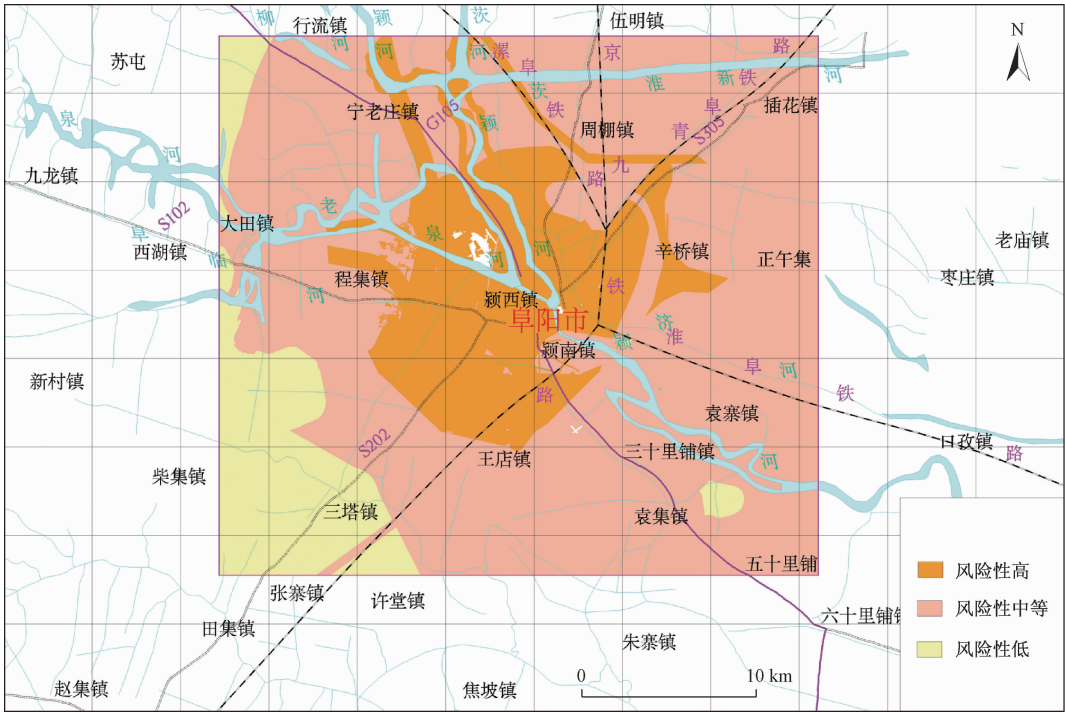


图 5 阜阳市地面沉降风险性分区图
Fig. 5 Risk zoning map of land subsidence in Fuyang City

6 防控建议

根据对研究区地面沉降影响因素以及风险性评价结果,地面沉降防治工作主要从以下几个方面开展:

(1) 减少深层地下水开采量

据统计,阜阳市的地表水、浅层地下水较丰富,且目前开发利用率较低,可适当增加对这两类水源的开发补充供水,一方面减少对深层地下水依赖,有利于缓解地面沉降,另一方面,深层地下水一旦受到污染,恢复难度极大,从而保护地下水环境。结合中深层与深层地下水大量开采的实际现状,应针对中心城区危险性等级较高的区域尽快实施全面查封中深层地下水开采井,制定切实可行的方案,建立应用地表水取供水工程,限期限批次大量减少深层地下水开采,以缓解阜阳市城区地面沉降趋势。

(2) 建立地面沉降的预警体系

阜阳中心市区以及周边宁老庄镇、程集镇、袁寨镇、周棚镇易损性等级较高,由于西气东输管线、在建商合杭高速铁路、郑合高速铁路沿线及飞机场周边等大量重要基础工程通过上述区域,应即作为重点地面沉降布点和监测对象,建立实施专门性工程地面沉降灾害防治方案,完善地面沉降监测网络,建立地面沉降的预警体系。

(3) 科学规划

对于未来阜阳市城镇规划中,应避免在地下水降水漏斗中心附近选址应急水源地,应选择在水文地质条件较好的外围区域,对于黏土与砂层较厚的区域上工程建设应加强对于软土地基的处理措施以及地面沉降的监测。

7 研究结论

(1) 阜阳市高风险性区域面积为 203.7 km^2 , 占研究区总面积的 20.37% , 其中主要分布在阜阳市城区与颍西镇大部分地区, 并以此区域为中心向四周扩展。中等风险性区域面积为 681.5 km^2 , 占研究区总面积的 68.15% , 其位于研究区东部和北部。低风险性区域面积为 114.7 km^2 , 占研究区总面积的 11.47% , 该区位于研究区西部、南部。

(2) 结合阜阳市地质条件, 从诱发地面沉降机理条件出发, 从地面沉降现状、自然因素与人类活动 3 个方面建立了适用于阜阳市地面沉降的危险性评价指标体系, 考虑社会经济条件, 从地面高程、单位面积 GDP、人口密度与工程重要性 4 个方面建立易损性评

价指标体系, 共同组成风险性评价指标体系。并引入层次分析-综合指数法评价模型完成开展地面沉降风险性评价研究。

(3) 基于研究区现有地质条件与风险评价研究结果分析, 提出具有针对性的地面沉降防治措施, 为以后阜阳市国土空间开发与城镇规划提供地学依据。

8 不足与展望

本次研究还存在一定的局限性。主要包括: 研究在开展风险性评价过程中, 鉴于研究区范围较大, 各工程抗风险等级的基础数据可信度与可获得性, 以及对区域性整体沉降与差异性沉降的不同表现及其后果研究不够深入, 研究仅仅从宏观上对研究区不同区域地面沉降风险性划定等级, 对于易损性评价中工程重要性指标划分仅仅从承灾体受破坏后造成不利影响程度考虑, 层次分析-综合指数法受主观因素影响较大, 只能通过经验判断评价模型对现行情况的合理性。对于下一步研究工作, 应进一步提高收集资料数据的精度, 细化现有评价指标体系, 对于重大工程自身具有的设防标准与能力与地面沉降相互关系展开针对性分析, 验证不同评价方法对于现行条件的适用性。

参考文献:

- [1] 刘苏平, 施斌, 张诚成, 等. 连云港徐圩地面沉降 BOTDR 监测与评价[J]. 水文地质工程地质, 2018, 45(5): 158 - 164.
LIU Suping, SHI Bin, ZHANG Chengcheng, et al. Monitoring and evaluation of land subsidence based on BOTDR in Xuwei near Lianyungang [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2018, 45(5): 158 - 164.
- [2] 葛凌, 刘毅. 浅谈阜阳市工程建设的地面沉降问题及防治措施[J]. 工程与建设, 2012, 26(2): 238 - 239.
GE Ling, LIU Yi. Analysis of ground subsidence problems and prevention measures for engineering construction in Fuyang City [J]. Engineering and Construction, 2012, 26(2): 238 - 239.
- [3] 王寒梅. 上海地面沉降风险评价及防治管理区建设研究[J]. 上海地质, 2010, 31(14): 7 - 17.
WANG Hanmei. Study on risk evaluation and control schemes of land subsidence in Shanghai City [J]. Shanghai Geology, 2010, 31(14): 7 - 17.
- [4] 段梅. 广东珠海-坦洲地区地面沉降风险评价[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2017, 28(2): 69 - 77.

- DUAN Mei. Risk evaluation of ground subsidence in typical land subsidence zones of Zhuhai-Tanzhou area [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2017, 28 (2): 69–77.
- [5] 孟磊, 冯启言, 张海荣, 等. 徐州大屯中心区地面沉降机理分析与危险性评价[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2008, 19(3): 60–63.
- MENG Lei, FENG Qiyan, ZHANG Hairong, et al. Mechanism analysis and hazard assessment on land subsidence in Datun central district of Xuzhou City [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2008, 19(3): 60–63.
- [6] TOSI L, TEATINI P, CARBOGNIN L, et al. Using high resolution data to reveal depth-dependent mechanisms that drive land subsidence: The Venice coast, Italy [J]. Tectonophysics, 2009, 474 (1/2): 271–284.
- [7] 赵文涛, 李亮. 苏锡常地区地面沉降机理及防治措施[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2009, 20(1): 88–93.
- ZHAO Wentao, LI Liang. The mechanism of land subsidence and its prevention measures in Suzhou-Wuxi-Changzhou area [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2009, 20(1): 88–93.
- [8] GALLOAY DEVIN L, BURBEY THOMAS J. Review: Regional land subsidence accompanying groundwater extraction [J]. Hydrogeology Journal, 2011, 19(8): 1459–1486.
- [9] CHAI J C, SHEN S L, ZHU H H, et al. Land subsidence due to groundwater drawdown in Shanghai [J]. Geotechnique, 2004, 54(2): 143–147.
- [10] TEATINI P, FERROMATO M, GAMBOLATI G, et al. Groundwater pumping and land subsidence in the Emilia-Romagna coast-land, Italy: Modeling the past occurrence and the future trend [J]. Water Resources Research, 2006, 42(1): 1–19.
- [11] CALDERHEAD A I, THERRIEN R, RIVERA A, et al. Simulating pumping induced regional land subsidence with the use of InSAR and field data in the Toluca Valley, Mexico [J]. Advances in Water Resources, 2011, 34(1): 83–97.
- [12] 张雪. 基于三维地质建模的北京市平原区地面沉降风险性评价[J]. 南水北调与水利科技, 2017, 15(1): 126–130.
- ZHANG Xue. Study on the risk assessment of land subsidence in Beijing plain based on 3D modeling [J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2017, 15(1): 126–130.
- [13] BRABB E E. Innovation approaches to landslide hazard and risk mapping [A]. Proc. of 4th ISL [C]. Toronto 1984: 307–323.
- [14] 胡蓓蓓, 姜衍祥, 周俊, 等. 天津市滨海地区地面沉降灾害风险评估与区划[J]. 地理科学, 2008, 28(5): 693–697.
- HU Beibei, JIANG Yanxiang, ZHOU Jun, et al. Assessment and zonation of land subsidence disaster risk of Tianjin Binhai area [J]. Scientia Geographica Sinica, 2008, 28(5): 693–697.
- [15] 李益湘, 官煜, 孙利平. 阜阳市地面沉降趋势预测[J]. 水文地质工程地质, 1993, 20(1): 50–56.
- LI Yixiang, GUAN Yu, SUN Liping. Prediction of land subsidence trend in Fuyang City [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 1993, 20(1): 50–56.
- [16] 郭荣, 陈伟, 李琴. 阜阳市地面沉降研究和防治的若干问题[J]. 安徽地质, 2010, 20(4): 300–302.
- GUO Rong, CHEN Wei, LI Qin. Several issues with study, prevention and treatment of ground subsidence in Fuyang City [J]. Geology of Anhui, 2010, 20(4): 300–302.
- [17] 赵德君, 彭凤, 杨建, 等. 基于层次分析法的武汉市岩溶塌陷危险性分区评价[J]. 资源环境与工程, 2012, 26(增刊1): 101–103.
- ZHAO Dejun, PENG Feng, YANG Jian, et al. Risk assessment of karst collapse in Wuhan based on Analytic Hierarchy Process [J]. Resources Environment & Engineering, 2012, 26(S1): 101–103.
- [18] 王国良. 地面沉降危险性分级标准初探[J]. 上海地质, 2006(4): 39–41.
- WANG Guoliang. Preliminary studies on dangerous grading standard of land-subsidence [J]. Shanghai Geology, 2006(4): 39–41.
- [19] 张梁, 张业成. 关于地质灾害涵义及其分类分级的探讨[J]. 中国地质灾害与防治学报, 1994, 5(5): 398–401.
- ZHANG Liang, ZHANG Yecheng. Discussion on the meaning and classification of geological disasters [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 1994, 5(5): 398–401.