

DOI: 10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2019.03.16

应用地理探测器改进地面沉降危险性评估模型的研究

石鹏远^{1,2,3}, 余洁^{1,2,3}, 朱琳^{1,2,3}, 王彦兵^{1,2,3}

(1. 首都师范大学城市环境过程与数字模拟国家重点实验室培育基地, 北京 100048;
2. 首都师范大学资源环境与旅游学院, 北京 100048; 3. 首都师范大学三维
信息获取与应用教育部重点实验室, 北京 100048)

摘要: 地面沉降危险性评估对受地面沉降灾害影响的有着重要的参考意义。目前应用较广泛的因子叠加模型和模糊层次分析模型存在着评估指标权重的确定人工干预较强, 影响评估结果的问题。本文采用地理探测器分别对因子叠加模型和模糊层次分析模型进行改进, 根据各评估因子的分布与沉降分布的关联性定量地计算各项评估指标的权重。本文利用改进后的三个模型: 地理探测器——最大值因子叠加模型、地理探测器——加权因子叠加模型以及地理探测器——模糊层次分析模型分别进行地面沉降危险性评估, 并与最大值因子叠加模型、加权因子叠加模型、模糊层次分析模型进行对比, 结果表明: 改进后的模型总体评估准确度分别为 75.23%、89.56%、76.38%, 均高于未改进模型的 60.51%、53.73%、65.05%。

关键词: 地面沉降; 危险性评估; 地理探测器; 加权综合评价法; 模糊层次法

中图分类号: P642.26

文献标识码: A

文章编号: 1003-8035(2019)03-0101-12

Hazard assessment model of land subsidence based on geographical detector

SHI Pengyuan^{1,2,3}, YU Jie^{1,2,3}, ZHU Lin^{1,2,3}, WANG Yanbing^{1,2,3}

(1. State Key Laboratory Incubation Base of Urban Environmental Processes and Digital Simulation, Capital Normal University, Beijing 100048, China; 2. College of Resource Environment and Tourism, Capital Normal University, Beijing 100048, China; 3. Key Laboratory of 3-Dimensional Information Acquisition and Application, Ministry of Education, Capital Normal University, Beijing 100048, China)

Abstract: Risk assessment of land subsidence is a significant indicator of the potential risk for urban safety caused by land subsidence. The widely used factor overlapping model and fuzzy analytic hierarchy process model have a problem that is the determination of index weights of the models is affected significantly by human experience, which resulting in relatively subjective assessment result. We propose a method by combining factor overlapping model and fuzzy analytic hierarchy process model with geographical detector separately. Index weights are determined by the relationship of geographical distribution between factors and land subsidence. Three models combined with geographical detector (Geographical Detector-Maximum Value Factor Overlapping, Geographical Detector-Weighted Factor Overlapping, Geographical Detector-Fuzzy

收稿日期: 2018-11-06; 修订日期: 2019-01-04

基金项目: 地表载荷作用下 MTINSAR 城市地面沉降监测及时空多尺度演化规律挖掘 (41671417); 科技创新服务能力建设-基本科研业务费(科研类) (025185305000/191)

第一作者: 石鹏远(1992-), 男, 地图学与地理信息系统专业, 硕士, 主要从事地面沉降危险性评估相关研究。E-mail: rosielspy@foxmail.com

通讯作者: 余洁(1964-), 女, 摄影测量与遥感专业, 教授, 博士生导师, 主要研究领域为遥感影像处理与应用以及空间数据分析。E-mail: yuj2015@cnu.edu.cn

Analytic Hierarchy Process) were applied to assess the hazard separately and validated by comparing the three models with three original models. The result shows that the overall assessment accuracy of improved models are 75.23%, 89.56% and 76.38%, the overall assessment accuracy of original models are 60.51%, 53.73% and 65.05%. Models combined with geographical detector have a higher overall assessment accuracy.

Keywords: land subsidence; hazard assessment; geographical detector; weighting comprehensive evaluation method; fuzzy analytic hierarchy process

0 引言

地面沉降作为一种在自然因素和人为因素下形成的地表垂直下降现象^[1],能够对城市基础设施和建筑物(如农田、住宅、道路和输电线路等)造成破坏,使政府的财政和社会成本增加^[2-3]。进行地面沉降危险性评估可以为城市规划、防灾减灾以及地质环境的恢复治理提供基础资料和科学依据,以避免或减轻地面沉降造成的损失^[4]。

对地面沉降危险性进行评估的模型有多种。一些学者^[5-8]采用土水模型法,从水位模型和土体力学模型着手,对地面沉降危险性进行评估,土水模型法的优点是能够基于精确的水文、土壤数据和地面沉降成因机理模拟预测地面沉降,但该方法需要大量的实地勘测数据以使土水模型的模拟条件与实际的水文、土壤状态吻合。另一些学者采用加权综合评价法^[9-12],综合考虑各因子对地面沉降的影响程度,把各指标的优劣综合起来,用一个无量纲的评估分值加以集中,以表示地面沉降危险性,其中部分学者^[13-16]采用因子叠加模型将与地面沉降相关的因子进行指标打分并进行多个栅格数据层的数学运算,按照人工赋予的叠加函数计算得到评估结果;另一部分学者^[17-21]采用模糊层次分析模型,建立模糊评价矩阵为各项评估指标赋予不同的权重,计算各指标的评分加权总和并进行评估。加权综合评价法的优点在于灵活性和综合性强,能够根据评价目标有目的地调整参与评估的因子组,适合于对技术、决策或方案进行综合分析评价和优选,是一种较为常用的方法^[22-24]。然而在因子选取和指标权重确定的过程中,人为因素的判断会影响评估结果。在一些研究中,指标的权重由特尔斐法或学者直接确定^[25-27];而采用模糊层次分析模型计算权重时,因子之间的重要性比较也常依靠特尔斐法或学者的专业判断^[28-29]。这使因子的指标项权重的确定受到较强的人工干预,具有不确定性,进而影响评估模型的准确性。

为了减少指标权重确定过程中人工干预导致的

不确定性,本文将地理探测器方法应用于加权综合评价法构建的地面沉降危险性评估模型中,以因子叠加模型和模糊层次分析模型为例进行改进。改进后的模型将根据各评估因子在地理位置上的分布与地面沉降分布的关联程度,从统计学的角度出发,定量地确定各项评估指标的权重,以期提高评估模型的准确性。

1 地面沉降危险性评估模型及因子指标

1.1 评估模型

本文共选取三种较常被使用的、便于操作的评估模型,考虑到因子叠加模型有多种运算函数,选择了较为常见的最大值因子叠加模型和加权因子叠加模型。第三种模型是模糊层次分析模型。对三种模型分别应用地理探测器进行评估指标权重确定环节的改进。

(1) 最大值因子叠加模型

最大值因子叠加模型(Maximum Value Factor Overlapping, MVFO)在进行地面沉降危险性评估时,仅使用沉降特征因子指标(如沉降速率、累计沉降量)。对沉降特征因子进行危险性指标打分,并按栅格进行叠加运算,栅格中危险性分值最高的因子指标分值视为最终的沉降危险性估值。这一模型的优势在于参与评估因子的数量少,因子数据易于收集,评估过程简单快捷,基于沉降特征的评估较为符合地区近期的沉降状态,对高危险性估值的地区漏检率低;不足之处在于该模型不考虑推动沉降发展的诱发因子,缺少对沉降未来的发展趋势的估计,且对于沉降危险性较低的地区容易产生误判。危险性评估值计算公式为:

$$H_{\text{危险性}} = \max\{N_1, N_2, \dots, N_n\} \quad (1)$$

式中: $H_{\text{危险性}}$ ——沉降危险性最终估值;

N_n ——第 n 项因子的指标评分;

n ——因子总数。

(2) 加权因子叠加模型

加权因子叠加模型(Weighted Factor Overlapping, WFO)在评估中既考虑沉降特征因子对沉降状态的表达刻画,又考虑沉降诱发因子对沉降发展趋势的预示

作用。由于不同的地区沉降诱发因子不同,且诱发因子打分的指标也不同,因此该模型不取指标评分最大值为沉降危险性的最终估值,而是将每一个指标都视为具有单独的权重,在简化计算的前提下,各指标被认为权重相等。各因子进行指标打分并单独成图,按照栅格进行叠加运算,栅格的危险性最终估值为所有指标的平均分值。该评估模型的优势在于即包含能反映沉降状态的沉降特征因子又包含能揭示沉降未来趋势的沉降诱发因子,且操作简单便捷;不足之处在于模型忽视了不同因子与沉降关联的差异性,在评估中将各因子视为同等重要,对评估精度产生影响。危险性评估值计算公式为:

$$H_{\text{危险性}} = \frac{\sum_{i=1}^n N_i}{n} \quad (2)$$

式中: $H_{\text{危险性}}$ ——沉降危险性最终估值;

N_i ——第 i 项因子的指标评分;

n ——因子总数。

(3) 模糊层次分析模型

模糊层次分析模型(Fuzzy Analytic Hierarchy Process, FAHP)是根据模糊数学方法与层次分析法建立的评估模型。考虑到不同因子与地面沉降的关联性具有差异,该模型通过不同因子之间的两两比较构建各因子对评估对象的隶属度函数,量化确定评估中各因子的指标分值所占权重。FAHP模型既解决了判断矩阵的一致性问题,也解决了解的收敛速度和精度问题,最终求得与实际相符的指标权重排序向量^[18]。该模型的优势在于半定量地体现了不同因子作用的差异性,使评估结果更加合理有效;不足之处在于,在确定指标权重的过程中,对各因子进行的人工比较存在着不确定性,对评估精度产生影响。

该方法的模型建立过程如下^[30]:

a. 通过对因子的两两比较,建立优先关系矩阵 F 。矩阵标度取值范围为 0.1 ~ 0.9。

$$f_{ij} = \begin{cases} 0.1 \sim 0.4 & s(i) < s(j) \\ 0.5 & s(i) = s(j) \\ 0.6 \sim 0.9 & s(i) > s(j) \end{cases} \quad (3)$$

式中: f_{ij} ——矩阵 F 中因子 i 与因子 j 重要性判断标度;

$s(i)$ ——因子 i 的重要程度;

$s(j)$ ——因子 j 的重要程度。

f_{ij} 值越高,说明因子 i 在与因子 j 的对比中显得更为重要。 f_{ij} 为 0.5 时,两个比较的因子同等重要。矩阵

F 是一个模糊互补矩阵,即 $f_{ij} = 1 - f_{ji}$ 。

b. 计算模糊一致性判断矩阵 R 。

按行对优先关系矩阵 F 求和,得到向量 $C = \sum_{j=1}^n f_{ij}$,并进行如下数学变换, $r_{ij} = \frac{(C_i - C_j)}{2(n-1)} + 0.5$, 得到模糊一致性判断矩阵 R 。其中, n 为因子总数, C_i 和 C_j 分别为向量 C 中相应行数的值。

c. 通过和行归一法计算排序向量 W^0 。

$$W^0 = (w_1, w_2, \dots, w_n)^T = \left(\frac{\sum_{j=1}^n r_{1j}}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n r_{ij}}, \frac{\sum_{j=1}^n r_{2j}}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n r_{ij}}, \dots, \frac{\sum_{j=1}^n r_{nj}}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n r_{ij}} \right) \quad (4)$$

式中: W^0 ——计算得到的排序向量;

w_n ——向量 W^0 在第 n 行的值;

n ——因子总数;

r_{ij} ——矩阵 R 在 i 行 j 列的值。

d. 根据转化公式: $e_{ij} = \frac{r_{ij}}{r_{ji}}$, 由互补型判断矩阵 R

生成互反型判断矩阵 E 。

e. 以排序向量 W^0 作为迭代初值 V^0 , 进一步求解精度较高的排序向量 V^k 。

输入迭代初值 V^0 , 利用迭代公式 $V^{k+1} = E V^k$, 计算特征向量 V^{k+1} , 并求 V^{k+1} 的无穷范数 $\|V^{k+1}\|_{\infty}$ 。若 $|\|V^{k+1}\|_{\infty} - \|V^k\|_{\infty}| \geq \varepsilon$, 则以 $V^k = \frac{V^{k+1}}{\|V^{k+1}\|_{\infty}}$ 作为新初值, 再次迭代。否则, 即得到最大特征值 $\lambda_{\max}$, 将 V^{k+1} 归一化处理:

$$V^{k+1} = \left(\frac{V_{k+1,1}}{\sum_{i=1}^n V_{k+1,i}}, \frac{V_{k+1,2}}{\sum_{i=1}^n V_{k+1,i}}, \dots, \frac{V_{k+1,n}}{\sum_{i=1}^n V_{k+1,i}} \right) \quad (5)$$

式中: $V_{k+1,n}$ ——特征向量 V^{k+1} 的第 n 行值。所得向量

$W^k = V^{k+1}$, 即为排序向量, 迭代结束。

f. 结合加权综合评价法模型计算最终的评估结果:

$$H = \sum_{i=1}^n W_i N_i \quad (6)$$

式中: H ——最终评估指数;

W_i ——计算出的第 i 项指标权重;

N_i ——第 i 项因子的指标评分;

n ——因子总数。

1.2 地理探测器对模型的改进

1.2.1 地理探测器

地理探测器(Geographical Detector, GD)是由王劲

峰等^[31]所开发的一种新的统计学方法,该方法能够探测某一地理属性的空间分异性,并揭示其背后的驱动因子,例如探测某一地理属性 Y 和其解释因子 X 之间的关系。其核心思想基于的假设是:若某个因变量受到某一自变量的重要影响,那么因变量和自变量的空间分布应该具有相似性^[32]。该方法的优势在于没有过多的假设条件与约束,能有效地克服传统统计分析方法处理类别变量时的局限性^[33]。

地理探测器由四个探测器组成:因子探测器、交互作用探测器、风险区探测器、生态探测器,分别用于探测因子 X 对地理属性 Y 分布的影响程度、两个不同的因子 X_1 和 X_2 共同作用下对 Y 分布的影响、因子 X 的两个子区域属性值均值差异是否显著、 X_1 和 X_2 对 Y 的空间分布影响的差异是否显著。

本文使用因子探测器参与评估模型中因子指标的权重确定。因子探测器计算结果在本文中称为“因子驱动力”,其得到的计算结果用 q 值度量, q 值越高,说明自变量 X 对因变量 Y 的影响越强;反之,则说明自变量 X 对因变量 Y 的影响较弱。 q 值的计算公式为:

$$q = 1 - \frac{\sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2}{N \sigma^2} = 1 - \frac{SSW}{SST} \quad (7)$$

式中: $h = 1, 2, \dots, L$ ——因变量 Y 或自变量 X 内部的分类或分区;

N_h 和 N ——分别为层 h 和全区的单元数;

σ_h^2 和 σ^2 ——分别是层 h 和全区的 Y 值方差;

SSW 和 SST ——分别为层内方差和与全区总方差;

q ——值域为 $[0, 1]$ 。

1.2.2 模型的改进

(1) 地理探测器——最大值因子叠加模型

地理探测器——最大值因子叠加模型(Geographical Detector-Maximum Value Factor Overlapping, GD-MVFO)对 MVFO 模型沉降特征因子的指标分值比较过程进行了修改。根据地理探测器探测得到的各因子 q 值计算得到因子的指标权重。在选取危险性最高的指标时,各因子的比较分值等于因子的指标分值与指标权重的乘积。比较分值最高的因子,其指标分值将作为沉降危险性最终估值。

与 MVFO 模型相比,改进后的 GD-MVFO 模型在评估中不仅考虑沉降特征因子的指标分值大小,还考虑不同因子的影响差异,而不是将各因子视为同等重要。GD-MVFO 模型危险性评估值计算公式为:

$$w_i = \frac{q_i}{q_1 + q_2 + \dots + q_n} \quad (8)$$

$$C_m = \max\{N_1 w_1, N_2 w_2, \dots, N_n w_n\} \quad (9)$$

$$H_{\text{危险性}} = N_m = \frac{C_m}{w_m} \quad (10)$$

式中: w_i ——第 i 项因子的指标权重;

q_i ——第 i 项因子的因子驱动力;

n ——因子总数;

N_n ——第 n 项因子的指标分值;

C_m ——因子 m 的比较分值;

w_m ——因子 m 的指标权重;

$H_{\text{危险性}}$ ——沉降危险性最终估值。

(2) 地理探测器——加权因子叠加模型

地理探测器——加权因子叠加模型(Geographical Detector-Weighted Factor Overlapping, GD-WFO)使用探测到的 q 值计算得到各因子的指标权重。与 WFO 模型相比,改进后的 GD-WFO 模型不仅综合了各因子的指标打分值,还考虑了不同因子的影响能力差异,不再将各因子视为同等重要。沉降危险性最终估值等于各因子对应的指标分值与指标权重的乘积之和。GD-WFO 模型的公式如下:

$$w_i = \frac{q_i}{q_1 + q_2 + \dots + q_n} \quad (11)$$

$$H_{\text{危险性}} = \sum_{j=1}^n N_j w_j \quad (12)$$

式中: w_i ——第 i 项因子的指标权重;

q_i ——第 i 项因子的因子驱动力;

n ——因子总数;

N_j ——因子 j 的指标分值;

w_j ——因子 j 的指标权重;

$H_{\text{危险性}}$ ——沉降危险性最终估值。

(3) 地理探测器——模糊层次分析模型

地理探测器——模糊层次分析模型(Geographical Detector-Fuzzy Analytic Hierarchy Process, GD-FAHP)在原有的 FAHP 模型的基础上,对生成因子优先关系矩阵的环节进行改进。根据对因子驱动力的探测结果而不是对因子的人工对比估值计算产生优先关系矩阵 F 。

GD-FAHP 模型的建立过程如下:

a. 首先根据探测出的 q 值计算生成因子驱动力比较矩阵 Q ,公式如下:

$$Q_{ij} = \frac{1}{2} \times \frac{q_i}{q_j} \quad (13)$$

式中: Q_{ij} ——因子 i 与因子 j 的因子驱动力比较值;
 q ——因子驱动力。
b. 根据因子力比较矩阵 Q 计算生成优先关系矩阵 F :

$$F_{ij} = \frac{Q_{ij}}{Q_{ij} + Q_{ji}} \quad (14)$$

式中: F_{ij} ——因子 i 与因子 j 重要性判断标度;
 Q_{ij} ——因子 i 与因子 j 的因子驱动力比较值;
 Q_{ji} ——因子 j 与因子 i 的因子驱动力比较值。
c. 将矩阵 F 带入模糊层次模型中,求得权重向量 W^k 。

1.3 因子指标

1.3.1 评估因子选取

根据北京市地面沉降发生机理^[34-35] 综合考虑地面沉降灾害对社会经济可持续发展带来的严重影响,依照少而精、实用易操作、数据易获取等原则,参照地质灾害评估的行业规范、沉降因素研究文献和以往的地面沉降危险性评估文献,本文在进行地面沉降危险性评估时将地面沉降特征因子、地面沉降诱发因子作为评估因子。

(1) 沉降特征因子

参照中华人民共和国国土资源部发布的《地质灾害危险性评估规范》^[36] 对地面沉降调查的内容规定及地面沉降发育程度分级表,本文选择地面沉降速率和地面累计沉降量两个因子作为沉降特征因子参与地面沉降危险性评估。

本文的地面沉降速率,采用基于永久散射体合成孔径雷达干涉测量技术和 TerraSAR-X 的微波遥感影像计算得到研究区 2010 年年均地面沉降速率。地面累计沉降量的选取,则根据其它文献中^[37] 已发布的北京市历史累计沉降量数据,采用 1955~2010 年的沉降值。沉降速率及累计沉降量分布见图 1(a) 和(b)。

(2) 沉降诱发因子

有学者^[38] 的研究显示,北京市地下水开采对地面

沉降影响最大,沉降中心与地下水位降落漏斗区高度吻合,是地面沉降的主要贡献因素。

北京地区的地面沉降分层沉降量被认为与对应层位上的黏性土占比呈正比例关系,其空间分布特征及变化趋势与平原区的地层结构及可压缩黏性土层厚度具有很好的一致性,整体由北西向的单一结构区向南东方向的多层结构区扩张。沉降速率大于 50 mm/a 的沉降区大多分布在黏性土层厚度大于 100 m 的地区,几大沉降中心与黏性土层厚度较大地区吻合较好。

还有学者^[39] 认为降水会通过地下水补给和土壤含水量的变化间接影响到地面沉降发育状态。

根据以上原因,本文选取地下水水位变化速率、地下水水位标高、可压缩层厚度和年均降水量四个因子作为沉降诱发因子参与评估,见图 1(c)~(f)。

1.3.2 指标评分准则

目前在地面沉降危险性评估工作中,不同地区对各因子的指标评分标准存在差异。本文参照国家发布的地质灾害危险性评估规范文件^[36]、危险性评估指导专著^[1] 及北京地区地面沉降危险性评估文献^[4,15,18,21] 结合研究区各因子的分布情况,制定指标评分准则(表 1)。根据准则对各评估因子赋予危险性指标分值,并参与后续计算。

2 实验及验证

2.1 实验区概况

实验区位于北京市平原地区,地处东经 116 度 20 分至 116 度 40 分,北纬 39 度 45 分至 40 度 5 分之间(图 2)。实验区面积约为 385.51 km²,覆盖北京市东城区大部、朝阳区南部,并与西城区、丰台区、大兴区和通州区有少许交叠。实验区西侧的西城区和东城区地面沉降发育程度较低,西单到东单地区被认为是北京市最早发现沉降的地区^[37] (20 世纪 30 年代中期)。东侧涵盖了朝阳来广营—金盏和东八里庄—通州城区—黑庄户两个沉降带的一部分,其中东郊八里庄大

表 1 指标评分表
Table 1 Index score table

评估因子	危险性评语	轻度	较轻	中度	较重	重度
	危险性分值	0~2	2~4	4~6	6~8	8~10
特征因子	沉降速率/(mm/year)	0~10	10~20	20~30	30~40	40~50
	累计沉降/mm	0~100	100~300	300~500	500~800	800~1 000
	地下水水位变化速率/(m/year)	0~-0.5	-0.5~-1.0	-1.0~-1.5	-1.5~-2.0	-2.0~-2.5
诱发因子	地下水水位标高/m	-15~-17	-17~-19	-19~-21	-21~-23	-23~-25
	可压缩层厚度/m	100~110	110~120	120~130	130~140	140~150
	年均降水量/mm	731~673	673~614	614~555	555~497	497~438

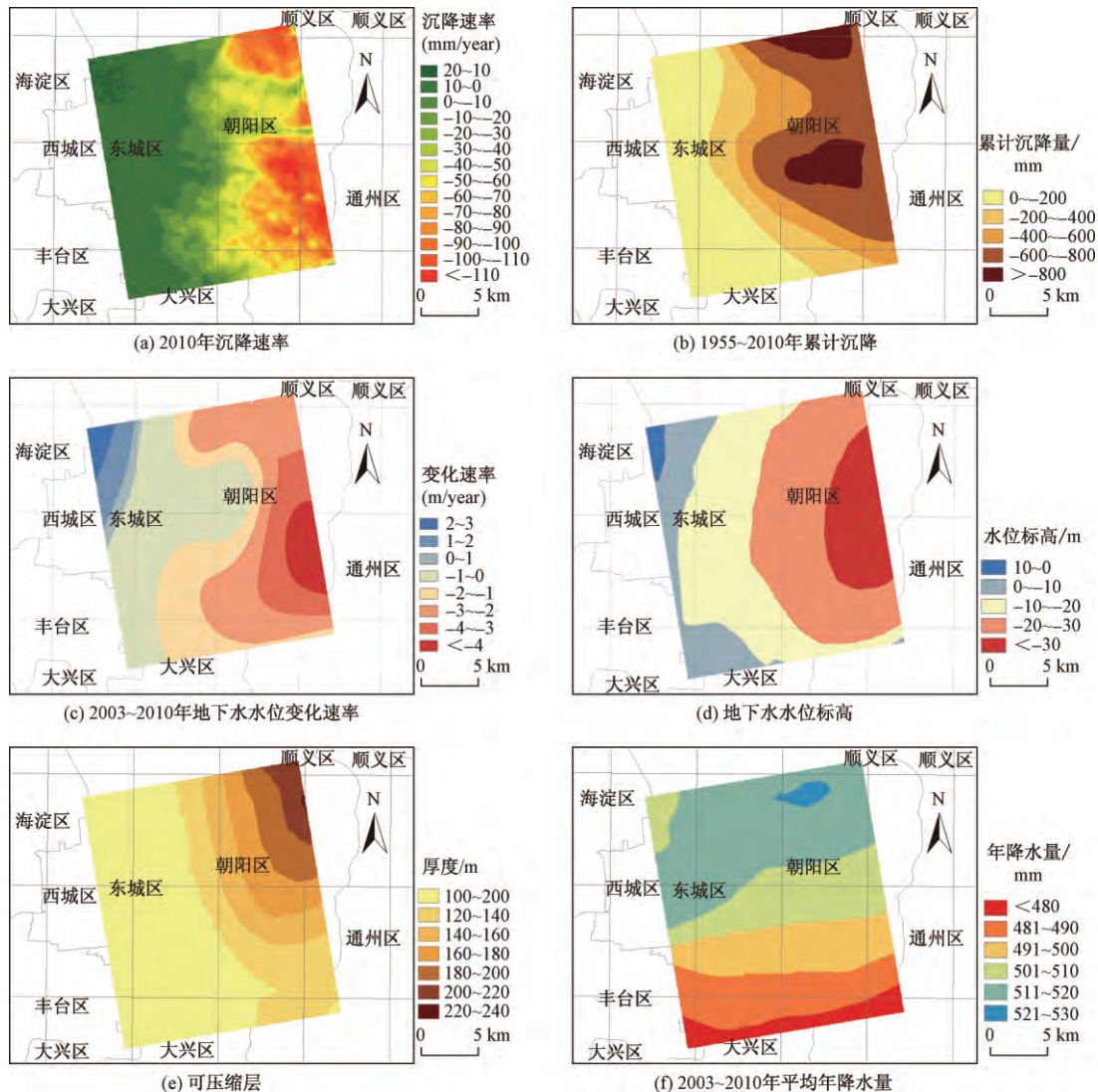


图1 因子分布图

Fig. 1 Distribution of factors

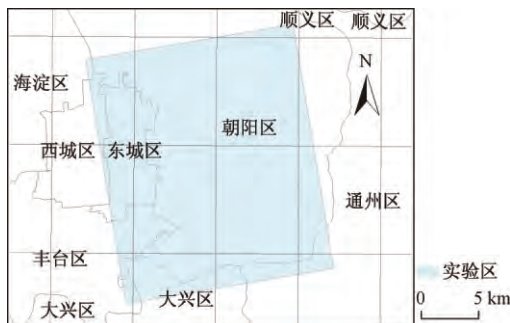


图2 实验区范围

Fig. 2 Experimental area

郊亭和来广营两个地区的沉降产生于20世纪70年代初到80年代初期工业发展需求导致的对地下水的大量开采;通州沉降区形成于80年代初至20世纪末,并

在21世纪初迈入快速发展阶段^[40]。到目前为止,实验区东侧部分地区平均年沉降速率超过50 mm/year,局部地区沉降速率超过100 mm/year。

2.2 评估实验

2.2.1 因子驱动力探测

在研究区中以500 m为间距生成1 545个采样点(图3)提取各因子位于采样点的值。评估实验的假设条件是基于2010年以前的因子分布数据对研究区2010年至2015年沉降发展做出估计。从评估者的角度出发,2010年以前的因子分布数据为已知量,可以作为自变量参与探测计算;2010至2015年的沉降量为未知量,不能作为因变量进行探测。根据沉降速率在时间上的连续性,将2010年沉降速率作为替代的因变量 Y ,所有因子作为自变量 X 进行因子驱动力(q

值) 计算(表 2)。表中的 p 值为显著性检验值。

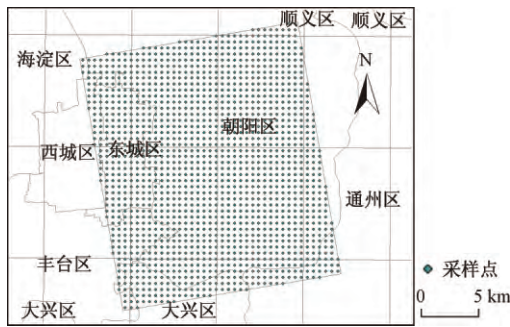


图 3 采样点分布
Fig. 3 Distribution of sampling points

表 2 因子驱动力探测结果

Table 2 Detection result offactor driving force		
探测因子	q 值	p 值
沉降速率	0.999 7	0.000 0
累计沉降	0.013 8	0.003 6
地下水水位变化速率	0.261 0	0.000 0
地下水水位标高	0.025 4	0.000 0
可压缩层厚度	0.018 9	0.000 0
年均降水	0.010 0	0.032 6

2.2.2 实验结果

(1) 未改进的评估模型

根据模型公式和指标评分表, MVFO、WFO、FAHP 模型的评估结果见图 4 地面沉降危险性评估结果(a) ~ (c)。其中 FAHP 模型的计算矩阵和最终权重如下所示:

a. 优先关系矩阵 F :

$$\begin{bmatrix} 0.5 & 0.6 & 0.6 & 0.8 & 0.8 & 0.9 \\ 0.4 & 0.5 & 0.6 & 0.7 & 0.7 & 0.9 \\ 0.4 & 0.4 & 0.5 & 0.6 & 0.6 & 0.8 \\ 0.2 & 0.3 & 0.4 & 0.5 & 0.6 & 0.8 \\ 0.2 & 0.3 & 0.4 & 0.4 & 0.5 & 0.8 \\ 0.1 & 0.1 & 0.2 & 0.2 & 0.2 & 0.5 \end{bmatrix}$$

b. 模糊一致性矩阵 R :

$$\begin{bmatrix} 0.50 & 0.54 & 0.59 & 0.54 & 0.66 & 0.79 \\ 0.46 & 0.50 & 0.55 & 0.60 & 0.62 & 0.75 \\ 0.41 & 0.45 & 0.50 & 0.55 & 0.57 & 0.70 \\ 0.36 & 0.40 & 0.45 & 0.50 & 0.52 & 0.65 \\ 0.34 & 0.38 & 0.43 & 0.48 & 0.50 & 0.63 \\ 0.21 & 0.25 & 0.30 & 0.35 & 0.37 & 0.50 \end{bmatrix}$$

c. 排序向量 W^0 :

$$[0.206\ 7\ 0.193\ 3\ 0.176\ 7\ 0.160\ 0\ 0.153\ 3\ 0.110\ 0]^T$$

d. 互反型判断矩阵 E :

$$\begin{bmatrix} 1.00 & 1.17 & 1.44 & 1.78 & 1.94 & 3.76 \\ 0.85 & 1.00 & 1.22 & 1.50 & 1.63 & 3.00 \\ 0.69 & 0.82 & 1.00 & 1.22 & 1.33 & 2.33 \\ 0.56 & 0.67 & 0.82 & 1.00 & 1.08 & 1.86 \\ 0.52 & 0.61 & 0.75 & 0.92 & 1.00 & 1.70 \\ 0.27 & 0.33 & 0.43 & 0.54 & 0.59 & 1.00 \end{bmatrix}$$

e. 权重向量 W^k :

$$[0.258\ 9\ 0.217\ 1\ 0.175\ 7\ 0.142\ 8\ 0.131\ 3\ 0.074\ 1]^T$$

(2) 改进后的模型

根据模型公式和指标评分表, GD-MVFO、GD-WFO、GD-FAHP 模型的评估结果见图 4 地面沉降危险性评估结果(d) ~ (e)。

GD-MVFO 模型中评估因子的指标权重为:

$$[0.986\ 4\ 0.013\ 6]^T$$

GD-WFO 模型中评估因子的指标权重为:

$$[0.752\ 4\ 0.010\ 4\ 0.196\ 4\ 0.019\ 1\ 0.014\ 2\ 0.007\ 5]^T$$

GD-FAHP 模型计算矩阵和最终权重如下所示:

a. 因子驱动力比较矩阵 Q :

$$\begin{bmatrix} 0.500\ 0 & 36.231\ 9 & 1.915\ 7 & 19.685\ 0 & 26.455\ 0 & 50.000\ 0 \\ 0.006\ 9 & 0.500\ 0 & 0.026\ 4 & 0.271\ 7 & 0.365\ 1 & 0.690\ 0 \\ 0.130\ 5 & 9.456\ 5 & 0.500\ 0 & 5.137\ 8 & 6.904\ 8 & 13.050\ 0 \\ 0.012\ 7 & 0.920\ 3 & 0.048\ 7 & 0.500\ 0 & 0.672\ 0 & 1.270\ 0 \\ 0.009\ 5 & 0.684\ 8 & 0.036\ 2 & 0.372\ 0 & 0.500\ 0 & 0.945\ 0 \\ 0.005\ 0 & 0.362\ 3 & 0.019\ 2 & 0.196\ 9 & 0.264\ 6 & 0.500\ 0 \end{bmatrix}$$

b. 优先关系矩阵 F :

$$\begin{bmatrix} 0.500\ 0 & 0.999\ 8 & 0.936\ 2 & 0.999\ 4 & 0.999\ 6 & 0.999\ 9 \\ 0.000\ 2 & 0.500\ 0 & 0.002\ 8 & 0.227\ 9 & 0.347\ 7 & 0.655\ 7 \\ 0.063\ 8 & 0.997\ 2 & 0.500\ 0 & 0.990\ 6 & 0.994\ 8 & 0.998\ 5 \\ 0.000\ 6 & 0.772\ 1 & 0.009\ 4 & 0.500\ 0 & 0.643\ 6 & 0.865\ 8 \\ 0.000\ 4 & 0.652\ 3 & 0.005\ 2 & 0.356\ 4 & 0.500\ 0 & 0.781\ 3 \\ 0.000\ 1 & 0.344\ 3 & 0.001\ 5 & 0.134\ 2 & 0.218\ 7 & 0.500\ 0 \end{bmatrix}$$

c. 将矩阵 F 带入模糊层次模型后, 求得最终权重向量 W^k :

$$[0.420\ 4\ 0.068\ 9\ 0.254\ 9\ 0.113\ 7\ 0.090\ 6\ 0.051\ 5]^T$$

2.3 结果验证

2.3.1 InSAR 监测的沉降危险性

根据 InSAR 监测的 2010 年至 2015 年沉降值计算得到年均沉降(图 5(a)), 并参照危险性的指标评分表中对沉降速率的危险性评语, 得到作为验证标准的沉降危险性分布(图 5(b)), 该图将作为衡量各评估模型利用 2010 年因子数据对 2011 ~ 2015 年(相对于因子数据的未来五年) 的沉降危险性进行评估的结果准确性参照标准。

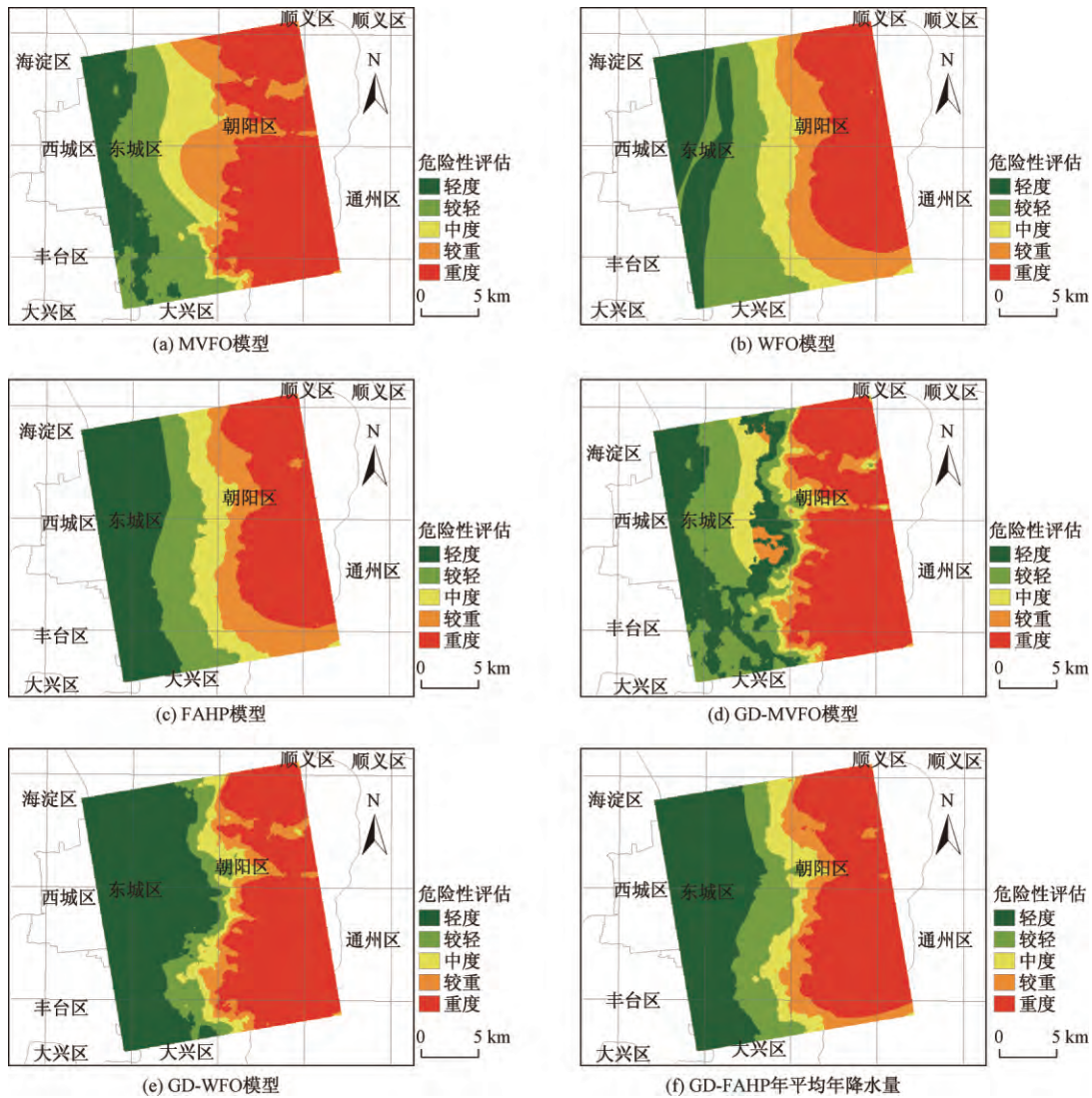


图4 地面沉降危险性评估结果

Fig. 4 Assessment results of land subsidence hazard

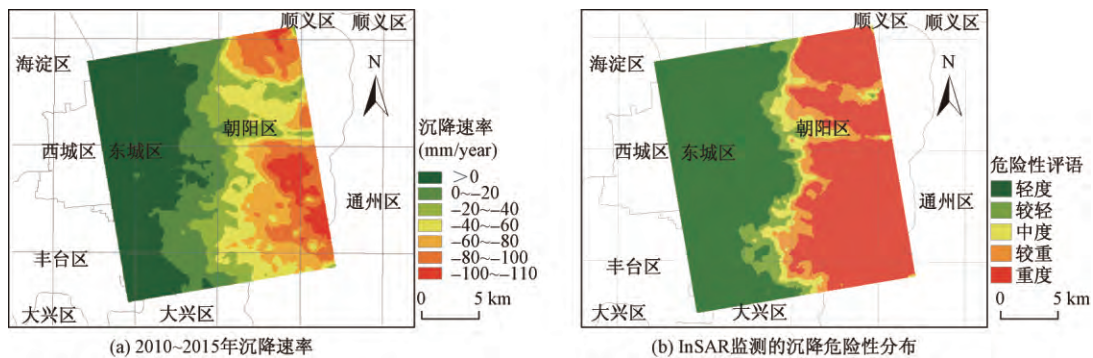


图5 InSAR 监测沉降速率及沉降危险性分布

Fig. 5 Actual subsidence rate and subsidence hazard distribution

以 250 m 为间距获取验证结果的采样,根据验证采样点提取模型评估结果和作为对照的沉降危险性。

2.3.2 模型评估结果与目标评语的匹配系数

根据验证采样点提取到的评估数据计算得到模型

评估结果与目标评语的匹配准确度,验证结果如表 3 所示。在未改进的模型中,MVFO 模型从“轻度”到“重度”五项评语准确度及总体准确度分别为 30.15%、40.37%、44.31%、78.67%、100% 和 60.51%;WFO 模型为 40.25%、40.91%、44.31%、50.95%、74.26% 和 53.73%;FAHP 模型为 63.36%、43.85%、50.00%、49.05%、75.81% 和 65.05%。在应用地理探测器改

进的模型中,GD-MVFO 模型从“轻度”到“重度”五项评估准确度及总体准确度分别为 49.48%、93.32%、89.82%、83.89%、100.00% 和 75.23%;GD-WFO 为 91.67%、63.37%、68.56%、70.85%、97.88% 和 89.56%;GD-FAHP 模型为 72.95%、54.28%、69.46%、53.79%、89.45% 和 76.38%。

表 3 模型评估结果准确度
Table 3 Accuracy of model assessment results

MVFO 模型							GD-MVFO 模型						
目标 评语	模型评估结果						目标 评估	模型评估结果					
	轻度	较轻	中度	较重	重度	准确度 / %		轻度	较轻	中度	较重	重度	准确度 / %
轻度	836	1 187	453	297	0	30.15%	轻度	1 372	982	335	84	0	49.48%
较轻	0	151	89	109	25	40.37%	较轻	5	349	20	0	0	93.32%
中度	0	1	148	167	18	44.31%	中度	0	4	300	30	0	89.82%
较重	0	0	1	332	89	78.67%	较重	0	0	1	354	67	83.89%
重度	0	0	0	0	2 265	100.00%	重度	0	0	0	0	2 265	100.00%
						60.51%							75.23%
WFO 模型							GD-WFO 模型						
目标 评语	模型评估结果						目标 评估	模型评估结果					
	轻度	较轻	中度	较重	重度	准确度 / %		轻度	较轻	中度	较重	重度	准确度 / %
轻度	1 116	1 306	329	22	0	40.25%	轻度	2 542	231	0	0	0	91.67%
较轻	0	153	161	59	1	40.91%	较轻	8	237	129	0	0	63.37%
中度	0	18	148	137	31	44.31%	中度	0	30	229	75	0	68.56%
较重	0	0	97	215	110	50.95%	较重	0	0	51	299	72	70.85%
重度	0	0	57	526	1 682	74.26%	重度	0	0	0	48	2 217	97.88%
						53.73%							89.56%
FAHP 模型							GD-FAHP 模型						
目标 评语	模型评估结果						目标 评估	模型评估结果					
	轻度	较轻	中度	较重	重度	准确度 / %		轻度	较轻	中度	较重	重度	准确度 / %
轻度	1 757	801	211	4	0	63.36%	轻度	2 023	682	68	0	0	72.95%
较轻	0	164	173	37	0	43.85%	较轻	0	203	163	8	0	54.28%
中度	0	33	167	116	18	50.00%	中度	0	7	232	88	7	69.46%
较重	0	0	109	207	106	49.05%	较重	0	0	88	227	107	53.79%
重度	0	0	45	503	1 717	75.81%	重度	0	0	0	239	2 026	89.45%
						65.05%							76.38%

2.3.3 Kappa 系数

在通常情况下,总体准确度能很好地表示评估结果与目标评语的匹配准确度,但是当某一类目标评估的验证采样点占据多数时,总体准确度受到该类别评估的影响较大,可能出现评估模型的偶然性高准确度。为进一步验证各模型的评估效果,使用 Kappa 系数进行分析。Kappa 系数计算结果通常在 0 到 1 之间,系数越大表示一致性越高。

计算结果表明,MVFO 模型、WFO 模型、FAHP 模型的 Kappa 系数分别为 0.485 1、0.405 2、0.525 5。

GD-MVFO 模型、GD-WFO 模型、GD-FAHP 模型的 Kappa 系数分别为 0.663 7、0.842 9、0.665 1。

2.3.4 F1-measure 函数

匹配准确度从验证采样点目标真实评估值的角度出发验证模型评估效果,此外还可以从评估结果的角度出发验证评估模型的某一类危险性评语对目标真实评语值的估计能力。为兼顾两种验证角度,进一步验证各模型的评估效果,使用 F1-measure 函数进行计算,F1-measure 值越高说明评估模型越有效。

计算结果表明,MVFO 模型、WFO 模型、FAHP 模型

的 F1-measure 平均值分别为 55.58%、49.43%、53.82%。GD-MVFO 模型、GD-WFO 模型、GD-FAHP 模型的 Kappa 系数分别为 75.39%、76.27%、63.74%。

3 结论

本文应用地理探测器,分别对 MVFO 模型、WFO 模型和 FAHP 模型进行了改进,将改进模型的地面沉降危险性评估与三种未改进的评估模型进行了结果验证和对比分析,得到如下结论:

(1) 改进后的评估模型在评估因子的指标权重确定环节中使用地理探测器进行因子驱动力的探测,根据因子与未来发育的地面沉降在空间分布上的相似关系,定量地计算并确定各项因子指标的权重值,替代了人工打分在指标权重确定环节中的作用,减少了评估工作因人工干预作用的差异而产生不同结果的可能性。

(2) 与三种未改进的评估模型相比,应用地理探测器方法改进的 GD-MVFO 模型、GD-WFO 模型、GD-FAHP 模型与用作验证的地面沉降分布拟合度更好,表明将地理探测器应用于地面沉降的危险性评估是一种可行的方法,提升了评估模型的性能。

参考文献:

- [1] 罗元华,张梁,张业成. 地质灾害风险评估方法[M]. 北京:地质出版社,1998: 1-116.
LUO Yuanhua, ZHANG Liang, ZHANG Yecheng. Risk assessment method of geological disasters [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1998: 1-116.
- [2] MARFAI MA, KING L. Monitoring land subsidence in Semarang, Indonesia [J]. Environmental Geology, 2007, 53(3): 651-659.
- [3] RAHNEMA H, MIRASI S. Seismic and geotechnical study of land subsidence and vulnerability of rural buildings [J]. International Journal of Geosciences, 2012, 3(4): 878-884.
- [4] 贾三满,田芳,刘明坤,等. 北京地区建设用地地面沉降危险性评估方法及标准[J]. 城市地质, 2012, 7(4): 7-11.
JIA Sanman, TIAN Fang, LIU Mingkun, et al. The risk assessment method and standard on the construction land subsidence in Beijing area [J]. Urban Geology, 2012, 7(4): 7-11.
- [5] HU B, ZHOU J, XU S, et al. Assessment of hazards and economic losses induced by land subsidence in Tianjin Binhai new area from 2011 to 2020 based on scenario analysis [J]. Natural Hazards, 2013, 66(2): 873-886.
- [6] 梁健,张虎元,张永雷,等. 北京市平原区典型地质灾害危险性评估[J]. 水文地质工程地质, 2008, 35(5): 113-115.
LIANG Jian, ZHANG Huyuan, ZHANG Yonglei, et al. Risk evaluate for typical geological hazards in Beijing plain [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2008, 35(5): 113-115.
- [7] ESAKI T, DJAMALUDDIN I, MITANI Y. A GIS-based prediction method to evaluate subsidence-induced damage from coal mining beneath a reservoir, Kyushu, Japan [J]. Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology, 2008, 41(3): 381-392.
- [8] NIE L, ZHANG M, JIAN H. Analysis of surface subsidence mechanism and regularity under the influence of seism and fault [J]. Natural Hazards, 2013, 66(2): 773-780.
- [9] KIM K, LEE S, OH H, et al. Assessment of ground subsidence hazard near an abandoned underground coal mine using GIS [J]. Environmental Geology, 2006, 50(8): 1183-1191.
- [10] 伊尧国,刘慧平,刘湘平,等. 基于权重因子模型的建筑荷载作用下地面沉降危险性评价[J]. 地球与环境, 2017, 45(4): 478-489.
YI Yaoguo, LIU Huiping, LIU Xiangping, et al. Assessment of ground subsidence hazard induced by building load based on weights-of-evidence model [J]. Earth and Environment, 2017, 45(4): 478-489.
- [11] 王坤. 天津宁河县地面沉降危险性评价[J]. 西部资源, 2015, 67(4): 113-115.
WANG Shen. Risk assessment of land subsidence in Ninghe County, Tianjin [J]. Western Resources, 2015, 67(4): 113-115.
- [12] 伊尧国,刘慧平,张洋华,等. 融合权重因子模型和深度学习方法的都市地面沉降危险性分析[J]. 灾害学, 2017, 32(1): 50-59.
YI Yaoguo, LIU Huiping, ZHANG Yanghua, et al. Analysis of urban ground subsidence hazard induced by building load combined with weights of evidence model and deep learning [J]. Journal of Catastrophology, 2017, 32(1): 50-59.
- [13] 王双. 湛江市重点区地面沉降易发性及危险性评价与防治措施探析[J]. 地下水, 2017, 39(2): 42-44.

- WANG Shuang. Susceptibility and risk assessment of land subsidence in major areas of Zhanjiang City and preventive measures [J]. Ground Water, 2017, 39 (2): 42–44.
- [14] 路云, 张海荣, 冯启言, 等. 大屯中心区地面沉降危险性评价[J]. 测绘科学, 2009, 34(3): 84–86.
LU Yun, ZHANG Hairong, FENG Qiyang, et al. The fatalness assessment about land subsidence in the center of datun area [J]. Science of Surveying and Mapping, 2009, 34(3): 84–86.
- [15] 刘德成, 何静. 北京市通州区地面沉降危险性评价与区划[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2008, 19(3): 158–159, 162.
LIU Decheng, HE Jing. Risk assessment and zoning of land subsidence in tongzhou district of Beijing [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2008, 19(3): 158–159, 162.
- [16] 杨艳, 雷坤超, 王新惠, 等. 京沈客运高铁专线北京段地面沉降灾害危险性评估[J]. 上海国土资源, 2014, 35(4): 146–150.
YANG Yan, LEI Kunchao, WANG Xinhui, et al. Evaluation of land subsidence risk for the Beijing section of the Beijing – Shenyang high-speed railway [J]. Shanghai Land & Resources, 2014, 35(4): 146–150.
- [17] 张欢, 焦珣. 上海市沿江沿海地区地面沉降特征及危险性评价[J]. 水利规划与设计, 2016(7): 6–8, 22.
ZHANG Huan, JIAO Xun. Land subsidence characteristics and risk assessment of coastal areas along the Yangtze River in Shanghai [J]. Water Resources Planning and Design, 2016(7): 6–8, 22.
- [18] 周志华, 杨丽萍. 基于模糊层次综合法的天津市地面沉降危险性评价[J]. 中国人口·资源与环境, 2015, 25(增刊1): 558–563.
ZHOU Zhihua, YANG Liping. Land subsidence hazard assessment of Tianjin City based on the fuzzy AHP comprehensive method [J]. China Population, Resources and Environment, 2015, 25(S1): 558–563.
- [19] 段学敏. 基于 GIS 的沧州地面沉降危险性区划[D]. 北京: 中国地质大学, 2013.
DUAN Xuemin. GIS-based hazard zoning of land subsidence in Cangzhou [D]. Beijing: China University of Geosciences, 2013.
- [20] 刘会平, 王艳丽. 广州市地面沉降危险性评价[J]. 海洋地质动态, 2006, 22(1): 1–4, 43.
LIU Huiping, WANG Yanli. An appraisal of ground subsidence fatalness in peral delta: A case study of Guangzhou City [J]. Marine Geology Letters, 2006, 22(1): 1–4, 43.
- [21] 李伟, 杨旭东, 马学军, 等. 模糊评判法在沧州市地面沉降灾害危险性评价中的应用[J]. 勘察科学技术, 2006(6): 39–42, 58.
LI Wei, YANG Xudong, MA Xuejun, et al. Application of fuzzy evaluation method for ground settlement hazard in Cangzhou City [J]. Site Investigation Science and Technology, 2006(6): 39–42, 58.
- [22] 张会, 张继权, 韩俊山. 基于 GIS 技术的洪涝灾害风险评估与区划研究——以辽河中下游地区为例[J]. 自然灾害学报, 2005, 14(6): 141–146.
ZHANG Hui, ZHANG Jiquan, HAN Junshan. GIS-based assessment and zoning of flood /waterlogging disaster risk: a case study on middle and lower reaches of Liaohe River [J]. Journal of Natural Disasters, 2005, 14(6): 141–146.
- [23] ZHANG J, OKADA N, TATANO H, et al. Damage evaluation of agro-meteorological hazards in the maize-growing region of Songliao Plain, China: Case study of Lishu County of Jilin Province [J]. Natural Hazards, 2004, 31(1): 209–232.
- [24] 胡蓓蓓, 姜衍祥, 周俊, 等. 天津市区及近郊区地面沉降灾害风险评估与区划[J]. 中国人口·资源与环境, 2008, 18(4): 28–34.
HU Beibei, JIANG Yanxiang, ZHOU Jun, et al. Assessment and zonation of land Subsidence disaster risk in urban and suburb of Tianjin [J]. China Population, Resources and Environment, 2008, 18(4): 28–34.
- [25] 姜媛, 贾三满, 王海刚. 北京地面沉降风险评价与管理[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2012, 23(1): 55–60.
JIANG Yuan, JIA Sanman, WANG Haigang. Risk assessment and management of land subsidence in Beijing Plain [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2012, 23(1): 55–60.
- [26] 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.
- [27] 赵团芝,侯艳声,胡新锋. 浙江宁波工程性地面沉降特征与风险区划[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2015, 26(4): 36–42.
ZHAO Tuanzhi, HOU Yansheng, HU Xinfeng. Characteristic analysis and risk zoning of engineering land subsidence in Ningbo City [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2015, 26(4): 36–42.
- [28] 房浩,何庆成,徐斌,等. 沧州地区地面沉降灾害风险评价研究[J]. 水文地质工程地质, 2016, 43(4): 159–164.
FANG Hao, HE Qingcheng, XU Bin, et al. A study of risk assessment of the land subsidence in Cangzhou [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2016, 43(4): 159–164.
- [29] 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(4): 7–11, 17.
WANG Hanmei. Study on risk evaluation and control schemes of land subsidence in Shanghai City [J]. Shanghai Geology, 2010, 31(4): 7–11, 17.
- [30] 王寒梅. 上海市地面沉降风险评价体系及风险管理研究[D]. 上海: 上海大学, 2013.
WANG Hanmei. The risk assessment system and risk management of land subsidence in Shanghai [D]. Shanghai: Shanghai University, 2013.
- [31] WANG J, LI X, CHRISTAKOS G, et al. Geographical detectors-based health risk assessment and its application in the neural tube defects study of the Heshun region, China [J]. International Journal of Geographical Information Science, 2010, 24(1): 107–127.
- [32] 王劲峰,徐成东. 地理探测器:原理与展望[J]. 地理学报, 2017, 72(1): 116–134.
WANG Jinfeng, XU Chengdong. Geodetector: principle and prospective [J]. Journal of Geographical Sciences, 2017, 72(1): 116–134.
- [33] 廖颖,王心源,周俊明. 基于地理探测器的大熊猫生境适宜度评价模型及验证[J]. 地球信息科学学报, 2016, 18(6): 767–778.
LIAO Ying, WANG Xinyuan, ZHOU Junming. Suitability assessment and validation of giant panda habitat based on geographical detector [J]. Journal of Geoinformation Science, 2016, 18(6): 767–778.
- [34] 宫辉力,李小娟,潘云,等. 京津冀地下水消耗与区域地面沉降演化规律[J]. 中国科学基金, 2017, 31(1): 72–77.
GONG Huili, LI Xiaojuan, PAN Yun, et al. Groundwater depletion and regional land subsidence of the Beijing-Tianjin-Hebei area [J]. Bulletin of National Natural Science Foundation of China, 2017, 31(1): 72–77.
- [35] 沈宥宁. 北京近15年地下水位下降与地面沉降关系及南水北调初效[J]. 科技展望, 2016, 26(25): 96.
SHEN Youning. Relationship between groundwater level decline and land settlement in Beijing in recent 15 years and initial effect of south-to-north water transfer project [J]. Science and Technology, 2016, 26(25): 96.
- [36] 中华人民共和国国土资源部. 地质灾害危险性评估规范: DZ/T 0286—2015 [S]. 北京: 地质出版社, 2015.
Ministry of Land and Resources of the People's Republic of China. Specification of risk assessment for geological hazard: DZ/T 0286—2015 [S]. Beijing: Geological Publishing House, 2015.
- [37] 杨艳,贾三满,王海刚. 北京平原区地面沉降现状及发展趋势分析[J]. 上海地质, 2010, 31(4): 23–28.
YANG Yan, JIA Sanman, WANG Haigang. The status and development of land subsidence in Beijing Plain [J]. Shanghai Geology, 2010, 31(4): 23–28.
- [38] 雷坤超,罗勇,陈蓓蓓,等. 北京平原区地面沉降分布特征及影响因素[J]. 中国地质, 2016, 43(6): 2216–2228.
LEI Kunchao, LUO Yong, CHEN Beibei, et al. Distribution characteristics and influence factors of land subsidence in Beijing area [J]. Geology in China, 2016, 43(6): 2216–2228.
- [39] 武建强,余勤. 神经网络技术在地面沉降区划中的应用研究[J]. 江苏地质, 2003, 27(3): 171–174.
WU Jianqiang, YU Qin. Application study of nerve network technology in land subsidence planning [J]. Journal of Geology, 2003, 27(3): 171–174.
- [40] 北京市地质矿产勘查开发局. 北京市水文地质工程地质大队. 北京地下水[M]. 北京: 中国大地出版社, 2008: 1–368.
Beijing Geology Prospecting & Developing Bureau, Beijing Institute of Hydrogeology and Engineering Geology. Beijing ground water [M]. Beijing: China Land Press, 2008: 1–368.