

DOI: 10.7672/sgjs2025220104

基于BP神经网络的钢架网壳结构碳排放预测研究

张亚辉, 韩永坤, 郝校, 赵景, 赵帅

(中建六局土木工程有限公司, 天津 300450)

[摘要]大跨度空间建筑结构设计和荷载大小对结构体系的碳排放有显著影响。为研究钢架网壳的碳排放规律,通过数值模拟分析了不同屋盖钢架网壳结构体系,计算了不同跨度及不同材料网壳和网架的材料用量和碳排放量,并通过BP神经网络对网壳和网架的碳排放量进行了预测。通过静力分析计算网壳和网架结构体系的材料用量、应力比和稳定性,在满荷载作用下,确定结构体系处于稳定状态。对网壳和网架结构体系碳排放量进行计算得知,当结构体系材料为铝合金时,其碳排放量比其他材料小。基于BP神经网络模型对网壳和网架碳排放量进行了预测,预测值与实际值误差均 $\leq 5\%$,精度满足预测要求。在屋盖材料生产和安装过程中,可采用先进的施工工艺提高施工效率,从而减少施工过程中的能源消耗和材料浪费。

[关键词]钢结构;网壳;碳排放;BP神经网络;预测**[中图分类号]** TU391**[文献标识码]** A**[文章编号]** 2097-0897(2025)22-0104-06

Study on Carbon Emission Prediction for Steel Frame Shell Structures Based on BP Neural Networks

ZHANG Yahui, HAN Yongkun, HAO Xiao, ZHAO Jing, ZHAO Shuai

(China Construction Sixth Engineering Bureau Civil Engineering Co., Ltd.,
Tianjin 300450, China)

Abstract: The design of large span spatial building structures and the magnitude of loads have a significant impact on the carbon emissions of the structural system. To study the carbon emission law of steel frame mesh shells, numerical simulations were conducted to analyze the structural systems of different roof steel frame mesh shells. The material consumption and carbon emissions of mesh shells and grids with different spans and materials were calculated, and the carbon emissions of mesh shells and grids were predicted using BP neural networks. The research results indicate that by calculating the material consumption, stress ratio, and stability of the mesh shell and grid structure system through static analysis, it is determined that the structural system is in a stable state under full load. According to the calculation of the carbon emissions of the grid shell and grid structure system, when the structural system material is aluminum alloy, its carbon emissions are smaller than other materials. Based on the BP neural network model, the carbon emissions of the mesh shell and grid structure were predicted. The error between the predicted value and the actual value was $\leq 5\%$, and the accuracy met the prediction requirements. In the production and installation process of roof materials, advanced construction techniques can be used to improve construction efficiency, thereby reducing energy consumption and material waste during the construction process.

Keywords: steel structure; reticulated shell; carbon emissions; BP neural network; prediction

0 引言

碳排放的增加是导致地球气候系统变暖和温室效应加剧的关键因素,在建筑建设中,使用材料

多及运营能耗高的建筑导致碳排放量逐渐增加,其中屋盖使用的钢材比建筑其他部位多,碳排放量也多。为探求钢结构生产阶段碳排放量的规律,杨俊祺等^[1]通过PSO-BP神经网络模型,对山西省的碳排放量进行模拟和预测;刘熹等^[2]基于PSO-BP神

[作者简介] 张亚辉,项目经理,工程师,E-mail:jdkljlkdf@yeah.net

[收稿日期] 2025-02-05

经网络模型,对碳中和目标下的贵州省碳排放进行了预测;李可馨等^[3]通过BP神经网络预测模型,对中国建筑业碳排放量进行了预测;潘思羽等^[4]通过BP神经网络预测模型,对甘肃省二氧化碳排放预测及影响因素进行了研究;司琪等^[5]采用文献计量学方法,总结了建筑碳排放领域的相关研究现状、热点、发展趋势和存在的问题。以上学者通过BP神经网络预测模型对不同地区的碳排放量进行了预测,但未涉及建筑屋盖材料生产阶段的碳排放量预测。

在碳排放量分析和预测中,郑建华等^[6]研究了设计阶段改良对装配式建筑全生命周期碳排放的影响,研究结果表明,改良后的单位面积年均碳排放量减排率达18.71%;王亚平^[7]利用2021年中国30个省份的面板数据,测算了省域建筑业的碳排放量;张桐瑞等^[8]研究了装配式建筑碳排放影响因素,选择低碳原材料和改进物流可减少碳排放;王健等^[9]对黑龙江省建筑能耗、碳排放进行了测算,得出了黑龙江省建筑领域能耗和碳排放总量和强度;石振武等^[10]采用探索性空间数据分析(ESDA)模型,研究了长江三角洲城市群建筑部门碳排放时空格局及影响因素。然而,涉及不同材料、不同跨度屋盖材料生产阶段碳排放量预测方面的研究较少。基于此,本文通过数值模拟分析不同屋盖钢架网壳结构体系,计算不同跨度和不同材料网壳和网架的材料用量和碳排放量,并通过BP神经网络对网壳和网架碳排放量进行了预测。

1 工程概况

以某市大型体育馆建筑为工程背景,该体育馆建筑面积为21 084.72m²,地上共4层,每层层高均为5.6m,第1,2层四周设有健身房、休息室及办公室,第3,4层为挑空层。体育馆屋盖采用双层钢架网壳结构,跨度85m,是由细小钢架构件组成的大跨度空间结构体系。

2 钢架网壳结构体系静力性能分析

2.1 钢架网壳结构模型

为研究不同屋盖结构在生产阶段的碳排放特征,选取3种大跨度屋盖体系进行分析,分别为单层

网壳结构、双层网壳结构和网架结构。每种屋盖结构体系均设置5个跨度,分别为45,65,85,105,125m,每种屋盖设置了2种材质,分别为铝合金和钢材,钢材为Q355钢和Q235钢,不同材料屋盖结构物理参数如表1所示。

根据GB 50009—2012《建筑结构荷载规范》,GB 50017—2017《钢结构设计标准》,单层网壳结构受拉杆件长细比限值为250,受压杆件长细比限值为150,双层网壳结构和网架结构受拉杆件长细比限值为300,受压杆件长细比限值为180。

采用有限元软件进行建模计算,建模过程中,采用beam189单元模拟单层网壳结构杆件,采用link180单元模拟双层网壳、网架的结构杆件和拉索。设置各结构体系的设计使用年限为50年,结构安全等级为一级,主要的设计荷载为恒荷载0.52kN/m²、活荷载0.48kN/m²,基本风压0.5kN/m²,地面粗糙类别为B类,最大温降18℃,最大温升18℃。对不同结构体系和跨度屋盖结构进行静力和稳定性分析时,采取相同的设计水平对各结构进行分析,分析过程中,通过稳定应力比和强度应力比中的最大值进行应力比上限设定,杆件应力比上限为0.9,索构件应力比上限为0.5,将2种应力比平均分为5个区,通过优化结构设计,将各应力比区间构件数量控制在相应总数的10%~30%。为方便对各结构体系构件进行描述,设置Q235钢编号为Q2,Q355钢编号为Q3,铝合金编号为T6,单层网壳编号为DC,双层网壳编号为SC,网架结构编号为WJ,结构体系跨度以实际跨度值表示,如采用跨度为40m的Q235钢单层网壳结构,编号为Q2DC40,结构体系其他构件均按以上方法编号。

单层网壳、双层网壳及网架结构均采用焊接球节点和圆管截面杆件,支座为三向铰接并沿最外环均匀布置,均设置了Q235钢、Q355钢及铝合金材料。

单层网壳结构形式为凯威特K6型单层球面网壳,不同材料和不同跨度结构的矢跨比均为1:6,整体刚度水平采用相同标准控制。在静力分析中,结构的恒荷载和活荷载系数均为1.1,在荷载作用下,结构

表1 不同材料屋盖结构参数

Table 1 Structural parameters of roofs made of different materials

项目	屈服强度/MPa	破断应力/MPa	非比例伸长应力/MPa	密度/(kg·m ⁻³)	弹性模量/MPa	泊松比	线膨胀系数/°C ⁻¹
6082-T6 铝合金	—	—	260	2.71×10 ³	7.10×10 ⁴	0.32	2.28×10 ⁻⁵
Q235 钢	235	—	—	7.85×10 ³	2.05×10 ⁵	0.31	1.18×10 ⁻⁵
Q355 钢	335	—	—	7.85×10 ³	2.05×10 ⁵	0.31	1.18×10 ⁻⁵
钢束丝	1 330	1 670	—	7.85×10 ³	2.05×10 ⁵	0.31	1.18×10 ⁻⁵

跨中挠度最大值不超过结构跨度的 1/420。

双层网壳结构形式采用凯威特 K6 型交叉桁架双层球面网壳,不同材料双层网壳结构的矢跨比均为 1:7,结构厚度与跨度比均为 1/50,整体刚度水平采用相同标准进行控制。在静力分析中,结构的恒荷载和活荷载系数均为 1.1,在荷载作用下,结构跨中挠度最大值不超过结构跨度的 1/260。

网架结构形式采用双层联方型四角锥平面网架,不同材料双层网架结构厚度与跨度比均为 1/15,整体刚度水平采用相同标准进行控制。在静力分析中,结构恒荷载和活荷载系数均为 1.1,在荷载作用下,结构挠度的最大值不超过结构跨度的 1/260。

2.2 静力分析结果

考虑恒荷载、活荷载、风荷载及温度条件下,对单层网壳结构、双层网壳结构和网架结构进行静力分析,得到各结构体系的杆件材料用量,如表 2 所示。

表 2 各结构体系杆件材料用量

Table 2 Material consumption at members of various structural systems

材料	跨度/ m	杆件材料用量/t		
		单层网壳结构	双层网壳结构	网架结构
Q235 钢	45	15.79	88.95	146.77
	65	74.11	216.95	357.97
	85	181.66	616.74	1 017.62
	105	639.86	1 808.06	2 983.30
	125	1 494.68	2 895.12	4 776.95
	45	11.25	74.95	123.67
Q355 钢	65	50.96	205.62	339.27
	85	128.05	515.74	850.97
	105	455.56	1 142.95	1 885.87
	125	984.82	1 827.40	3 015.21
	45	9.25	32.57	53.74
	65	41.96	88.66	146.29
6082-T6 铝合金	85	104.21	208.45	343.94
	105	368.34	447.41	738.23
	125	831.19	630.68	1 040.62

根据模拟结果,对节点处受压、受拉及受弯情况处理。结合网壳和网架结构连接杆件的直径大小,通过 JGJ 7—2010《空间网格结构技术规程》规定的焊接球节点计算方法,计算网壳和网架结构节点质量。单层网壳结构、双层网壳结构和网架结构节点材料用量如表 3 所示。

空间结构的稳定应力比是反映杆件稳定性的重要参数,各结构体系杆件稳定应力比最大值如表 4 所示。由表 4 可知,各结构体系的稳定应力比最大值均<0.9,均处于稳定状态。

为研究网壳结构的稳定性,通过有限元软件

表 3 各结构体系节点材料用量

Table 3 Material consumption at nodes of various structural systems

材料	跨度/ m	节点材料用量/t		
		单层网壳结构	双层网壳结构	网架结构
Q235 钢	45	4.63	9.25	29.89
	65	16.80	26.99	60.75
	85	42.37	68.43	206.77
	105	158.32	214.80	913.00
	125	355.63	423.87	1 333.67
	45	3.04	9.25	20.70
Q355 钢	65	12.68	26.88	60.59
	85	28.77	70.28	120.90
	105	103.15	123.86	300.49
	125	310.40	219.85	646.83
	45	3.00	18.26	31.70
	65	12.58	42.38	67.15
6082-T6 铝合金	85	30.21	88.00	166.72
	105	88.79	138.75	334.26
	125	186.49	291.18	415.69

表 4 各结构体系杆件稳定应力比最大值

Table 4 Maximum stability stress ratio at members of various structural systems

材料	跨度/ m	应力比最大值		
		单层网壳结构	双层网壳结构	网架结构
Q235 钢	45	0.89	0.88	0.87
	65	0.77	0.89	0.89
	85	0.74	0.87	0.88
	105	0.71	0.89	0.85
	125	0.72	0.89	0.89
	45	0.89	0.88	0.85
Q355 钢	65	0.89	0.89	0.87
	85	0.89	0.89	0.87
	105	0.89	0.87	0.88
	125	0.89	0.89	0.88
	45	0.89	0.85	0.86
	65	0.88	0.89	0.87
6082-T6 铝合金	85	0.89	0.87	0.88
	105	0.89	0.89	0.89
	125	0.89	0.89	0.89

对单层网壳和双层网壳结构进行稳定性分析,在恒荷载和活荷载系数均为 1.1 条件下,对结构施加满荷载。取荷载-位移曲线第 1 个临界点位置的荷载值作为稳定极限承载力,稳定极限承载力与稳定容许承载力的比值为安全系数。网壳结构体系安全系数如表 5 所示,结构体系的安全系数均>2,可知结构体系处于稳定状态。

3 钢架网壳结构体系碳排放研究

3.1 碳排放计算方法

依据 GB/T 51366—2019《建筑碳排放计算标准》,对网壳结构和网架碳排放进行计算。网壳结构和网架结构主要由杆件和节点组成,所有构件均为预制件并在现场安装。根据各类构件生产所需

表 5 网壳结构体系安全系数

Table 5 Safety factor of reticulated shell structure system

材料	跨度/m	安全系数	
		单层网壳结构	双层网壳结构
Q235 钢	45	2.35	20.40
	65	2.35	12.24
	85	2.24	13.26
	105	2.14	16.32
	125	2.04	13.26
Q355 钢	45	2.24	28.56
	65	2.14	18.36
	85	2.35	17.34
	105	2.24	19.38
	125	2.14	18.36
6082-T6 铝合金	45	2.24	23.46
	65	2.14	12.24
	85	2.14	12.24
	105	2.14	12.24
	125	2.14	12.24

材料及各种工艺制作成构件时的碳排放量,Q235 钢焊接球节点、Q355 钢焊接球节点、铝合金焊接球节点、Q235 钢、Q355 钢、再生铝合金碳排放因子分别为 3 295,3 724,2 113,3 162,3 645,1 973 kgCO_{2e}/t。

3.2 不同结构体系碳排放量分析

3.2.1 单层网壳结构

在材料分别为 Q235 钢、Q355 钢和铝合金条件下,不同跨度单层网壳碳排放量变化如图 1 所示,其中网壳结构包括杆件和节点。

由图 1 可知,在网壳结构材料为 Q235 钢条件下,随着跨度的增大,杆件和节点碳排放量均呈先缓慢增大再快速增大趋势。

在网壳结构材料为 Q355 钢条件下,随着跨度的增大,杆件和节点碳排放量变化趋势与 Q235 钢基本一致。

在网壳结构材料为铝合金条件下,相比 Q235 钢和 Q355 钢,杆件和节点碳排放量最小。随着跨度的增大,当跨度<85m 时,网壳结构碳排放量增大趋势缓慢,当跨度>85m 时,网壳结构碳排放量快速增大。

综上所述,当单层网壳材料不同时,单层网壳结构碳排放量均呈先缓慢增大再快速增大趋势。相比其他材料,网壳结构材料为 Q235 钢时,碳排放量最大,网壳结构材料为铝合金时,碳排放量最小。

3.2.2 双层网壳结构

在材料分别为 Q235 钢、Q355 钢和铝合金条件下,不同跨度双层网壳碳排放量变化如图 2 所示。

由图 2 可知,在网壳结构材料为 Q235 钢条件下,杆件碳排放量呈先减小后增大趋势,节点碳排放量呈逐渐增大趋势。材料相同条件下,随着跨度

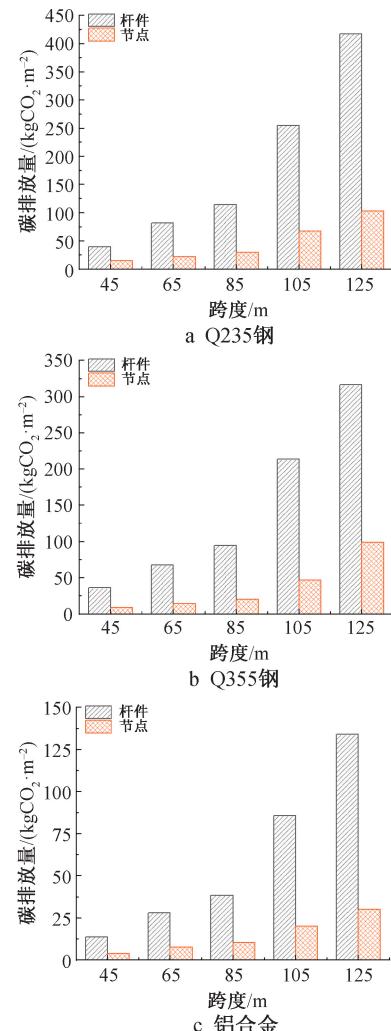


图 1 不同材料单层网壳碳排放量

Fig. 1 Carbon emissions of single-layer reticulated shells with different materials

的增大,网壳结构的总体碳排放量呈增大趋势,跨度越大,增大趋势越明显。

在网壳结构材料为 Q355 钢条件下,杆件和节点碳排放量变化趋势与材料为 Q235 钢时基本一致。在相同跨度条件下,当跨度<105m 时,相比材料为 Q235 钢的碳排放量,材料为 Q355 钢的碳排放量明显较大,杆件和节点碳排放量变化趋势也相对较大。当跨度>105m 时,材料为 Q355 钢的碳排放量明显小于材料为 Q235 钢的碳排放量。

在网壳结构材料为铝合金条件下,杆件碳排放量呈先减小再增大趋势,节点碳排放量呈逐渐增大趋势,且杆件和节点碳排放量明显小于材料为 Q235 钢和 Q355 钢时的碳排放量。

综上所述,当双层网壳材料不同时,杆件碳排放量呈先减小后增大趋势,节点碳排放量逐渐增大。在网壳结构材料为铝合金条件下,杆件和节点碳排放量明显小于材料为 Q235, Q355 钢时碳排放

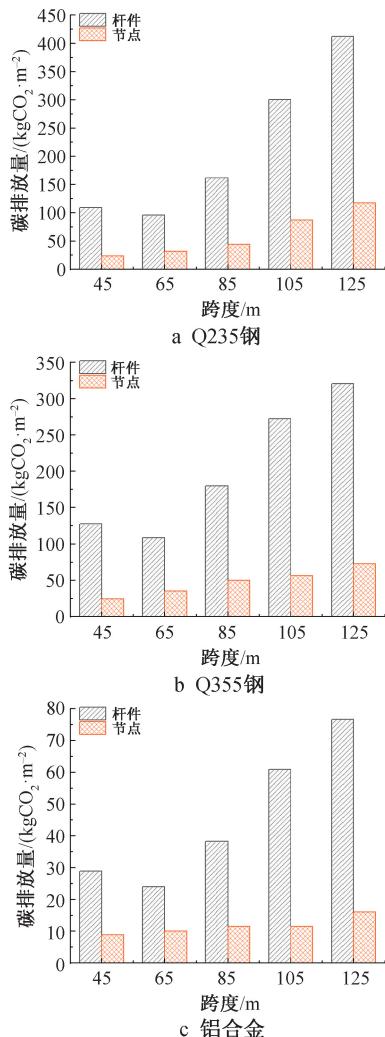


图 2 不同材料双层网壳碳排放量

Fig. 2 Carbon emissions of double-layer reticulated shells with different materials

量。在相同跨度条件下,当跨度<105m时,材料为Q355钢的碳排放量明显大于材料为Q235钢的碳排放量;当跨度>105m时,材料为Q355钢的碳排放量明显小于材料为Q235钢的碳排放量。

3.2.3 网架结构

在材料分别为Q235钢、Q355钢和铝合金条件下,不同跨度网架结构碳排放量变化如图3所示。

由图3可知,当双层网架材料不同时,网架结构碳排放量总体呈先缓慢增大再快速增大趋势。在相同跨度下,相比其他材料,网架结构材料为铝合金时碳排放量最小,网架结构材料为Q235钢时的碳排放量最大。

4 基于BP神经网络的碳排放量预测

基于以上网壳和网架结构及各结构体系的碳排放量特征,建立单层网壳、双层网壳和网架结构碳排放量预测模型,温度设为体育馆施工区当地温度。预测模型确定6个参数,分别为屋盖的结构跨

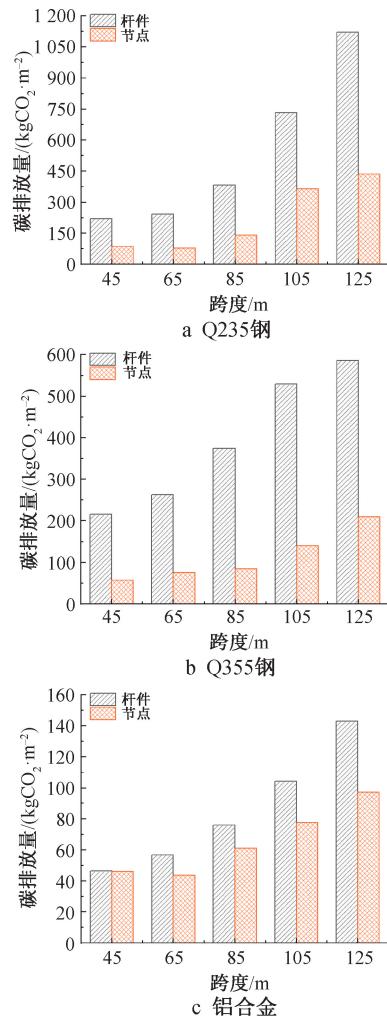


图 3 不同材料网架结构碳排放量

Fig. 3 Carbon emissions of grid structures with different materials

度、结构强度、结构材料密度、结构材料排放因子、厚度和材质传热系数,将以上参数作为建筑碳排放量预测模型输入变量。然后选取6个输入变量80%的数据作为训练样本,另外20%的数据中选取10%作为验证样本,另外10%作为测试样本,通过测试样本可测试模型预测性能。BP神经网络预测模型训练中,选择logsig函数作为输出层到隐藏层的激活函数,输出层选择线性传递函数purelin返回输出值。为减少模型学习过程中的震荡,选取BP神经网络中动量项的值为0.92,最大训练次数为980,期望误差为0.001。采用相关系数、平均相对误差分析各预测模型的性能,相对误差PRE计算公式为:

$$PRE = \left| \frac{Y_i - \hat{Y}_i}{Y_i} \right|$$

式中: Y_i 为实际值; \hat{Y}_i 为预测值。

结合公式计算结果得知各预测模型预测值与

实际值的误差均 $\leqslant 5\%$,且各预测模型的相关系数均 >0.999 ,表明训练效果符合预期,精度满足预测要求,模型中的输入参数与不同屋盖材料生产阶段的碳排放量基本一致。

5 低碳设计建议

在屋盖设计中,可采用高强度低合金钢材作为屋盖结构,相比普通碳素钢,高性能钢材具有更高的强度和更好的韧性,在保证结构安全的情况下,可减少钢材用量,对于非承重构件,可采用纤维增强复合材料,该材料在生产和运输过程中,碳排放量相对较低。由于屋盖结构的跨度和高度直接影响结构的受力性能和材料用量,在满足建筑功能要求的前提下,适当减小跨度和高度可以降低结构内力、减少结构材料用量。

6 结语

1)通过数值模拟对不同屋盖结构体系和屋盖材料进行静力和稳定性分析,确定了不同屋盖结构体系的材料用量。在恒荷载和活荷载系数均为1.1条件下,对结构施加满荷载,在满荷载作用下,结构体系的安全系数均 >2 ,各结构体系处于稳定状态。

2)根据规范计算出了不同屋盖结构体系的碳排放因子。在不同跨度和不同材料下分析了网壳结构和网架结构的碳排放特征。分析结果表明,在相同跨度下,相比其他材料,网架结构材料为铝合金时的碳排放量最小,网架结构材料为Q235钢时的碳排放量最大。

3)通过建立BP神经网络碳排放预测模型,可得预测值与实际值的误差均 $\leqslant 5\%$,训练效果符合预期,模型中的输入参数与不同屋盖材料生产阶段的碳排放量基本一致。

参考文献:

- [1] 杨俊祺,范晓军,赵跃华,等.基于PSO-BP神经网络的山西省碳排放预测[J].环境工程技术学报,2023,13(6):2016-2024.
YANG J Q, FAN X J, ZHAO Y H, et al. Prediction of carbon emissions in Shanxi Province based on PSO-BP neural network [J]. Journal of environmental engineering technology, 2023, 13(6):2016-2024.
- [2] 刘熹,潘龙高.碳中和目标下的贵州省碳排放预测研究[J].产业与科技论坛,2023,22(18):39-40.
LIU X, PAN L G. Study on carbon emission prediction of Guizhou Province under the target of carbon neutralization [J]. Industrial & science tribune, 2023, 22(18):39-40.
- [3] 李可馨,代大为.基于BP神经网络的中国建筑业碳达峰预测与实证路径[J].淮南师范学院学报,2023,25(3):79-85.
LI K X, DAI D W. Prediction and emission reduction path of carbon emission peak of China's construction industry based on BP neural network [J]. Journal of Huainan Normal University, 2023, 25(3):79-85.
- [4] 潘思羽,张美玲.基于BP神经网络的甘肃省二氧化碳排放预测及影响因素研究[J].环境工程,2023,41(7):61-68,85.
PAN S Y, ZHANG M L. Prediction of carbon dioxide emission in Gansu Province based on BP neural network and its influencing factors [J]. Environmental engineering, 2023, 41(7):61-68, 85.
- [5] 司琪,徐非凡,马瑞江,等.国内建筑碳排放研究可视化分析[J].施工技术(中英文),2023,52(15):138-143.
SI Q, XU F F, MA R J, et al. Visual analysis of domestic building carbon emissions research [J]. Construction technology, 2023, 52(15):138-143.
- [6] 郑建华,庄天环,韩扬.设计阶段改良对装配式建筑全生命周期碳排放影响研究[J].施工技术(中英文),2023,52(4):72-75,80.
ZHENG J H, ZHUANG T H, HAN Y. Study on impact of design phase improvement on the whole life cycle carbon emission of prefabricated buildings [J]. Construction technology, 2023, 52(4):72-75, 80.
- [7] 王亚平.中国省域建筑业碳排放空间关联网络效应分析[J].价值工程,2024,43(35):60-62.
WANG Y P. Analysis of spatial correlation network effects of carbon emissions from the construction industry in China's provincial areas [J]. Value engineering, 2024, 43(35):60-62.
- [8] 张桐瑞,耿立明,那永霖,等.基于三维视角下的装配式建筑碳排放影响因素研究[J].砖瓦,2024(12):136-138,141.
ZHANG T R, GENG L M, NA Y L, et al. Study on the influencing factors of carbon emission of assembled buildings based on three-dimensional perspective [J]. Brick-tile, 2024(12): 136-138, 141.
- [9] 王健,李若冰,魏存,等.黑龙江省建筑能耗和碳排放的测算与分析[J].低温建筑技术,2023,45(11):14-18,23.
WANG J, LI R B, WEI C, et al. Measurement and analysis of building energy consumption and carbon emissions in Heilongjiang [J]. Low temperature architecture technology, 2023, 45(11):14-18, 23.
- [10] 石振武,毕爱琦.长江三角洲城市群建筑部门碳排放时空格局及影响因素分析[J].西安理工大学学报,2024,40(2):182-192.
SHI Z W, BI A Q. Spatiotemporal pattern and influencing factors of carbon emissions from construction sector in the Yangtze River Delta urban agglomeration [J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2024, 40(2):182-192.