文章编号:1674-2869(2024)03-0343-06

基于压力-状态-响应和云模型的危废处置中心安全韧性评价

王 美[1],李旭康[2],胡立嵩*[1],冷朝阳[1]
1. 武汉工程大学资源与安全工程学院,湖北 武汉 430074;
2. 武汉世纪天源环保技术有限公司,湖北 武汉 430074

摘 要:为提高危险废物处置中心的系统风险抵抗能力,保证其处置过程安全进行,以武汉某危险废物处置中心为研究对象,基于压力-状态-响应(PSR)模型从压力、状态以及响应3个方面构建危险废物处置中心的安全韧性评价指标体系,运用层次分析法和熵权法分别得出主观权重值和客观权重值,并运用组合赋权法得出各指标组合权重值,根据云模型得出危险废物处置中心的安全韧性等级为"良好"。结果表明,基于PSR模型的安全韧性评价模型对于系统安全评价具有一定的科学性和借鉴意义。

关键词:危险废物;Pressure-State-Response模型;组合赋权;云模型;安全韧性
中图分类号:X705 **文献标识码**:A **DOI**:10.19843/j.cnki.CN42-1779/TQ.202310028

Safety resilience evaluation of hazardous waste disposal center based on pressure-state-response and cloud model

WANG Mei[1], *LI Xukang*[2], *HU Lisong*[*1], *LENG Chaoyang*[1]
1. School of Resources and Safety Engineering, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430074, China;
2. Wuhan Centruy Tianyuan Environmental Protetion Technology Co., Ltd, Wuhan 430074, China

Abstract: To enhance the systemic risk resilience and ensure the safe disposal process of a hazardous waste disposal center, taking one center in Wuhan as the research object, based on the Pressure-State-Response (PSR) model, we developed a safety resilience evaluation index system for the hazardous waste disposal center, considering three aspects: pressure, state, and response. The subjective and objective weight values were obtained by using an analytic hierarchy process and an entropy weight method, and the combined weight values of each index were obtained by using the combined weight method. Using cloud model analysis, we determined that the safety resilience level of the hazardous waste disposal center was "good". These results indicate that the safety resilience evaluation model based on the PSR model is scientifically valid and provides valuable insights for system safety assessment.

Keywords: hazardous waste; pressure-state-response model; portfolio empowerment; cloud model; safety resilience

随着工业化进程的快速发展,危险废物数量急剧增加。危险废物是指列入《国家危险废物名录》,或者根据国家规定的危险废物鉴别标准和鉴别方法认定的具有腐蚀性、毒性、易燃性、反应性或者感染性等的一种或者几种危险特性的固体废物(包括液态废物)[1]。2021年,在《排放源统计调

收稿日期:2023-10-30
基金项目:武汉工程大学研究生教育创新基金(CX2022580)
作者简介:王 美,硕士研究生。Email:13941832002 @163.com
***通信作者**:胡立嵩,博士,教授。Email:289234646@qq.com
引文格式:王美,李旭康,胡立嵩,等. 基于压力-状态-响应和云模型的危废处置中心安全韧性评价[J]. 武汉工程大学学报,2024,46(3):343-348.

查制度》(国统制〔2021〕18号)确定的统计调查范围内,全国工业危险废物产生量为8 653.6万t,利用处置量为8 461.2万t。

随着行业中涌现了大量的危险废物处置单位,因此对危废运输、贮存及处置的过程中如何进行安全管理显得尤为重要。钱若晨等[2]以湖北省重点危险废物产生企业为调研对象,研究危险废物全生命周期的环境安全风险评估方法,构建危险废物全生命周期的环境安全风险分级管控体系,进一步提升政府对危险废物环境安全风险进行全面、针对性的管控,避免重特大事故的发生。张伯强等[3]以江苏省危险废物填埋场为例,构建了含有16个评价指标的指标体系,分析其权重,建立综合指数风险评价模型,利用迭置指数法进行风险评价等级划分,实践性和指导性较强。

韧性作为当下学者研究的热点,意在强调系统遭受冲击后复原的能力。韧性一词起源于拉丁语[4],最初出现在工程系统中,后来广泛应用于生态系统、交通运输系统、食品安全系统和城市灾害系统,并基于此形成了韧性科学这一理念[5]。与传统的风险评估不同的是,韧性评估由“环境外”转入“系统内”,强调系统吸收变化、缓冲扰动、维持恢复平衡状态并优化提升自身的能力。在安全工程领域,黄浪等[6-7]认为安全韧性作为系统的一个关键属性,衡量的是系统应对不确定性干扰的缓冲、抵抗、吸收以及恢复水平,以事前–事中–事后为主线,系统安全韧性概念框架。杜修力等[8]为降低地铁系统安全运营风险,从韧性城市的视角基于地铁系统物理构成要素的五个基本维度出发提出了一种针对城市地铁系统安全运营的评价指标体系。本文将引入压力-状态-响应(pressure-state-response,PSR)模型构建危险废物焚烧处置中心安全韧性水平评价指标体系,通过主客观赋权法结合云模型对危废处置中心的安全韧性进行有效的评估,判断出该中心对突发事故的应对能力,并发现系统现阶段的脆弱之处,从而给出相应的整改和优化措施,提高该处置中心安全系统的韧性水平。

1 评价指标体系的构建

1.1 PSR评价模型

PSR模型源于加拿大统计学家Rapport于1979年提出的压力-响应框架[9],后由联合国经济合作与发展组织将其应用于生态环境方面的评价,并进一步发展到普遍意义上的PSR模型。后来PSR模型的思想逐渐应用于城市公共安全、城市脆弱性、基础设施韧性等领域[9-10]。

1.2 构建评价指标体系

按照科学性、导向性、针对性和易操作性等原则通过对压力、状态、响应3个方面进行指标体系分类,从而构建评价指标体系。其中“压力”表征系统所面临的内外界风险威胁和干扰,“状态”表征系统在风险的冲击和扰动下所展现的自身状况,“响应”表征系统在受到干扰后的自调节能力和做出的正向反馈,分别与系统安全的“扰动前-扰动中-扰动后”的韧性过程对应,最终实现系统有机循环的动态提升。

表1 安全韧性评价指标体系

Tab. 1 Safety resilience evaluation index system

目标层	一级指标	二级指标
安全韧性	压力韧性	自然因素
		外界危险废物产生量
		焚烧设施/设备技术
		危险废物的贮存
		危险废物的有毒有害性质
		中心设施布局合理性
		交通运输
		操作人员的安全意识
	状态韧性	生产设备及辅助设备表
		机器设备故障率
		焚烧工艺
		废物存储、运输和处理
		生产工艺流程及产排污节点
		环境及人员
		系统功能
	响应韧性	火灾、爆炸事故救援能力
		危险废物对人员伤亡的急救措施
		事故救援时间
		设备故障及灾后修复时间
		管理层决策和执行度
		应急预案完备度
		事故发生后的信息整合度

2 主客观组合赋权

2.1 层次分析法

层次分析法是一种评价方法,它通过9级标度法对各指标之间的相互重要性进行比较,并根据专家经验建立判断矩阵,从而进行主观权重计算。为确保评价结果的可信度,需要对计算的结果进行一致性检验。

2.2　熵权法

熵权法是一种常见的客观赋权方法,根据实测数据的差异程度和提供的信息量多少来确定评价指标,最终得到各个指标的权重值。具体步骤如下:(1)构建评价矩阵;(2)为避免指标量度和值域范围不同而导致的结果不准确的问题,需对正向指标和负向指标进行数据归一化处理,将评价矩阵$\boldsymbol{X}$进行归一化处理得到归一化矩阵$\boldsymbol{V}$;(3)计算第i个专家对于第j项指标的评价比重p_{ij};(4)计算各指标的信息熵e_j;(5)计算权重,当$p_{ij}=0$时,需要对各指标客观系数进行修正[13]。

对熵权法和层次分析法计算出的权重进行处理,得到组合权重,公式如下:

$$\omega_j=\frac{\sqrt{a_jb_j}}{\sum_{i=1}^{m}\sqrt{a_jb_j}} \tag{1}$$

式中:a_j——层次分析法所得权重;b_j——熵权法所得权重。

3　云模型的构建

云模型是一种处理定性概念与定量描述之间关系的模型,能同时反映事物的随机性和模糊性,具有较好的灵活性和适应能力。云模型有3个数字特征值,分别是期望Ex、熵En和超熵He,云的数字特征值表示为(Ex,En,He)。正态云发生器分为正向发生器和逆向发生器,是云模型使定性与定量建立相互联系的映射关系的算法。

云模型评价法与模糊数学综合评价法评价结果与实际打分数值的误差基本相同,说明云模型评价法评价结果基本贴合实际,且准确性可靠[14]。因此本文选取云模型评价方法。

3.1　确立标准云C_v

以评价划分的5个级别评语集为基础建立标准云模型,即为标准云C_v,数字特征值计算公式如下:

$$Ex_v=\frac{C_{\max}+xC_{\min}}{2} \tag{2}$$

$$En_v=\frac{C_{\max}-C_{\min}}{6} \tag{3}$$

$$He_v=\mathrm{K} \tag{4}$$

式中:$C_{\max}$——划分区间分值的上限;$C_{\min}$——划分区间分值的下限;K为常数,可依据需要进行调整。

3.2　确定评价云C_{ui}

评价云C_{ui}的生成需要依据第i个二级指标的数据值,评价云C_{ui}的数值特征值计算公式如式(5-7)所示。

$$Ex_{ui}=\bar{X}=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}x_i \tag{5}$$

$$En_{ui}=\sqrt{\frac{\pi}{2}}\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left|x_i-Ex_{ui}\right| \tag{6}$$

$$He_{ui}=\sqrt{\left|En_{ui}{}^2-S^2\right|} \tag{7}$$

其中,x_i为第i个指标的数据值,S^2为样本方差。

3.3　确定综合云C

综合云的生成依据评价云与其权重,计算公式如公式(8-10)所示。

$$Ex=\sum_{i=1}^{n}\left(Ex_{ui}\times\omega_i\right) \tag{8}$$

$$En=\sqrt{\sum_{i=1}^{n}En_{ui}{}^2\times w_i} \tag{9}$$

$$He=\sum_{i=1}^{n}\left(He_{ui}\times w_i\right) \tag{10}$$

其中,w_i为指标的综合权重,即组合权重。

4　实例分析

武汉市千子山循环经济产业园危险废物处置项目主要适应湖北省内危险废物的处置规模需求对武汉市及周边地区大型企业在经营生产过程中产生的危险废物进行处理处置。危险废物集中处置中心工程不仅规范了危险废物的安全处理处置,而且从根本上改变危险废物污染环境,缓解废物危害人体健康的现状。因此对危险废物处置中心进行安全评价有必要和实际意义。

4.1　确定组合权重

运用层次分析法来计算评价指标的主观权重,运用熵权法来计算各指标客观权重。根据式(1)计算出综合权重,指标权重计算结果见表2和表3。

表2　压力韧性指标组内综合权重

Tab. 2　Comprehensive weight value within stress resilience index group

一级指标	二级指标	AHP法	熵权法	组合权重
压力韧性	自然因素	0.033 5	0.117 0	0.065 4
	外界危险废物产生量	0.160 4	0.132 5	0.152 4
	焚烧设施/设备技术	0.064 2	0.123 0	0.092 9
	危险废物的贮存	0.210 5	0.144 6	0.182 4
	危险废物的有毒有害性质	0.278 0	0.134 3	0.202 0
	中心设施布局合理性	0.076 1	0.131 5	0.104 6
	交通运输	0.049 4	0.105 2	0.075 4
	操作人员的安全意识	0.128 0	0.111 8	0.125 0

因后续云模型计算需要,需求得3个一级指标内的各二级指标的组合综合权重,因文章篇幅问题,下面以一级指标压力韧性为例,求得其组合综合权重,利用MATLAB计算出云模型的参数。

表3 目标层组内综合权重

Tab. 3 Comprehensive weight values in target layer group

	一级指标	AHP法	熵权法	综合权重
目标层	压力韧性	0.212 7	0.299 5	0.254 0
	状态韧性	0.329 1	0.332 6	0.332 9
	响应韧性	0.458 2	0.367 9	0.413 1

4.2 云模型的韧性评价

4.2.1 *评价集与标准云的确定* 综合文献研究和专家意见,将危险废物处置中心的安全韧性评价指标按照科学性等原则将评价等级划分为5级,分别表示差等、较弱、中等、良好、优秀5个级别[15],见表4所示。取 k=0.02,计算得到标准云数值特征值,见表5。借助 MATLAB 软件得到标准云图如图1所示。

4.2.2 *评价云与综合云的确定* (1)二级指标评价云计算。

根据评分结果,计算出各二级指标的数值特征值,借助MATLAB软件得出结果,见表6。

表4 安全韧性评价等级

Tab. 4 Safety resilience evaluation grade

等级	差等	较弱	中等	良好	优秀
指标分值	[0,2)	[2,4)	[4,6)	[6,8)	[8,10]

表5 标准云参数特征值

Tab. 5 Characteristic values of standard cloud parameters

等级	区间	*Ex*	*En*	*He*
差等	[0,2)	1	0.333 3	0.02
较弱	[2,4)	3	0.333 3	0.02
中等	[4,6)	5	0.333 3	0.02
良好	[6,8)	7	0.333 3	0.02
优秀	[8,10]	9	0.333 3	0.02

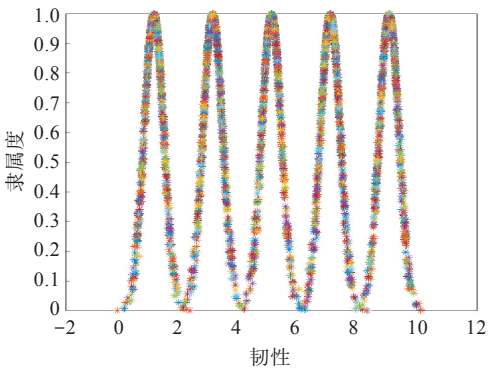

图1 标准云图

Fig. 1 Standard cloud image

表6 二级指标评价云

Tab. 6 Cloud evaluation by secondary indicators

二级指标	组合权重	评价云(*Ex*,*En*,*He*)
自然因素	0.065 4	(6.800 0,0.802 1,0.237 9)
外界危险废物产生量	0.152 4	(7.400 0,0.651 7,0.016 0)
焚烧设施/设备技术	0.092 9	(7.100 0,0.651 7,0.353 9)
危险废物的贮存	0.182 4	(8.100 0,0.651 7,0.353 9)
危险废物的有毒有害性质	0.202 0	(7.800 0,0.802 1,0.237 9)
中心设施布局合理性	0.104 6	(7.500 0,0.501 3,0.036 4)
交通运输	0.075 4	(6.400 0,0.902 4,0.332 7)
操作人员的安全意识	0.125 0	(6.400 0,0.902 4,0.332 7)
生产设备及辅助设备表	0.104 7	(6.500 0,1.002 7,0.494 7)
机器设备故障率	0.153 9	(7.100 0,0.651 7,0.353 9)
焚烧工艺	0.123 3	(6.700 0,1.203 2,0.048 5)
废物存储、运输和处理	0.216 3	(8.100 0,0.651 7,0.353 9)
生产工艺流程及产排污节点	0.142 8	(6.500 0,1.002 7,0.494 7)
环境及人员	0.162 8	(6.700 0,1.203 2,0.048 5)
系统功能	0.096 2	(6.200 0,0.802 1,0.237 9)
火灾、爆炸事故救援能力	0.173 5	(8.000 0,0.501 3,0.351 7)
危险废物对人员伤亡的急救措施	0.121 2	(7.400 0,0.651 7,0.016 0)
事故救援时间	0.164 9	(7.600 0,0.902 4,0.332 7)
设备故障及灾后修复时间	0.126 9	(7.400 0,0.651 7,0.016 0)
管理层决策和执行度	0.136 3	(7.100 0,0.651 7,0.353 9)
应急预案完备度	0.173 2	(8.200 0,0.551 5,0.144 5)
事故发生后的信息整合度	0.103 9	(7.200 0,0.802 1,0.426 1)

(2)一级指标评价云计算。

将各二级指标特征数值和相对应的权重,可得到一级指标的特征值,结果见表7。

表7　一级指标评价云

Tab. 7　First level index evaluation cloud

一级评价指标	*Ex*	*En*	*He*
压力韧性	7.351 4	0.737 0	0.233 9
状态韧性	6.966 8	0.939 2	0.290 2
响应韧性	7.614 0	0.678 8	0.237 4

(3)目标层综合评价云。

运用一级指标评价过程,将各一级指标的特征数值和对应的权重代入计算,即可得到目标层A的评价云A(7.331 9,0.788 6,0.254 1)。

4.2.3　云图绘制　利用MATLAB软件绘制出隶属度云图的标准云图和评价云图,将其放在同一个平面坐标系内,进行更直观的对比,参照标准云图,基于最大相似度原则观察各个评价云图的位置分布情况[16]。各级指标的评价云图和标准云图的对比图详见图2,因二级指标数量较多,在此只展示一级指标的评价云与标准云对比图。

根据表6中二级指标评价云中的特征值可以得出,二级指标中的危险废物的贮存,废物存储、运输和处理,火灾、爆炸事故救援能力和应急预案完备度4个指标云滴分布在8~10之间属于优秀范围内。且目标层的评价云为A(7.331 9,0.788 6,0.254 1),因此该焚烧处置中心的整体安全韧性评估得分为7.331 9,按照等级区间的划分,可知该中心安全韧性等级水平为良好,与实际情况相符,证明该评价方法可适用安全韧性的评价也适用于该评价对象。

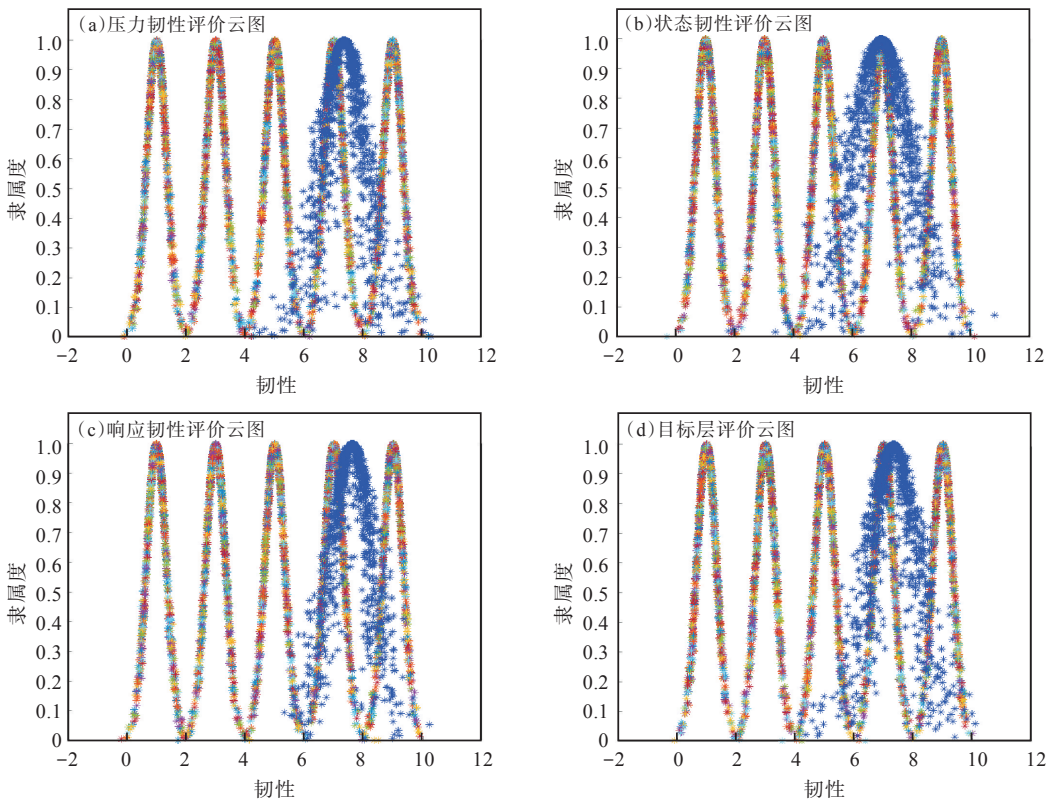

图2　各级指标评价云图

Fig. 2　Cloud map of evaluation of indicators at all levels

5　结　论

本文以安全韧性为研究对象,基于PSR模型以某危险废物焚烧处置中心为例,构建安全韧性评价体系,采用主客观组合赋权和云模型法进行综合评价安全韧性。本文得出的主要研究结论如下:

(1)选取武汉某经济产业园区内的危险废物焚烧处置中心作为研究对象,结合安全工程学原理进行风险因素辨识,引入PSR模型构建安全韧性评价指标体系,可得知PSR模型可应用于安全韧性理论进行安全评价。

(2)利用云模型进行安全韧性评价,云模型结合了模数数学和概率论的特点,可以较为准确地评价对象所处的安全等级范围,根据综合云图显

示表明该危废处置中心的整体安全韧性等级为良好，与该中心实际情况符合，即表示该安全韧性评价模型对于系统安全评价具有一定的科学性和借鉴意义。

参考文献

[1] 姜杰.我国危险废物处置及管理现状[J].安全、健康和环境，2019，19(5)：52-54.

[2] 钱若晨，王先华，王彪，等.基于多种评估模型耦合的危险废物产生企业环境安全风险评估[J].工业安全与环保，2023，49(9)：23-28.

[3] 张伯强，席北斗，高柏，等.基于层次分析法的模糊综合评判在危险废物填埋场场址比选中的应用[J].环境工程技术学报，2016，6(3)：275-283.

[4] 冯真，龙思杰，胡骏嵩，等.中国工业危险废物现状调查及利用处置对策[J].化工管理，2023(24)：61-64.

[5] KLEIN R J T，NICHOLLS R J，THOMALLA F. Resilience to natural hazards：how useful is this concept [J]. Environmental Hazards，2003，5(1)：35-45.

[6] 黄浪，吴超，王秉.系统安全韧性的塑造与评估建模[J].中国安全生产科学技术，2016，12(12)：15-21.

[7] 黄浪，吴超，杨冕，等.韧性理论在安全科学领域中的应用[J].中国安全科学学报，2017，27(3)：1-6.

[8] 杜修力，张洋，缪惠全，等.韧性城市视角下地铁系统安全运营评价指标体系[J].自然灾害学报，2023，32(3)：1-13.

[9] RAPPORT D J，FRIEND A M. Towards a comprehensive framework for environmental statistics：a stress-response approach [M]. Ottawa：Statistics Canada，1979.

[10] 李葛，齐普荣，李寻昌，等.基于PSR层次分析模型-BP神经网络的城市安全评价[J].灾害学，2020，35(3)：224-229.

[11] 杨睿.基于PSR模型的临洮县县城基础设施韧性研究[D].兰州：兰州交通大学，2021.

[12] 袁海平，张羽，熊礼军，等.基于组合权重—集对分析的地压风险预评估[J].矿业安全与环保，2022，49(1)：71-76.

[13] 仝瑞刚，曹庆贵，宋洁，等.基于组合赋权-集对分析的煤矿煤尘爆炸危险性评价研究[J].中国矿业，2020，29(5)：97-102.

[14] 肖振航，周德红，李维东，等.基于云模型的化工园区安全风险评估[J].武汉工程大学学报，2022，44(1)：112-118.

[15] 戴剑勇，王雯雯，黄晓庆.基于网络云模型的尾矿库溃坝安全评估[J].安全与环境学报，2022，22(1)：17.

[16] 陈莉，张海侠.基于熵权—云模型的我国绿色智慧城市评价[J].系统仿真学报，2019(1)：136-144.

本文编辑：张 瑞

☆

(上接第342页)

[14] 宋涵，郑尚透.基于AHP综合评价法的电梯舒适度评估体系研究[J].机电工程技术，2019，48(2)：21-22，81.

[15] 肖振航，周德红，李维东，等.基于云模型的化工园区安全风险评估[J].武汉工程大学学报，2022，44(1)：112-118.

[16] 史红伟，田磊.基于ANP和指标权重敏感性分析的矿区生态安全评价[J].河北工程大学学报(自然科学版)，2020，37(3)：75-81.

[17] 李会，吴琼，汪铭远.基于神经网络与敏感度分析的城市宜居性评价体系研究——以安徽省16市为例[J].长春理工大学学报(社会科学版)，2020，33(3)：115-122.

[18] 马子惠，马书明，张树深.大连市生态脆弱性评价及其不确定性分析[J].水土保持通报，2019，39(3)：237-242，262.

[19] 秦会艳，刘婷婷，黄颖利.我国省域尺度森林生态系统恢复力评价及敏感性分析[J].生态与农村环境学报，2022，38(3)：281-288.

[20] 刘滢，于珈懿，于戈.既有住宅失能老人居室空间光热环境及舒适性评价研究[J].西部人居环境学刊，2021，36(5)：31-39.

[21] 曾昱，董超.健康声环境之住宅隔音窗应用研究[J].建筑技艺，2020(增刊2)：96-99.

[22] 徐飞，吉喆.改善生态住宅声环境的设计措施要点分析[J].工程建设与设计，2020(9)：157-159.

[23] 汪珊珊，武玉艳，汪留成.高寒气候下集合住宅顶层节能设计策略研究——以西宁为例[J].南方建筑，2023(1)：72-80.

[24] 宋小冬，赵一夫，庞磊.住宅区道路可穿越对公共交通出行的便利性影响[J].上海城市规划，2023(1)：121-127.

本文编辑：苗 变