

# 校园绿色图书馆建筑运行性能实测分析

周 燕, 徐伊雯, 蔡健敏, 贺文丽

(宁波大学 土木与环境工程学院, 浙江 宁波 315211)

**摘要:** 以绿色和常规图书馆建筑为例, 从室内热湿环境、光环境、空气品质、用户满意度等方面对其相同功能区进行实测与调查, 对比分析两者的室内环境质量和能耗水平. 结果表明: 绿色图书馆建筑室内热湿环境和  $\text{CO}_2$  体积分数优于常规图书馆建筑, 但室内光环境水平低于常规图书馆建筑; 绿色图书馆建筑全年能耗水平约为  $71.95 \text{ kWh} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1}$ , 常规图书馆建筑全年耗能水平约为  $90.48 \text{ kWh} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1}$ , 两者能耗水平差别的主要原因是常规图书馆全年平均空调用电量远高于绿色图书馆建筑. 因此, 常规图书馆建筑在能耗优化时应重点考虑采取措施降低空调能耗. 研究结果可为促进图书馆建筑实际运行效能提供有益参考.

**关键词:** 绿色图书馆建筑; 室内环境质量; 能耗; 现场测试

**中图分类号:** TU-023

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1001-5132 (2020) 06-0107-07

近年来, 获得绿色建筑标识认证的建筑物数量增长迅速, 但建筑实际运行与设计存在偏差<sup>[1-2]</sup>. 因此, 开展绿色公共建筑运行性能的实测调研与分析, 发现实际运行中的问题, 对于我国绿色建筑持续良好的发展有重要的意义. 国内对绿色办公建筑实际运行性能的研究相对较多<sup>[3-5]</sup>, 但对绿色图书馆建筑的实际运行性能研究较少, 缺乏实测可靠的从运行数据出发的综合评价. 本文通过对校园内一星级绿色图书馆建筑和常规图书馆建筑的运行性能进行实测, 从建筑能耗、室内热湿环境、光环境、空气品质 and 用户满意等方面进行对比分析, 为促进节能减排和国内绿色图书馆建筑的实际运行性能优化提供有益的参考.

## 1 案例建筑概况

本文中绿色图书馆建筑为宁波大学主校区内的真诚图书馆, 获得绿色建筑设计标识一星级认证; 常规图书馆建筑为宁波大学梅山校区的刘浩清·孔爱菊图书馆. 绿色图书馆建筑总建筑面积约为  $40\,162 \text{ m}^2$ , 建筑高度为  $23.5 \text{ m}$ , 其中地上为 5 层, 地下室 1 层; 常规图书馆建筑总建筑面积约为

$10\,950 \text{ m}^2$ , 建筑高度为  $29.0 \text{ m}$ , 其中地上为 5 层, 地下室 1 层. 绿色图书馆建筑采用土壤源热泵作为主要系统冷热源, 中央空调采用全空气加新风系统, 常规图书馆建筑采用 VRF 空调系统, 新风采用直接蒸发式机组. 两个案例建筑均以南向为主要朝向, 具体设计参数见表 1. 两个案例建筑均是集教学与科研服务为一体的现代化高校图书馆, 主要功能区基本相同, 如图 1 所示. 两个案例建筑的建造年代、楼层数量、体形系数、平面布局 and 围护结构的保温性能基本一致, 具有可对比性.

表 1 绿色和常规图书馆建筑各项设计参数

| 建筑    | 建筑面<br>积/ $\text{m}^2$                                    | 建筑高<br>度/ $\text{m}$ | 体形<br>系数 | 窗墙比             |      |      |      |
|-------|-----------------------------------------------------------|----------------------|----------|-----------------|------|------|------|
|       |                                                           |                      |          | 东               | 南    | 西    | 北    |
| 绿色图书馆 | 40 162                                                    | 23.5                 | 0.13     | 0.27            | 0.28 | 0.22 | 0.31 |
| 常规图书馆 | 10 950                                                    | 29.0                 | 0.14     | 0.33            | 0.47 | 0.31 | 0.32 |
| 建筑    | 传热系数/ $(\text{W} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{K})^{-1})$ |                      |          | 中央空调系统          |      |      |      |
|       | 外墙                                                        | 屋顶                   | 外窗       | 形式              |      |      |      |
| 绿色图书馆 | 0.95                                                      | 0.47                 | 2.7      | 地源热泵全空气<br>空调系统 |      |      |      |
| 常规图书馆 | 0.91                                                      | 0.47                 | 2.7      | VRF 空调系统        |      |      |      |

收稿日期: 2020-03-20.

宁波大学学报(理工版)网址: <http://journalg.nbu.edu.cn/>

基金项目: 浙江省自然科学基金(LY20E080009); 宁波市自然科学基金(2019A610400); 宁波市公益性计划项目(202002N3120); 宁波市住房和城乡建设局科技项目; 浙江省大学生科技创新项目(新苗人才计划).

第一作者: 周燕(1977-), 女, 河南南阳人, 博士/副教授, 主要研究方向: 建筑节能与可再生能源的利用. E-mail: zhouyan@nbu.edu.cn



图1 案例建筑平面布置及测试区域

## 2 室内环境测试与调查方法

### 2.1 室内物理环境参数测试

为了得到室内物理参数数据,采用测试仪器从建筑室内热湿环境、光环境和空气品质等方面测试室内空气温度、湿度、照度和 $\text{CO}_2$ 体积分数。测试仪器为LM8000A 风速、湿度、光照度、温度四合一表,GM1040 照度计,RC-4 温湿度记录仪,HT-2000  $\text{CO}_2$ 测试仪。其中,空气温度、湿度及 $\text{CO}_2$ 体积分数采用自动记录仪以15 min的间隔进行记录。使用测量仪器时,测点选择自习区桌面正中的位置;避开热源光源干扰,确保仪器测量的结果真实可靠,物理参数和相应测量精度见表2。

表2 物理参数及相应仪器测量范围和精度

| 物理参数               | 测量范围                        | 精度                           |
|--------------------|-----------------------------|------------------------------|
| 空气温度               | -40~85 $^{\circ}\text{C}$   | $\pm 0.5$ $^{\circ}\text{C}$ |
| 相对湿度               | 10%~95%                     | $\pm 3\%$                    |
| $\text{CO}_2$ 体积分数 | $0\sim 9.999\times 10^{-3}$ | $\pm 5\times 10^{-5}$        |
| 光照度                | $0\sim 100\,000$ lx         | $\pm 3\%$                    |

为了对比分析图书馆建筑的室内环境质量,分别选取绿色和常规图书馆建筑相同功能区域进行测试。如图1所示,测试区域均为图书馆内学生自习区,均位于案例建筑四楼南面,前面无遮挡。两个案例建筑测试期均为2019年1~12月。自习区仪器放置位置根据图书馆内人流分布、测试人员感知的物理参数变化确定。绿色和常规图书馆建筑测试区域在测试期间的人员密度基本相同,分别为0.237和0.240  $\text{人}\cdot\text{m}^{-2}$ 。因此,人员因素对绿色和常规图书馆建筑室内环境参数的影响基本相同,对比分析时可以忽略。

### 2.2 用户满意度调查

为了量化用户对室内建筑环境性能在热环境、光环境和空气质量等方面的满意度评价,在绿色图书馆建筑和常规图书馆建筑物理参数实测的区域进行学生问卷调查,参考热环境人类工效学国家标准<sup>[6]</sup>,问卷采用从-3到+3的7等级模型表示用户满意度水平从十分不满意至十分满意。绿色和常规图书馆建筑有效问卷调查均为102份,参与绿

色图书馆建筑问卷调查的同学在测试区域停留时间在1h之内为12人,1~3h为34人,3~6h为30人,6h以上为26人.参与常规图书馆建筑问卷调查的同学在测试区域停留时间在1h之内为16人,1~3h为28人,3~6h为22人,6h以上为36人.问卷调查主要内容包括:(1)被采访者的基本信息(性别、年级、停留时间)和对绿色建筑了解程度等;(2)被采访者对于室内环境质量的满意度评价,指标包括不同季节室内温湿环境、光照、空气品质和室内综合环境等.其中室内环境质量满意度指标分为“十分满意”“满意”“较满意”“一般”“较不满意”“不满意”“十分不满意”7个等级.被采访者对于某项指标不满意时,写出不满意原因.

### 3 室内物理环境和能耗水平分析

#### 3.1 室内热湿环境分析

通过对绿色和常规图书馆建筑自习区的室内热环境参数连续测试,选取冬季(1月)、夏季(7月)及过渡季(4月)典型月中连续2周的每天平均温度和湿度进行分析,每天平均温度和相对湿度分布如图2所示.

在夏季,绿色和常规图书馆建筑室内均有空调系统,两者室内温度均维持在25~28℃,室内温

度波动较小.两者室内相对湿度波动亦较小,维持在65%~73%之间,但绿色图书馆建筑室内湿度略低于常规图书馆建筑.在过渡季节,因绿色图书馆建筑依靠开启室内新风系统和部分外窗进行通风,常规图书馆建筑仅靠开启外窗通风,两者受室外温度和相对湿度影响较大,变化趋势同室外基本趋于一致,绿色图书馆建筑室内温度和相对湿度略低于常规图书馆.在冬季,绿色图书馆建筑室内温度略低于常规图书馆建筑.

为了更好地评价和对比分析绿色与常规图书馆建筑的室内热环境,参考民用建筑室内热湿环境评价标准<sup>[7]</sup>中规定的热舒适Ⅱ级区域:夏季室内温度24~28℃,相对湿度40%~70%,如图3中的实线框;冬季室内温度18~24℃,相对湿度≤60%,如图3中的虚线框.在焓湿图上绘出夏季、冬季和过渡季节测试得到的温度和相对湿度对应的焓湿量数据点,如图3所示的散点部分.

从图3中可以看出,夏季绿色图书馆建筑测试区域约有48.22%的测点在热湿舒适Ⅱ级区,常规图书馆约有46.81%的测点在热湿舒适Ⅱ级区;冬季绿色图书馆建筑测试区域约有16.31%的测点在热湿舒适Ⅱ级区,常规图书馆约有20.57%的测点属于热湿舒适Ⅱ级区;过渡季绿色图书馆建筑测

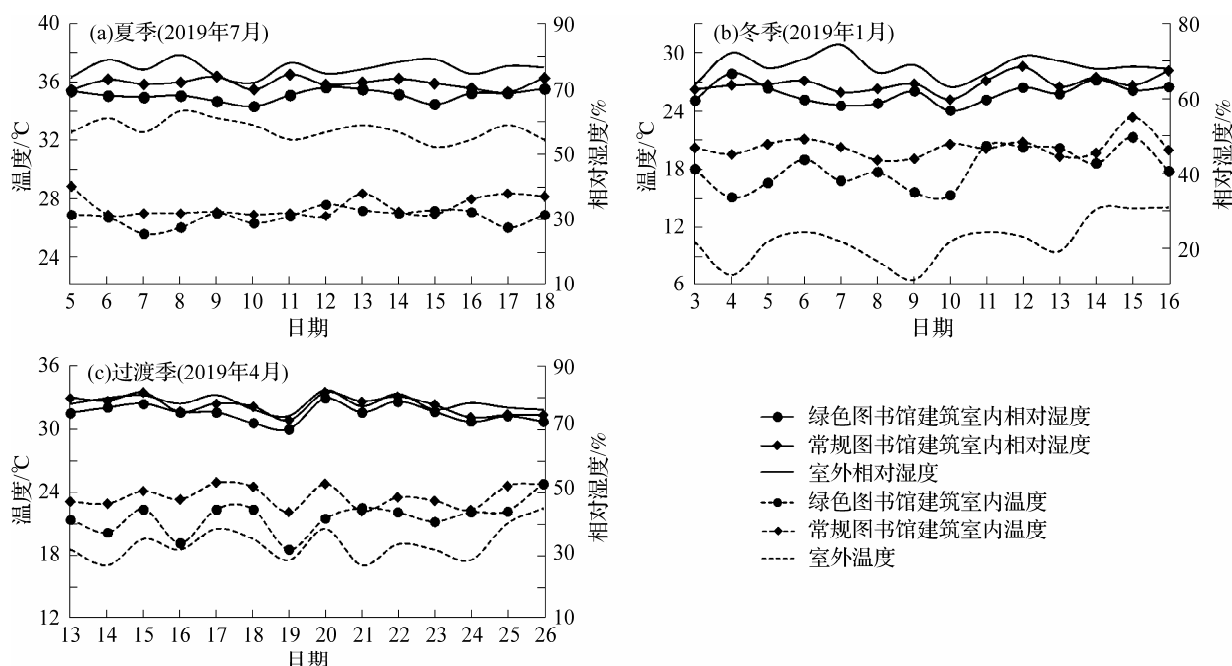


图2 不同季节绿色与常规图书馆建筑室内每天平均温度和相对湿度变化情况

试区域约有 70.92% 的测点在热湿舒适 II 级的两个区域内, 常规图书馆约有 69.5% 的测点在热湿舒适 II 级的两个区域内。

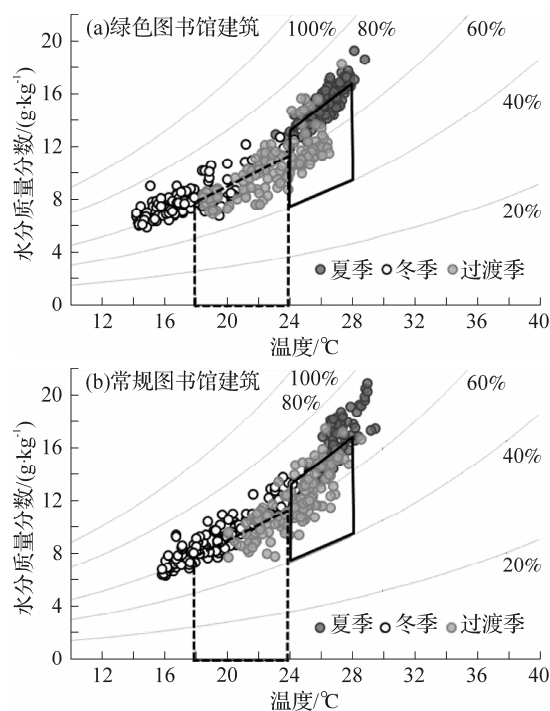


图3 绿色与常规图书馆建筑实测热湿环境情况

综合不同季节每天平均温度和相对湿度变化情况与实测数据点在热湿舒适 II 级区内的分布情况, 除冬季外, 绿色图书馆在夏季和过渡季节室内热湿环境略优于常规图书馆, 且常规图书馆全年室内相对湿度高于绿色图书馆, 主要原因可能是其地理位置更加靠近海边。

### 3.2 室内空气品质和光环境分析

根据参数测试的可实现性以及与健康的相关程度, 关于室内空气品质的参数, 本文仅对案例建筑的室内  $\text{CO}_2$  体积分数进行分析, 全年室内  $\text{CO}_2$  体积分数分布如图 4 所示。绿色图书馆建筑  $\text{CO}_2$  体积分数主要集中在 0.055%~0.065% 之间, 而常规图书馆建筑  $\text{CO}_2$  体积分数主要集中在 0.060%~0.070% 之间, 绿色图书馆建筑的室内  $\text{CO}_2$  体积分数低于常规图书馆, 也就是说, 就  $\text{CO}_2$  体积分数而言, 绿色图书馆室内空气优于常规图书馆。绿色和常规图书馆建筑均安装有新风系统, 绿色图书馆建筑采用全空气系统, 常规图书馆建筑采用直接蒸发式新风机组, 两者设计人均新风量相等, 但  $\text{CO}_2$  体积分数测试结果说明, 实际运行时绿色图书

馆建筑室内的人均新风量大于常规图书馆。

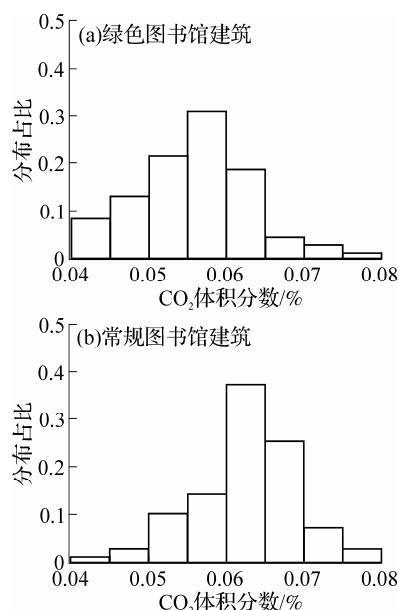


图4 绿色与常规图书馆建筑全年室内  $\text{CO}_2$  体积分数分布

绿色与常规图书馆建筑全年室内照度分布对比如图 5 所示, 绿色图书馆建筑自习区照度基本集中在 300~400 lx 之间, 而常规图书馆建筑自习区照度则集中在 500~600 lx 之间, 高于绿色图书馆建筑。根据国家建筑照明设计标准<sup>[8]</sup>中对图书馆建筑照明标准值的规定, 一般阅览室 0.75 m 参考面的照度标准值为 300 lx, 绿色图书馆建筑满足该标准的概率为 71%, 常规图书馆建筑满足该标准的概率为 96%, 常规图书馆建筑室内光环境优于绿色图书馆建筑。

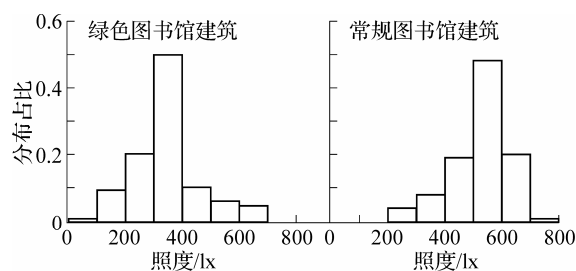


图5 绿色与常规图书馆建筑全年室内照度分布对比

### 3.3 用户室内环境质量满意度分析

绿色图书馆建筑与常规图书馆建筑环境质量各项满意率如图 6 所示, 绿色图书馆建筑室内温度和湿度环境的满意率明显高于常规图书馆; 室内环境总体满意率绿色图书馆建筑为 98.0%, 常规图书馆建筑为 90.2%; 室内空气品质满意率绿色图书

馆建筑高于常规图书馆,但相差不大。而室内光环境满意率则是常规图书馆建筑较高,绿色图书馆建筑为 78.4%,常规图书馆建筑为 92.2%,这和物理参数测试分析结果一致,室内光环境全年平均照度常规图书馆高于绿色图书馆建筑。

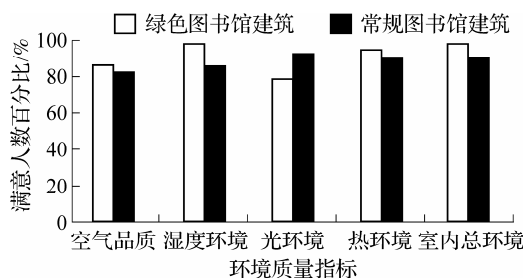


图6 图书馆建筑室内环境质量指标满意率

室内环境质量用户各项满意度分布如图7所示,各项指标满意度水平采用四分位图表示,柱形的上线与下线分别表示25%与75%的用户水平,柱形中部的线表示中位数。图中的圆点表示内部值样本与离散值样本。统计分析结果表明,绿色图书馆建筑冬季室内热湿环境、夏季和过渡季节室内湿环境、空气品质和室内整体满意度均高于常规图书馆,室内光环境和夏季室内热环境满意度低于常规图书馆建筑。常规图书馆建筑除夏季热环境、室内光环境和过渡季热环境获得较高满意度外,其余指标均位于“较满意”级别。此外,常规图书馆建筑中的离散值样本明显多于绿色图书馆建筑,而绿色图书馆建筑整体环境满意度水平较高,由此可见绿色图书馆建筑的室内环境照顾到了更多用户的整体感受,优于常规图书馆建筑。

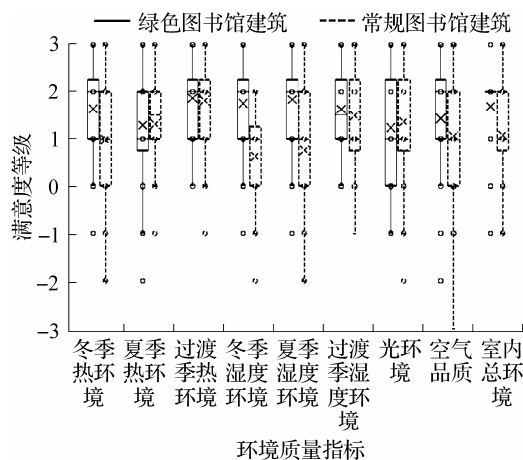


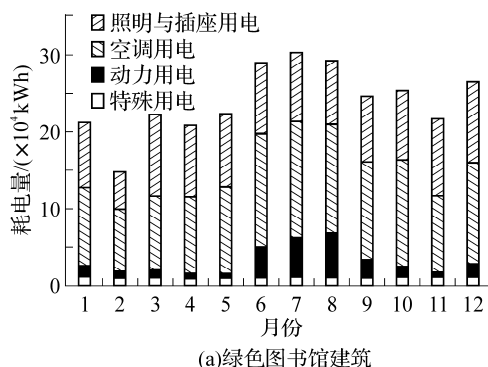
图7 图书馆建筑室内环境质量指标满意度分布

综合室内环境质量各项指标物理参数实测结

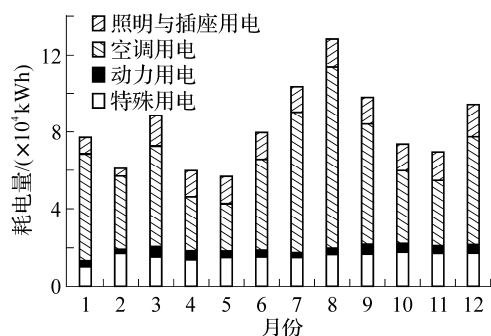
果和用户满意度调查分析结果,绿色图书馆建筑夏季室内热湿环境总体较好,优于常规图书馆建筑。冬季室内热湿环境从实测数据对比分析结果看,绿色图书馆建筑冬季室内温度低于常规图书馆建筑,但冬季室内热湿环境用户满意度高于常规图书馆建筑,用户问卷调查结果表明,常规图书馆建筑不满意原因主要是因为冬季室内温度较高有闷热感。室内光环境方面,常规图书馆建筑实测数据与满意度均高于绿色图书馆建筑,进一步分析造成绿色图书馆建筑室内光环境不满意的主要原因一方面是室内照度不够,导致室内偏暗,全年实际光照满足设计标准的概率仅为71%;另一方面,窗墙比对室内照度的影响,两者的测试区域均位于南向且外窗透光性能相同,南向窗墙比常规图书馆建筑为0.47,远大于绿色图书馆的0.28。室内空气品质方面,绿色图书馆用户满意度高于常规图书馆,用户问卷调查结果表明常规图书馆偶有异味影响了其室内空气品质的满意度,与前述绿色图书馆建筑实测 $\text{CO}_2$ 体积分数低于常规图书馆的结果一致。室内总体环境满意度方面,绿色图书馆建筑优于常规图书馆建筑。

### 3.4 建筑能耗分析

绿色图书馆建筑于2017年11月开始试运行,常规图书馆建筑于2018年7月投入使用,选取两个案例建筑2019年全年能耗监测数据进行分析,每月各项耗电量如图8所示。由图8可以看出,两个案例建筑耗电量均较高的月份是6~9月,即夏季空调期,然后是1~3月和12月,即冬季采暖期,其中2019年2月有春节假期,故2月耗电量相对较低。空调用电量每月变化较大,其他各项每月用电量变化不大,空调用电量影响每月总耗电量,过渡季节4~5月和10~11月耗电量相对较少。



(a)绿色图书馆建筑



(b)常规图书馆建筑

图8 绿色和常规图书馆建筑 2019 年逐月各项耗电量

绿色和常规图书馆建筑全年各分项电耗拆分如图9所示。在各分项能耗中,空调系统的全年电耗约占全部用电量的一半以上。绿色图书馆建筑全年平均空调用电约为  $35.58 \text{ kWh} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1}$ , 其他用电(照明和插座、动力、特殊用电)全年平均约为  $36.37 \text{ kWh} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1}$ ; 常规图书馆建筑全年平均空调用电约为  $54.82 \text{ kWh} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1}$ , 其他用电全年平均约为  $35.66 \text{ kWh} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1}$ 。由此可见, 全年平均其他用电量两者基本没有差别, 而全年平均空调用电量常规图书馆建筑远高于绿色图书馆建筑, 因此, 空调用电决定了建筑物的能耗水平, 优化空调系统是减少建筑能耗的关键, 常规图书馆建筑应采取措施降低空调能耗。

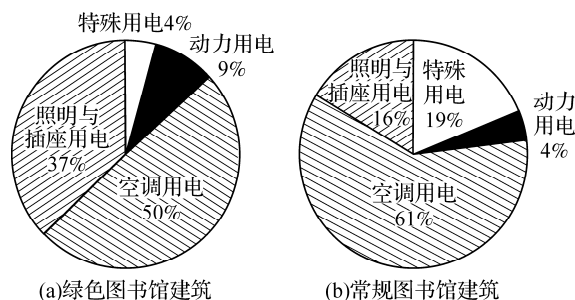


图9 绿色与常规图书馆建筑 2019 年耗电量拆分图

绿色和常规图书馆建筑 2019 年全年能耗水平分别为  $71.95$  和  $90.48 \text{ kWh} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1}$ , 国家民用建筑能耗标准<sup>[9]</sup>中没有相关图书馆建筑的能耗约束值和引导值, 参考标准中的 B 类商业办公建筑, 夏热冬冷地区的约束值为  $110 \text{ kWh} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1}$ , 引导值为  $80 \text{ kWh} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1}$ 。由此可见绿色图书馆建筑能耗水平较低, 低于引导值, 而常规图书馆建筑能耗水平高于引导值, 低于约束值, 绿色图书馆建筑能耗水平整体较好。

## 4 结论

本文从室内热湿环境、光环境、空气品质、用户满意度和建筑能耗等方面对绿色和常规图书馆建筑相同功能区进行了实测与调查, 对比分析了两者的室内环境质量和能耗水平, 结论如下:

(1)室内热湿环境方面, 实测结果表明夏季和过渡季绿色图书馆建筑室内热湿环境略优于常规图书馆建筑, 冬季室内温度稍低于常规图书馆建筑; 用户满意度调查结果表明, 绿色图书馆全年室内热湿环境满意度水平较高, 说明绿色图书馆冬季稍低的室内温度对人体热舒适影响不大, 并没有影响到用户满意度。常规图书馆冬季室内热湿环境不满意的主要原因是冬季室内温度较高有闷热感。

(2)室内光环境方面, 常规图书馆建筑实测数据与满意度均高于绿色图书馆, 主要原因一方面是绿色图书馆建筑室内照度不够, 导致室内偏暗, 另一方面是南向窗墙比对测试区域室内照度的影响。室内空气品质方面, 绿色图书馆用户满意度高于常规图书馆, 与绿色图书馆建筑实测  $\text{CO}_2$  体积分数较低的结果一致, 用户问卷调查结果表明常规图书馆偶有异味影响了其室内空气品质的满意度。室内总体环境满意度方面, 绿色图书馆优于常规图书馆建筑。

(3)绿色图书馆建筑全年能耗水平约为  $71.95 \text{ kWh} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1}$ , 而常规图书馆建筑全年能耗水平约为  $90.48 \text{ kWh} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1}$ , 全年平均其他用电量(照明和插座、动力、特殊用电)两者基本没有差别, 而全年平均空调用电量常规图书馆远高于绿色图书馆建筑, 因此, 空调用电量决定了建筑物的能耗水平, 常规图书馆建筑在能耗优化时应重点考虑采取措施降低空调能耗。

## 参考文献:

- [1] 裴祖峰. 绿色办公建筑运行性能后评估实测与研究[D]. 北京: 清华大学, 2015.
- [2] Geng Y, Ji W J, Wang Z, et al., A review of operating performance in green buildings: Energy use, indoor environmental quality and occupant satisfaction[J]. Energy & Buildings, 2019, 183:500-514.
- [3] 林波荣, 刘彦辰, 裴祖峰. 我国绿色办公建筑运行能耗

- 及室内环境品质实测研究[J]. 暖通空调, 2015, 45(3): 1-8; 21.
- [4] 倪欣, 刘涛, 孙建华. 西北地区三星级办公建筑运营效果分析[J]. 工业建筑, 2017, 47(11): 73-76; 131.
- [5] 洪玲笑. 基于实际运行效果的重庆地区绿色办公建筑后评估研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2017.
- [6] GB/T 18977-2003. 热环境人类工效学 使用主观判定量表评价热环境的影响[S].
- [7] GB 50736-2012. 民用建筑供暖通风与空气调节设计规范[S].
- [8] GB 50034-2013. 建筑照明设计标准[S].
- [9] GB/T 51161-2016. 民用建筑能耗标准[S].

## Analysis of operation performance for green library building on campus

ZHOU Yan, XU Yiwen, CAI Jianmin, HE Wenli

( School of Civil and Environmental Engineering, Ningbo University, Ningbo 315211, China )

**Abstract:** This research concerns the operation performance of both green and conventional library building. The issues relating to indoor environment quality and energy consumption level are comparatively analyzed. Indoor environment quality is broken down into four aspects, that is, thermal environment, luminous environment, air quality, and user's satisfaction of the indoor environment quality. The results show that indoor thermal environment and air quality of the green building have a slight advantage over those of the conventional library building, but indoor luminous environment of the green library building is not as satisfying as that of the conventional building. The annual energy consumption of green library building is about  $71.95 \text{ kWh} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1}$ , in contrast, for the conventional library building it reaches about  $90.48 \text{ kWh} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1}$ , meaning that energy consumption level of the green building is generally better. The main reason for the different energy consumption level is because of the annual average electricity consumption of the air conditioning system, and the conventional library consumes much higher power than the green library. For the conventional library building, measures should be taken to reduce energy consumption of the air conditioning system, so as to make optimal energy consumption for the entire building. The study provides useful reference for promoting better energy consumption and operation performance of library building.

**Key words:** green library building; indoor environment quality; energy consumption; field measurement

( 责任编辑 韩 超 )