

装配式绿色屋顶经济效益评价

——以合肥实验学校建筑为例

张少杰^{1,2,3}, 胡岚岚¹, 朱明智¹, 施晶晶¹

(1. 安徽建筑大学建筑与规划学院, 安徽 合肥 230031; 2. 安徽省 BIM 工程中心, 安徽 合肥 230031; 3. 安徽省装配式建筑研究院, 安徽 合肥 230031)

摘 要:装配式绿色屋顶的节能效益和经济效益研究, 可为装配式绿色屋顶的推广应用提供科学依据。以合肥实验学校教学楼为研究对象, 利用 Revit 软件和 Green Building Studio 程序明确绿色屋顶的节能效益, 对绿色屋顶的建造成本、维护成本进行收集统计, 通过成本效益分析方法, 选取财务净现值研究装配式绿色屋顶的经济效益, 得出装配式绿色屋顶较之传统绿色屋顶的经济效益优势。

关键词:装配式; 绿色屋顶; 经济效益; Green Building Studio; 财务净现值

中图分类号: TU986 **文献标志码:** A

随着城市的发展, 人口急剧增多, 人类生活与生产的排放量也随之增多。中国作为世界第二大经济体, 2005 年开始 CO₂ 年排放量超过美国, 且随着城镇建设的快速发展, 建筑业碳排放占全国总碳排放的 35% ~ 50%, 建筑业 CO₂ 减排已成为中国当前社会和经济建设中的一项重要任务^[1]。

绿色建筑作为减少温室气体排放、解决全球能源危机的有效途径之一, 是近年学术研究的热点问题^[2]。绿色屋顶作为其中一个领域, 不仅可以涵蓄雨水、减少径流污染、降低噪声、减少空气污染、增加生物多样性, 而且具有很好的热效应^[3]。早在 20 世纪 60 年代, 德国便开始发展绿色屋顶, 据统计现在德国大约有 10% 的屋顶已经绿化。在中国, 每年大中型城市的绿色屋顶面积增加量保持在 10 万 m² 以上, 截至 2020 年北京全市屋顶绿化面积已突破 300 万 m², 但这些新增的绿

色屋顶面积仅占各大中型城市总屋顶面积的 1%, 有些城市甚至低于 1%^[4]。此外, 中国城市中建成多年的建筑其承受能力、防水能力有限, 同时, 屋顶施工面临着成本高、施工周期长等问题。因此, 研究将装配式建造方法应用到绿色屋顶建造中, 构建的装配式绿色屋顶有望解决传统绿色屋顶存在的问题且达到较好的经济效益。

国外学者 Korol 等^[5]介绍了装配式绿色屋顶技术的各项优势和创新的节能建筑技术; Loiola 等^[6]研究了装配式绿色屋顶系统在大雨条件下的雨水保留和总径流延迟的性能; 林滔^[7]在分析总结了传统式绿色屋顶的发展现状后, 指出了传统绿色屋顶的不足和问题, 并对装配式绿色屋顶的景观形态和施工技术进行了分析与归纳。装配式绿色屋顶与传统式绿色屋顶相比, 在土壤介质层和植物层并无太大差别, 保温隔热功效一致, 但装

配式屋顶相比传统式屋顶建造成本更低、施工更方便、后期维护费用也更少。装配式绿色屋顶将构成传统式绿色屋顶的蓄排水层、过滤层、阻根层等集成到一个模块,具有荷载轻、可拆卸、可移动和学习成本低等特点。

然而,由于对装配式绿色屋顶的经济效益缺乏定量研究,目前,大部分学者在研究装配式绿色屋顶时主要通过案例分析和直观判断做定性分析。为推动装配式建造方式在绿色屋顶的普及应用,笔者选用合肥实验学校的教学楼作为研究对象,结合合肥地区气候条件,建立实验学校教学楼的建筑模型,将相关数据导入应用程序进行模拟计算,得出绿色屋顶的节能效益,再根据调查模拟的数据,计算项目的财务净现值,进而分析装配式绿色屋顶的经济效益。

一、研究方法

1. 研究对象及气候分析

合肥实验学校于 1987 年创办,现有九珑湾和包河花园两个校区,本次实验的研究对象是九珑湾校区的主教学楼。

本次模拟的气象数据 CSWD (Chinese Standard Weather Data) 来自于第 58321 号气象站。Climate Consultant 分析软件能根据典型气象年 8 760 h 的逐时数据对不同地区全年的气候状况进行形象的分析^[8]。笔者利用该软件分析模拟数据,生成了合肥地区典型年的全年逐时干球温度、日均干湿球温度和太阳辐射状况以及舒适区间情况。

2. 能耗分析软件及方法

笔者选择 Green Building Studio 为分析工具,其与 Revit 和 Vasari 软件以及其他兼容的能源分析软件相互融合,在远程服务器上计算密集型的小时模拟,并通过网页向用户提供结果。

目前学术界采用的建筑能耗分析方法主要分为两大类:一类是建立在稳定传热理论基础上的静态能耗分析法,另一类是建立在不稳定传热理论基础上的动态能耗模拟法^[9]。动态能耗模拟法较之静态能耗分析

法结果更为精确,可实现对建筑能耗的逐时、逐区动态模拟。笔者使用的能耗模拟软件 Green Building Studio 采用的即为动态模拟法。

3. 成本效益分析方法

成本效益分析是对项目建设初期或是对已建设项目所带来的价值进行评估的一种方法,财务净现值 (FNPV) 是投资项目按照该行业的基准收益率,把净现金流量折算到项目建设开始年,其表达式为^[10]

$$FNPV = \sum_{t=1}^n (CI_t - CO_t)(1 + i)^{-t} \quad (1)$$

式中: CI_t 为第 t 年的现金流入量,元; CO_t 为第 t 年的现金流出量,元; n 为技术方案计算期,年; i 为建设行业的标准折现率,取 3%,取值依据国家发展改革委员会和建设部发布的《建设项目经济评价方法与参数》一文。

二、绿色屋顶节能效益分析

1. 建筑模型及参数

为了模拟建筑在有无绿色屋顶的两种情况下的建筑能耗,需要对该学校的教学楼进行 Revit 建模(见图 1)。模型的有效使用面积(排除走廊、卫生间、楼梯间等非人流长时间停留区域)为 9 488 m²,屋顶面积为 4 193 m²。

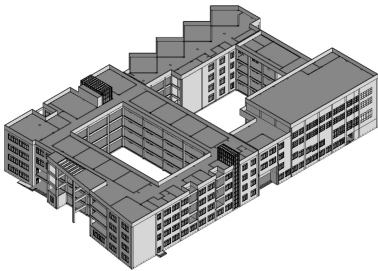


图 1 实验学校教学楼建筑模型

本建筑模型中的建筑构造、建筑设备、加热制冷信息、室内用电设施和学生的活动等都对建筑的能耗产生影响。因此,根据教学楼的实际建造情况和查阅资料获得了如下的相关参数:

(1)结构为框架结构,外墙为 200 mm 轻质混凝土砌块,传热系数 $U = 0.8108 (W \cdot$

$\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$);内墙使用 20 mm 石膏板的框架隔墙,传热系数 $U=1.473\ 3(\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1})$;楼板为 200 mm 轻质混凝土楼板,传热系数 $U=1.361\ 0(\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1})$ 。

(2)屋顶为加气混凝土保温屋面,传统屋顶传热系数 $U=0.50(\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1})$,而绿色屋顶传热系数 $U=0.24(\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1})^{[11]}$ 。教学楼建筑外窗为大型双层玻璃窗(反射涂层)(传热系数 $U=2.921\ 4(\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1})$),内窗为大型单层玻璃窗(传热系数 $U=3.689\ 8(\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1})$)。

(3)人员活动的人均面积为 $4\ \text{m}^2/\text{人}$,每人的显热增量为 $73.27\ \text{W}$,每人的潜热增量为 $58.61\ \text{W}$,照明负荷密度为 $12.92\ \text{W}/\text{m}^2$,电力负荷密度为 $16.15\ \text{W}/\text{m}^2$,建筑使用时间为 $8:00-21:00$ 。

(4)空调设备为 VAV 单风管,设定温度为 $25\ ^\circ\text{C}$,制冷空气温度为 $12.22\ ^\circ\text{C}$,制热空气温度为 $32.22\ ^\circ\text{C}$ 。

在本案例中,建筑有无绿色屋顶的能耗多少主要取决于屋顶的传热系数,因此在 Revit 中模拟能耗时,笔者控制其他参数不变,只改变屋顶传热系数。

2. 建筑能耗模拟

运行 Revit 中的热负荷和冷负荷计算,得出两种屋顶建筑的计算结果(见表 1)。

表 1 冷热负荷两种屋顶建筑计算结果 W		
建筑类型	峰值总冷负荷	峰值热负荷
传统屋顶建筑	707 729	460 788
绿色屋顶建筑	691 791	446 940

由表 1 可知,绿色屋顶对建筑冷热负荷的影响显而易见,绿色屋顶建筑相较于传统屋顶建筑在一年内冷负荷节约了 $15\ 938\ \text{W}$,热负荷节约了 $13\ 848\ \text{W}$,冷负荷和热负荷共节约了 $29\ 786\ \text{W}$ 。

运行 Revit 软件导出文件到 Green Building Studio 的程序网页进行云端建筑能耗模拟,得出两种屋顶建筑的计算结果(见表 2)。

由表 2 可知,绿色屋顶建筑在年用电量、年燃料使用量和年峰值需求量等项目中较之传统屋顶建筑节能效果显著,其中,年用电量

表 2 能源消耗两种屋顶建筑计算结果		
建筑类型	用电量/ ($\text{kW}\cdot\text{h}\cdot\text{a}^{-1}$)	燃料使用量/ ($\text{MJ}\cdot\text{a}^{-1}$)
传统屋顶建筑	1 523 908	3 333 577
绿色屋顶建筑	1 513 939	3 157 598

节约了 $9\ 969\ \text{kW}\cdot\text{h}$,年燃料使用量节约了 $175\ 979\ \text{MJ}$ 。为方便后续计算,研究将燃料使用量转化为用电量,使用燃料默认为天然气。根据查阅资料可得, $1\ \text{kW}\cdot\text{h}$ 电的热值为 $3.6\ \text{MJ}/\text{kW}\cdot\text{h}$, $1\ \text{m}^3$ 天然气的热值为 $36\ \text{MJ}/\text{m}^3$,燃料使用节约量转化为用电量约为 $48\ 883\ \text{kW}\cdot\text{h}$ 。最后,得到每年总节约用电量为 $58\ 852\ \text{kW}\cdot\text{h}$ 。由于该建筑的有效使用面积为 $9\ 488\ \text{m}^2$,可得出在合肥地区该教学楼每年的节能量为 $6.2\ \text{kW}\cdot\text{h}/\text{m}^2$ 。

三、装配式绿色屋顶经济效益评价

1. 装配式绿色屋顶特征

绿色屋顶中的草坪式绿色屋顶由于基质厚度较薄,种植品种以草坪地被植物为主,具有建造和管理简单、质量轻、成本低廉的优点^[12]而被选为研究对象,培养植物选择佛甲草。基质方面选择人工轻量种植基质,这种基质容重较低,较为适宜。

装配式的草坪式绿色屋顶基本构造主要包括:屋面、保温层、防水层、装配式种植容器、土壤基质层和植物层等。种植容器在市场上主要有节能型装配式绿色屋顶模块、绿植草种植容器、模块式绿色屋顶种植容器。传统草坪式绿色屋顶基本构造主要包括:屋面、保温层、防水层、阻根层、蓄排水层、过滤层、土壤基质层和植物层等。

2. 绿色屋顶成本分析

(1)屋顶改造费用

由于本案例中的教学楼建筑在设计之初并未考虑绿色屋顶的建造,屋顶原有的屋面不能满足绿色屋顶建造的标准,所以需要进行屋面的改造升级,最主要的改造部分就是防水的改造。经调研分析,本案例中的草坪式绿色屋顶改造费用约为 $50\sim70\ \text{元}/\text{m}^2^{[10]}$,取其平均值为 $60\ \text{元}/\text{m}^2$ 。本案例的屋顶面积为 $4\ 193\ \text{m}^2$,得到屋顶的改造费用为

251 580 元。

(2)材料施工费用

传统式的草坪式绿色屋顶主要有阻根层、蓄排水层、过滤层、土壤基质层、植物层和

施工;装配式的草坪式绿色屋顶主要有装配式种植容器、土壤基质层、植物层和施工。依据文献查阅和市场调研结果,两者的单方成本对比如表 3、表 4 所示。

表 3 传统式绿色屋顶单方成本						元/m ²
屋顶类型	阻根层成本	蓄排水层成本	过滤层成本	土壤基质层成本	植物层和施工成本	单方造价合计
传统绿色屋顶	6 ~ 8	20 ~ 25	5 ~ 8	35	70	136 ~ 146

表 4 装配式绿色屋顶单方成本					元/m ²
屋顶类型	装配式种植容器成本	土壤基质层成本	植物层和施工成本	单方造价合计	
装配式绿色屋顶	36 ~ 50	35	55	126 ~ 140	

根据表 3、表 4,传统式的草坪式绿色屋顶和装配式的草坪式绿色屋顶单方成本取其均值,分别为 141 元/m²、133 元/m²;由于该案例的屋顶面积为 4 193 m²,且为满足日后维护管理和教学需求,现将屋顶绿化率控制在 80%左右,即施工面积为 3 354 m²;则这两种建造方式的基本材料费用和施工费用分别为 472 914 元、446 082 元。

(3)后期养护费用

合肥市属亚热带季风性湿润气候,四季分明,雨量适中,植物平时养护只需定期检查排水口、定期除草等,养护低廉。且装配式绿色屋顶模块化的设计相较于传统式绿色屋顶的排水和灌水系统更加智能化,未来的维护更加低廉和便捷。据调查结果,传统的草坪式绿色屋顶每年的养护成本为 5 元/m²^[10],装配式的草坪式绿色屋顶每年的养护成本为 2 元/m²。最后得出该案例中的传统式和装配式的草坪式绿色屋顶的每年后期养护费用分别为 16 770 元和 6 708 元。

(4)绿色屋顶成本

综合上述分析,研究案例的两种建造方式绿色屋顶成本如表 5 所示。

表 5 两种建造方式绿色屋顶的成本 元		
成本类型	传统绿色屋顶	装配式绿色屋顶
屋顶改造费用	251 580	251 580
材料施工费用	472 914	446 082
前期建造费用	724 494	697 662
后期年均养护费用	16 770	6 708

3. 装配式绿色屋顶经济效益分析

为了分析装配式和传统式绿色屋顶的经济效益,引入财务净现值计算方法,其中,绿

色屋顶的节电费用作为现金流入量,两种不同建造方式需要的建设成本费用和后期维护费用作为现金流出量,得到两种建造方式在经济效益方面的定量分析。

(1)节电费用计算

安徽省城乡中小学办公用电执行居民生活用电标准。本案例中的公办学校教学楼设计电压等级在 1 000 V 以下,所以采用居民生活用电电价 0.585 3 元/(kW·h)。同时,由于从 2012 年至今居民生活用电电价都没有发生变化,所以在后面的计算中默认未来的电价保持不变。由绿色屋顶节能效益分析中的建筑能耗模拟得出绿色屋顶相较于传统屋顶一年节省了 58 852 kW·h 的电量,则一年节约的电费约为 34 446 元。

(2)养护费用计算

由于经济的波动性和通货膨胀的客观存在,后期养护费用不会一成不变。为了较为客观地计算未来的养护费用,引入居民消费价格指数作为变量,以近十年中国居民消费价格指数的平均数作为未来的增长率,查阅 2011—2021 年的中国居民消费指数,笔者取其平均值为 2.53%,得到装配式的草坪式绿色屋顶未来的年养护费用 6 708 × 1.025 3 *t* 元,传统式的草坪式绿色屋顶未来的年养护费用为 16 770 × 1.025 3 *t* 元,*t* 为从起始年开始后的第 *n* 年。

(3)计算分析

以 2021 年为第 1 年,传统式绿色屋顶计算期为 *n* 年的财务净现值为

$$FNPV = \sum_{t=1}^n (34\,446 - 16\,770 \times 1.025\,3^t)$$
$$(1 + 0.03)^{-t} - 724\,494 \tag{2}$$

笔者取30年为周期,得到未来30年的财务净现值。由Excel计算式(2)得到的结果如表6所示。

表6 传统式绿色屋顶财务净现值元

年份	FNPV	年份	FNPV	年份	FNPV
2021	-697 728.7	2031	-585 273.6	2041	-528 527.5
2022	-691 893.4	2032	-576 988.3	2042	-525 715.1
2023	-676 911.9	2033	-569 334.2	2043	-523 357.2
2024	-662 773.1	2034	-562 291.2	2044	-521 438.7
2025	-649 450.5	2035	-555 839.8	2045	-519 945.2
2026	-636 918.6	2036	-549 960.8	2046	-518 862.6
2027	-625 152.5	2037	-544 635.9	2047	-518 177.3
2028	-614 128.0	2038	-539 847.3	2048	-517 876.0
2029	-603 821.7	2039	-535 577.5	2049	-517 945.9
2030	-594 210.9	2040	-531 809.6	2050	-518 374.5

表7 装配式绿色屋顶财务净现值元

年份	FNPV	年份	FNPV	年份	FNPV
2021	-670 896.7	2031	-450 744.3	2041	-300 683.8
2022	-645 074.9	2032	-432 934.3	2042	-288 772.6
2023	-620 168.6	2033	-415 799.1	2043	-277 357.3
2024	-596 150.1	2034	-399 318.2	2044	-266 422.9
2025	-572 993.1	2035	-383 471.8	2045	-255 954.5
2026	-550 671.5	2036	-368 240.9	2046	-245 938.0
2027	-529 160.4	2037	-353 606.7	2047	-236 359.6
2028	-508 435.4	2038	-339 551.2	2048	-227 205.7
2029	-488 472.9	2039	-326 056.8	2049	-218 463.5
2030	-469 250.0	2040	-313 106.6	2050	-210 120.1

由表6、表7可知,虽然装配式绿色屋顶仅凭电费作为收益,在不考虑生态收益的情况下并不能在30年后收回建设成本和维护成本,但装配式绿色屋顶相较于传统式绿色屋顶具有出色的经济效益,未来10年后装配式经济收益比传统式多124 960.9元,20年后多218 703元,30年后多308 254.4元。可以看出随着时间发展,传统式绿色屋顶与装配式绿色屋顶在财务净现值上的差距愈来愈大,这体现出二者在经济效益上的巨大差异,也为装配式建造技术在绿色屋顶中的推广提供了经济方面有力的科学依据。总体来说,在未考虑绿色屋顶的生态效益和环境效益的情况下,绿色屋顶在公共建筑中很难仅凭建筑节能的收益来收回建造成本和后期维

护费用,特别是在更大面积的公共建筑中,所以期待政府和有关部门可以对装配式绿色屋顶及其相关的项目给予一定政策倾斜和资金支持,使其发挥社会效益。

$$FNPV = \sum_{t=1}^n (34\,446 - 6\,708 \times 1.025\,3^t)$$
$$(1 + 0.03)^{-t} - 697\,662 \tag{3}$$

同理,得到的结果如表7所示。

四、结 论

笔者将装配式建造技术引入绿色屋顶,并选用合肥市实验学校的教学楼为研究对象,对绿色屋顶的建造成本、维护成本进行收集统计,通过成本效益分析方法得出结论,表明装配式绿色屋顶虽然仅凭电费作为收益不能在30年后收回建设成本和维护成本,但较之传统式绿色屋顶具有出色的经济效益。

通过调查研究可知,目前装配式建造方式在景观中的应用多集中在小型的绿色屋顶

的建造当中,并未在大规模的公园和绿地中进行运用,因此,笔者计划将来继续研究大型绿地系统中应用装配式建造方式是否能够达到更加出色的经济效益。

参考文献:

[1] 刘科,冷嘉伟. 亚洲绿色建筑评价体系 CO₂ 减排指标比较研究[J]. 建筑技艺, 2020(7): 14-17.

[2] 胡文发,孔德龙,何新华. 基于 BP-WINGS 的绿色建筑发展影响因素分析[J]. 软科学, 2020,34(3):75-81.

[3] 侯婷,杨成建,陈晓育,等. 绿色屋顶热效应机理研究进展[J]. 中国城市林业, 2022,20(1): 80-84.

[4] 何家浩. 浅谈绿色屋顶发展现状与前景[J]. 浙江农业科学, 2020,61(9):1810-1815.

[5] KOROL E, SHUSHUNOVA N. Benefits of a modular green roof technology [J]. Procedia engineering, 2016,100(161):1820-1826.

[6] LOIOLA C, MARY W. Hydrological performance of modular-tray green roof systems for increasing the resilience of mega-cities to climate change[J]. Journal of hydrology, 2019, 573:1057-1066.

[7] 林滔. 装配式屋顶花园景观模式与施工技术研究[D]. 广州:仲恺农业工程学院, 2014.

[8] 李红莲. 建筑能耗模拟用典型气象年研究[D]. 西安:西安建筑科技大学, 2016.

[9] 程桃桃. 基于 EnergyPlus 平台的办公建筑动态能耗模拟分析[D]. 西安:西安建筑科技大学, 2011.

[10] 方眠. 广州市屋顶绿化成本及生态效益分析[D]. 广州:华南理工大学, 2015.

[11] 牛皓,周集体,ADRIAENS P. 华盛顿绿色屋顶环境效益的经济评价[J]. 建筑经济, 2010(12):87-90.

[12] 单进,戴子云. 北京常用草坪式屋顶绿化轻型基质对屋面雨水径流控制影响研究[J]. 2019(20):86-91.

Economic Benefit Evaluation of the Assembled Green Roof: Taking the Teaching Building of Hefei Experimental School as an Example

ZHANG Shaojie^{1,2,3}, HU Lanlan¹, ZHU Mingzhi¹, SHI Jingjing¹

(1. School of Architecture & Urban Planning, Anhui Jianzhu University, Hefei 230601, China; 2. BIM Engineering Center of Anhui Province, Hefei 230601, China; 3. Prefabricated Building Research Institute of Anhui Province, Hefei 230601, China)

Abstract: Studying the energy-saving and economic benefits of prefabricated green roofs can provide scientific basis for the popularization and application of prefabricated green roofs. Taking the teaching building of Hefei Experimental School as an example, Revit software and Green Building Studio program are used to clarify the energy-saving benefits of green roofs. Besides, the construction costs and maintenance costs of green roofs are collected and calculated. Through the cost-benefit analysis method, the financial net present value is selected to study the economic benefit of assembled green roofs. Finally, the economic benefits advantages of assembled green roofs over traditional green roofs are obtained.

Key words: assembled; green roof; economic benefits; Green Building Studio; FNPV

(责任编辑:王丽娜 英文审校:林 昊)