

DOI:10.19322/j.cnki.issn.1006-4710.2023.03.002

<https://xuebao.xaut.edu.cn>

引文格式:李文清,徐蔼彦,朱轶韵,余婷婷. 基于用能行为的建筑碳排放计算研究[J]. 西安理工大学学报,2023,39(3):310-316,403.

LI Wenqing, XU Aiyun, ZHU Yiyun, YU Tingting. Calculation of building carbon emissions based on energy consumption behavior [J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2023,39(3):310-316,403.

# 基于用能行为的建筑碳排放计算研究

李文清, 徐蔼彦, 朱轶韵, 余婷婷

(西安理工大学 土木建筑工程学院, 陕西 西安 710048)

**摘要:** 为了研究高校建筑碳排放影响因素,以西安理工大学一栋典型办公建筑为研究对象,采用现场调研、模拟计算及统计分析等方法,计算了该建筑运行阶段碳排放量,研究了学生在办公室内用能行为对建筑运行阶段碳排放量的影响。研究表明:该建筑运行阶段碳排放总量为 34 423.8 t,单位面积年碳排放量为 51.6 kg/(m<sup>2</sup>·a),其中暖通空调、照明和插座产生的碳排放分别占建筑总碳排放的 56.0%、22.6%、19.9%。对该建筑使用者的用能行为进行约束后,碳排放总量减少 23%,其中暖通空调、照明和插座的碳排放分别减少了 32%、12%、14%。碳排放与学生在校活动行为有关,使用者不良的用能习惯会造成能源的许多浪费,建议建立可视化的校园能耗与碳排放监管平台,同时积极开展低碳宣传教育,提升师生的低碳理念,推动低碳校园建设。

**关键词:** 高校建筑; 碳排放; 计算模型; 用能分析

中图分类号: TU201.5

文献标志码: A

文章编号: 1006-4710(2023)03-0310-07

## Calculation of building carbon emissions based on energy consumption behavior

LI Wenqing, XU Aiyun, ZHU Yiyun, YU Tingting

(Faculty of Civil Engineering and Architecture, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

**Abstract:** In order to study the influencing factors of building carbon emissions in colleges and universities, taking a typical office building in Xi'an University of Technology as the research object, the carbon emissions by the building during operation were calculated by field investigation, simulation calculation and statistical analysis. The influence of students' energy consumption behavior in the office on the carbon emissions of the building during operation was studied. The results show that the total carbon emission of the building is 34 423.8 t, and that the annual carbon emission per unit area is 51.6 kg/(m<sup>2</sup>·a). Respectively, the carbon emissions from HVAC, lighting and sockets accounted for 56.0%, 22.6% and 19.9% of the total carbon emissions of the building. After the energy consumption behavior of the building users is constrained, the total carbon emissions are reduced by 23%, among which the carbon emissions of HVAC, lighting and socket are reduced by 32%, 12% and 14%, respectively. Carbon emissions are related to students' school activities, and users' bad energy habits will cause a lot of waste of energy. It is suggested to establish a visual monitoring platform for campus energy consumption and carbon emissions, and actively carry out low-carbon publicity and education to the low-carbon concept of teachers and students and promote the construction of low-carbon campus.

收稿日期: 2022-07-12; 网络首发日期: 2023-01-12

网络首发地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail//61.1294.N.20230112.0952.002.html>

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52078419); 陕西省科技厅项目(2023-YBSF-189); 大学生创新创业训练计划资助项目(S202210700047)

第一作者: 李文清,女,硕士生,研究方向为建筑节能与碳排放分析。E-mail: liwenqing070411@163.com

通信作者: 朱轶韵,女,博士,教授,博导,研究方向为绿色建筑、建筑节能及碳排放等。E-mail: zyyun@xaut.edu.cn

**Key words:** university building; carbon emission; calculation model; energy analysis

近年来,气候变化问题是全球最瞩目的热点问题之一。2020年全球平均温度比1850—1900年的基线高 $1.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ <sup>[1]</sup>。据研究,温室气体排放加剧是全球温室效应的主要原因,温室气体主要包括 $\text{CO}_2$ 、 $\text{CH}_4$ 、 $\text{N}_2\text{O}$ 、 $\text{HFCs}$ 、 $\text{PFCs}$ 、 $\text{SF}_6$ ,控制二氧化碳排放是控制全球气候变暖的关键措施。

根据《中国建筑能耗研究报告2020》,2018年全国建筑全过程碳排放总量为49.3亿t,占全国能源碳排放总量的51.2%,其中建筑运行阶段碳排放21.1亿t,占建筑全过程碳排放总量的42.8%<sup>[2]</sup>。因此,建筑减排潜力巨大,而且由于建筑使用时间较长,减少运行阶段碳排放,对我国实现节能减排的目标具有重要意义。

我国高校众多,2020年全国高校共计2738所,高校建筑用途包含办公、教学、居住、体育活动等,是一个城市建筑的缩影<sup>[3]</sup>。近年来建筑能耗与碳排放是专家学者们所关注研究的热点,并取得了许多重要的成果。张晨悦以山东建筑大学为例,从建筑、交通、生活三个方面对碳排放进行了调研和计算,总结了高校建筑碳排放特点及规律<sup>[4]</sup>。程筹等通过对常州某高校一年的能耗与碳排放进行统计计算,得出电力碳排放占全部碳排放总量的93.19%,其中空调和照明占电力碳排放的85%左右<sup>[5]</sup>。同时还有研究发现建筑碳排放不仅与建造技术和节能设备的运用有关,很大一部分还取决于建筑使用者的节能行为习惯。但Chen Shuo通过筛选Scopus数据库内的相关研究,发现在用户行为对建筑能耗影响研究中,以大学建筑作为案例研究的仅17%<sup>[6]</sup>。其中,谈雪等通过定量分析得出校园能耗中与学生行为有关的功能性能耗占总能耗的比值达到60%以上<sup>[7]</sup>。赵倩等通过模拟居住建筑能耗,发现不同的开窗行为和空调行为对建筑能耗有不同程度的影响<sup>[8]</sup>。陈淑琴等对比分析了不同空调使用模式对空调能耗的影响,研究发现适度型(6~10月开启空调,温度设定 $24\text{ }^{\circ}\text{C}$ )和节约型(7、9月开启空调,温度设定 $26\text{ }^{\circ}\text{C}$ )使用方式比奢侈型(5~7、9、10月开启空调,温度设定 $22\text{ }^{\circ}\text{C}$ )使用方式分别节约空调能耗41%和73%<sup>[9]</sup>。Roschildt D. H.的研究表明用户的行为决定了建筑物的能源消耗程度,节约型比浪费型的用户在制冷能耗方面减少84%,照明能耗减少35%,总能源消耗降低30%<sup>[10]</sup>。Deng Yujing研究发现电脑的数量和使用频率对建筑能耗有较大的影响,同时空调设备的使用行为是影响学生公寓

用电量的最大因素<sup>[11]</sup>。陈淑琴等分析了照明、空调、电脑、饮水机和打印机的使用特征,研究表明高校办公建筑内使用者的用能行为存在着很大浪费<sup>[12]</sup>。以上研究均为用能行为对能耗的影响研究。国内对于建筑内用户的用能行为的研究较晚,关于用能行为对建筑碳排放量分析较少,因此,通过分析学生用能行为与不同行为模式对建筑碳排放的影响,可以系统且有针对性的提出校园减碳策略。

本文选取西安理工大学金花校区(位于陕西省西安市,属于寒冷地区)一栋典型办公建筑作为研究对象,首先,计算该建筑正常运行时的碳排放;其次,对建筑碳排放的重要影响因素之一学生用能行为进行调研统计分析;再次,对比分析三种不同行为模式(建筑标准运行、调研的用能行为、优化后的用能行为)下,该建筑碳排放的差异;最后,提出适宜的高校办公建筑节能减排措施。

## 1 建筑运行阶段碳排放计算

### 1.1 碳排放计算方法

碳排放计算方法众多<sup>[13]</sup>,如生命周期法、实测法、统计指标法、碳排放因子法等,其中碳排放因子法因可提供较为全面的建筑碳排放评估而得到广泛应用,其基本思路是根据碳排放清单,针对各种排放源确定其活动水平数据和碳排放因子,二者乘积即为碳排放量。

高校办公建筑运行阶段碳排放计算应包括暖通空调、照明、插座用能(电脑等外接用能设备)及电梯等其他系统在建筑运行期间的碳排放总量。建筑运行阶段碳排放量可按照式(1)计算。

$$C_M = \left( \sum_{i=1, j=1}^n E_{i,j} F_i \right) y / A \quad (1)$$

式中: $C_M$ 为建筑运行阶段单位建筑面积碳排放量( $\text{kg}/\text{m}^2$ ); $E_{i,j}$ 为第 $j$ 类系统的第 $i$ 类能源年消耗量( $\text{kWh}/\text{a}$ ); $F_i$ 为第 $i$ 类能源的碳排放因子,本研究采用的碳排放因子取自《建筑碳排放计算标准》(GB/T 51366—2019); $y$ 为建筑设计寿命( $\text{a}$ ); $A$ 为建筑面积( $\text{m}^2$ )。

### 1.2 碳排放模拟计算

本文使用斯维尔建筑碳排放CEEB2022软件对西安理工大学金花校区一栋典型办公建筑运行阶段的碳排放量进行计算。首先确定建筑参数以及各项运行参数,以确定软件模拟的准确性。然后对建筑暖通空调系统、照明系统、其他用能设备产生的碳排放量进行模拟。

### 1.2.1 建筑参数设置

建筑参数包括:建筑的地理位置、当地的气象参数、建筑的结构参数、运行参数。其中运行参数主要包括人员在室情况、人员密度、照明和插座设备的设置及运行情况、空调系统设置情况、热水供应情况、空调系统分区和冷热源情况、电梯等<sup>[14]</sup>。

本文选取的典型办公建筑位于陕西省西安市碑林区,气象参数采用西安典型气象年数据,建造于1985年,为“L”型建筑,建筑面积 13 352 m<sup>2</sup>。东侧建筑(九层)和南侧建筑(六层)的房间功能以办公室为主,北侧建筑为五层,均为阶梯教室。该建筑的西北轴测图如图 1 所示,其结构参数见表 1。

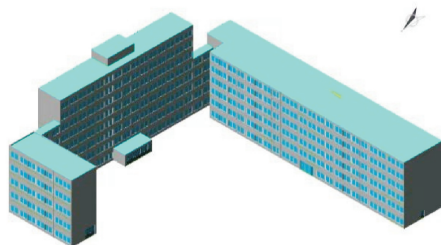


图 1 建筑西北轴测图

Fig. 1 Northwest axonometric drawing of buildings

表 1 建筑结构参数

Tab. 1 Structural parameters of buildings

建筑构件	构造做法(自下而上)	传热系数/ (W·m <sup>-2</sup> ·K <sup>-1</sup> )
屋顶	240 mm 厚预应力钢筋混凝土空心板+50 mm 厚水泥蛭石砂浆保温层+20 mm 厚水泥砂浆找平层+200 mm 厚四角砖墩+30 mm 厚 200 号细石混凝土预制板	1.448
外墙	240 mm:75 号砖	1.926
隔墙	120 mm:75 号砖	2.471
楼板	150 mm 厚钢筋混凝土预制板+50 mm 厚钢筋混凝土现浇层+120 mm 厚 35 号炉渣砼垫层+30 mm 厚 1:2 水泥砂浆抹面	1.955

建筑运行参数通过调研统计获取。通过调研发现,人员在室时间为 8:00~12:00,人员在室概率节假日低于工作日。建筑运行过程中,会议室电器设备包括投屏设备和电脑等。平均各办公室电器设备包括 8 台笔记本、1 台打印机、1 个烧水器。部分办公室夏季使用小风扇,个别办公室冬季使用电暖气。教室电器设备主要包括电脑以及多媒体设备。办公

设备以及照明设备均为入室即开启状态。以此确定各房间电器设备功率参数。各房间照明功率密度按照各房间实际使用灯具进行确定。其他参数参考《西安市公共建筑节能设计标准》进行确定。具体建筑各功能房间运行参数如表 2 所示。

表 2 建筑各功能房间运行参数

Tab. 2 Operating parameters of functional rooms in buildings

房间类型	空调温度/ ℃	供暖温度/ ℃	新风量/ (m <sup>3</sup> ·h <sup>-1</sup> )	人员密度/ (人·m <sup>-2</sup> )	照明功率密度/ (W·m <sup>-2</sup> )	电器设备功率/ (W·m <sup>-2</sup> )
会议室	26	20	30	0.50	9	7.4
办公室	26	20	30	0.13	9	15
卫生间		18	20		3	
教室		20	30	0.43	7	3.4
杂物间					5	
楼梯间					5	
走廊、大厅					5	

建筑内空调系统采用调研中办公室多用的分体挂壁式空气调节器,该空调整冷量 3 500 W,制冷输入功率 1 064 W,制热量 3 850 W,制热输入功率 1 167 W,制冷能效比 3.29,制热能效比 3.30,未考虑热回收。空调全年可以使用,冬夏分别进行供热供冷。11 月 15 日至 3 月 15 日进行集中供暖。冬季供热方式为空调整热与暖气供应结合。暖气供热为燃气锅炉+换热机组组合供热,锅炉采用超低氮冷凝热水锅炉,系统供热效率 90%以上。该建筑无集中供应热水设备。

### 1.2.2 建筑碳排放计算

通过斯维尔建筑碳排放 CEEB2022 软件模拟计算得出建筑运行过程各个系统的能源消耗量以及碳排放量,具体数值见表 3。该建筑以上述参数运行 50 年总碳排放量为 34 423.8 t,单位面积碳排放量为 2 578.2 kg/m<sup>2</sup>,单位面积年碳排放量为 51.6 kg/(m<sup>2</sup>·a)。

建筑运行阶段碳排放包括暖通空调、照明、插座以及其他系统所产生的碳排放总和。由于该建筑燃气消耗全部用于冬季供暖,将该部分碳排放计入暖通空调系统内。建筑运行阶段总碳排放中暖通空调(包括电力制冷与制热、燃烧燃气锅炉制热)产生的碳排放占比 56.0%;照明系统占比 22.6%;插座设备(主要为使用电脑、打印机等办公设备)占比 19.9%;其他类占比 1.5%,如图 2 所示。



同时可以看出,办公建筑使用燃气所产生的碳排放量仅占建筑总碳排放量的 6.6%,占比较少,而暖通空调、照明、插座设备电力碳排放各占总量约 1/3。这表明,通过改变学生的用能习惯,进而实现节能减排这一目标的潜力较大。

表 3 建筑运行阶段碳排放量  
Tab. 3 Carbon emissions during building operation

能源类型	子类	耗电量/ (kWh· m <sup>-2</sup> )	耗热量/ (kWh· m <sup>-2</sup> )	碳排放因 子/(kg· kWh <sup>-1</sup> )	碳排放 量/t
电力	供冷	892			10 626.1
	供暖	536			6 385.2
	照明	654		0.892 2	7 790.8
	插座 设备	575			6 849.7
	其他	43			512.2
化石 燃料	燃气		1 065	55.54	2 259.8
	合计				34 423.8

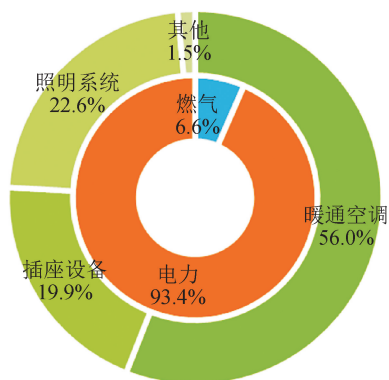


图 2 建筑运行阶段碳排放量占比

Fig. 2 Proportion of carbon emissions in building operation stage in building operation stage

## 2 建筑使用者用能行为分析

建筑碳排放与建筑能源消耗量有关,而能源的消耗取决于用能设备的使用情况。建筑中人的用能行为包括人员对空调、照明、插座(用电设备,如电脑、打印机、烧水器等)的使用等可人为控制的行为<sup>[15]</sup>,为分析学生的用能行为对办公建筑碳排放的影响,本研究于 2022 年 3 月至 5 月在校内,通过发放电子问卷、与学生面对面交流、进入办公室实地考察等方法进行调研。调研内容包括学生的基本信息,办公场所空调全年使用情况,日常照明、电脑等耗能设备的使用时间、频率、使用习惯等,并获取有

效问卷 112 份。

### 2.1 办公建筑人员在室时间分析

图 3 统计了该办公建筑内学生工作日与节假日各时间段在室情况。从图中可以看出,节假日学生在室活动情况与工作日期间趋势相同,但学生在室率相较于工作日下降了约 25%。工作日 7:00 开始学生在室率逐渐增加,9:00~12:00 学生在室率维持在 85%~95%;12:00~14:00 学生离开办公室,约 20%的学生在此期间会返回办公室;14:00~15:00 学生返回办公室,在室率维持在 85%~95%;17:00~19:00 学生离开办公室;而在 19:00 之后有部分同学会返回办公室继续办公学习,直到 24:00 学生全部离开办公室。

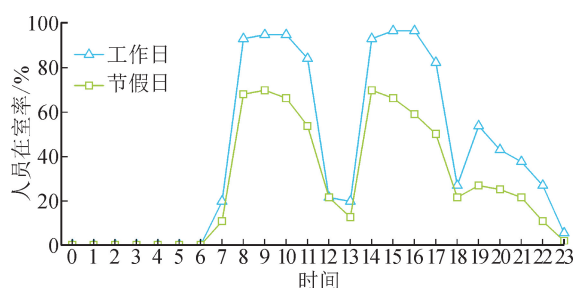


图 3 人员逐时在室率

Fig. 3 Probability of users in the room at each time

### 2.2 典型用能设备使用情况分析

#### 2.2.1 空调使用情况分析

图 4 是该办公建筑内学生全年各月空调使用情况。从图中可以看出,随着 5 月份气温开始升高,天气逐渐炎热,空调使用概率逐渐上升,7、8 月达到峰值,在室的学生开空调概率可达 80%。随着季节进入秋天,气温逐渐下降,使用空调制冷有所下降。从 10 月开始,空调使用开始有小幅度增加,学生在室使用概率较低。11 月 15 日至次年 3 月 15 日集中供暖,但冬季空调使用率有所上升,经调研发现主要原因是老旧建筑暖气设备老化,传热能力较差,同时冬季寒冷,未常开窗通风,室内易出现空气不流通等现象,部分学生会选择开启空调辅助供热和调节空气流通。

图 5 进一步反映了冬夏两季工作日和节假日内各时间段空调使用情况。从图中可以看出,冬季空调使用率低于夏季。通过调查发现,这是由于夏季较为炎热,主要采用空调制冷为室内提供舒适的环境,而冬季采暖以集中供暖为主,空调制热辅助供暖。同时从图中可看出节假日空调使用率低于工作日,且每日空调使用主要在 9:00~12:00,14:00~17:00,与学生在室工作学习时间相符合。

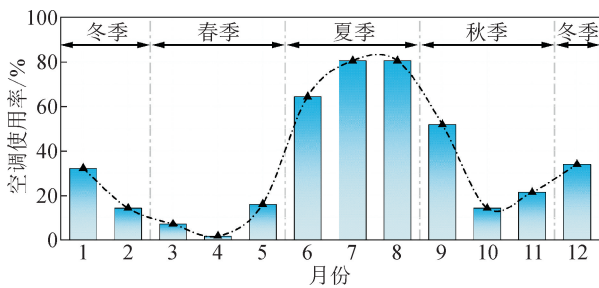


图4 空调逐月使用率

Fig. 4 Monthly utilization rate of air conditioning

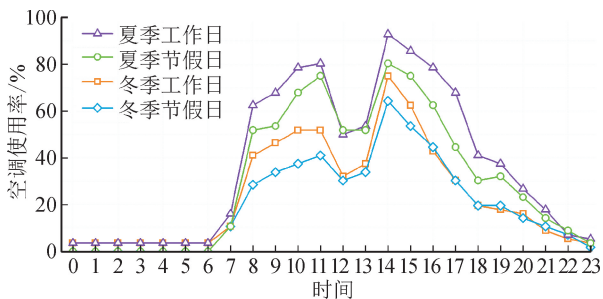


图5 各时间段空调使用情况

Fig. 5 Air conditioning usage at each time period

### 2.2.2 照明使用情况分析

图6反映了工作日与节假日各时间段照明设备使用情况。可看出照明主要集中在8:00~22:00,其使用率均在60%以上,且夜间仍有部分办公室处于照明状态。10:00~16:00照明设备使用概率有所下降,原因是有一部分学生因为室外光照较好,室内采光可达到正常使用需求所以关闭照明设备。但大部分学生则更习惯于早上进入办公室即开灯,直到晚上离开办公室才关灯,并无根据采光情况或中途离开办公室而随手关灯的习惯。

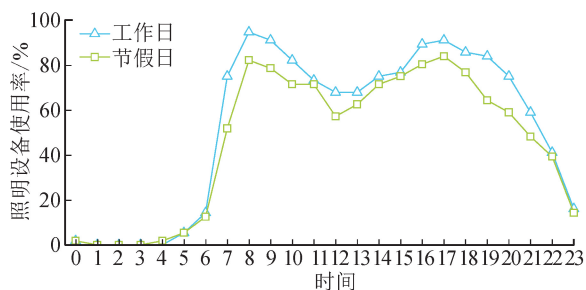


图6 各时间段照明设备使用情况

Fig. 6 Use of lighting equipment at each time period

### 2.2.3 电脑设备使用情况分析

电脑是学生日常工作学习中必不可少的设备。图7反映了工作日与节假日各时间段电脑使用情况。从图中可以看出,工作日学生到达办公室开始使用电脑的时间在8:00左右,9:00~12:00内有85%~95%的电脑处于开启状态;12:00~14:00大部

分学生离开办公室,其中约30%的学生在此期间仍在使用电脑或使其处于待机状态;14:00学生开始返回办公室使用电脑,14:00~18:00电脑开启状态维持在85%~95%;18:00~19:00学生离开办公室并关闭电脑;20:00~24:00有部分同学会返回办公室继续使用电脑办公学习,但相较于白天,夜间电脑使用率约减小了一半。节假日与工作日电脑使用情况大致相同,但电脑使用率相较于工作日下降了约20%。电脑整体使用情况与学生在室情况基本相同。

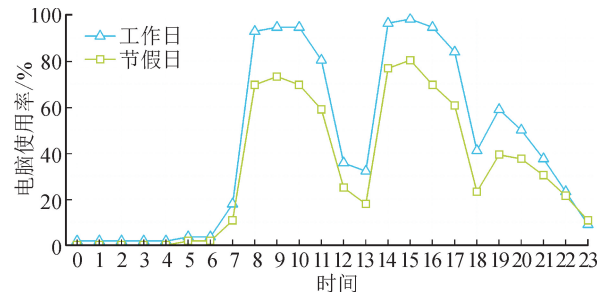


图7 各时间段电脑使用情况

Fig. 7 Computer usage at each time period

### 2.3 用能行为的特征分析

建筑内影响碳排放的因素中,与人的行为有关的主要可分为两个方面<sup>[16]</sup>:一是为满足使用者热舒适需求,使用暖气和空调这类供热和制冷设备,称为“环境因素”;二是为满足用户生活工作需求,使用照明设备、电脑、打印机、电梯、排气扇等设备,称为“工作因素”。

通过调研问卷发现,环境因素的改变一方面与建筑物和外界环境的交互有关。当夏季外界气温升高、冬季外界气温降低时,使用者感觉温度不利于高效的工作学习而常常采取开空调。日常通过使用照明设备弥补自然采光的不足。另一方面,也存在由于节能意识较弱而导致不使用时不关闭照明、不关闭空调等设备的行为。此类因素对建筑的碳排放影响会随着使用者对舒适度的需求和节能意识的改变而改变。节能减排策略也主要从此方面入手。

而工作因素与建筑物的功能和用户的使用目的有关。此类因素不会因为建筑使用者的行为而发生改变,只与建筑自身的被使用时间有关,减排空间较小。但可考虑更改无人使用时设备的开启情况,以达到节能减排目的。

### 3 不同行为模式下建筑碳排放对比分析

为进一步分析用户用能行为对建筑碳排放的影响,现对建筑内办公室参数进行调整,对比三种不同的行为模式下建筑运行阶段碳排放差异。模式一根

据《公共建筑节能设计标准》(JGJ/T 67-2019)的规定,按无设计文件确定参数时确定房间运行参数,表现为工作日 7:00~18:00 空调温度 26℃,供暖温度 20℃,照明功率密度为 11 W/m<sup>2</sup>,节假日各设备均不运行;模式二采用调研分析结果来确定相关参数,房间运行参数见表 2;模式三对使用者用能行为

模式进行优化,学生行为按照办公时间(8:00~12:00,14:00~24:00)的实际情况确定参数,但在午休时间(12:00~14:00)照明使用率降至 20%,设备使用率降至 10%,休息时间(0:00~8:00)关闭照明、空调、电脑等设备。人员在室率与设备、照明使用率具体数值如表 4、表 5 所示。

表 4 办公室内人员在室率  
Tab. 4 Probability of staff in office

模式		各时间段的人员在室率/%																							
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
模式一	工作日	0	0	0	0	0	0	10	50	95	95	95	80	80	95	95	95	95	30	30	0	0	0	0	0
	节假日	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
模式二	工作日	0	0	0	0	0	0	20	93	95	95	84	21	20	93	96	96	82	27	54	43	38	27	5	
	节假日	0	0	0	0	0	0	11	68	70	66	54	21	13	70	66	59	50	21	27	25	21	11	2	
模式三	工作日	0	0	0	0	0	0	20	93	95	95	84	21	20	93	96	96	82	27	54	43	38	27	5	
	节假日	0	0	0	0	0	0	11	68	70	66	54	21	13	70	66	59	50	21	27	25	21	11	2	

表 5 办公室内设备、照明使用率  
Tab. 5 Probability of use of office equipment and lighting

模式		各时间段内设备、照明使用率/%																								
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	
模式一	照明	工作日	0	0	0	0	0	10	50	95	95	95	80	80	95	95	95	95	30	30	0	0	0	0	0	
		节假日	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	设备	工作日	0	0	0	0	0	10	50	95	95	95	50	50	95	95	95	95	30	30	0	0	0	0	0	
		节假日	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
模式二	照明	工作日	2	0	0	0	5	14	75	95	91	82	73	68	68	75	77	89	91	86	84	75	59	41	16	
		节假日	2	0	0	0	2	5	13	52	82	79	71	71	57	63	71	75	80	84	77	64	59	48	39	14
	设备	工作日	2	2	2	2	2	4	4	18	93	95	95	80	36	32	96	98	95	84	41	59	50	38	23	9
		节假日	0	0	0	0	0	2	2	11	70	73	70	59	25	18	77	80	70	61	23	39	38	30	21	11
模式三	照明	工作日	0	0	0	0	0	0	75	95	91	82	20	20	20	75	77	89	91	26	26	75	59	41	5	
		节假日	0	0	0	0	0	0	52	82	79	71	10	10	10	71	75	80	84	77	64	59	48	39	0	
	设备	工作日	0	0	0	0	0	0	18	93	95	95	20	20	20	96	98	95	84	26	26	50	38	23	5	
		节假日	0	0	0	0	0	0	11	70	73	70	10	10	10	77	80	70	61	23	39	38	30	21	0	

该建筑用能以电力为主,辅以少量燃气。日常用能涉及暖通空调(包括电力制冷、制热,燃烧燃气锅炉制热),照明,插座设备(包括电脑、打印机等设备),电梯等其他方面用能。根据三种行为模式计算得到的碳排放结果如图 8,图 9 所示。

由图 8 可知,模式二单位面积碳排放量最高,模式一次之,模式三最低。由图 9 可知,模式一与模式二计算得出各项碳排放具有一定差异,但总碳排放量较为接近。由于模式一根据公共建筑节能设计标准设置办公楼的相关房间参数,设置系统工作时间

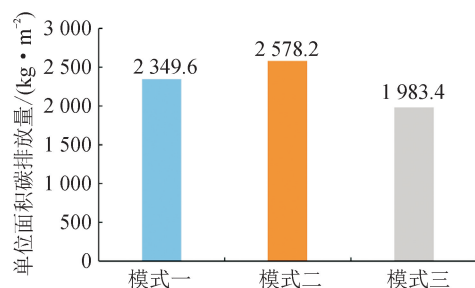


图 8 不同模式下建筑单位面积碳排放量  
Fig. 8 Carbon emissions per building area by different modes

为 7:00~18:00,且认定节假日相关用能系统不运行,这与学校办公楼的实际使用情况有所出入,故实际碳排放高于设计标准;但设计标准对于部分参数设计值较高,例如照明设备在工作时间内运行概率高达 95%,而实际运行概率多在 70%~80%之间,这将会增加单位时间内能源消耗计算量,以此权衡建筑的碳排放量。模式二是按照实际计算,且与规范设计相符,数据可靠。

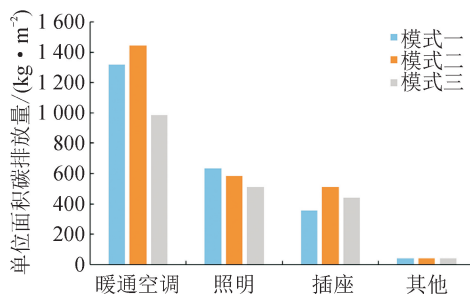


图 9 不同模式下建筑内各子项单位面积碳排放量

Fig. 9 Carbon emissions per unit area of each sub-item in building by different modes

模式三是对模式二进行了优化改进,对学生的不规范用能进行优化,具体表现为在 0:00~8:00 关闭照明、空调、电脑等设备,同时在 12:00~14:00 午休时间降低了照明以及空调的使用率。根据计算结果,优化后建筑碳排放总量减少 23%,其中暖通空调碳排放比优化前降低了 32%,照明碳排放量降低了 12%,插座设备类用能的碳排放降低了 14%。同时优化后结果相比与公共建筑节能设计标准的碳排放也有所减少,这说明,建筑使用者的行为将直接影响建筑碳排放量,约束使用者的不良用能行为,减排效果明显。因此为了减少校园建筑碳排放,应该加强校内各种宣传教育活动,提高学生的低碳意识,以达到节能减排的目的。

#### 4 结论与建议

1) 本文研究的办公建筑运行阶段的碳排放总量为 34 423.8 t,单位面积年碳排放量为 51.6 kg/(m<sup>2</sup>·a)。其中暖通空调、照明和插座产生的碳排放分别占建筑总碳排放的 56.0%、22.6%、19.9%。通过改变人员的用能习惯,实现节能减排的潜力较大。

2) 对学生的用能行为进行约束后(优化模式),仅关闭夜间设备防止浪费,降低午休时间设备待机概率,则暖通空调、照明和插座的碳排放分别降低了 32%、12%和 14%。减排效果明显。

3) 建议建立可视化的校园能耗和碳排放监管平台,同时积极开展低碳宣传教育,提升师生的低碳理念,推动低碳校园建设。

#### 参考文献:

- [1] QI Jianfeng Jeffrey, PETER Dauvergne. China's rising influence on climate governance: forging a path for the global south[J]. *Global Environmental Change*, 2022, 73:102484.
- [2] 中国建筑节能协会. 中国建筑能耗研究报告 2020[J]. 建筑节能(中英文), 2021(2):1-6.
- [3] 周侠. 重庆大学校园碳平衡研究[D]. 重庆:重庆大学, 2015.  
ZHOU Xia. A study on the campus carbon balance of Chongqing University[D]. Chongqing: Chongqing University, 2015.
- [4] 张晨悦. 山东建筑大学碳排放计算研究[D]. 济南:山东建筑大学, 2016.  
ZHANG Chenyue. Carbon emission calculation of Shandong Jianzhu University[D]. Jinan: Shandong Jianzhu University, 2016.
- [5] 程骞, 郑浩. 基于碳排放数据的高校绿色建筑节能水平分析[J]. 安阳工学院学报, 2021, 20(2):34-37.  
CHENG Qian, ZHENG Hao. The Energy-saving level analysis of green universities building on carbon emission data[J]. *Journal of Anyang Institute of Technology*, 2021, 20(2):34-37.
- [6] CHEN Shuo, ZHANG Guomin, XIA Xiaobo, et al. The impacts of occupant behavior on building energy consumption: a review[J]. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 2021, 45:101212.
- [7] 谈雪, 郭强, 许健, 等. 夏热冬冷地区某高校典型建筑用能特征与用能行为影响分析[J]. 南京理工大学学报, 2019, 43(1):101-107.  
TAN Xue, GUO Qiang, XU Jian, et al. Characteristics of energy use of typical buildings and its behavioral influencing analysis in one university campus in hot summer and cold winter, China[J]. *Journal of Nanjing University of Science and Technology*, 2019, 43(1): 101-107.
- [8] 赵倩, 林建泉, 黄忠, 等. 重庆农村居住建筑人行为对建筑空调能耗的影响[J]. 制冷与空调(四川), 2017, 31(6):627-635.  
ZHAO Qian, LIN Jianquan, HUANG Zhong, et al. Impacts of occupant behavior pattern on air-conditioning energy consumption of rural residential buildings in Chongqing [J]. *Refrigeration and Air Conditioning*, 2017, 31(6):627-635.
- [9] 陈淑琴, 潘阳阳, HIROSHI Yoshino, 等. 办公建筑空调使用行为定义研究[J]. 建筑科学, 2015, 31(10): 228-234.  
CHEN Shuqin, PAN Yangyang, HIROSHI Yoshino, et al. Research on the definition of air-conditioning occupant behavior in office building[J]. *Building Science*, 2015, 31(10):228-234.



- Province during 1991-2018[J]. Plateau Meteorology, 2020,39(4):762-773.
- [36] 王玉洁, 秦大河. 气候变化及人类活动对西北干旱区水资源影响研究综述[J]. 气候变化研究进展, 2017, 13(5):483-493.  
WANG Yujie, QING Dahe. Influence of climate change and human activity on water resources in arid region of Northwest China: an overview[J]. Climate Change Research, 2017,13(5):483-493.
- [37] 毕超, 单楠, 毕华兴. 西北极端干旱区近 54 年降水量和温度变化趋势[J]. 中国水土保持科学, 2015, 13(3):90-96.  
BI Chao, SHAN Nan, BI Huaxing. Variation trends of temperature and precipitation in extremely arid region of northwestern China in recent 54 years[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2015, 13(3): 90-96.
- [38] 邹磊, 夏军, 张印, 等. 海河流域降水时空演变特征及其驱动力分析[J]. 水资源保护, 2021,37(1):53-60.  
ZHOU Lei, XIA Jun, ZHANG Yin, et al. Spatial-temporal change characteristics and driving forces of precipitation in the Haihe River Basin[J]. Water Resources Protection 2021,37(1):53-60.
- [39] 陈发虎, 陈婕, 黄伟. 东亚夏季风减弱诱发我国西北干旱区降水增加[J]. 中国科学:地球科学, 2021,51(5):824-826.
- [40] 王婷, 李双双, 延军平, 等. 基于 ENSO 发展过程的中国夏季降水时空变化特征[J]. 自然资源学报, 2022,37(3):803-815.  
WANG Ting, LI Shuangshuang, YAN Junping, et al. Spatio-temporal variation of summer precipitation in China based on ENSO development process[J]. Journal of Natural Resources, 2022,37(3):803-815.  
(责任编辑 王绪迪)

(上接第 316 页)

- [10] ROSCHILDT D H, KARINI R L, BAPTISTA S C A S D, et al. Influence of user behavior on energy consumption in a university building versus automation costs[J]. Energy and Buildings, 2022,256:111730.
- [11] DENG Yujing, GOU Zhonghua, GUI Xuechen, et al. Energy consumption characteristics and influential use behaviors in university dormitory buildings in China's hot summer-cold winter climate region[J]. Journal of Building Engineering, 2021,33:101870.
- [12] 陈淑琴, 徐方, 杜博文, 等. 高校校园办公建筑使用者用能行为特征分析[J]. 建筑热能通风空调, 2016,35(1):31-34.  
CHEN Shuqin, XU Fang, DU Bowen, et al. The characteristics of energy use behavior in office buildings on campus [J]. Building Energy & Environment, 2016,35(1):31-34.
- [13] 李小冬, 朱辰. 我国建筑碳排放核算及影响因素研究综述[J]. 安全与环境学报, 2020,20(1):317-327.  
LI Xiaodong, ZHU Chen. Summary of research on account of carbon emission in building industry and analysis of its influential factors[J]. Journal of Safety and Environment, 2020,20(1):317-327.
- [14] 白路恒. 公共建筑全生命周期碳排放预测模型研究——以天津市办公建筑为例[D]. 天津:天津大学, 2019.  
BAI Luheng. Study on public building life cycle carbon emissions prediction model—taking office buildings in Tianjin as examples[D]. Tianjin: Tianjin University, 2019.
- [15] 王闯. 有关建筑用能的人行为模拟研究[D]. 北京:清华大学, 2014.  
WANG Chuang. Simulation research on occupant energy-related behaviors in building[D]. Beijing: Tsinghua University, 2014.
- [16] 孙禹, 冷红, 蒋存妍. 基于人行为影响的住区建筑多主体集成能耗模型[J]. 土木建筑与环境工程, 2017, 39(1):38-50.  
SUN Yu, LENG Hong, JIANG Cunyan. Multi-agent based energy model for domestic buildings based on occupant behavior[J]. Journal of Civil Architectural and Environmental Engineering, 2017,39(1):38-50.  
(责任编辑 王卫勋)