

我国绿色建筑常用节能技术 后评估比较研究^{*}

清华大学 林波荣[★] 肖娟

摘要 根据后评估(POE)的方法,对我国不同气候区的11栋绿色建筑及示范建筑的实际能耗情况及节能技术进行了调研和分析研究,包括围护结构、暖通空调系统、生活热水系统及可再生能源系统等,对系统的设计参数、运行效果、实际能耗、室内环境质量和使用满意度进行了分析,总结了设计、运行中的常见问题和优化策略。研究发现,自然通风和自然采光等低成本被动式技术实际运行效果良好,值得重视和推广;人员的行为模式和使用模式对能耗影响较大,应成为节能运行管理中的要点;绿色办公建筑在引进建筑节能技术和应用可再生能源系统时,需考虑技术的经济性。在中国现有建设水平下,应发展低能耗、低投入成本、低空间成本、高运行效率的示范技术。

关键词 绿色建筑 运行性能 后评估 节能技术 示范技术

POE research on common energy saving technology applied to green buildings in China

By Lin Borong[★] and Xiao Juan

Abstract With post-occupancy evaluation (POE) method, investigates and analyses actual energy consumption and energy saving technology of eleven green buildings and demonstrating buildings in different climate zones in China, which covers building envelope, HVAC systems, domestic hot water systems and renewable energy systems. Analyses design parameters, operation performance, actual energy consumption, indoor environment quality and users' degree of satisfaction. Sums up common questions and optimization strategies in design and operation. Finds that the passive techniques with low costs such as natural ventilation and daylighting have good operation effects, deserving attention and popularization. The behaviour mode and use pattern of occupants have a major influence on energy consumption, which should be deemed as key points in operation management. Economical efficiency should be considered when importing energy technology for buildings and applying renewable energy. The demonstrating technologies with lower energy consumption, investment costs and space costs and higher operation efficiency should be developed under exist constructions level in China.

Keywords green building, operation performance, POE, energy saving technology, demonstration technology

[★] Tsinghua University, Beijing, China

①

0 引言

随着人们对建筑能耗和建筑节能技术应用的关注,从20世纪80年代开始,国际上涌现了大批典型示范公共建筑。近8年来,国内也开始纷纷建设节能绿色建筑,北京、上海、深圳等城市这种现象尤为显著。由US Green Building Council(USGBC)资助,并由New Buildings Institute

(NBI)执行的一项针对通过LEED体系认证的建筑的能耗调查研究^[1],调查了121个LEED新建建筑(new construction(NC)buildings)的实际运行能耗的情况及在现有能耗下的用户舒适度,并与普通办公建筑作比较。调查显示,虽然这些

^①☆ 林波荣,男,1976年9月生,工学博士,副教授,副校长
100084 北京海淀区清华大学建筑技术科学系
(010) 62785691

E-mail:linbr@tsinghua.edu.cn

收稿日期:2012-05-15

* 科技部“十二五”科技支撑计划课题(编号2011BAJ04B06,2012BAJ09B03),国家自然科学基金委重点项目(编号51138004)

LEED-NC 建筑平均能耗强度低于普通建筑,但同时体现出很大的分散性和无规律性——LEED 星级评定中等级最高的铂金级、次高的金级,能耗强度 EUI 相对于通过级和银级的建筑未体现出绝对的优越性;而针对舒适性,该研究对热、光、声、空气品质多方面进行评分。文献[2]中 IEA Task 13 研究了位于欧洲、美国、日本的 12 个示范居住建筑项目,给出其中 8 个建筑的能耗情况,并针对实际检测能耗高于模拟预测值的问题逐个案例定量分析具体原因:室温设定值、气密性、用户行为等因素的差异;研究了不同夜间通风设定和遮阳设施对室内温度的影响;进行了特定设备和系统的测评,包括窗户的传热系数 K、热泵 COP 和太阳能光伏电板性能。

从国外的研究成果可以看出,绿色建筑实际运行能耗、可再生能源的实际运行情况和设定值有所偏离,造成偏离的因素有室温设定值、气密性、用户行为、运行模式等的差异,国内却缺少相应的较为完整的案例评价体系和研究分析。本文选取北京、上海、深圳等城市的 11 个绿色公共建筑,调研其节能技术的选用,分析适宜我国绿色建筑推广的技术;研究其实际运行能耗及分项值,进行节能性判断,并通过实地调研,分析影响能耗的主要因素;研究各楼的可再生能源应用情况,并进行系统评价;针对其中两个建筑进行热环境、系统设备的测试,环境满意度调研,作

为构建性能后评估(POE)体系的一部分工作。

1 整体能效研究

本文调研了北京、上海、深圳、宁波、济南 5 个城市(其中,北京、济南位于寒冷地区,上海、宁波位于夏热冬冷地区,深圳位于夏热冬暖地区)11 个绿色建筑,其中 5 个获得绿色建筑设计三星标识、3 个获得绿色建筑运行三星标识、1 个获得绿色建筑运行二星标识。下面介绍这些案例应用的节能技术情况、能耗及能效实测结果。

1.1 节能技术使用情况

所调研的 11 个绿色建筑采用的主要节能技术见表 1。调研结果显示,这些建筑都采用了自然通风、自然采光和遮阳等低成本的被动技术,且效果显著,值得推广。在调研的建筑中,太阳能光伏技术比主动式太阳能热水系统应用得更为广泛,但是考虑引进的绿色建筑技术所节省的年运行费与其增量投资成本之间的关系发现,某些绿色建筑存在一些技术推广上的问题,如建筑 NB,其面积小、总体耗电少,因采用节能技术每年能节省的运行费用也有限,但投资高,达到了 2 万元/m²,远高于其他 3 个建筑(见表 2)。另一方面,考虑到空间土地资源成本问题,建筑 NB 占地面积与建筑 SZ-B 相同,但前者容积率为 0.5,远不及后者(6.0)。在我国现有建设水平下,应发展低能耗、低成本、低空间成本(土地资源)的示范技术。

表 1 所调研的绿色建筑中常用的节能技术

	BJ-A	BJ-B	BJ-C	BJ-D	BJ-E	JN	SZ-A	SZ-B	SZ-C	SH	NB
高性能保温	√	√	√	√	√	√				√	√
高性能外窗	√	√	√		√	√	√	√	√	√	√
屋顶绿化	√	√	√		√	√	√	√	√	√	√
自然通风	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√
自然采光	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√
遮阳	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√
新风热回收	√	√	√	√	√		√	√	√	√	√
温湿度独立控制		√	√		√		√	√	√	√	√
热泵系统				√			√	√	√	√	√
太阳能光电系统	√	√	√	√	√			√	√	√	√
主动式太阳能热水系统	√	√	√				√	√	√	√	√
节能灯	√	√	√	√	√		√	√	√	√	√

注:表 1 及下文图 1~4 中,建筑 BJ-A~E 位于北京,SZ-A~C 位于深圳,SH,JN,NB 分别位于上海、济南和宁波。“√”表示采用该项技术或措施。

表 2 4 个案例建筑基本信息及成本比较

	建筑面积/ 万 m ²	占地面积/ m ²	容积率	投资成本/ (元/m ²)
SZ-B	1.81	3 000	6.0	4 200
NB	0.156	3 000	0.5	20 000
JN	1.57			2 150
BJ-A	1.3			6 000

1.2 实测能耗研究

监测 11 个绿色建筑全年单位建筑面积的耗电情况,以及部分建筑的空调、照明插座的分项电耗,结果见图 1~4。所调研绿色建筑的单位建筑面积总能耗在 29~82 kW·h/(m²·a) 之间,差别较

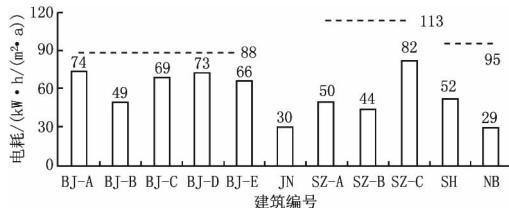


图 1 绿色建筑实测总电耗

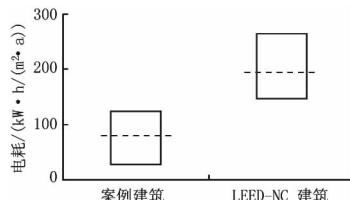
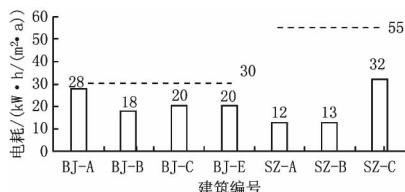
图 2 案例建筑与 LEED 建筑^[1]能耗比较

图 3 绿色建筑空调系统实测总电耗

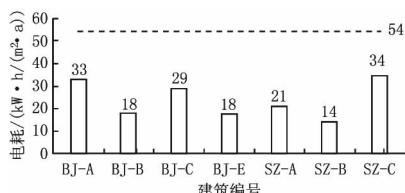


图 4 绿色建筑照明与插座实测总电耗

大,各建筑单位建筑面积的空调能耗和照明插座能耗基本都低于当地商务办公楼的指标参考值(在图 1,3,4 中虚线所示)^[3],体现一定的节能性(调研北京地区 5 个绿色办公建筑的总电耗比指标参考值节能 25%)。调研和实测数据表明,寒冷气候区办公建筑的供暖能耗约为 $50 \text{ kW} \cdot \text{h}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ 。考虑供暖能耗之后,所调研建筑的能耗值与文献[1]中美国 LEED-NC 建筑能耗值的对比见图 2,调研的建筑能耗远低于 LEED-NC 建筑能耗,引起两国能耗差异的原因可能包括被动式设计差异、主动系统设备形式和效率的差异、室内热扰密度与作息的差异、人员行为模式的差异。

分析位于同一气候区的各建筑之间分项能耗的差异,得到以下结论:

1) 空调系统设备的效率影响能耗,但不是主要因素。如深圳地区的 3 个建筑中,SZ-C 空调系

统效率高,但是与 SZ-A 和 SZ-B 相比,空调能耗高。

2) 充分利用自然通风能有效降低空调能耗及总能耗。如建筑 SZ-B 和建筑 JN 都充分利用了自然通风。

3) 使用和控制模式对能耗有较大影响。如建筑 BJ-B 和建筑 SZ-A 的照明系统均采用区域控制、部分开启模式,显著降低了照明能耗。

图 1,3 中北京、济南地区建筑的总电耗、空调电耗不包括冬季供暖电耗,上海、宁波、深圳地区建筑的总电耗包含热源消耗,各楼总电耗不包括其信息中心电耗、高耗能实验室电耗。

1.3 可再生能源应用情况

在所调研的 11 个绿色建筑中,可再生能源应用广泛,主要是太阳能热水系统和太阳能光伏发电系统。本文研究了其中建筑 SZ-A 的太阳能热水系统,建筑 NB,BJ-B,BJ-D,SZ-B 的光伏发电系统的应用情况及其效率分析。

1.3.1 太阳能热水系统

建筑 SZ-A 采用了太阳能集热板结合空气源热泵作为辅助热源的生活热水供热方式。系统产生的热水主要供给室外游泳池的淋浴用,由 49 块 2 m^2 的平板式太阳能集热板(共 98 m^2)结合 2 台空气源热泵和 2 个容量为 3 t 的保温水箱组成。根据运行 1 年的实际热水耗水量与耗电量(见图 5)进行实际需求量下的方案经济性分析(见表 3),与燃气锅炉方案相比,初投资回收年限为 2 年,体现了良好的经济性。

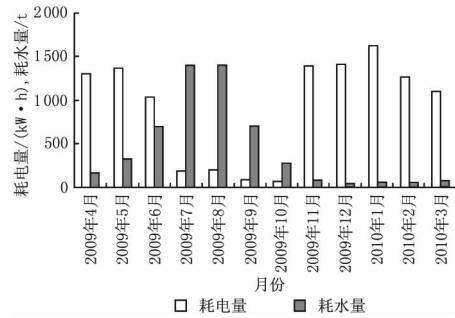


图 5 建筑 SZ-A 太阳能热水系统全年逐月耗电量和热水消耗量

在需求时间内,当集热器水温低于 50°C 时启动热泵,而保温水箱的水位控制为 3 个时间段分段控制,水位过低时通过自来水注水补充。读取该楼太阳能热水系统的全年逐月耗电量和热水消耗量(见图 5),发现此系统水箱控制模式存在问题,即

表 3 建筑 SZ-A 太阳能热水系统经济性评价

	年耗电量/(MW·h/a)	年耗气量/万 m ³	年运行费/万元	年运行费节省率/%	初投资/万元	初投资回收年限/a
燃气锅炉	0	1.72	6.88		3.20	
98 m ² 太阳能热水+空气源热泵	12.3	0	1.36	80	14.88	2.1

注:1) 设备的初投资估算值按太阳能集热板 600 元/m², 空气源热泵 750 元/kW 计;

2) 运行费估算值按电费 1.1 元/(kW·h) 计。

全年水位控制一致。冬季热水用量小, 此时保持水箱中多余水量的水温会增加热泵的能源消耗。改进建议为对水位实行分季节控制。对于太阳能热水系统, 辅助能源形式与安装容量的选择、辅助能源与太阳能的集成控制模式决定了太阳能热水系统的适宜性。

1.3.2 光伏发电系统

在所研究的 11 栋楼中, 9 栋建筑安装了太阳能光伏系统, 其中已监测得到 5 栋建筑的光伏发电情况。对于建筑 NB, 其光伏发电能满足总耗电需求。而其他 4 栋建筑的发电量占全楼耗电量的比例很小, 对于建筑 BJ-B, BJ-D, BJ-E 和 SZ-B, 分别为 0.68%, 1.2%, 3.9% 和 4.8%。建筑 NB 利用光伏系统实现零能耗, 一方面其建筑面积小 (1 600 m²)、使用率低; 另一方面由于安装了 300 m² 的光伏板, 高成本投入 (建筑建安成本达 2 万/m²)。

以系统发电效率评价光伏发电系统的运行性能, 以建筑 NB 和建筑 BJ-D 为例, 计算其逐月值, 结果见图 6。逐月光伏发电效率在 8%~17% 之间, 属于低效率的能源利用形式。有研究指出, “在中国只有二层楼以下才有可能实现‘零能耗’住宅, 至于公共建筑, 其能耗密度远远高于住宅, 完全不可能实现‘零能耗’”^[3]。在我国土地资源紧张的现代化高建筑密度的城市绿色建筑建设中, 不适合大面积推广光伏电板。

$$\eta_{\text{电}} = \frac{W_{\text{电}}}{Q_{\text{辐射}}} \times 100\% \approx \frac{W_{\text{电}}}{HA} \times 100\% \quad (1)$$

式中 $\eta_{\text{电}}$ 为发电效率, %; $W_{\text{电}}$ 为当月光伏发电量, kW·h/月; $Q_{\text{辐射}}$ 为当月太阳能光伏电板所接受的太阳能辐射量, kW·h/月; H 为倾角等于当地纬度单位面积倾斜表面上的当月太阳总辐射量, kW·h/(m²·月); A 为光伏板面积, m²。

2 案例分析

选取建筑 SZ-A 进行详细能耗分析、环境测试及系统测评。建筑基本信息见表 4。以下分析针对建筑 SZ-A 新建部分 (4 340 m²)。

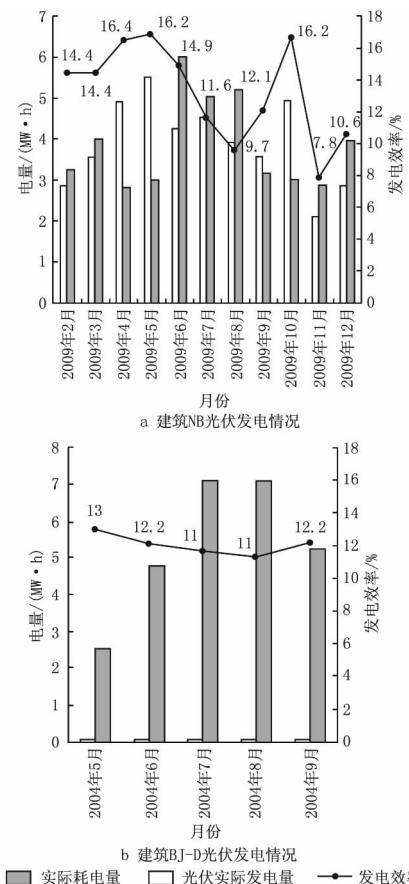


图 6 建筑 NB 和 BJ-D 太阳能光伏系统运行性能

表 4 案例建筑基本信息

	建筑面积/m ²	建筑高度/m	层数	中庭数量	体形系数
SZ-A	5 130	9.5	3	1	0.26

2.1 能耗分析

建筑 SZ-A 全年总耗电 50.0 kW·h/(m²·a) (见图 7), 远低于当地办公建筑电耗均值 99 kW·h/(m²·a)。其中, 空调系统能耗小, 虽然空调系统效率仅约为 3, 但由于中庭室内运动场夏季不用空调, 且全楼充分利用自然通风, 大大降低了单位建筑面积空调能耗。且中庭室内运动场的照明控制采用分区开启模式, 有效降低了照明能耗。

比较建筑 SZ-A 全年实测能耗与设计预测能耗值 (见表 5), 发现年电耗实际运行值远高于设计预测值。其中, 空调电耗模拟与实测值较为接近

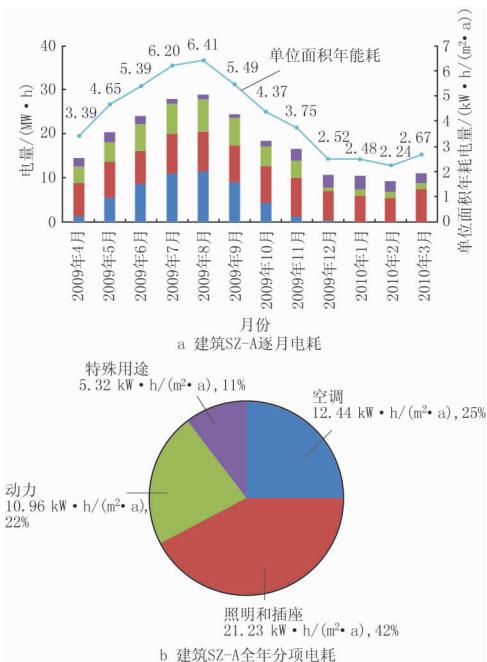


图 7 建筑 SZ-A 全年电耗

(相差 14%)，照明插座、生活热水、动力系统的能耗实际运行值都远高于模拟值($\geq 60\%$)，可能是因为模拟工况中对该建筑使用情况的估计不足。

对于 SZ-A 选用的温湿度独立控制供冷系统，基于其实际运行电耗值，进行方案的实际运行经济性分析，结果见表 6。相对于电制冷的参考方案，本楼方案实际运行时节能率为 22.9%，初投资回收年限为 6.5 a，虽然不及方案设计值，但是仍具有显著的节能效果和较好的经济性。

2.2 热环境、自然通风、自然采光情况测评

建筑 SZ-A 利用自然通风、自然采光(见图 8)，降低了空调、照明能耗，同时考虑了室内综合环境的舒适性。测试中庭天窗通风量，换气次数为 2.76~4.15 h⁻¹(见图 9)。对中庭的竖直室温分布进行测试，温度竖直分层现象较为显著(见图 10)，自然通风效果良好。

2.3 环境满意度调研

表 5 建筑 SZ-A 能耗实测值与设计预测值比较

	空调	照明+插座	生活热水	动力等	MW·h/a
设计预测值	46	27	9	9	91
实测值	54	92	23	48	217

表 6 基于实测值修正建筑 SZ-A 空调系统经济性分析

	年耗电量/(万 kW·h/a)	节能率/%	年运行费/(万元/a)	年运行费节省率/%	初投资/万元	初投资回收年限/a
参考方案	7.0	—	7.7	—	23.6	—
选用方案设计值	4.58	34.6	5.04	34.6	35.1	4.3
选用方案实际运行参数	5.4	22.9	5.94	22.9	35.1	6.5

注：参考方案空调系统冷源为螺杆电制冷机，电价按 1.1 元/(kW·h) 计。



图 8 建筑 SZ-A 中庭天窗(利用自然采光与自然通风)

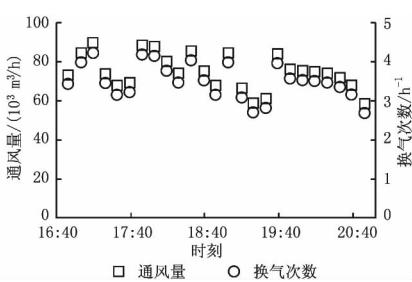


图 9 通风量和换气次数

笔者于 2010 年 4 月对该楼室内使用人员发放综合环境满意度问卷 20 份，回收 17 份，71% 人员认为楼内热感觉适中，另有 23% 人员认为楼内有

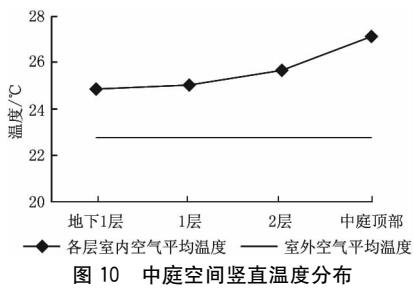


图 10 中庭空间竖直温度分布

点热；59% 人员觉得有点闷，35% 人员感觉风环境舒适；59% 人员认为所在处照度正合适，29% 人员认为偏暗；76% 人员对楼内总体环境满意；53% 人员认为影响综合环境舒适感觉的最主要因素是温

度。

综合测试和问卷调查结果表明,该楼在当天测试工况下温度和照度都较舒适,但是风速偏小,换气次数明显小于设计值,楼内人员感觉偏闷。

2.4 小结

建筑SZ-A采用中庭大空间被动通风,依靠中庭天窗自然采光,整体上通风效果良好,中庭温度分层现象明显,自然采光下的室内照度基本能满足需求。充分利用自然通风和自然采光,大大降低了建筑SZ-A的空调电耗和照明电耗。电耗数据表明,建筑SZ-A的空调和生活热水系统节能性好,与电制冷和燃气锅炉供生活热水的参考方案相比,实际运行回收期分别为6.4 a和2.1 a,具有优越的经济性。

3 结论

本文按照后评估(POE)的方法,对我国不同气候区的11栋绿色建筑及示范建筑的实际能耗情况及节能技术进行了调研和分析研究,包括围护结构、暖通空调系统、生活热水系统及可再生能源系统等,对系统的设计参数、运行效果、实际能耗、室内环境质量和使用满意度进行了分析,总结了设计、运行中的常见问题和优化策略,为促进绿色建筑在我国的推广应用提供参考。研究得到的主要结论如下:

1) 目前,国内示范公共建筑在设计中大都充分利用自然通风和自然采光等低成本的被动技术,实地调研数据表明,自然通风和自然采光效果良好,节能效果显著,使用满意度高,是值得重视和推

广的节能技术。

2) 人员的行为模式和使用模式,如照明的部分区域控制、分时开启模式对能耗影响较大,应成为设计中的要点。

3) 绿色办公建筑在引进建筑节能技术和应用可再生能源系统时,还需对其进行经济性分析,考虑采用节能技术所能节省的年运行费与增量投资成本之间的对比,空间土地资源利用的有效性以及系统运行效率等问题。在中国现有建设水平下,应发展低能耗、低投入成本、低空间成本(土地资源)、高运行效率的示范技术。

研究中遇到一些难点,主要是对建筑的测评需要搜集长周期内的数据,但是某些建筑能耗数据和设备检测体系都不完备,因而建议建立机制,公开能耗数据,进行参观者的满意度测评,进行各项节能措施效果的监测和评估,进一步总结、促进适宜节能技术的绿色建筑在我国的推广应用。

参考文献:

- [1] Cathy T, Mark F. Energy performance of LEED® for new construction buildings[R]. NBI, Washington DC, 2008:15-19, 28-31
- [2] Thomsen K E, Schultz J M, Poel B. Measured performance of 12 demonstration projects—IEA Task 13 ‘Advanced solar low energy buildings’ [J]. Energy and Buildings, 2005, 37(2):111-119
- [3] 清华大学建筑节能研究中心. 中国建筑节能年度发展研究报告 2009 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009:133-135, 159-168