

崔希民 张 兵 彭 超. 建筑物采动损害评价研究现状与进展[J]. 煤炭学报, 2015, 40(8): 1718–1728. doi: 10.13225/j.cnki.jccs.2015.0594

Cui Ximin Zhang Bing Peng Chao. Current status and progress on the estimation of mining-induced building damage[J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(8): 1718–1728. doi: 10.13225/j.cnki.jccs.2015.0594

建筑物采动损害评价研究现状与进展

崔希民^{1,2} 张 兵^{1,2} 彭 超^{1,2}

(1. 中国矿业大学(北京)地球科学与测绘工程学院,北京 100083; 2. 中国矿业大学(北京)煤炭资源与安全开采国家重点实验室,北京 100083)

摘 要: 针对建筑物采动损害评价研究的迫切性,分析了国内外建筑物损害临界变形值确定和损坏等级划分研究现状,归纳给出了基于模糊数学、物元模型、神经网络、聚类分析、熵权法、点数法等理论开展损害评价的优缺点;详细介绍了国际上采动建筑物损害评价的新进展——脆弱性曲线、分类回归树方法。最新研究表明,基于建筑物分类和计算机辅助分析有助于提高建筑物采动损害评价的准确性,克服评价因子的不确定性影响;进而提出了未来急需开展的研究工作和待解决的问题。

关键词: 建筑物采动损害;评价;进展;临界变形;地下开采

中图分类号: TD325 文献标志码: A 文章编号: 0253-9993(2015)08-1718-11

Current status and progress on the estimation of mining-induced building damage

CUI Xi-min^{1,2} ZHANG Bing^{1,2} PENG Chao^{1,2}

(1. College of Geoscience and Surveying Engineering, China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083, China; 2. State Key Laboratory of Coal Resources and Safety Mining, China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083, China)

Abstract: To meet the urgency and necessary of mining induced building damage estimation in practice, the present situation of the determination of critical deformation and damage classification to building was analyzed. The advantages and shortcomings were investigated for the building damage assessment based on the fuzzy mathematics, matter element, neural network, entropy weight, fuzzy clustering and point method. The new progresses in the assessment of mining induced building damage, such as vulnerability curve, classification and regression tree, were introduced in detail. The study results reveal that it is helpful to improve the accuracy of building damage assessment based on building typology and computer aided analysis. The influences of uncertainty from estimating factor may be further avoided in the process of damage assessment. The areas for further study in the future are proposed.

Key words: mining induced building damage; estimation; progression; critical deformation; underground mining

随着时间的推移和地下资源的枯竭,东部和部分中部矿山工作面接续紧张,大部分可采资源被建筑物、水体和铁路压占。据20世纪80年代国有重点煤矿统计,全国“三下”压煤量约137.9亿t,其中建筑物下约87.6亿t,村庄下压煤占建筑物下压煤的

60%^[1]。要延长矿井服务年限,就必须在科学、合理开采设计的基础上尽可能多地回收利用“三下”资源。因此,建筑物采动损害评价结果既是采动损害责任认定的依据,也是地下开采设计优化的基础和前提。采动损害评价理论与方法研究已经越来越引起

科研与工程技术人员的注意与重视。

建筑物采动损害评价涉及 2 个主要问题: ① 建筑物临界变形值的确定、与变形值对应的损坏等级划分及其评价分析方法; ② 地表移动变形的预计及其可靠性。尽管科学合理的进行建筑物采动损害评价时两者缺一不可, 但由于篇幅所限, 本文将侧重于第 1 个问题的研究现状与进展进行分析与阐述, 而地表移动变形预计方法的选择、预计参数的确定、预计结果的可靠性分析等问题将另文讨论。

1 建筑物的临界变形值与损坏等级划分

地下开采空间达到一定尺寸后, 上覆岩层的移动变形将波及到地表, 在地表产生连续的或不连续的移动变形。地表移动包括垂直方向的下沉和水平方向的移动。基于下沉和水平移动又可导出倾斜、曲率、水平变形、扭曲和剪应变等变形^[2]。均匀的下沉和水平移动只产生建筑物的刚体位移, 不会造成建筑物的破坏; 而建筑物对非均匀的下沉和水平位移引起的变形敏感, 理论上, 这些变形量都可作为建筑物损坏的临界变形值以及损坏等级划分的依据。

1.1 国内的研究现状

1973 年末至 1978 年初, 我国从村庄下采出的煤量约为 3 400 万 t, 积累了较丰富的不同结构类型农村房屋受开采影响后的抗变形能力、破坏形态等实测数

据和资料。当时的农村房屋以居住性房屋为主体, 多为 3~5 开间单层房屋, 平面尺寸不大, 密度大并伴有各类附属房屋; 建筑材料均就地取材, 材质和结构形式因地制宜。焦传武通过对峰峰、阜新、焦作、铜川、鹤壁、王封、梅田、丰城、羊场、田坝等局矿地表和房屋变形观测的系统分析, 认为长度小于 20 m, 材料为片石基础、砖墙承重、木屋架、瓦屋面这类砖木混合结构的单层及两层民用建筑物, 其临界变形值为水平变形值为 2 mm/m、曲率为 $0.2 \times 10^{-3} \text{ m}^{-1}$ 、倾斜为 3 mm/m, 并建议此类建筑物损坏等级的划分选用表 1 中的数值^[3]; 2000 年《建筑物、水体、铁路及主要井巷煤柱留设与压煤开采规程》修订后, 将该类建筑物定义为砖混结构, 将表 1 中 IV 级破坏的曲率值由 $0.6 \times 10^{-3} \sim 0.8 \times 10^{-3} \text{ m}^{-1}$ 改为 $>0.6 \times 10^{-3} \text{ m}^{-1}$ ^[4], 目前已成为我国建筑物采动损坏程度划分的主要依据。对于土筑或土坯平房, 由于材料强度低, 抗变形能力弱, 分析给出的地表临界变形值为水平变形值 1 mm/m、曲率 $0.05 \times 10^{-3} \text{ m}^{-1}$ 、倾斜 1 mm/m, 建议建筑物损坏等级划分按表 1 选用^[3]; 对于片石砌承重墙的房屋, 其抗变形能力可与土筑平房相同, 也参照表 1 选用。对于多柱式木排架结构, 由于其抗变形能力高于上述结构类型的房屋, 建议分级标准参考表 1 执行^[3]; 对于砖窑洞、土窑洞的损害统计分析, 尽管没有给出对应破坏等级的变形值, 但得到了当深厚比 >200 时窑洞完整无损的结论^[3]。

表 1 建筑物损坏等级^[3]
Table 1 Classification of subsidence damage for buildings^[3]

建筑物类型	损坏等级	地表变形值			结构处理
		水平变形/(mm·m ⁻¹)	曲率/m ⁻¹	倾斜/(mm·m ⁻¹)	
砖混结构	I	≤2.0	≤ 0.2×10^{-3}	≤3.0	不修或简单维修
	II	≤4.0	$0.2 \times 10^{-3} \sim 0.4 \times 10^{-3}$	≤6.0	小修
	III	≤6.0	$0.4 \times 10^{-3} \sim 0.6 \times 10^{-3}$	≤10.0	中修
	IV	>6.0	$0.6 \times 10^{-3} \sim 0.8 \times 10^{-3}$	>10.0	大修或拆建
土筑平房	I	<1.0	< 0.05×10^{-3}	<1.0	不修
	II	1.0~1.5	$0.05 \times 10^{-3} \sim 0.10 \times 10^{-3}$	1.0~2.0	小修
	III	1.5~3.0	$0.10 \times 10^{-3} \sim 0.30 \times 10^{-3}$	2.0~7.0	中修
	IV	3.0~4.0	$0.30 \times 10^{-3} \sim 0.50 \times 10^{-3}$	7.0~11.0	大修
多柱式木排架 结构房屋	I	+5.0, -6.0	$\pm 1.5 \times 10^{-3}$	<20.0	不修
	II	+5.0~+9.0, -6.0~-11.0	$\pm 1.5 \times 10^{-3} \sim \pm 7.0 \times 10^{-3}$	20.0~44.0	小修
	III	+9.0~+13.0, -11.0~-18.0	$\pm 7.0 \times 10^{-3} \sim \pm 10.0 \times 10^{-3}$	44.0~55.0	小修
	IV	+13.0 以上, -18.0 以上	$> \pm 10.0 \times 10^{-3}$	>55.0	中修或局部拆除

我国幅员辽阔, 不同地区的习俗和自然条件决定了其不同的建筑物结构与特征。部分矿区根据本矿区建筑物特点和建筑物下采煤实践, 制定了适合本矿区的建筑物损坏等级标准, 表 2 为峰峰矿区建立的采

动区建筑物损坏评价指标^[5]; 对于长度较大建筑物, 研究认为其破坏程度不仅与地表水平变形有关, 还与其长度、高度和地表曲率相关, 峰峰矿区提出了总变形指标方法以衡量建筑物损坏程度, 见表 3^[3, 5]。总

变形指标可表示为

$$\Delta L = L \sqrt{\varepsilon^2 + \left(\frac{H}{R}\right)^2} \quad (1)$$

其中 ΔL 为总变形指标, mm; L 为建筑物长度, m; H 为建筑物高度, m; R 为地表曲率半径, m; ε 为地表水平变形, mm/m。

表 2 建筑物损坏程度与地表变形关系^[5]

Table 2 Relationships between the classification of mining subsidence and surface deformations^[5]

破坏程度	地表变形值		
	水平变形 / (mm · m ⁻¹)	曲率 / m ⁻¹	倾斜 / (mm · m ⁻¹)
轻度	1.5 ~ 3.0	0.15 × 10 ⁻³ ~ 0.25 × 10 ⁻³	3.0 ~ 5.0
中度	3.0 ~ 6.0	0.25 × 10 ⁻³ ~ 0.60 × 10 ⁻³	5.0 ~ 10.0
严重	>6.0	>0.60 × 10 ⁻³	>10.0

表 3 建筑物损坏程度与总变形指标的关系^[3,5]

Table 3 Relationships between the classification of mining subsidence and the index of total deformations^[3,5]

破坏程度	轻度	中度	严重
总变形指标 ΔL /mm	<150	150 ~ 250	>250

1978 年改革开放以后,特别是新农村建设以来,农村建筑物发生了翻天覆地的变化。在建筑结构上,既有钢筋混凝土单层和多层结构,也有砖混结构、砖木结构;有的村庄新旧房屋混杂。在地区分布上,东部以砖混、砖木结构为主,有的有底圈梁,有的有顶圈梁,有的有构造柱等;砖窑洞、土窑洞多位于中西部;西南部存在木排架结构房屋。目前在建筑物采动损坏等级划分上,一般笼统地以砖混结构为基础,大多没有考虑建筑类型、建筑结构、建筑材料与质量、修建年限等因素,难免导致建筑物损坏等级界定结果与实际存在偏差。

1.2 国外研究现状

根据查阅文献可知,国外采动建筑物的临界变形值主要以水平变形、剪应变(扭曲)、偏斜率、曲率半径为指标,按砖石结构、钢结构与强化混凝土结构、木结构进行分类。研究者主要来自于美国、英国、苏联、波兰、德国等原主要产煤国,研究年代主要集中在 20 世纪 50—80 年代,指标多、不系统,见表 4^[6-27]。表中的 I 级损坏特征为墙皮细小裂缝,门窗开关不灵活,相当于我国规程中的 I 级轻微损坏;II 级损坏特征为局部结构单元不稳定、门窗卡住、窗框折断、建筑物使用受限,相当于我国规程中的 III 中度损坏和 IV 级中的严重损坏;III 级损坏特征为主体结构损坏,有

倒塌可能,需全部或大部分重建,不能安全居住,相当于我国规程中的 IV 级极度严重损坏,表中的建议值为文献[28]所确定。各国的建筑物临界变形值对比和建筑物破坏等级划分见表 5^[2]。英国国家煤炭局研究认为,造成建筑物损坏的主要原因是地表水平变形,根据实测资料和经验将地表水平变形、建筑物长度和破坏程度联系起来,绘制了地表水平变形与建筑物损坏程度关系图,同时总结了一个依据建筑物长度变化的损坏等级分类表,两者配合使用^[5,7]。国外的研究表明,同一类型建筑结构或相同损坏特征对应着不同的临界值,表明建筑结构、建筑质量、修建年代等建筑物自身属性决定了其抵抗变形的能力,同一类型建筑物因建筑质量好和使用年限长短的不同而可能具有不同表象,另一方面也存在各国对建筑物临界变形特征的认定标准不同。

国内外研究的对比分析表明:

(1) 不同国家选取的临界变形指标不尽相同,等级数量也存在差异。中国与苏联相同,但 Donetsk 考虑了建筑物的层数;波兰选用了水平变形和倾斜;英国则只考虑水平变形;不同国家的损坏评价指标体系差异较大,相同的损坏等级对应不同的临界变形值,也对应不同的采动损坏程度。

(2) 由于建筑物的类型、结构、修建年代、几何尺寸、建筑质量等差异较大,其抵抗变形能力不同,大多数评价体系未体现这些特征;Anon^[7]和 Wagner^[29]依据建筑物长度和地表水平变形关系绘制了破坏分级图,只反应了建筑物长度对地表变形的敏感程度;苏联根据多年研究,提出了用总变形指标来评定刚性结构房屋的损坏程度,总变形指标为^[5]:

$$\Delta L = L \sqrt{(m_\varepsilon + \varepsilon)^2 + \left(\frac{m_R H}{R}\right)^2} \quad (2)$$

其中, m_ε 和 m_R 是按建筑物长度或宽度确定的系数,进而按建筑物用途分类建立不同类别建筑物的损坏等级与总变形指标的关系;对于柔性结构建筑物,苏联研究给出了其允许变形值的计算公式^[5],即

$$\Delta L' = \frac{L \times 10^{-3}}{16} \sqrt{1.024 + H^2} \quad (3)$$

认为当柔性建筑物总变形指标大于等于允许变形值时,应采取留设煤柱的方法予以保护。

(3) 建筑物完整性与抵抗变形能力会随着使用年限的增加而降低,但在目前的损坏评价中建筑物修建年代往往被忽略而未体现。

(4) 建筑物采动损坏评价应根据研究区域的大小和建筑物特征,按建筑物类别分区选取与实际相符的评价指标体系。

表 4 建筑物的损坏等级与特征
Table 4 Classification of subsidence damage for structures

建筑物类型	损坏等级与特征	地表变形类型	变形值	国家	研究者(年份)	建议值							
I 墙皮细小裂缝, 门窗开关不灵活	剪应变		$(0.5 \sim 1.0) \times 10^{-3}$	—	Meyerhoff(1953)	1.0×10^{-3}							
			1.0×10^{-3}	美国	O' Rourke(1976)								
			1.0×10^{-3}	英国	Attewell(1977)								
			1.0×10^{-3}	前苏联	Polshin(1957)								
			$(1.0 \sim 2.0) \times 10^{-3}$	德国	Niemczyk(1949)								
			$(1.0 \sim 2.0) \times 10^{-3}$	—	Skempton(1956)								
			$(1.0 \sim 2.0) \times 10^{-3}$	美国	Sowers(1962)								
			1.2×10^{-3}	美国	Boscardin(1980)								
			0.25×10^{-3}	英国	Littlejohn(1975)								
			0.4×10^{-3}	英国	Beevers(1954)								
	水平变形			$(0.4 \sim 0.5) \times 10^{-3}$	印度	Singh(1968)	0.5×10^{-3}						
				0.5×10^{-3}	前苏联	Polshin(1957)							
				0.5×10^{-3}	日本	Goto(1968)							
				0.5×10^{-3}	美国	Yokel(1978)							
				0.5×10^{-3}	美国	Boscardin(1980)							
				$(0.5 \sim 1.0) \times 10^{-3}$	英国	Anon(1975)							
				$(0.5 \sim 1.0) \times 10^{-3}$	英国	Attewell(1977)							
				0.6×10^{-3}	德国	Niemczyk(1949)							
				$<0.75 \times 10^{-3}$	美国	O' Rourke(1976)							
				0.8×10^{-3}	英国	Priest(1957)							
II 局部结构单元不稳定 门窗卡住 窗框折断 建筑物使用受限	偏斜率					$(1.0 \sim 2.0) \times 10^{-3}$							
							$(1.0 \sim 1.5) \times 10^{-3}$	美国	Cording(1978)				
							$(0.3 \sim 0.7) \times 10^{-3}$	前苏联	Polshin(1957)				
							0.4×10^{-3}	英国	Burland(1975)				
							1.0×10^{-3}	美国	Grant(1974)				
	剪应变						$(2.5 \sim 3.0) \times 10^{-3}$						
								$(4.0 \sim 6.0) \times 10^{-3}$	前苏联	Anon(1958)			
								2.0×10^{-3}	美国	Bjerum(1963)			
								$(2.0 \sim 3.3) \times 10^{-3}$	瑞典	Broms(1976)			
								2.5×10^{-3}	波兰	Adamek(1981)			
2.7×10^{-3}								英国	Thorburn(1977)				
3.0×10^{-3}								日本	Ulrich(1974)				
$(3.0 \sim 6.0) \times 10^{-3}$								—	Nishida(1982)				
3.3×10^{-3}								美国	Grant(1974)				
3.3×10^{-3}								美国	Skempton(1956)				
水平变形						$(1.2 \sim 2.0) \times 10^{-3}$							
							$(3.3 \sim 5.0) \times 10^{-3}$	波兰	Starzewski(1974)				
							3.5×10^{-3}	美国	Meyerhoff(1953)				
							1.0×10^{-3}	—	Ulrich(1974)				
							1.5×10^{-3}	波兰	Adamek(1982)				
							$(2.0 \sim 4.0) \times 10^{-3}$	前苏联	Anon(1958)				
							$(2.5 \sim 3.5) \times 10^{-3}$	美国	Cording(1976)				
							$(0.14 \sim 0.22) \times 10^{-3}$	—	Rigby(1952)				
							偏斜率						0.5×10^{-3}
0.6×10^{-3}	美国	Horne(1964)											
曲率半径/km						20							
							3 ~ 20	苏联	Anon(1958)				
							13	日本	Nishida(1982)				
							20	—	Ulrich(1974)				
			20	波兰	Adamek(1982)								

续表

建筑物类型	损坏等级与特征	地表变形类型	变形值	国家	研究者(年份)	建议值
砖石、砖承重 墙结构低层	III 主体结构损坏,有倒塌可能,需全部或大部分重建,不能安全居住	剪应变	$(7.0 \sim 8.0) \times 10^{-3}$	美国	O' Rourke(1977)	7.0×10^{-3}
		水平变形	2.75×10^{-3}	美国	Boscarding(1960)	3.0×10^{-3}
			3.5×10^{-3}	英国	Anon(1957)	
钢结构和强化混 凝土结构建筑物	I 墙皮细小裂缝, 门窗开关不灵活	剪应变	$(1.0 \sim 2.0) \times 10^{-3}$	美国	Skempton(1956)	1.3×10^{-3}
			1.3×10^{-3}	美国	O' Rourke(1976)	
			2.0×10^{-3}	前苏联	Polsin(1957)	
			2.0×10^{-3}	英国	Attewell(1977)	
	II 局部结构单元不稳 定,门窗卡住,窗框 折断,建筑物使用受限	剪应变	$(2.0 \sim 2.5) \times 10^{-3}$	美国	Sowers(1962)	3.3×10^{-3}
			2.2×10^{-3}	—	Breth(1975)	
			$(2.5 \sim 3.3) \times 10^{-3}$	—	Thomas(1953)	
木结构建筑物	I 墙皮细小裂缝, 门窗开关不灵活	剪应变	2.0×10^{-3}	美国	Mahar(1981)	剪应变
		水平变形	1.0×10^{-3}	日本	Goto(1968)	水平变形
	II 局部结构单元不稳定, 门窗卡住,窗框折断, 建筑物使用受限	剪应变	$(3.3 \sim 5.5) \times 10^{-3}$	瑞典	Broms(1976)	$(3.3 \sim 5.0) \times 10^{-3}$
			$(5.0 \sim 10.0) \times 10^{-3}$	波兰	Starzewski(1974)	
			—	—	—	

表 5 主要产煤国的建筑物允许变形值^[2]Table 5 Maximum allowable structural deformation in major coal producing countries^[2]

国家	压缩变形/(mm·m ⁻¹)	拉伸变形/(mm·m ⁻¹)	倾斜/(mm·m ⁻¹)	曲率半径/km
中国	2.0	2.0	3.0	5
法国	1.0~2.0	0.5	—	—
德国	0.6	0.6	1.0~2.0	—
日本	5.0	5.0	—	—
波兰	1.5	1.5	2.5	20
前苏联 Donetsk	2.0	2.0	4.0	20
前苏联 Kalaganda	4.0	4.0	6.0	3.0
英国	1.0	—	—	—

表 6 主要产煤国的建筑物损坏等级划分^[2]Table 6 Classification of structural damage in major coal producing countries^[2]

损坏等级	中国	波兰	前苏联		英国
			Donetsk	Kalaganda	
I	$\varepsilon \leq 2.0$ $k \leq 0.2$ $i \leq 3$	$\varepsilon \leq 1.5$ $i \leq 2.5$	$\varepsilon \leq 2$ $\rho \leq 20$ $i \leq 4$	$\varepsilon \leq 4$ $\rho \leq 3$ $i \leq 6$	$\varepsilon \leq 0.5$
II	$\varepsilon \leq 4.0$ $k \leq 0.4$ $i \leq 6$	$\varepsilon \leq 3.0$ $i \leq 5.0$	>5 层 $\varepsilon \leq 2.5$ $\rho \leq 12$ $i \leq 4$	$\varepsilon \leq 7$ $\rho \leq 1.5$ $i \leq 11$	$\varepsilon \leq 1.0$
III	$\varepsilon \leq 6.0$ $k \leq 0.6$ $i \leq 10.0$	$\varepsilon \leq 6.0$ $i \leq 10.0$	3-4 层 $\varepsilon \leq 3.5$ $\rho \leq 12$ $i \leq 6$	$\varepsilon \leq 10$ $\rho \leq 1$ $i \leq 16$	$\varepsilon \leq 2.0$
IV	$\varepsilon > 6.0$ $k > 0.6$ $i > 10.0$	$\varepsilon > 9.0$ $i > 15.0$	2 层 $\varepsilon \leq 6$ $\rho \leq 5.5$ $i \leq 8$	—	—
V	—	—	1 层 $\varepsilon \leq 7.5$ $\rho \leq 3$ $i \leq 10$	—	$\varepsilon > 3.0$
VI	—	—	1 层 $\varepsilon > 14$ $\rho > 1$ $i > 25$	—	—

注:层代表建筑物层数; ε 代表水平变形; ρ 代表曲率半径; i 代表倾斜; k 代表曲率。

2 采动损害评价方法的研究现状

我国的建筑物开采损害评价一直采用地表移动变形的预计值按表 1 的分界值确定建筑物的损坏等级^[3-4],一般依据地表终态的预计变形值,大多未考

虑工作面推进过程中的地表动态变形,也未考虑建筑物类型、建筑结构、尺寸与形状、建筑材料与质量、修建年限等建筑物自身固有的因素。

胡炳南研究认为,“三下”采煤规程中以对建筑物破坏影响较大的倾斜、曲率和水平变形值作为因

子,划分绝对的“硬性”界限,当变形值处在两损坏等级分界值附近时,尽管数值相差较小,但会出现归属于不同的采动损坏等级;因此建议以倾斜、曲率、水平变形作为模糊综合评判因子,对于损坏等级分界点附近取值时,由于等级划分最模糊,模糊度最大,隶属度取 0.5,分界点中间的模糊度最小、分界最清楚,隶属度取 1,由此采用梯形和半梯形隶属函数分布及超标加权法分配权重,依据地表变形预计值进行模糊综合评判,确定了建筑物损坏程度^[30];刘立民等应用可拓学的理论和方法,基于可拓学中的可拓集合变换和相关函数分析法,给出了受沉陷影响建筑物损害评价的经典域物元和节域物元,并建立了建筑物损害量化评价的物元模型^[31]。尽管两者都较好地解决了分界点处的损害等级跳跃问题,但未考虑建筑物自身的属性特征。

影响建筑物采动损害程度的因素很多,有些是确定的、定量的,有些则是模糊的、定性的。这些因素的存在,使得采动影响下建筑物损坏程度分类时往往伴随着很大的模糊性。郭文兵认为影响砖混结构建筑物采动损坏程度的因素,不仅有地质采矿方面的因素,而且有建筑物本身的因素,通过对这些因素的具体分析,选取建筑物状况、与采空区位置关系、建筑物平面尺寸、采动程度系数、开采的深厚比、覆岩平均坚固性系数、煤层倾角、顶板管理方法等 8 个因素,采用自适应 BP 神经网络技术建立了建筑物采动损坏程度的预测模型,其中,将建筑物的修建年限、地基、基础性、建筑材料和结构以及建筑质量等作为建筑物状况的综合放映,按好坏划分为 5 个等级,即:好、较好、一般、较差、差并分别用 1、0.8、0.6、0.4、0.2 作为输入变量;建筑物在移动盆地中的位置按有利、较有利、一般、较不利、不利 5 种情况并分别用 1、2、3、4、5 表示,以筛选的 32 个典型建筑物采动损害实例作为学习训练样本,6 个实例作为预测样本并用于检验网络性能,对模型预测结果与实际值进行了对比分析,结果表明用人工神经网络方法预测建筑物采动损坏程度是可行的^[32],但也存在各因素作用机理不明、训练过程中局部极小、网络结构难以确定、权重取值主观等问题。在此基础上,作者采用平移-标准差数据标准化方法,建立模糊相似矩阵以求解模糊等价矩阵,由动态聚类图得到分类结果,从而建立了基于模糊等价关系的采动影响下建筑物损坏程度模糊聚类分析方法^[33]。该方法尽管综合考虑了建筑物的几何状况,但不能体现与建筑物破坏密切相关的建筑结构、类型及修建年限等因素,也未考虑不同因素影响间的不等权分配。王正帅等基于实测数据采用熵权法确定各

影响因素的权重,提出了建筑物采动损害的熵权模糊识别模型,同样通过计算模糊综合隶属度,按最大隶属度原则评判建筑物损坏等级^[34];尽管熵权法是一种根据样本数据确定权重的客观赋权法^[35-36],能消除主观赋权法中人为因素的不利影响,但需要大数据量的实测样本以提高模型的可靠性。

随着计算机技术和 3S 技术的发展,越来越多的研究者开始尝试利用 GIS 技术开展建筑物采动损害评价^[37-38]。Ibrahim 利用中国的采动建筑物损坏等级,基于 GIS 开展地表移动变形的过程预计,提出了模糊逻辑与 GIS 相结合的评价方法^[39],但未充分利用 GIS 的强大空间分析功能。

2010 年 Malinowska 依据建筑物水平投影长度、建筑物形状、基础、地基、建筑条件、已采取的防护措施、建筑物的技术状态等将建筑物划分为 7 个大类、若干个子类,分别赋予不同的点数,建筑物的总点数对应着该建筑物抵抗变形能力,基于总点数将建筑物抵抗变形能力划分成 5 个级别,点数越高则建筑物对变形越敏感;建立了建筑物抵抗变形等级与地表变形 6 个等级的关系,利用 GIS 对建筑物损坏等级进行分阶段评价^[40]。点数法的优点是考虑建筑物自身条件与特征,但也应当看到其实质是典型的专家打分法,评价结果的可靠性完全取决于评价人员的主观经验。2010 年 Oh 构建了包括地质条件、井下巷道、钻孔、地形、土地利用的空间数据库,将地形坡度、地质条件、土地利用状况、井下巷道的埋藏深度、至巷道的平面距离、地表潜水埋深和潜水渗透性作为影响因子,研究区的地面沉陷状况通过野外实测获得,采用证据权重模型即贝叶斯概率模型,分析下沉及其相关因子,基于 GIS 划分了沉陷灾害等级^[41];其优点是考虑地形地貌的影响,发挥了 GIS 的缓冲区分析和空间分析功能,但忽略了建筑物的自身属性。

2013 年 Saeidi 对国际上 6 种主要的建筑物采动损害评价方法进行了对比研究,其中 2 种方法是以建筑物长度与水平变形之间关系确定的图示法等级图,4 种为 3~5 级的损坏分级,以法国某铁矿沉陷区 1 500 栋建筑为例,采用损坏等级归一化处理,尽管分析给出了各方法的可比性、评价结果的安全程度,但并未表征各方法的本质,对比结果不够客观,详见参考文献[42]。

3 建筑物采动损害评价方法的研究进展

3.1 基于脆弱性曲线的评价方法

脆弱性(Vulnerability)来源于自然灾害风险评估,用于衡量承灾体遭受的损害程度。当承灾体的脆

弱性侧重于因灾造成的灾情水平时,通常用致灾和成灾之间的关系曲线或方程表示为脆弱性曲线,有时也称易损性曲线^[43]。1964年White首次提出了脆弱性曲线方法并用于水灾脆弱性评估^[44]。近年来该方法在水灾、地震、台风、滑坡、泥石流、雪崩、海啸等灾害研究中逐渐被推广应用。

2009年Saeidi将脆弱性曲线引入沉陷区建筑物损害评价中,着重解决不同经验方法评估引起的歧义以及损害评估中的不确定性问题^[45]。脆弱性曲线利用了3类输入数据:建筑物的损坏等级、事件强度准则和建筑物类型。损坏等级是按变形值划分的4个或5个等级,事件强度准则可以选用建筑物最敏感的水平变形,而建筑物的类型划分较复杂,要考虑与建筑物抵抗变形关系密切的影响因子。Saeidi将法国Ferriferous盆地Lorraine区的建筑类型按建筑材料与结构、建筑物长度、地基与基础、建筑物形状与对称性划分为4个大类,各大类又分别细分为7,5,9,6个子类,详见表7^[45]。理论上该地区的建筑物类型为 $7 \times 5 \times 9 \times 6 = 1890$ 种。实际上经过归类分析后可分成5类,占全部建筑物的70%。对每一个建筑类型分别建立脆弱性曲线,例如建筑类型为MRMSSR,现场实际统计1600栋典型损坏状况见表8,则按对应的变形值计算平均损坏等级为

$$\mu_D(\varepsilon) = \sum_{i=1}^4 P(D_i) D_i \quad (4)$$

其中, D_i 为损坏等级值,对于四级分级 D_i 分别为1,2,3,4; $P(D_i)$ 为与地表变形值对应的 D_i 损坏等级的概率。

$$P(D_i) = N(D_i) / n \quad (5)$$

其中, $N(D_i)$ 为对应地表变形的 D_i 级损坏建筑物数量; n 为总数量。根据表8计算的平均损坏等级可以通过回归获得连续脆弱性曲线(损坏等级):

$$\mu_D(\varepsilon) = 1.58 \times [1.53 + \arctan(0.43\varepsilon - 1.52)] \quad (6)$$

其中, ε 为地表水平变形值,如图1所示。而达到或超过某一损坏等级的概率为

$$P(\text{Damage} \geq D_i) = 1 - P(\text{Damage} < D_i) \quad (7)$$

$$P(\text{Damage} < D_i) = \sum_j^{i-1} \frac{N(D_j)}{n} = \sum_j^{i-1} P(D_j) \quad (8)$$

脆弱性曲线法在评价精度和易操作性方面较好地折衷了现有经验方法的优点,同时可以考虑多种评价方法进行综合分析,但需要大量的样本数据做支撑,在脆弱性概念界定、指标选取、数据标准、曲线精度等方面仍有待进一步研究。2015年Saeidi进一步考虑开采影响和脆弱性曲线的不确定性,基于GIS开发了

表7 建筑类型划分
Table 7 Building typology

大类	子类/代码	叶类/代码	子类数量
建筑结构 与材料	砖石 结构	质量差的卵石、碎石、土坯结构,无防护措施/MR	7
		质量好的砖石结构,具有可能弱的加强措施/MB	
		强化的砖、混凝土砖结构,具有水平和垂直方向的加强措施/MC	
强化混 凝土 结构	强化混凝土框架结构/CF	5	
	强化混凝土剪力墙结构/CS		
	钢结构/ST 木结构/WO		
建筑物 长度/m	<10/L	5	
	11~20/M		
	21~30/H		
	31~40/V		
	>41/E		
基础与 地基	地基具有或不具有强化混凝土楼板/VB,VS	9	
	简单地基具有或不具有强化混凝土板/SB,SS		
	没有混凝土地板的地下室具有或不具有强化混凝土楼板/CB,CC		
	有混凝土地板的地下室具有或不具有强化混凝土楼板/DB,DS		
筏基础/RE			
形状与 对称性	外形简单,承重墙具有好的或不好的对称性/SR,SN	6	
	外形变化轻微,承重墙具有好的或不好的对称性/SR,SN		
	外形变化复杂,承重墙具有好的或不好的对称性/FR,FN		

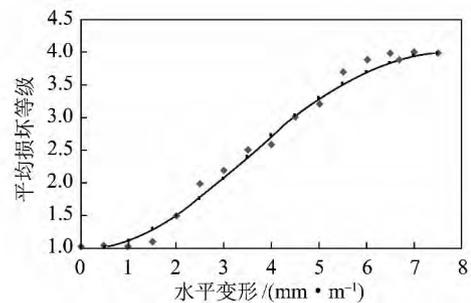


图1 平均损坏等级与回归分析

Fig. 1 Mean damage and regression

开采沉陷损坏等级模拟器(MSDS),可以进行多种可能地质采矿条件下的建筑物损坏等级评估,利用数理统计方法给出了等概率和相对概率条件下灾害强度的数学期望和标准差^[46],有一定的借鉴和参考价值。

表 8 某类建筑物平均损坏等级计算
Table 8 Calculation of mean damage for a type building

等级	水平变形/(mm·m ⁻¹)															
	0	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0	5.5	6.0	6.5	7.0	7.5
D ₁	100	100	100	91	48	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
D ₂	0	0	0	9	52	99	82	48	40	16	1	1	0	0	0	0
D ₃	0	0	0	0	0	0	18	52	60	71	73	26	8	2	2	0
D ₄	0	0	0	0	0	0	0	0	0	13	26	73	92	98	98	100
总数	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
μ _D	1	1	1	1.1	1.5	2	2.2	2.5	2.6	3.0	3.2	3.7	3.9	4	4	4

3.2 基于分类与回归树的评价方法

分类与回归树是由美国统计学家 Breiman 等于 1984 年提出的一种非参数分类与回归方法,简称 CART(Classification and Regression Trees)^[47],它既是一棵二叉树,也是一种决策树,同时也属于数据挖掘的一种方法。1997 年南京地质矿产研究所的张松林对该方法及其应用做了较详细的介绍^[48],目前 CART 已广泛应用于遥感信息提取、土地利用覆盖分类、矿床预测、医疗诊断、古生物化石分类、交通流分析、物种分布、食品科学、个人信用评价、语韵边界识别等自然与社会科学领域。

CART 方法应用包括分类回归树的构造和剪枝 2 个阶段:①在对已知数据集进行系统分析的基础上构建分类与回归的预测准则,不需要预先假设因变量与自变量的关系,根据样本集按照给定标准选择分支属性,利用递归划分法将自变量定义的空间划分为尽可能同质的组别,每一次划分都由自变量的最佳划分值来完成,将数据分成两部分,直到数据不可再分;分支属性的标准可以按信息增益(Information Gain)、熵(Entropy)和基尼指数(Gini Index)等进行选择。②由于分类回归树构造过程中许多分支反映的可能是训练样本中某个结点最优而非全局最优,即构造过程中得到的树并不一定是最简单、最紧凑的决策树;为了防止所建立的树和训练样本的过拟合现象发生,需要进行树剪枝;树剪枝的目的是检测和去掉该类分支,以提高对未知样本集进行分类的准确性;一般通过计算 CART 树的复杂度、误分类成本和成本复杂性来实现。

2014 年波兰的 Malinowska 将 CART 方法引入采动建筑物损害评价中^[49],采用了上西里西亚 2 处地面沉陷导致建筑物损坏的 ZB1 和 ZB2 区为样本,建筑物中 80% 为一、二层带地下室的砖结构民宅,80% 建造于 1985 年之前。ZB1 区作为训练样本,共有 372 栋房屋,其中有 141 栋受到了采动损坏。第 1

步是训练样本预处理,按建筑物的结构类型划分成 7 类变量,即承重墙损坏、隔墙损坏、天花板损坏、瓦片掉落、木制品损坏、墙皮脱落和烟囱管道损坏;前 3 种变量基于裂缝宽度、分布与方向的发展演化又细分为无、轻微、中等、严重 4 个损坏等级,后 4 种作为布尔变量(真/损坏、假/无损坏)统称为功能损坏;从而建立损坏等级与建筑物结构、功能损坏的对应关系准则。第 2 步是寻找决定建筑物损坏发生、发展的独立风险因子:一类是与建筑物相关的包括定量的修建年代、长度、层数和定性的保护措施、功能(住宅、农业、仓库);一类是引起建筑物破坏的地表变形值;分析结果表明,影响最大的风险因子是地表水平变形值和建筑物修建年代。第 3 步是构建分类树:141 个训练样本分为 4 个损坏等级,按照修建年代和分界水平变形值生成了具有 15 层 153 个叶节点的最大可能树;交叉验证和剪枝后得到的正确分类误差最小的最优树如图 2 所示,对应的损坏等级分区如图 3 所示。

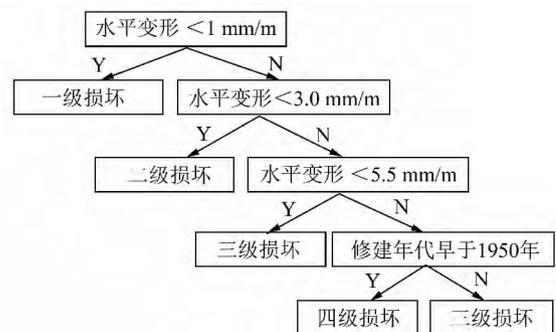
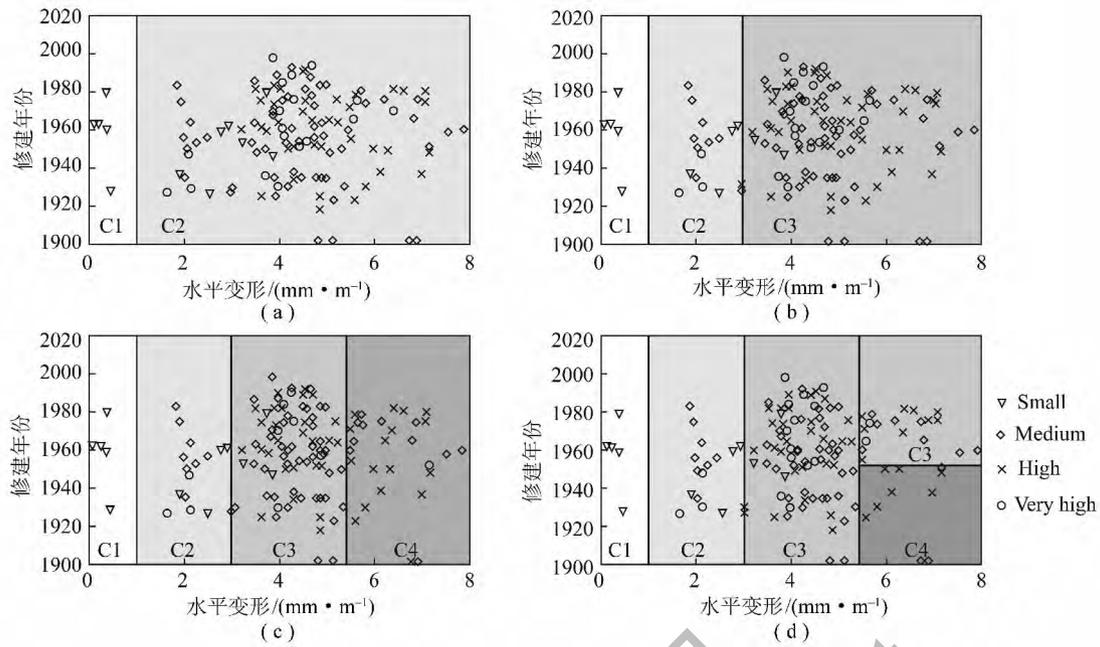


图 2 最终分类树^[49]

Fig. 2 Ultimate classification tree^[49]

ZB2 区为检验验证样本,共有 518 栋建筑物,其中实地调查发现损坏的有 127 栋,I、II、III 和 IV 级损坏房屋分别为 32、46、43 和 6 栋;应用分类回归树确定的 I、II、III 和 IV 级损坏房屋分别为 0、8、35 和 0 座,而采用波兰点数法得到的 I、II、III 和 IV 级破坏房屋分别为 5、10 和 0 座。尽管对于 I、II 损坏的验证

图3 损坏等级分区^[49]Fig. 3 Classification division of building damage^[49]

结果都较差,可能与预计方法的选择以及变形值预计精度有关,但分类回归树方法总体评价精度优于波兰基于主观经验的点数法。

研究认为,分类回归树以二叉决策树的形式给出,简单直观、误差率低,受少数异常数据影响小;当数据越复杂、变量越多,CART优越性就越显著;同时可对建筑物长度、高度或层数等多种致灾因子进行综合分析评判。

4 结论与展望

(1) 我国采动建筑物损坏等级划分和临界变形值的确定一致沿用20世纪七八十年代的成果,目前的村庄建筑物结构与类型等已发生质变,二层、三层框架结构、设有顶底圈梁、构造柱的楼房已经成为建设主流趋势,急需有关部门牵头组织相关院所开展系统的产学研联合攻关,充分考虑建筑物的自身属性和特征,建立符合现势性要求的、分级别的指标体系,为科学、合理、公正地开展建筑物损害评价提供技术支撑。

(2) 目前我国的建筑物损坏等级是按地表变形值大小硬性划分,分级值附近的微小变化会产生两个不同的损坏等级,国内外类似的等级划分是否合理?建筑物抵抗地表拉压变形能力不同,是否需要按拉伸和压缩变形分别建立评价指标体系等,仍有待进一步研究和商榷。

(3) 目前的评价体系中尽管引入了模糊数学、可拓学、神经网络、聚类分析、熵权法等理论,考虑了其

中的某些模糊性和不确定性,但仍未突破传统评价体系的框架,不能充分考虑建筑物自身属性特征;即使采用GIS也只是部分考虑了地形地貌等对建筑物损害的影响,没有充分利用其强大的缓冲区分析和空间分析功能,该领域的理论研究和应用尚有潜力可挖。

(4) 建筑物采动损害评价的发展趋势是在考虑建筑物自身属性特征的同时建立科学合理的损坏等级分类指标体系。尽管波兰的点数法评价系统充分考虑了建筑结构、建筑材料、地基与基础、几何形态参数、防护措施有无等属性特征,但依靠专家的主观打分,评价结果的好坏完全取决于评价人员的主观经验;脆弱性指数或曲线通过对评价区域的建筑物进行分类,依靠大量的实测数据按损坏概率计算平均损坏概率来实现评价;分类回归树方法同样使用了大样本数据,可以考虑建筑物修建年代、建筑物长度等属性信息进行单因素评价或多因素综合评价。这些方法的研究表明,分类建立建筑物损坏等级标准是未来采动损害评价的发展方向;同时证明采动建筑物的损坏与否不仅仅取决于地表变形值大小,也与建筑物的自身特性密切相关。

(5) 采动建筑物损坏的另一个重要影响因素是特定地质采矿条件下的地表移动变形预计值,预计模型的选择、预计参数的确定以及预计结果的可靠性等仍需开展研究;目前大多数研究者都采用地表移动终态的变形值进行损害程度评价,而采动过程中由于建筑物所处位置不同,其可能遭受拉伸、压缩变形等交替影响^[50],建筑物承受的终态变形值与采动过程中

的动态变形值差异较大,表明科学的建筑物损坏评价应与地表移动变形的动态全过程相结合^[51-53]。

(6) 采动建筑物损坏机理、机制研究目前仍有欠缺,特别是采动建筑物地基基础的协同作用、应力与变形的传递关系等。目前国内外研究已经取得一些新进展^[54-55],期待更多的研究成果为采动建筑物损害评价提供理论支撑。

参考文献:

- [1] 何国清,杨伦,凌庚娣,等. 矿山开采沉陷学[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社,1991.
- [2] Peng S. Surface subsidence engineering [M]. New York: SME, 1992.
- [3] 焦传武. 我国村庄下采煤的可行性[J]. 煤炭科学技术,1982(2): 8-14.
Jiao Chuanwu. Possibility of coal mining under villages in China [J]. Coal Science and Technology, 1982(2): 8-14.
- [4] 国家煤炭工业局. 建筑物、水体、铁路及主要井巷煤柱留设与压煤开采规程[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2000.
- [5] 邹友峰,邓喀中,马伟民. 矿山开采沉陷工程[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2003.
- [6] Anon. The movements of the rock masses and the surface in the main coalfields of the Soviet Union [M]. Moscow: General Institute of Mine Surveying Ugletekhizdat, 1958: 248-250.
- [7] Anon. Subsidence engineers handbook, national coal board[M]. London: Mining Department, 1975: 110-112.
- [8] Adamek V, Jeran P. Evaluation of existing predictive methods for mine subsidence in the US[A]. Proceedings 1st Annual Conference on Ground Control in Mining[C]. West Virginia University, Morgantown, WV, 1981: 209-219.
- [9] Adamek V, Jeran P. Evaluation of surface deformation characteristics over longwall panels in the Northern Appalachian Coalfield [A]. Proceedings International Symposium State-of-the-Art of Ground Control in Longwall Mining and Mining Subsidence, SME-AIME [C]. New York, 1982: 183-197.
- [10] Attewell P. Ground movements caused by tunnelling in soil, large ground movements and structures [A]. Proceedings of Conference at University of Wales Institute of Science and Technology [C]. New York: Wiley, 1977: 812-948.
- [11] Beevers C, Wardell K. Recent research in mining subsidence [J]. Transactions of the Institution of Mining Engineers, 1954, 114: 223-253.
- [12] Horne H, Lambe T. Settlement of buildings on the MIT campus [J]. Journal of Soil Mechanics Foundation and Engineer Division, ASCE, 1964, 90(SM5): 181-196.
- [13] Littlejohn G. Observations of brick walls subjected to mining subsidence [A]. Proceedings Conference on Settlement of Structures [C]. Cambridge, 1975: 384-393.
- [14] Meyerhoof G. Some recent foundation research and its application to design [J]. Structural Engineer, 1953, 31: 151-167.
- [15] Nishida T. The effect of old coal working on the deformation of newly constructed structures [A]. Presentation at 1st International SME - AIME Meeting [C]. Honolulu, HI, 1982: 82-326.
- [16] O'Rourke T, Cording E, Boscardin M. The ground movements related to braced excavation and their influence on adjacent buildings [M]. Final Report, US Department of Transportation, Contract No. DOT-FR-30022, NTIS PB 267311, Aug., 1976: 135-139.
- [17] O'Rourke T, Cording E, Boscardin M. Damage to brick-bearing wall structures caused by adjacent braced cuts and tunnels, large ground movements and structures [A]. Proceedings conference at university of wales institute of science and technology [C]. Cardiff, 1977: 647-671.
- [18] Polshin E, Tokar R. Maximum allowable non-uniform settlement of structures [A]. Proceedings 4th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering [C]. London, 1957: 402-405.
- [19] Priest A, Orchard R. Recent subsidence research in the Nottinghamshire and Derbyshire coal field [J]. Transactions Institute of Mining Engineers, 1957, 117: 499-515.
- [20] Rigby C, Dekoma C. Crack resistant housing [J]. Public Works of South Africa, 1952, 11(95): 25-46.
- [21] Singh T, Gupta R. Influence of parameters of packing on surface protection [J]. Journal of Mines, Metals and Fuels, 1968, 16(2): 37-52.
- [22] Skempton A, MacDonald D. Allowable settlement of buildings [A]. Proceedings Institution of Civil Engineers [C]. 1956: 727-768.
- [23] Sowers G. Shallow foundations, foundation engineering [M]. New York: McGraw-Hill, 1962.
- [24] Starzewski K. Discussion of allowable settlement of structures [A]. Proceedings Conference on Settlement of Structures [C]. Cambridge: Cambridge University, 1974: 808-810.
- [25] Thorburn S, Reid W. Incipient failure and demolition of two story dwellings due to large ground movements, large ground movements and structures [A]. Proceedings Conference at University of Wales, Institute of Science and Technology [C]. Cardiff, 1977: 87-99.
- [26] Wood R. Studies in composite construction: Part 1. Composite action of brick panel walls supported on reinforced concrete beams [J]. National Building Studies Research Paper, 1952, 13: 10-23.
- [27] Yokel F. Guidelines for housing construction in mine subsidence areas [A]. International Conference on Evaluation and Prediction of Subsidence [C]. Pensacola Beach, FL, 1978: 129-139.
- [28] Singh M. Mine subsidence [M]. New York: SME, 1993: 8-71.
- [29] Wagner H, Schumann H. Surface effect of total coal seam extractions by underground mining methods [J]. Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy, 1991, 91: 221-231.
- [30] 胡炳南. 建筑物采动破坏程度的模糊综合评判 [J]. 煤矿开采, 1993(3): 23-27.
Hu Bingnan. Fuzzy evaluation of mining induced damage of buildings [J]. Coal Mining Technology, 1993(3): 23-27.
- [31] 刘立民, 刘汉龙, 陈爱道, 等. 建筑物塌陷破坏评价的物元模型及其应用 [J]. 防灾减灾工程学报, 2003, 23(2): 94-99.
Liu Limin, Liu Hanlong, Chen Aidao, et al. Matter-element evaluation method and application to damage buildings caused by ground subsidence [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2003, 23(2): 94-99.

- [32] 郭文兵, 吴财芳, 邓喀中. 开采影响下建筑物损害程度的人工神经网络预测模型[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(4): 583-587.
Guo Wenbing, Wu Caifang, Deng Kazhong. Artificial neural network prediction model of mining-induced damage of buildings [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(4): 583-587.
- [33] 郭文兵, 刘义新, 李小红. 采动影响下建筑物损害程度的模糊聚类分析[J]. 采矿与安全工程学报, 2007, 24(3): 288-292.
Guo Wenbing, Liu Yixin, Li Xiaoshuang. Fuzzy clustering analysis of mining induced damages of buildings [J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2007, 24(3): 288-292.
- [34] 王正帅, 韩奎峰, 邓喀中. 建筑物采动损害的熵权模糊识别模型[J]. 煤矿开采, 2013, 18(5): 17-20.
Wang Zhengshuai, Han Kuifeng, Deng Kazhong. Entropy-weight fuzzy recognition model of buildings influenced by mining [J]. Coal Mining Technology, 2013, 18(5): 17-20.
- [35] 赵德深, 徐孟林, 夏洪春. 基于熵权层次分析法的导水裂缝带高度预测的研究[J]. 煤矿开采, 2013, 18(1): 8-11.
Zhao Deshen, Xu Menglin, Xia Hongchun. Prediction of water-induced fissure zone height based on entropy weight-AHP [J]. Coal Mining Technology, 2013, 18(1): 8-11.
- [36] 梁桂兰, 徐卫亚, 谈小龙. 基于熵权的可拓理论在岩体质量评价中的应用[J]. 岩土力学, 2010, 31(2): 535-540.
Liang Guilan, Xu Weiya, Tan Xiaolong. Application of extension theory based on entropy weight to rock quality evaluation [J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(2): 535-540.
- [37] 饶正宝, 王旭春, 卢雷. 基于 GIS 的沉陷区建筑物损害可视化评价方法[J]. 青岛理工大学学报, 2006, 27(1): 24-27.
Rao Zhengbao, Wang Xuchun, Lu Lei. GIS-based visualized damage evaluation method of constructions in subsidence area [J]. Journal of Qingdao Technological University, 2006, 27(1): 24-27.
- [38] 赵兵朝, 余学义, 赵继展. 开采沉陷预计评价系统的可视化研究[J]. 煤田地质与勘探, 2006, 34(4): 61-64.
Zhao Bingchao, Yu Xueyi, Zhao Jizhan. Visual study on prediction evaluation system of mining damage [J]. Coal Geology & Exploration, 2006, 34(4): 61-64.
- [39] Djameluddin I, Mitani Y, Esaki T. Evaluation of ground movement and damage to structures from Chinese coal mining using a new GIS coupling model [J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2011, 48: 380-393.
- [40] Malinowska A, Hejmanowski R. Building damage risk assessment on mining terrains in Poland with GIS application [J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2010, 47: 238-245.
- [41] Oh H, Lee S. Assessment of ground subsidence using GIS and the weights-of-evidence model [J]. Engineering Geology, 2010, 115: 36-48.
- [42] Saeidi A, Deck O, Verdel T. Comparison of building damage assessment methods for risk analysis in mining subsidence regions [J]. Geotech. Geol. Eng., 2013, 31: 1073-1088.
- [43] 周瑶, 王静爱. 自然灾害脆弱性曲线研究进展[J]. 地球科学进展, 2012, 27(4): 435-440.
Zhou Yao, Wang Jing'ai. A review on development of vulnerability curve of natural disaster [J]. Advances in Earth Science, 2012, 27(4): 435-440.
- [44] Smith D. Flood damage estimation—a review of urban stage-damage curves and loss functions [J]. Water SA Manuscript, 1994, 20(3): 231-238.
- [45] Saeidi A, Deck O, Verdel T. Development of building vulnerability functions in subsidence regions from empirical methods [J]. Engineering Structures, 2009, 31: 2275-2286.
- [46] Saeidi A, Deck O, Alheib M et al. Development of a damage simulator for the probabilistic assessment of building vulnerability in subsidence areas [J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2015, 73: 42-53.
- [47] Breiman L, Fredman J, Olshen R et al. Classification and regression trees [M]. New York: Chapman & Hall, 1984.
- [48] 张松林. CART—分类与回归树方法介绍[J]. 火山地质与矿产, 1997, 18(1): 67-75.
Zhang Songlin. An introduction to the methodology of CART—Classification and Regression Trees [J]. Volcanology & Mineral Resources, 1997, 18(1): 67-75.
- [49] Malinowska A. Classification and regression tree theory application for assessment of building damage caused by surface deformation [J]. Natural Hazards, 2014, 97: 317-334.
- [50] 克拉茨 H. 采动损害及其防护 [M]. 马伟民, 译. 北京: 煤炭工业出版社, 1984.
- [51] Cui Ximin, Wang Jiachen, Liu Yisheng. Prediction of progressive surface subsidence above longwall coal mining using a time function [J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2001, 38: 1057-1063.
- [52] 崔希民, 缪协兴, 赵英利. 论地表移动过程的时间函数[J]. 煤炭学报, 1999, 24(5): 453-456.
Cui Ximin, Miao Xiexing, Zhao Yingli. Discussion on the time function of time dependent surface movement [J]. Journal of China Coal Society, 1999, 24(5): 453-456.
- [53] 彭小沾, 崔希民, 臧永强. 时间函数与地表动态移动变形规律研究[J]. 北京科技大学学报, 2004, 26(4): 341-344.
Peng Xiaozhan, Cui Ximin, Zang Yongqiang. Time function and prediction of progressive surface movements and deformations [J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2004, 26(4): 341-344.
- [54] 邓喀中, 郭广礼, 谭志祥. 采动区建筑物地基、基础协同作用特性研究[J]. 煤炭学报, 2001, 26(6): 601-605.
Deng Kazhong, Guo Guangli, Tan Zhixiang. Study on the properties of coordination of the base and foundation of the building above mining subsidence areas [J]. Journal of China Coal Society, 2001, 26(6): 601-605.
- [55] Deck O, Heib M, Homand F. Taking the soil-structure interaction into account in assessing the loading of a structure in a mining subsidence area [J]. Engineering Structures, 2003, 25: 435-448.