

我国百年住宅全生命周期可持续性评价

李忠富, 孟芊芸

(大连理工大学 建设管理系, 辽宁 大连 116024, E-mail: mengqianyun0803@163.com)

摘 要: 以推进我国百年住宅的应用与发展为根本目的, 对其进行全生命周期可持续性评价。结合国内外已有的可持续性评估体系及相关标准规范, 选取人口、资源和环境 3 个方面的评价指标。采用 COWA 算子为评价指标赋权重, 并结合云物元理论, 建立百年住宅全生命周期可持续性评价模型。通过对具体案例进行实证分析, 结果表明该评价方法具有一定的可行性及科学性, 为百年住宅的进一步发展与推广提供依据。

关键词: 百年住宅; 全生命周期; 可持续性评价; COWA; 云物元模型

中图分类号: TU984.114 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-8859(2024)02-054-06 **DOI:** 10.13991/j.cnki.jem.2024.02.010

Whole Life Cycle Sustainability Evaluation of Long-Life Sustainable Housing in China

LI Zhongfu, MENG Qianyun

(Department of Construction Management, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China,

E-mail: mengqianyun0803@163.com)

Abstract: This study evaluates the whole life cycle sustainability of long-life sustainable housing with the fundamental purpose of promoting its application and development in China. Based on the existing sustainability evaluation systems and relevant standards at home and abroad, three evaluation indicators of population, resources and environment were selected. Using COWA operator to determine the weight of evaluation index and combining with cloud matter element theory, the whole life cycle sustainability evaluation model of long-life sustainable housing is established. Analysis of specific cases is conducted and shows that the evaluation method is feasible and scientific, providing a basis for the further development and promotion of long-life sustainable housing.

Keywords: long-life sustainable housing; whole life cycle; sustainability evaluation; COWA; cloud matter element model

改革开放 40 余年以来, 我国人居环境和住宅建设取得了辉煌的成就, 但从长寿命、高品质住宅建设及可持续发展的角度来看, 仍不尽如人意。为了全面推进住宅质量提高和绿色生活方式的转型升级, 我国引进国际先进的开放建筑 (Open Building, OB) 和 SI (Skeleton-Infill) 建筑体系理论, 结合建设发展现状和住宅供给模式, 努力打造建筑长寿化、品质优良化、绿色低碳化的百年住宅, 以期改善民生, 实现可持续发展的宏伟目标。

百年住宅最早由日本建设省于 20 世纪 80 年代提出^[1]。为了缓解资源紧缺和环境压力等问题, 日本都市再生机构开始推行 KSI (Kodan Skeleton and Infill Housing) 住宅体系, 即在确保主体结构耐久

性能的前提下, 使内部填充体灵活可变, 以此延长建筑使用寿命, 提高住宅可持续性, 推动社会由“建造后拆除”的资源浪费型向“建造优良产品、精心维护管理、长期珍惜使用”的资产存量型转变^[2]。我国在借鉴日本经验的基础上, 逐步发展出符合自身国情的百年住宅体系。2018 年 8 月, 由中国建筑标准设计研究院有限公司等单位编制的《百年住宅建筑设计评价标准》(T/CECS-CREA 513-2018) 正式实施。该标准明确了百年住宅的概念, 即“基于可持续建设发展理念, 统筹住宅建筑全寿命期内的策划设计、生产施工和使用维护全过程的集成设计与建造, 具有建筑长寿性能、品质优良性能、绿色持续性能, 全面保障居住长久品质与资产价值的住宅建筑”^[3]。该体系以新型建筑工业化为基础, 运用支

收稿日期: 2023-10-12.

撑体耐久性技术、填充体适应性技术、分离型集成技术等,采用集成化、模块化部品部件,实现设计标准化、部品工厂化、建造装配化和管理运维化,提升住宅建筑全生命周期的价值。截至目前,全国百年住宅示范项目总建筑面积已达百余万平方米。

近年来,高校科研团队积极开展相关研究工作,而研究方向集中于设计方案及具体工法的探究等技术层面^[4~6],对其可持续性的研究只停留在描述阶段,少有针对其可持续性开展的评价研究。基于此,借鉴已有研究及国际上影响较大的可持续性评估体系,如美国 LEED、英国 BREEAM、日本 CASBEE、加拿大 GBC 等,以国内现行标准规范为依据,结合百年住宅项目特点,选取人口、资源和环境 3 个方面的评价指标,构建其全生命周期可持续性评价指标体系。采用 COWA 算子和云物元理论相结合的方法,建立评价模型,通过对实际案例进行分析,验证模型的实用性与科学性,以期为百年住宅的进一步发展与推广提供依据。

1 百年住宅可持续性评价指标体系

通过分析住宅项目可持续发展内涵,结合相关现行标准,如《百年住宅建筑设计与评价标准》(T/CECS-CREA 513-2018)、《绿色建筑评价标准》(GB/T 50378-2019)、《建筑工程绿色施工评价标准》(GB/T 50640-2010)等,借鉴已有相关研究,遵循目的性、全面性、层次性和可操作性的原则,对百年住宅全生命周期各阶段分别进行指标选取,得到一系列初步的评价指标,再依据人口、资源和环境 3 个角度进行分类,筛选关键影响因素,并按照一定的层次结构建立评价指标体系,如表 1 所示。

1.1 人口可持续指标

可持续发展的核心是“以人为本”^[18],住房建设及其发展模式与人民生活质量及劳动力就业息息相关,以此影响人口可持续发展。

(1) 可持续居住水平。住宅可持续居住水平主要体现在建筑寿命及住宅易更新性。延长建筑寿命可以降低人的居住负担,让人们得以将财力、精力花费在其他活动上^[7],一定程度上提高人口素质;住宅易于更新改造,户型可灵活变化,可以满足家庭生命周期不同阶段的居住需求,提高生活质量,实现“以人为本”的可持续发展。

(2) 住宅宜居水平。当前我国住房建设逐渐由“高数量”向“高质量”转型,推进“住有所居”向“住有宜居”迈进^[8]。住宅宜居不仅是指居住品质

表 1 我国百年住宅全生命周期可持续性评价指标体系

一级指标 层 N	二级指标 层 U	三级指标层 V	指标来源 (文献)
人口可持续 N ₁	可持续居住	建筑寿命 V ₁₁	[1][2][7]
	水平 U ₁₁	住宅易更新性 V ₁₂	[1][3]
	住宅宜居水平 U ₁₂	适老通用性与无障碍设计 V ₁₃	[3][8]
	居住品质 U ₁₃	居住品质 V ₁₄	[1][8][9]
	就业效果 U ₁₃	施工人员健康与安全 V ₁₅	[10]
		就业结构升级 V ₁₆	[11]
资源可持续 N ₂	节能与能源利用 U ₂₁	施工节能技术及设备 V ₂₁	[12][13]
		建筑节能体系 V ₂₂	[1][9][14][15]
		可再生能源利用 V ₂₃	[14][15]
	节水与水资源利用 U ₂₂	施工节水技术及设备 V ₂₄	[12][13]
		非传统水源利用率 V ₂₅	[14]
		节水器具配置 V ₂₆	[14]
	节材与材料资源利用 U ₂₃	节约建材 V ₂₇	[1][9]
		绿色建材应用比例 V ₂₈	[7][14]
	节约土地 U ₂₄	地下空间开发利用指标 V ₂₉	[16]
		人均居住用地指标 V ₂₁₀	[16]
环境可持续 N ₃	气环境 U ₃₁	施工扬尘控制情况 V ₃₁	[12][13]
		废气排放控制 V ₃₂	[12]
	水环境 U ₃₂	施工污水废水排放控制 V ₃₃	[13]
	声环境 U ₃₃	施工噪声控制 V ₃₄	[12][13]

优良,同时要考虑为各年龄段及残障人士提供方便、安全的生活环境,体现可持续发展的公平性原则^[18]。

(3) 就业效果。随着工业化建造水平提升、产业技术不断升级,危险落后的岗位逐渐消失,新技术岗位不断出现,推动建筑业农民工产业工人化^[11],减少职业健康与安全问题,促进人口素质提高。

1.2 资源可持续指标

据不完全统计,全球建筑相关产业年均消耗地球 50%能源、50%水资源、40%各种原材料,并造成 80%耕地损失^[1]。可见,建筑业已然成为资源大量消耗的行业。因此,住宅项目应在项目全生命周期各个阶段最大程度地节能、节水、节材、节地,实现资源可持续。

(1) 节能与能源利用。自 20 世纪 70 年代的世界性能源危机爆发以来,建筑业不断研发各种新型节能技术,努力提高施工机械节能效率及建筑设备运行效率,可再生能源的利用技术也日渐趋于成熟^[15]。

(2) 节水与水资源利用。我国水资源浪费严重,重复利用率不足 30%。面对水资源匮乏问题,住宅建设过程中需要“开源节流”。施工中采用节水技术及设备,使用维护阶段应配置节水的卫生器具并提高非传统水源利用率。

(3) 节材与材料资源利用。据统计,全国每年为生产建筑材料需消耗各种矿产资源达 100 亿 t 以上,每年产生的建筑垃圾逾 30 亿 t,约占城市垃

圾总量的 40%左右^[1]。从长远角度来看,延长建筑寿命、循环使用建材和采用绿色建材等方式可以节约材料^[11],促进材料资源可持续。

(4) 节约土地。我国幅员辽阔,但人口众多,土地资源极为紧缺。2014 年 9 月,国土资源部《关于推进土地节约集约利用的指导意见》提出:应提高建设用地利用效率,控制人均居住用地指标,统筹地上地下空间开发,合理利用地下空间^[16]。

1.3 环境可持续指标

据统计,全球建筑业每年产生 50%大气污染、50%水体污染和 48%固体废弃物^[1],住宅建设正持续加重环境负荷。施工过程中扬尘和废气排放会产生大气污染;废水排放会造成水体污染;施工噪声则会对周边的居住环境产生不良影响。

2 基于 COWA 算子的评价指标赋权

上述指标体系包含 3 项一级指标,10 项二级指标,再对其进行拓展,最终得到 20 个三级指标。由于指标权重对后续评价结果影响较大,因此,需采用合适的赋权方法。层次分析法 (Analytic Hierarchy Process, AHP) 所需定量数据信息较少,但适用于指标数量较少的情况;熵值法虽能处理指标数量较多的情况,所得结果也较客观,但所需样本信息量较大;COWA 算子法既能应对指标数量较多的情况,又能避免专家个人偏好的主观性,减少极端数据的不良影响^[17]。因此,采用 COWA 算子法为评价指标赋权。

有序加权平均 (Ordered Weighted Averaging, OWA) 算子通过将数据重新排列,并对不同位置的数据赋予不同权重,以减少极端数据的不利影响^[19]。我国学者王煜等^[20]在其基础上通过改进数据集结方式,提出了一系列 OWA 算子。本文采用基于组合数的有序加权算子 (Combination Ordered Weighted Aveaging, COWA),本质上是属性加权和位置加权相结合,把极端数据放在数列中影响不大的位置,以减少专家主观因素导致的评价结果偏差的不良影响,使赋权更加符合客观实际^[20]。其赋权计算过程如下:

(1) 确定指标权重评分数据集。以问卷调查的形式,邀请 m 位专家为可持续性评价指标的重要性进行打分,获得初始评分数据集 $(a_1, a_2, \dots, a_i, \dots, a_m)$ 。将数据集中的数据从大到小进行重新排序,并以 0 作为起始序号重新编号,得到新数据集 $(b_0, b_1, \dots, b_j, \dots, b_{m-1})$,其中 $b_0 \geq b_1 \geq \dots \geq b_j \geq \dots \geq b_{m-1}$ 。

(2) 计算加权向量。引入排列组合数,确定新数据集 b_j 的加权向量 θ_{j+1} ,其计算公式为:

$$\theta_{j+1} = \frac{C_{m-1}^j}{\sum_{k=0}^{m-1} C_{m-1}^k} = \frac{C_{m-1}^j}{2^{m-1}}, (j = 0, 1, 2, \dots, m-1) \quad (1)$$

(3) 计算绝对权重。将按式 (1) 计算得出的加权向量 θ_{j+1} 与新数据集 b_j 进行乘法结合,计算指标 N_i 的绝对权重 $\bar{w}_i$, 即:

$$\bar{w}_i = \sum_{j=0}^{m-1} \theta_{j+1} b_j, (j = 1, 2, \dots, \tau) \quad (2)$$

(4) 计算相对权重。将按式 (2) 计算得到的绝对权重 $\bar{w}_i$ 作归一化处理,得到指标 N_i 的相对权重 w_i , 即:

$$w_i = \frac{\bar{w}_i}{\sum_{i=1}^{\tau} \bar{w}_i}, (i = 1, 2, \dots, \tau) \quad (3)$$

3 基于云物元理论的可持续性评价模型

3.1 云物元理论

物元理论通过有序三元组 (事物 N , 事物特征 C , 事物特征量值 V), 构成描述事物的基本元, 反映事物物质和量的关系, 表示为 $R = (N, C, V)$ ^[21]。而在实际生活中, 事物特征量值 V 往往具有模糊性与随机性, 未必是一个确定的值。因此, 将云模型引入物元理论, 即用云模型中的正态云 (Ex, En, He) 代替事物特征量值 V , 其中, 期望 Ex 为云的分布中心; 熵 En 为指标等级的模糊度, En 越大, 指标等级界限模糊性越大; 超熵 He 表示熵 En 的不确定性及模糊性^[22]。若事物有 n 个特征, 则云物元模型表达式如下所示:

$$R = \begin{bmatrix} R_1 \\ R_2 \\ \vdots \\ R_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} N & C_1 & (Ex_1, En_1, He_1) \\ & C_2 & (Ex_2, En_2, He_2) \\ & \vdots & \\ & C_n & (Ex_n, En_n, He_n) \end{bmatrix} \quad (4)$$

3.2 可持续性评价等级标准云

参照《百年住宅建筑设计与评价标准》(T/CECS-CREA 513-2018)、《绿色建筑评价标准》(GB/T 50378-2019)、《建筑工程绿色施工评价标准》(GB/T 50640-2010) 和《可持续发展评价管理办法》, 将百年住宅可持续性划分为较差可持续、一般可持续和较好可持续 3 个等级。结合相关标准及专家意见, 给出符合百年住宅项目特点的可持续性评价指标等级界限, 具体如表 2 所示。

将评价指标等级界限看成一个双约束空间 $[C_{\min},$

表2 百年住宅可持续性评价指标等级界限

三级指标层	等级界限		
	较差 可持续	一般 可持续	较好 可持续
建筑寿命 V_{11}	[0, 3]	(3, 6]	(6, 8]
住户使用开放灵活性 V_{12}	[0, 30]	[30, 70]	[70, 100]
适老通用性与无障碍设 V_{13}	[0, 30]	[30, 70]	[70, 100]
居住品质 V_{14}	[0, 8]	(8, 16]	(16, 24]
劳动力健康与安全 V_{15}	[0, 30]	[30, 70]	[70, 100]
就业结构升级 V_{16}	[0, 30]	[30, 70]	[70, 100]
施工节能技术及设备 V_{21}	[0, 30]	[30, 70]	[70, 100]
建筑节能体系 V_{22}	[5, 15]	(15, 30]	(30, 40]
可再生能源利用 V_{23}	[0, 3]	(3, 7]	(7, 10]
施工节水技术及设备 V_{24}	[0, 30]	[30, 70]	[70, 100]
非传统水源利用率 V_{25}	[0, 3]	(3, 7]	(7, 10]
节水器具配置 V_{26}	[0, 8]	(8, 12]	(12, 15]
节约建材 V_{27}	[0, 30]	[30, 70]	[70, 100]
绿色建材应用比例 V_{28}	[0, 30]	[30, 70]	[70, 100]
地下空间开发利用指标 V_{29}	[0, 5]	(5, 7]	(7, 12]
人均居住用地指标 V_{210}	[0, 10]	(10, 15]	(15, 20]
施工扬尘控制情况 V_{31}	[0, 30]	[30, 70]	[70, 100]
废气排放控制 V_{32}	[0, 30]	[30, 70]	[70, 100]
施工污水排放控制 V_{33}	[0, 30]	[30, 70]	[70, 100]
施工噪声控制 V_{34}	[0, 30]	[30, 70]	[70, 100]

$C_{\max}$], 在转换为云物元参数时, 区间中间值为期望 Ex , 熵 En 则按照正态云的“3En”规则计算。区间界限值转换为云物元模型参数的公式为:

$$Ex = \frac{C_{\min} + C_{\max}}{2} \quad (5)$$

$$En = \frac{C_{\max} - C_{\min}}{6} \quad (6)$$

$$He = s \quad (7)$$

式中, s 为常量, 可结合实际情况和专家的意见进行适当调整^[23]。一般来说, He 越小, 云相对越薄, 隶属度的随机性越小, 越有利于判断比较, 但容易遗漏掉边界处的点; 反之, 其值越大, 云越厚, 隶属度的随机性越大, 隶属云之间的界限就越模糊, 虽然可比性变差, 但是可包容的点越多。

由式(5)~式(7)计算得到的指标等级标准云模型如表3所示。

3.3 综合评判矩阵

在基于云物元理论的可持续性评价中, 可将各评价指标值 x_{ij} 视为云滴, 利用隶属函数计算其相对于云模型的隶属度 $k_{\alpha}(x_{ij})$, 以此表示其关联度 $z_{\alpha}(v_{ij})$ 。具体计算过程如下:

(1) 产生一个正态随机数 En'_{ija} , 该随机数服从期望值为 En_{ija} 、标准差为 He_{ija} 的分布, 其中, ij 为分指标下标, α 为各可持续性等级。

(2) 计算云滴 x_{ij} 与各等级云的隶属度 $k_{\alpha}(x_{ij})$, 其计算公式如下:

$$z_{\alpha}(v_{ij}) = k_{\alpha}(x_{ij}) = e^{-\frac{(x_{ij} - Ex_{ija})^2}{2(En_{ija})^2}} \quad (8)$$

表3 百年住宅可持续性评价指标等级标准云模型

三级指标层	较差可持续	一般可持续	较好可持续
V_{11}	(1.5, 0.500, 0.01)	(4.5, 0.500, 0.01)	(7, 0.333, 0.015)
V_{12}	(15, 5.000, 0.25)	(50, 6.667, 0.30)	(85, 5.000, 0.25)
V_{13}	(15, 5.000, 0.25)	(50, 6.667, 0.30)	(85, 5.000, 0.25)
V_{14}	(4, 1.333, 0.08)	(12, 1.333, 0.08)	(20, 1.333, 0.08)
V_{15}	(15, 5.000, 0.25)	(50, 6.667, 0.30)	(85, 5.000, 0.25)
V_{16}	(15, 5.000, 0.25)	(50, 6.667, 0.30)	(85, 5.000, 0.25)
V_{21}	(15, 5.000, 0.25)	(50, 6.667, 0.30)	(85, 5.000, 0.25)
V_{22}	(10, 1.667, 0.10)	(22.5, 2.500, 0.10)	(35, 1.667, 0.10)
V_{23}	(1.5, 0.500, 0.01)	(5, 0.667, 0.03)	(8.5, 0.500, 0.01)
V_{24}	(15, 5.000, 0.25)	(50, 6.667, 0.30)	(85, 5.000, 0.25)
V_{25}	(1.5, 0.500, 0.01)	(5, 0.667, 0.03)	(8.5, 0.500, 0.01)
V_{26}	(4, 1.333, 0.08)	(10, 0.667, 0.03)	(13.5, 0.500, 0.01)
V_{27}	(15, 5.000, 0.25)	(50, 6.667, 0.30)	(85, 5.000, 0.25)
V_{28}	(15, 5.000, 0.25)	(50, 6.667, 0.30)	(85, 5.000, 0.25)
V_{29}	(2.5, 0.833, 0.05)	(6, 0.333, 0.015)	(9.5, 0.833, 0.05)
V_{210}	(5, 1.667, 0.10)	(12.5, 0.833, 0.05)	(17.5, 0.833, 0.05)
V_{31}	(15, 5.000, 0.25)	(50, 6.667, 0.30)	(85, 5.000, 0.25)
V_{32}	(15, 5.000, 0.25)	(50, 6.667, 0.30)	(85, 5.000, 0.25)
V_{33}	(15, 5.000, 0.25)	(50, 6.667, 0.30)	(85, 5.000, 0.25)
V_{34}	(15, 5.000, 0.25)	(50, 6.667, 0.30)	(85, 5.000, 0.25)

综合评判矩阵 D 由所有云关联度组成。其表达式如下:

$$D = \begin{bmatrix} z_1(v_1) & z_2(v_1) & z_3(v_1) \\ z_1(v_2) & z_2(v_2) & z_3(v_2) \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ z_1(v_n) & z_2(v_n) & z_3(v_n) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} & k_{13} \\ k_{21} & k_{22} & k_{23} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ k_{n1} & k_{n2} & k_{n3} \end{bmatrix} \quad (9)$$

式中, n 表示评价指标个数, 本文中 n 取 20。

3.4 综合关联度和评价等级

(1) 确定综合关联度。由式(8)得出三级指标 V 与可持续性等级之间的关联度 $z_{\alpha}(v_{ij})$, 结合 COWA 算子确定的指标权重值 w_{ij} , 二者进行加权可得到一级指标层 N 相对于可持续性等级的关联度。

$$z_{\alpha}(a_{ij}) = \sum w_{ij} z_{\alpha}(v_{ij}) \quad (10)$$

式中, $z_{\alpha}(a_{ij})$ 表示一级指标层 N 中第 i 个指标的第 j 个分指标对应第 α 个可持续性等级的关联度, 其中, $\alpha=1, 2, 3$ 。

由式(10)可得一级指标层 N 相对于可持续性等级的关联度, 利用式(11)即可得出总目标层相对于各可持续性等级的关联度。

$$z_{\alpha}(a) = \sum_{i=3}^3 w_i z_{\alpha}(a_i) \quad (11)$$

(2) 确定评价等级。根据最大隶属度原则, 确定目标层所属的可持续性等级, 即:

$$z(a) = \max z_{\alpha}(a) \quad (12)$$

4 案例分析

4.1 评价指标值与权重

以某百年住宅项目为例进行分析。该项目采用

全装配预制混凝土剪力墙结构体系, 建设用地面积 8450.91 m², 总建筑面积 33666.66 m², 其中地上建筑面积 22147.78 m², 地下建筑面积 11518.88 m², 容积率 2.62, 建筑密度 24.14%, 绿地率 30%。该项目实景图如图 1 所示。



图 1 项目实景图

根据实地调研、资料搜索及专家打分共同确定各评价指标值。根据上文指标赋权方法, 采用 COWA 算子计算各指标权重。各评价指标值及权重如表 4 所示。

表 4 某百年住宅项目评价指标值及权重值

一级指标 层 N	权重值	二级指标 层 U	权重值	三级指标 层 V	权重值	指标值
N ₁	0.3492	U ₁₁	0.1203	V ₁₁	0.0634	8
				V ₁₂	0.0570	75
				V ₁₃	0.0555	70
				V ₁₄	0.0804	24
		U ₁₂	0.1360	V ₁₅	0.0552	75
				V ₁₆	0.0376	70
				V ₂₁	0.0287	72
		U ₁₃	0.0929	V ₂₂	0.0312	30
				V ₂₃	0.0271	10
				V ₂₄	0.0228	69
N ₂	0.3343	U ₂₁	0.0871	V ₂₅	0.0182	10
				V ₂₆	0.0252	15
				V ₂₇	0.0484	75
				V ₂₈	0.0373	30
		U ₂₂	0.0662	V ₂₉	0.0455	12
				V ₂₁₀	0.0499	15
		U ₂₃	0.0857	V ₃₁	0.0575	67
				V ₃₂	0.0545	75
				V ₃₃	0.1072	60
		U ₂₄	0.0954	V ₃₄	0.0973	80
N ₃	0.3165	U ₃₁	0.1120			

4.2 综合评判矩阵

结合表 3 中确定的等级标准云, 将各评价指标值和权重值代入式 (8)、式 (9) 中, 通过 Matlab 编程得出各三级指标相对于各可持续性等级的关联度, 计算结果如表 5 所示。

4.3 确定综合关联度和评价等级

根据表 4、表 5 及式 (11) 可得到一级指标层 N 相对于各可持续性等级的关联度, 计算过程如下:

表 5 某百年住宅项目各评价指标相对可持续性等级的关联度

指 标	可持续性等级			指 标	可持续性等级		
	较差	一般	较好		较差	一般	较好
V ₁₁	0.0000	0.0000	0.0186	V ₂₅	0.0000	0.0000	0.0090
V ₁₂	0.0000	0.0009	0.1433	V ₂₆	0.0000	0.0000	0.0113
V ₁₃	0.0000	0.0138	0.0121	V ₂₇	0.0000	0.0008	0.1552
V ₁₄	0.0000	0.0000	0.0234	V ₂₈	0.0108	0.0156	0.0000
V ₁₅	0.0000	0.0021	0.1140	V ₂₉	0.0000	0.0000	0.0075
V ₁₆	0.0000	0.0115	0.0150	V ₂₁₀	0.0000	0.0047	0.0122
V ₂₁	0.0000	0.0019	0.0444	V ₃₁	0.0000	0.0245	0.0015
V ₂₂	0.0000	0.0084	0.0097	V ₃₂	0.0000	0.0012	0.0862
V ₂₃	0.0000	0.0000	0.0115	V ₃₃	0.0000	0.3188	0.0000
V ₂₄	0.0000	0.0361	0.0031	V ₃₄	0.0000	0.0000	0.5469

人口可持续 N₁ 可持续性等级:

$$z_{\alpha}(a_1) = (w_{11}, w_{12}, w_{13}, w_{14}, w_{15}, w_{16}) \cdot \begin{bmatrix} k_{111} & k_{112} & k_{113} \\ k_{121} & k_{122} & k_{123} \\ k_{131} & k_{132} & k_{133} \\ k_{141} & k_{142} & k_{143} \\ k_{151} & k_{152} & k_{153} \\ k_{161} & k_{162} & k_{163} \end{bmatrix}$$

$$= (0.0000, 0.0014, 0.0188)$$

同理可得资源可持续 N₂ 可持续性等级:

$$z_{\alpha}(a_2) = (0.0004, 0.0020, 0.0109)$$

环境可持续 N₃ 可持续性等级:

$$z_{\alpha}(a_3) = (0.0000, 0.0356, 0.0580)$$

再由表 4 及式 (12) 计算得出总目标层相对于各可持续性等级的关联度:

$$z_{\alpha}(a) = (w_1, w_2, w_3) \cdot \begin{bmatrix} z_1(a_1) & z_2(a_1) & z_3(a_1) \\ z_1(a_2) & z_2(a_2) & z_3(a_2) \\ z_1(a_3) & z_2(a_3) & z_3(a_3) \end{bmatrix}$$

$$= (0.0001, 0.0124, 0.0286)$$

将上述计算结果进行汇总, 并按照最大隶属度原则, 得到各一级指标及总目标层的可持续性等级, 具体结果如表 6 所示。

表 6 某百年住宅项目可持续等级综合关联度及评价等级

一级指标层	较差	一般	较好	max _α (a _i)	可持续性等级
N ₁	0.0000	0.0014	0.0188	0.0188	较好可持续
N ₂	0.0004	0.0020	0.0109	0.0109	较好可持续
N ₃	0.0000	0.0356	0.0580	0.0580	较好可持续
综合关联度	0.0001	0.0124	0.0286	0.0286	较好可持续

4.4 结果分析与讨论

由上述计算可知, 该百年住宅项目与“较好可持续”的综合关联度最大, 因此, 处于“较好可持续”的水平, 但有向“一般可持续”发展的趋势。分析各级评价指标的可持续性关联度可看出:

(1) 人口可持续性 N₁ 处于“较好可持续”的水平, 但有向“一般可持续”发展的趋势。由表 5 可以看出, 应提高适老通用及无障碍设施的设置比例, 如适老化综合门厅、适老化综合收纳、无障碍

停车场系统、通用性健身场所系统等;在施工人员健康与安全及就业结构升级方面,百年住宅已经逐渐突显优势,但由于相关技术仍在发展阶段,因此,还未产生较大的影响。

(2)资源可持续性 N_2 处于“较好可持续”的水平,但有向“一般可持续”发展的趋势。其中,施工节水技术及设备和绿色建材应用比例处于“一般可持续”的水平。因此,应重点改善这两个方面,根据工程特点,提高节水技术及设备和绿色建材的使用比例。

(3)环境可持续性 N_3 处于“较好可持续”的水平,但有向“一般可持续”发展的趋势。其中,施工扬尘控制情况和施工污水排放控制处于“一般可持续”的水平,说明施工单位在污染物排放与控制方面仍然不够重视,应加强环保意识,制定相关条例进行严格管理,采取一定的措施控制污染物扩散。

通过资料搜索和实地考察,该项目以国际化的可持续居住环境建设理念进行全面研发实践创新,应用整体装配式结构+SI住宅体系+装配式装修+BIM技术,荣获中国百年住宅示范工程、绿色建筑标识三星级,工程质量获得北京市优质工程等。因此,本文评价结果与实际相符。

5 结语

百年住宅全生命周期的可持续性评价是涉及多因素的综合评价。本文从人口、资源和环境3个角度设置评价指标,将COWA算子赋权法与云物元理论相结合,提出了一套可持续性评价体系。通过对实际项目进行评价,可以看出该方法思路清晰、步骤简单、易于理解,更为重要的是,该方法将原本以定性语言描述的百年住宅可持续性通过定量分析转化为具体的评价等级,并可以较为直观地看出问题的所在,为今后百年住宅的改进与发展提供了参考依据,促进其进一步推广,加快我国建筑业的转型升级及可持续发展。

参考文献:

- [1] 刘东卫. 百年住宅面向未来的中国住宅绿色可持续建设研究与实践[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2018.
- [2] 川崎直宏,金艺丽. 建筑长寿化发展方向的日本公共住宅建设体系[J]. 建筑学报,2020(5):24-27.
- [3] 中国工程建设标准化协会. 百年住宅建筑设计与评价标准:T/CECS-CREA 513-2018[S]. 北京:中国建筑标准设计研究院有限责任公司,2018.
- [4] 秦 珊,刘东卫,伍止超. 可持续发展模式的住宅建筑

- 系统集成与设计建造:中国百年住宅建设理论方法、体系技术研发与实践[J]. 建筑学报,2020(5):32-37.
- [5] 何 鑫. 百年住宅的技术体系研究[J]. 低碳世界,2018(4):190-191.
 - [6] 朱小军,施涛涛. 百年住宅的模块化设计[J]. 工业设计,2020(12):95-97.
 - [7] 苗 雪. 建筑创新百年住宅:记中国建筑标准设计研究院“科技百年宅-SI住宅体系样板间”[J]. 工程建设和设计,2014(12):12-14.
 - [8] 刘东卫,冯海悦,李 静. 新时代好房子标准内涵及指标体系探讨[J]. 中国勘察设计,2023(5):10-16.
 - [9] Ana F, Duarte M P, De J B, et al. A critical analysis of LEED, BREEAM and DGNB as sustainability assessment methods for retail buildings[J]. Journal of Building Engineering, 2023, 66.
 - [10] Liyang T, Yun C, Lianghai J, et al. Regional sustainable performance of construction industry in china from the perspective of input and output: considering occupational safety[J]. Buildings, 2022, 12(5):618-618.
 - [11] 李忠富,彭虹灵,蔡 晋. 建筑工业化背景下农民工产业工人化制约因素研究[J]. 建筑经济,2021,42(7):84-88.
 - [12] 住房和城乡建设部. 建筑工程绿色施工评价标准:GB/T50640-2010[S]. 北京:中国计划出版社,2011.
 - [13] 王乾坤,年春光,邓勤犁. 基于云物元理论的装配式建筑施工绿色度评价方法研究[J]. 建筑经济,2020,41(11):84-89.
 - [14] 中华人民共和国住房和城乡建设部,国家市场监督管理总局. 绿色建筑评价标准:GB/T50378-2019[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2019.
 - [15] 刘 睿. 绿色建筑管理[M]. 北京:中国电力出版社,2013.
 - [16] 董祚继,田春华. 解读《国土资源部关于推进土地节约集约利用的指导意见》[J]. 地球,2014(10):28-31.
 - [17] 李州扬. BIM技术在绿色建筑运营阶段的效益分析[D]. 大连:大连理工大学,2021.
 - [18] 李忠富. 现代建筑生产管理理论[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2013.
 - [19] Yager RR. On ordered weighted averaging aggregation operators in multicriteria decision making[J]. IEEE Trans. Systems, Man, and Cybernetics, 1988, 18(1).
 - [20] 王 煜,徐泽水. OWA算子赋权新方法[J]. 数学的实践与认识,2008(3):51-61.
 - [21] 徐泽水. 拓展的C-OWA算子及其在不确定多属性决策中的应用[J]. 系统工程理论与实践,2005(11):9-15.
 - [22] 龙 珊,张云宁,欧阳红祥. 基于云物元模型的装配式建筑绿色性评价[J]. 工程管理学报,2018,32(5):24-29.
 - [23] 柏 露. 基于云物元理论的装配式建筑施工可持续性评价研究[D]. 扬州:扬州大学,2020.

作者简介:

李忠富(1964-),男,博士,教授,研究方向:住宅产业化,现代建筑生产管理等;

孟芊芸(1999-),通信作者,女,硕士研究生,研究方向:住宅产业化,建筑工业化等。