

中瑞零碳建筑项目

中国全生命周期建筑碳排放计算研究报告



让我们共同打造气候中和的未来
Building a climate-neutral future together



中华人民共和国
住房和城乡建设部



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

intep
skat Swiss Resource Centre and
Consultancies for Development

版本说明

编辑信息

2025 年 5 月, 版本 1.0

项目发起与指导方

- 瑞士联邦外交部发展与合作署
- 中华人民共和国住房和城乡建设部

主要作者

- 西安建筑科技大学建筑设计研究院
- 罗智星教授及团队

联合作者

- Intep-skat 团队
 - 路枫博士
 - 朱继龙
 - André Ullal 博士
 - Roland Stulz
- CABR 团队
 - 张时聪博士
 - 杨芯岩博士

目录

目录

摘要

1. 绪论

- 1.1 背景 2
- 1.2 中外研究综述
- 1.3 面临的挑战

2. 中国建筑碳排放详细计算方法

- 2.1 确认系统边界
- 2.2 基本计算方法

3. 中瑞零碳建筑项目示范工程陕西留坝蜜蜂博物馆项目研究

- 3.1 项目背景与意义
- 3.2 项目概况
- 3.3 分析目的和工具
- 3.4 生命周期分析方法学
- 3.5 数据来源与取舍原则
- 3.6 生命周期分析结果
- 3.7 过程累积贡献分析
- 3.8 蜜蜂博物馆项目总结与建议

4. 蜜蜂博物馆技术分析

- 4.1 项目主要技术措施
- 4.2 具体技术分析

5. 欧洲建筑碳排放计算方法分析

- 5.1 欧洲建筑碳排放计算研究现状 31
- 5.2 对比分析 32

3 6. 建筑碳排放计算方法改进潜力分析 36

- 1 6.1 深化不同阶段建筑碳排放计算的精准计算分析 36
- 2 6.2 数字化和信息化技术应用拓展 36
- 2 6.3 碳排放核算、评价与优化的集成化平台 36

A1. 参考文献 38

2 6 A2. 术语表 39

8

8

9

12

12

13

13

14

14

15

21

22

23

23

31

摘要

当今时代，全球气候变化已成为国际社会需要共同应对的严峻挑战。为遏制气候变化的进一步恶化，国际社会亟须采取措施减少温室气体排放。中国在 2020 年 9 月提出“双碳”战略目标，要在 2030 年前实现“碳达峰”，于 2060 年达成“碳中和”（简称“30-60 双碳”目标），同时加强与他国合作，积极致力于推动全球双碳战略实施。这一战略旨在保护地球环境、降低对有限资源的依赖程度，为未来可持续发展创造有利条件。

中国建筑运行阶段产生的碳排放，在全社会总碳排放中占比高达 22%。所以建筑部门有效落实节能减排工作，对中国实现双碳战略目标具有重大意义。同时，建筑行业作为全球碳排放主要源头之一，对其全生命周期的碳排放展开研究，对于推动低碳建筑发展、实现绿色建筑目标至关重要。

本研究将对中国建筑生命周期碳排放进行详尽的分析，重点在于政策标准、计算方法以及当前面临的挑战，并对欧洲和瑞士的做法进行了深入的比较研究。研究内容包括搜集并分析中国的现行政策和标准、计算方法，并对当前中国建筑碳排放计算领域所面临的挑战进行了总结。研究中还包含了对陕西示范项目的案例分析，通过分解计算过程来展示研究方法的应用，并归纳瑞方对项目的改进建议。最终，研究还探讨了欧洲和瑞士在建筑碳排放计算方面的先进经验，与瑞士相关团队进行了持续的交流，并通过比较分析，评估了陕西省示范项目的降碳潜力以及中国碳排放计算方法的改进方向。

研究的核心成果揭示了中国与国际、特别是瑞士在建筑生命周期碳排放计算方面的差异。同时，研究结合了瑞士的经验技术，提出深化建筑全生命周期碳排放精准计算，拓展数字化技术应用等建议，以期改进中国的生命周期碳排放计算方法，期望能为后续的相关研究提供有价值的参考。

1. 绪论

1.1 背景

面对全球范围内极端气候频发的严峻形势，碳中和被视为实现全球气候目标的关键途径，这包括《巴黎协定》所设定的目标，即控制全球平均温度上升幅度在 2℃ 以内，并尽可能限制在 1.5℃。各国政府、国际组织及企业纷纷参与全球应对气候变化的行动，制定相关政策并作出承诺。相较于欧洲地区，中国在碳排放计算领域的探索起步较晚。值得肯定的是，中国政府持续为中国碳减排事业的推进做出了诸多的尝试与指导性工作。接下来，将主要从国家方针和国家标准、地方及团体标准等方面，进一步阐述中国政府在建筑碳减排工作中的具体措施。

首先，中国政府在 2009 年就明确提出了从 2020 年的减少温室气体排放的目标。这一目标的提出，标志着中国开始加大力度应对气候变化问题，并致力于推动绿色低碳发展。2021 年，中国政府提出“30-60 双碳”目标，进一步强调了降低温室气体排放的重要性，并争取 2030 年碳达峰，2060 年碳中和。这一目标的设定，为建筑碳排放降碳工作提供了明确的时间节点和任务要求。

值得注意的是，中国在 2009 年提出了 2020 年单位 GDP 的二氧化碳排放量比 2005 年至少下降 40%至 45%的目标。而在后续的发展中，又进一步提高了这一目标，努力争取到 2030 年单位 GDP 的二氧化碳排放量比 2005 年下降 60%至 65%。这一提升不仅展示了中国在碳减排方面的决心和行动力，也为建筑碳排放降碳工作提出了更高的标准和要求。为了实现“30-60 双碳”目标，中国需要采取更加有力的政策和措施，推动建筑行业向绿色低碳方向转型。因此，建筑全生命周期的碳排放计算变得至关重要，它不仅能够帮助我们更好地理解和控制碳排放，还能够为政策制定和技术创新提供数据支持。

对于建筑碳排放计算，首先建筑设计过程中，通过对空间类型、建筑构件与自然环境等交互机理的挖掘，并对建筑和各项设施的构成进行综合分析，可以从源头

减少能耗和碳排放的需求，构建低碳空间，营造低碳建筑。其次，碳排放计算是检验低碳建造技术的量化手段，完善建筑碳排放计算方法有助于对建筑全生命周期的碳排放进行精准的定量分析，以定量检验各种低碳技术的减碳成效。最后，碳排放计算是建筑行业进入碳交易市场的必要过程，建筑碳排放量作为核算的基础和约束值，直接关系到核算结果的代表性和可比性。因此，建筑领域碳排放计算边界的定义、建筑碳排放数据的核算问题是建筑碳交易中应首要关注的问题。

鉴于建筑碳排放计算的重要性和复杂性，中国的建筑碳排放降碳工作方面，出台了一系列政策标准，如鼓励建筑行业采用新技术、新材料和新工艺，降低碳排放强度。同时，还通过加大监管和执法力度，确保建筑行业碳排放得到有效控制。此外，还鼓励推动建筑行业与其他行业的协同发展，共同构建绿色低碳的产业体系。这些措施不仅有助于提升建筑行业的整体能效和环境表现，也为实现中国碳达峰和碳中和目标提供了坚实的支撑。

综上所述，中国对碳减排工作持坚定且长远的支持态度。这些目标与愿景的明确，既为建筑碳排放的降低指明了方向，也为中国绿色低碳发展提供了强大助力。未来发展中，预计在国家政策引导下，建筑行业将持续取得进展，为碳中和目标贡献力量。

1.2 中外研究综述

1.2.1 中外相关政策标准

■ 国际政策标准

1998 年，世界资源研究所(WRI)和世界可持续发展工商理事会(WBCSD)，协同世界各地的政府、企业、环保团体共同发起《温室气体议定书》(GHG Protocol)，旨在建立一个可信、高效的碳足迹核算框架。现行的 GHG Protocol 版本发布于 2009 年，由 4 个相互独立但又相互关联的标准组成：《温室气体核算体系企业核

算与报告标准》《企业价值链(范围 3)核算和报告标准》《产品生命周期核算和报告标准》和《温室气体核算体系项目量化方法》。其中《产品生命周期核算和报告标准》是面向企业的单个产品来核算产品寿命周期的温室气体排放，可识别所选产品的寿命周期中的最佳减缓机会。2009 年版本自发布以来被国际上广泛采用在推动国际碳核算和碳减排的发展方面发挥了重要作用。

2008 年，由英国标准协会编制的《商品和服务在生命周期内的温室气体排放评价标准》（PAS2050）正式颁布，标志着全球首个产品碳足迹标准的诞生。PAS 2050 以生命周期评价理论为基础，给出了具体的、明确的碳足迹计算方法，并提供了“从摇篮到工厂”（B2B）和“从摇篮到坟墓”（B2C）两种评价方案。

2013 年，以 PAS2050 为参考，国际标准化组织制定的 Products Carbon Footprint（ISO 14067）正式发布，旨在提供量化产品和服务在生命周期各阶段碳足迹的标准方法，提高计算结果的通用性与可比较性。ISO 14067 和 ISO 14044 等标准均指出，系统边界决定了哪些单元过程应包含在该研究中同时影响着结果量化的详细程度，因此系统边界的限定应对其中单元过程的多少及详细程度作出限定。

除了上述标准，国际标准还有 ISO21930 系列标准，其中 ISO21931 提供了一个通用框架，用于评估新建筑或现有建筑的环境、社会和经济特性、方面和影响，这些评估涉及建筑的设计、建筑产品、材料和组件的生产、建造、运营、维护和翻新以及寿命终结过程。与第一版（ISO 21931-1:2010）相比，第二版（ISO 21931-1:2022）的主要变化是扩大了范围，从仅评估环境性能的方法框架，扩展到包括评估建筑作品经济和社会性能的方法，作为可持续性评估的总体基础。

欧盟类似的有 EN 15978 提供了一个全面的框架，用于计算和评估建筑在其整个生命周期中的碳排放。这包括了建筑的使用阶段以及建材的生产、建筑的建造、

维护更新以及最终的拆除和材料的重新利用。通过遵循这一标准，建筑师和工程师可以设计出能效更高、环境影响更小的建筑。

早于欧盟框架体系的探索，瑞士自 20 世纪 90 年代起便构建了建筑能效与碳排放管理的本土标准体系，并为后续欧盟全生命周期评估框架提供了实践参考。比如迷你能源标准（Minergie），该标准指定了超前的建筑能效指标，并最大限度地利用建筑自身产生的可再生能源，同时强调建筑的健康舒适性，在瑞士及周边国家获得了广泛的市场认同¹。此外，自 1998 年以来，瑞士联邦能源局一直与各州合作，推广 SIA 建筑规范（标准 SIA 380/1）和 Minergie 标签系列。SIA 380 标准已多次更新，最近一次更新是在 2016 年。在建筑碳排放计算方面，瑞士作为欧盟国家，同时遵循 ISO 标准与瑞士本国的 SIA 系列标准，具体标准内容将在第五章进行分析。

■ 中国政策标准

中国作为发展中的经济大国，建筑业的能耗与碳排放量突出，实现借建筑节能减排，对中国经济的低碳发展具有重要的作用，目前中国相关性比较高的标准主要如下。

2006 年颁布实施了《绿色建筑评价标准》（GB/T 50378-2006），并于 2014 年、2019 年和 2024 年进行了修订。该标准经广泛调查研究，认真总结实践经验，参考有关国外标准，并在广泛征求意见的基础上，多次调整后形成适应中国本土的绿色建筑评价技术指标体系。

2019 年 12 月，《建筑碳排放计算标准》（GB/T51366-2019）正式实施，该标准由中国建筑科学研究院有限公司和中国建筑标准设计研究院有限公司担任主编单位，是中国第一部建筑碳排放计算国家标准。标准编制组经广泛调查研究，认真总结实践经验，在广泛征求意见的基础上进行编制。内容强调活动数据的构成

¹ 引自瑞士使馆官方网站新闻《瑞士与中国签署建筑节能领域谅解备忘录》

和碳排放计算方法，规定建筑运行阶段、建造及拆除阶段、建材生产及运输阶段三个部分的碳排放计算。针对建筑碳排放计算，标准碳排放因子定义为“将能源与材料消耗量与二氧化碳排放相对应的系数，用于量化建筑物不同阶段相关活动的排放”。

考虑不同阶段建筑碳排放活动类型对碳排放因子的需求,《建筑碳排放计算标准》（GB/T 51366-2019）附录分别给出了主要能源碳排放因子、建材碳排放因子和建材运输碳排放因子，以及建筑物运行特征、常用施工机械台班能源用量数据等，作为建筑碳排放计算的主要依据。

2022 年 4 月 1 日《建筑节能与可再生能源利用通用规范》（GB 55015-2021）开始实施，是一部建筑节能与可再生能源利用领域强制性规范。该标准强调项目要做碳排放分析，新建、扩建和改建建筑以及既有建筑节能改造均应进行建筑节能设计。

至于地方和团体标准层面，目前各地正积极探索并致力于构建符合自身特色的建筑碳排放标准体系。这一举措的目的不仅在于细化并提升国家标准的执行效果，更是为了充分考虑地域性差异，如气候条件、建筑材料供应、经济发展水平等因素，从而制定出更加贴合地方实际的碳排放控制要求。通过建立地方标准，可以更有效地引导当地建筑行业向低碳、环保方向转型，促进绿色建筑的普及与发展，为实现碳中和目标贡献区域力量。下表为部分地区工作展示。

地点	标准要求
北京市	《超低能耗居住建筑设计标准》（DB11/T 1665-2019）
山东省	《山东省工程建设技术导则》（JD37-002-2023）
广东省	《建筑碳排放计算导则(试行)》
四川省	《成都市绿色建筑施工图设计与审查技术要点（2021 版）》
江苏省	《江苏省民用建筑碳排放计算导则》
陕西省	《居住建筑全寿命周期碳排放计算标准》（DB61/T 5008-2021）
香港地区	《香港建筑物(商业、住宅或公共用途)的温室气体排放及减除的计算和报告指引》

表 1-1 部分地区关于建筑碳排放标准要求，出处：西安建筑科技大学

除了各级地方政府对碳排放计算工作的支持与统筹外，众多团体组织也在积极编制建筑碳排放计算的标准。这些团体组织包括行业协会、环保组织以及科研机构等，他们在推动碳排放计算标准化方面发挥了重要作用。行业协会通过制定行业规范和指南，为建筑碳排放计算提供了具体的执行标准。环保组织则通过倡导和宣传，提高了公众对建筑碳排放问题的认识，推动了相关标准的制定和实施。科研机构则通过深入研究，提供了科学依据和技术支持，确保了建筑碳排放计算的准确性和可靠性。这些团体组织的共同努力，使得建筑碳排放计算的标准更加完善，为实现碳减排目标提供了有力支持。

例如，中国建设监理协会制定了《建筑节能工程施工质量验收规范》（JGJ/T 246-2011），该规范明确了建筑节能工程施工的质量验收标准，并涉及施工过程对碳排放的影响。此外，《低碳建筑技术导则》（JGJ/Z 73-2012）详细阐述了低碳建筑设计与实施的技术要点，特别关注了降低碳排放的策略。中国工程建设标准化协会颁布了《建筑碳排放数据统计与分析标准》（CECS 374:2014），为建筑碳排放数据的统计与分析提供了具体的方法和要求。《碳中和建筑评价标准》（CECS 550:2023）则涵盖了建筑碳排放的计算，包括建筑隐含碳和建筑运行碳的计算方

法。2022 年 9 月，中国城市科学研究会发布了《建筑碳排放分析报告质量要求》，该文件对建筑碳排放的计算边界和方法进行了详尽的阐释。

1.2.2 中外常见计算方法概述

通过对中外的建筑碳排放计算研究现状梳理可以发现，中外国家建筑碳排放计算的逻辑和方法已形成一些共识。在计算方法方面，碳排放因子法的应用比较广泛。但是由于建筑业以及建筑的复杂性，建筑碳排放计算实践、建筑碳减排的技术及管理创新也面临着诸多问题和不足，需要进一步研究解决。

根据不同的研究对象和研究目的，建筑物及建筑产业中的建筑碳排放量计算所采用的方法主要有：碳排放因子法、物料平衡法和实测法等，具体介绍如下。

- 碳排放因子法

碳排放因子法(也称为碳排放系数法)是对某项活动以确定的因子来计算其所产生的碳排放量，此处所采用的因子是单位数量的该项活动所产生的碳排放量。获取产生碳排放的活动数量，按照碳排放因子确定该部分活动所产生的碳排放量，是碳排放因子法的基本原理。建筑全生命周期活动构成复杂，持续时间长，在建筑碳排放计算时间中，结合工程量分析及能耗使用监测数据，采用碳排放因子法对建筑全生命周期碳排放量进行计算的可行性大，也是目前中外各种评价标准普遍采用的计算方法。可根据建筑设计估算值或实际建造运行中的实测值获取各项活动数值，包括建筑材料的投入量、施工阶段工程量、使用阶段采暖能耗等数据，乘以对应的碳排放因子，例如单位材料内含碳排放量、机械设备单位台班碳排放量、单位能耗碳排放量等数值，分别计算建筑物生命周期中的各项活动和总投入物质所产生的碳排放量。

- 物料平衡法

物料平衡法是一种专门用于精确计算建筑领域碳排放量的方法，它紧密依托于建

筑的设施布局和工艺流程，能够深入捕捉到建筑碳排放的实际源头和数量。然而，这种方法也存在一些局限性，其中最为显著的是其工作量大和数据需求多的特点。

在建筑领域，物料平衡法特别适用于那些涉及复杂设备和工艺流程的建筑类型，如大型公共建筑、工业厂房等。它通过详细分析建筑的能源消耗、建筑材料的使用以及建筑运营过程中的排放情况，从而得出准确的碳排放数据。例如，在建筑中的脱硫过程中，物料平衡法能够精确计算出脱硫设备所消耗的化学物质以及产生的排放气体的碳排放量。这需要详细记录和分析脱硫设备的运行数据、化学物质的消耗情况以及排放气体的成分，工作量相对较大，对数据的需求也较为苛刻。

此外，物料平衡法在计算建筑碳排放量时，还需要考虑每年建筑中引入的新化学物质和设备。这要求相关人员对新设备的性能参数、运行数据以及化学物质的消耗情况进行详细记录和分析，以精确计算出新设备在运营过程中所产生的碳排放量。这一过程同样需要大量的时间和精力，对数据的要求也相对较高。尽管物料平衡法存在工作量大和数据需求多的缺点，但其精确性和适用性仍然使其在建筑领域具有重要的应用价值。通过详细分析建筑的设施布局、工艺流程以及能源消耗情况，物料平衡法能够为建筑碳排放的核算和减排工作提供有力的数据支持。同时，这种方法也能为建筑设计和运营过程中的节能减排提供有益的参考，帮助建筑行业实现更加绿色、可持续的发展。

- 实测法

在环境污染监测领域，实测法已被较为广泛地采纳。该方法通过在特定污染源现场直接进行测量，获取污染物的排放浓度及流量数据，进而估算出碳排放量。然而，实际操作中，该方法的可行性面临一定挑战，因其易受环境因素的显著影响，故主要适用于运行中的污染源监测。此外，确保取样的代表性至关重要，因为若取样不当，利用实测数据来统计污染源排放量将会引入较大误差。下表为这几种方法的优缺点对比总结。

方法	优点	缺点
碳排放因子法	便于计算，不会出现较大偏差	碳排放因子差异较大，对于地域性和时效性要求较大
物料平衡法	能得到比较精确的碳排放数据	对投入物与产出物进行全面的分析研究，工作量大，过程复杂
实测法	对于计算使用阶段二氧化碳排放量很准确，反映实际情况	实验的可操作性较难，受环境影响大

表 1-2 三种方法优缺点总结表，出处：西安建筑科技大学

总体而言，碳排放因子法是当前建筑领域最为权威且应用广泛的碳排放计算方法。值得注意的是，在中国，建筑碳排放的计算方法已经发展得相对成熟，主要采用的是全生命周期评估 (LCA) 的理念，这一方法全面考虑了建筑材料生产、运输、施工、使用及最终废弃处理等各个阶段的碳排放。而在这一框架下，排放因子法被广泛应用，为建筑项目的碳排放量提供了一个科学、准确的量化结果，从而为建筑行业的绿色转型和低碳发展提供了有力的技术支持。

1.3 面临的挑战

尽管中国在建筑碳排放领域已经取得了显著的进步，例如通过推广绿色建筑材料、优化建筑设计和施工过程，以及实施更严格的环保标准，但仍然面临着许多挑战，下面将具体论述。

1.3.1 数据获取与核算难度

根据《2023 中国建筑与城市基础设施碳排放研究报告》，2021 年全国房屋建筑全过程碳排放总量为 40.7 亿吨 CO₂，占全国能源相关碳排放的比重为 38.2%。其中，建材生产阶段碳排放 17.0 亿吨 CO₂，建筑施工阶段碳排放 0.7 亿吨 CO₂，建

筑运行阶段碳排放 23.0 亿吨 CO₂。这表明不同阶段的碳排放量差异显著，核算工作复杂且数据获取难度大。

此外，传统的建筑碳排放计算方法依赖于施工图设计信息，涉及的材料和设备种类繁多，通常超过 60 种，独立产品数量可达 2000 件以上。采用这种方法计算建筑物的碳排放，需要庞大的碳排放因子数据库，并且耗费大量的时间和人力资源。这种方法不仅效率低下，而且与快速评估建筑环境影响的初衷相悖，尤其在建筑施工完成后，再进行环境影响核算的实际意义有限。

因此，我们需要根据建筑设计不同阶段和内容，开发出快速且高效的物化碳排放计算方法。这样的方法能够及时提供反馈，帮助优化设计，提高评估效率，更好地实现建筑环境影响的快速评估。这种方法不仅能够减少资源消耗，还能在设计阶段就考虑到环境影响，从而实现更加可持续的建筑设计。

1.3.2 技术创新与政策标准

技术进步在减少建筑业碳排放中起到关键作用，但目前技术进步效应对于中国建筑业碳排放呈现负向驱动效应，说明技术水平提高仍有较大空间。同时，不同地区在建筑节能降碳方面可能存在政策和标准不统一的问题，这影响了碳排放计算的准确性和可比性。

有报告中提到，建筑隐含碳排放在 2016 年达峰，后在 2020 年受疫情影响下降，2021 年出现回升²。这可能反映了疫情期间建筑活动的减少，以及后续技术进步和政策调整的不足。

中国建筑节能协会建筑能耗与碳排放数据专委会的工作简介指出，专委会旨在整合行业力量，协同开展建筑能耗和建筑碳排放专项研究，夯实建筑节能数据基础，

² 中国建筑节能协会,重庆大学城乡建设与发展研究院. 中国建筑能耗与碳排放研究报告

(2023 年)[J]. 建筑,2024(2):46-59.

这暗示了目前建筑能耗和碳排放数据核算、研究与应用方面存在一定挑战和需求。

1.3.3 建筑碳排放计算方法的详细度与可操作性

中国于 2019 年发布了《建筑碳排放计算标准》（GB/T 51366—2019），从建筑全生命周期碳排放构成的层面对各组成部分的碳排放计算进行了规定，并给出了相应的计算公式。但是由于建筑构成复杂、生命周期长、标准的详细度不足，仅作为建筑碳排放计算的原则性指导文件，具体实施操作过程的指导性不强。尚无建筑碳排放计算详细方法的学术专著，使得建筑从业相关人员在碳排放管理过程中缺少技术支撑和应用指导。至于可操作性不足，更多体现在缺少建设前期可行性研究及方案设计阶段无详细数据时的计算方法，现有的计算软件多以《建筑碳排放计算标准》（GB/T 51366-2019）的基本要求为依据，按照全生命周期进行阶段划分，计算结果的分析不够精准，对建筑各阶段碳排放组成缺少分类细化，不足以应对设计及低碳建造技术的分析。

这些挑战与困境表明，中国在建筑碳排放计算领域需要进一步加强数据获取与核算能力，推动技术创新和政策标准的统一。通过这些措施，应当可以更有效地应对建筑领域的碳减排挑战。

2. 中国建筑碳排放详细计算方法

目前中国现行的建筑碳排放计算依据《建筑碳排放计算标准》(GB/T51366-2019), 其中建筑碳排放计算的具体计算方法和步骤在标准中有详细说明。

在此标准中, 考虑到建筑物的生命周期较长, 涉及的产业链也较为复杂, 从原材料的开采到建筑物的最终报废, 整个周期跨度大。为确保在计算建筑碳排放时, 不会与建材工业、交通运输等领域的碳排放计算发生重复, 相关标准对建筑生命周期内的不同阶段进行了细致划分。具体来说, 这些阶段包括:

- 建材的生产和运输阶段
- 建筑的建造和拆除阶段
- 建筑物的运行阶段

通过这种分阶段的明确界定, 可以更科学、准确地计算建筑全生命周期的碳排放, 避免不同行业间的重复计算, 为实现建筑行业的低碳发展提供数据支持。

2.1 确认系统边界

2.1.1 系统边界

- 建材的生产和运输阶段

在进行建筑材料生产阶段的碳排放计算时, 应采用“摇篮到大门”的生命周期评估模型。该模型的边界从上游原材料和能源的生产开始, 一直延伸到建筑材料的出厂点。这一阶段的主要建材的运输距离消耗量需要通过查询设计图纸、采购清单等工程建设相关的技术资料确定。关于碳排放因子包括以下几个方面:

- 原材料的采集与加工过程所产生的碳排放。
- 制造建筑材料所消耗的能源, 其开采和生产过程产生的碳排放。
- 原材料和能源的运输过程中产生的碳排放。
- 建筑材料的生产过程直接产生的碳排放。

在计算过程中, 如果某些排放数据缺失或者被忽略, 应当在报告中明确指出。对于建材运输阶段的碳排放计算, 其理论边界应涵盖以下几个环节:

- 从建材的生产地点运输到建筑施工现场的运输过程。
- 运输过程中消耗的能源, 其开采和加工阶段的碳排放。
- 运输工具的生产过程产生的碳排放。
- 运输道路等基础设施的建设过程中的碳排放。

这些计算环节确保了从原材料采集到建筑材料最终使用过程中的碳排放能够被全面评估, 从而为建筑项目的碳足迹分析提供准确的数据支持。

- 建筑的建造和拆除阶段

建筑建造阶段是根据建筑设计文件、施工组织设计或施工方案, 按照相关标准通过一系列活动将投入到项目施工中的各种资源在时间和空间上合理组织, 变成建筑实体的过程。主要组成为:

- 构成工程实体的分部分项工程的建造能耗;
- 未完成工程施工, 发生于该工程施工前和施工过程中的技术、生活、安全等方面的非工程实体的各项措施的能耗。

相应的建筑建造阶段的碳排放分为两部分:

- 分部分项工程施工过程消耗的燃料、动力产生的碳排放;
- 措施项目实施过程消耗的燃料、动力产生的碳排放。

而建筑拆除阶段的碳排放应包括人工拆除和使用小型机具机械拆除使用的机械设备消耗的各种能源动力产生的碳排放。

- 建筑运行阶段

在评估建筑物运行期间的碳排放时, 必须全面考虑以下关键环节的排放量: 暖通空调系统、生活热水的供应、照明及电梯设备的运行、可再生能源的利用, 以及

建筑碳汇系统的固碳作用。通过对这些关键环节的细致核算，可以更准确地掌握建筑在实际使用过程中对环境的影响。

2.1.2 温室气体类型

温室气体包括但不限于二氧化碳(CO₂)、甲烷(CH₄)、氧化亚氮(N₂O)等多种气体。其中，CO₂为人类活动最常产生的温室效应气体，为了统一度量整体温室效应的结果，规定以 kgCO₂e 为度量温室效应的基本单位。二氧化碳当量(kgCO₂e)指与一定质量的某种温室气体具有相同温室效应的 CO₂的质量，是可用于比较不同温室气体对温室效应影响的度量单位。

建筑建造、运行、拆除过程中产生的温室气体主要为 CO₂，其计算结果通常使用 kgCO₂；建材生产和运输及制冷剂排放的温室气体包括各种温室气体，其碳排放强度通常使用二氧化碳当量(kgCO₂e)表示。

通常采用单位面积建筑碳排放量对不同建筑设计方案 and 不同建筑物之间的碳排放进行比较，单位面积建筑碳排放量由建筑碳排放除以建筑面积得到。

2.2 基本计算方法

根据建筑全寿命周期的阶段分类，常用的计算公式也各不相同。

2.2.1 运行阶段

对于运行阶段碳排放计算，其建筑碳排放量应依据各系统不同类型能源消耗量和不同类型能源的碳排放因子确定，按照一般规定建筑运行阶段单位建筑面积的总碳排放量 (C_M) 应按照下列公式计算：

$$C_M = \frac{[\sum_{i=1}^n (E_i EF_i) - C_p]y}{A}$$
(2.2- 1)

$$E_i = \sum_{j=1}^n (E_{i,j} - ER_{i,j})$$
(2.2 - 2)

- 式中：
- C_M —— 建筑运行阶段单位建筑面积碳排放量 (kgCO₂/m²)
 - E_i —— 建筑第 i 类能源年消耗量 (单位/a)
 - EF_i —— 第 i 类能源的碳排放因子
 - E_{i,j} —— j 类系统的第 i 类能源消耗量 (单位/a)
 - ER_{i,j} —— j 类系统小号由可再生能源系统提供的第 i 类能源量 (单位/a)
 - C_p —— 建筑绿地碳汇系统年减碳量 (kgCO₂/a)
 - i —— 建筑消耗终端能源类型，包括电力、燃气、石油、市政热力等
 - J —— 建筑用能系统类型，包括供暖空调、照明、生活热水系统等
 - y —— 建筑设计寿命 (a)
 - A —— 建筑面积 (m²)

2.2.2 建筑建造与拆除阶段

在建筑建造与拆除阶段的计算公式存在着部分差异。

- 建造阶段
- 建筑建造阶段的碳排放计算应按照下式计算：

$$C_{JZ} = \frac{\sum_{i=1}^n E_{JZ,i} EF_i}{A} \quad (2.2 - 3)$$

式中：

C_{JZ} —— 建筑建造阶段单位建筑面积碳排放量 (kgCO_2/m^2)

$E_{JZ,i}$ —— 建筑建造阶段第 i 类能源总消耗量 (kgCO_2/kWh 或 kgCO_2/kg)

EF_i —— 第 i 类能源的碳排放因子 (kWh 或 kg)

A —— 建筑面积 (m^2)

■ 建筑拆除阶段

该阶段的单位建筑面积的碳排放量应该按照下列公式计算：

$$C_{cc} = \frac{\sum_{i=1}^n E_{cc,i} EF_i}{A} \quad (2.2 - 4)$$

式中：

C_{cc} —— 建筑建造阶段单位建筑面积碳排放量 (kgCO_2/m^2)

$E_{cc,i}$ —— 建筑建造阶段第 i 类能源总消耗量 (kWh 或 kg)

EF_i —— 第 i 类能源的碳排放因子 (kgCO_2/kWh)

A —— 建筑面积 (m^2)

建筑物人工拆除和机械拆除阶段的能源用量应按照下列公式计算：

$$E_{cc} = \sum_{i=1}^n Q_{cc,i} f_{cc,i} \quad (2.2 - 5)$$

$$f_{cc} = \sum_{j=1}^m T_{B-i,j} R_j + E_{jj,i} \quad (2.2 - 6)$$

式中：

E_{cc} —— 建筑拆除阶段能源用量 (kg 或 kWh) ;

$Q_{cc,i}$ —— 第 i 个拆除项目的工程量;

$f_{cc,i}$ —— 第 i 个拆除项目每计量单位的能耗系数 ($\text{kWh}/\text{工程量计量单位}$

或 $\text{kg}/\text{工程量计量单位}$) ;

$T_{B-i,j}$ —— 第 i 个拆除项目单位工程量第 j 种施工机械台班消耗量;

R_j —— 第 i 个拆除项目第 j 种施工机械台班的能源用量;

i —— 拆除工程中项目序号;

j —— 施工机械序号。

2.2.3 建材生产阶段及运输阶段

在建材生产阶段及运输阶段计算时，应按照国家现行标准《环境管理 生命周期评价 原则与框架》(GB/T 24040)、《环境管理 生命周期评价 要求与指南》(GB/T24044) 计算。并按照下式计算：

$$C_{jc} = \frac{C_{sc} + C_{ys}}{A} \quad (2.2 - 7)$$

式中：

C_{JC} —— 建筑生产及运输阶段单位建筑面积碳排放量 ($\text{kgCO}_2\text{e}/\text{m}^2$)

C_{SC} —— 建筑生产阶段碳排放 (kgCO_2e)

C_{YS} —— 建筑运输阶段碳排放 (kgCO_2e)

A —— 建筑面积 (m²)

■ 建材生产阶段

建材生产阶段的计算公式应按照下式计算：

$$C_{sc} = \sum_{i=1}^n M_i F_i \quad (2.2 - 8)$$

式中：

C_{sc} —— 建筑生产阶段碳排放 (kgCO₂e)

M_i —— 第 i 种主要建材的消耗量

F_i —— 第 i 类主要建材的碳排放因子 (kgCO₂e/单位建材数量)

■ 建材运输阶段

建材运输阶段的计算公式如下：

$$C_{ys} = \sum_{i=1}^n M_i D_i T_i \quad (2.2 - 9)$$

式中：

C_{ys} —— 建筑生产阶段碳排放 (kgCO₂e)

M_i —— 第 i 种主要建材的消耗量 (t)

D_i —— 第 i 类建材的平均运输距离

T_i —— 第 i 种建材的运输方式下，单位重量运输距离的碳排放因子

[kgCO₂e/(t·km)]

3. 中瑞零碳建筑项目示范工程陕西留坝蜜蜂博物馆项目研究

3.1 项目背景与意义

3.1.1 背景

留坝县地处秦岭南麓，生态环境优美，蜜源植物丰富，养蜂历史悠久。然而，长期以来，当地的蜜蜂产业主要以传统的养殖和销售模式为主，产业附加值有待提高。为了充分发挥留坝的资源优势，推动蜜蜂产业的发展，打造特色生态旅游品牌，陕西省留坝蜜蜂博物馆项目应运而生，项目位置如图 3-1 所示。

2023 年 3 月，“陕西省汉中市留坝县火烧店镇蜜蜂研究与乡村振兴旅游基地”项目被选为中瑞零碳建筑项目第二批示范项目之一。该项目是由中国住房和城乡建设部与瑞士发展与合作署共同发起的部级国际合作项目。项目于 2023 年 5 月启动，预计在中瑞团队大约一年的共同努力下，将于 2024 年正式竣工。

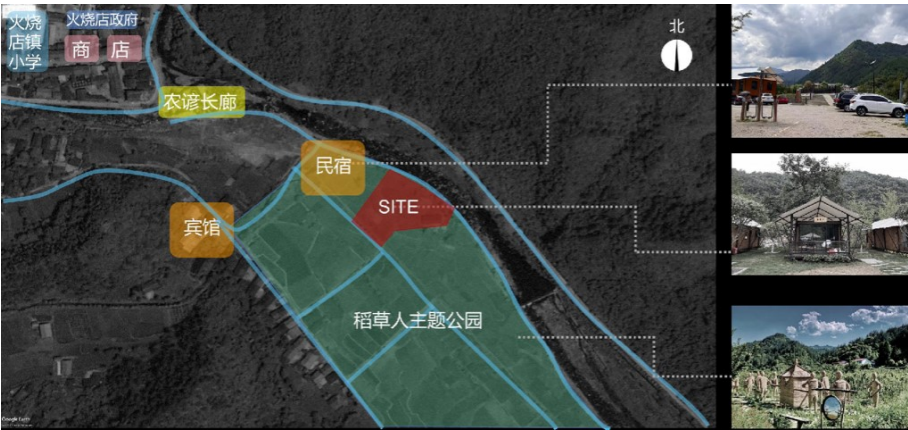


图 3-1 项目位于乡村自然环境中， 图片来源：中瑞零碳建筑项目陕西留坝示范工程团队

3.1.2 意义

▪ 产业推动

深度挖掘蜜蜂文化内涵，为蜜蜂产业注入文化元素，提升产业附加值。通过展示蜜蜂养殖技术、蜂产品加工过程等，促进产业从单一的生产销售向多元化发展，包括科普教育、旅游体验等领域延伸。为当地蜂农提供一个学习交流的平台，有助于推广先进的养殖技术和管理经验，提高蜜蜂养殖的效率和质量，从而增加蜂农收入，推动当地蜜蜂产业的规模化、标准化发展。

▪ 文化传承

蜜蜂文化是人类农业文化的重要组成部分。博物馆的建设可以系统地收集、整理和展示与蜜蜂相关的历史文化、民俗风情等，保护和传承这一独特的文化遗产。让更多的人了解蜜蜂在生态系统中的重要作用以及人类与蜜蜂长期共生的关系，增强人们对自然生态的保护意识。

▪ 旅游发展

丰富留坝县的旅游资源，为游客提供一个新颖、有趣的旅游景点。吸引更多的游客前来参观游览，延长游客在留坝的停留时间，促进当地旅游业的发展。同时，与周边的自然景观、乡村旅游等项目形成联动，打造综合性的旅游线路，提升留坝旅游的整体吸引力和竞争力。

3.2 项目概况

3.2.1 建筑基本信息

工程名称	留坝县蜜蜂博物馆
建筑类型	公共建筑
用地面积(m²)	4674.10m²
建筑面积(m²)	1404.3m²
建筑层数	地上 2 层
建筑密度	16.30%
容积率	0.29
绿地率	37%
机动车停车位	15 辆

表 3-1 基本信息表格，出处：西安建筑科技大学

3.2.2 展览内容

本建筑作为综合性建筑，集科普研究、互动体验、蜂文化展示和蜂产品销售于一体，设有多个展厅，包括蜜蜂文化历史展厅、蜜蜂养殖技术展厅、蜂产品展厅等。

- 蜜蜂文化历史展厅：通过图片、文字、实物等多种形式，展示蜜蜂在人类历史长河中的发展演变，以及与蜜蜂相关的神话传说、诗词歌赋、民俗文化等。
- 蜜蜂养殖技术展厅：详细介绍古法圆桶养蜂技术特色，蜜蜂的繁殖与饲养管理、病虫害防治等。设置互动体验区，让游客可以亲自操作养蜂工具，模拟蜜蜂养殖的一些环节，增加游客的参与感和趣味性。
- 蜂产品展厅：展示各类蜂产品，并介绍它们的营养价值、功效和加工工艺。游客可以在这里品尝到正宗的留坝蜂蜜等蜂产品，还可以购买相关的纪念品。

此外，博物馆还设有科普教育区、多媒体放映厅等。科普教育区定期举办蜜蜂科普讲座和培训活动，面向中小学生和社会公众普及蜜蜂知识和生态保护理念。多媒体放映厅播放与蜜蜂相关的纪录片，让游客更加直观地了解蜜蜂的生活习性和生态价值。

3.3 分析目的和工具

本节分析目的是进行建筑生命周期的碳排放计算旨在定量分析建筑碳排放热点，进一步提出碳减排措施并实现碳排放强度的降低。项目在设计阶段按照《建筑节能与可再生能源利用通用规范》(GB55015—2021) 和《近零能耗建筑技术标准》(GB/T 51350-2019) 的要求，并参考国家标准《建筑碳排放计算标准》(GB/T51366-2019)及《公共建筑节能设计标准》(GB/50189-2015) 对于建材生产及运输阶段、建筑建造阶段、建筑运行阶段、建筑拆除阶段的碳排放计算进行的详细规定，进行建筑生命周期的碳排放计算。

分析工具是 Microsoft Excel 、斯维尔超低能耗计算软件 PHES 2022。

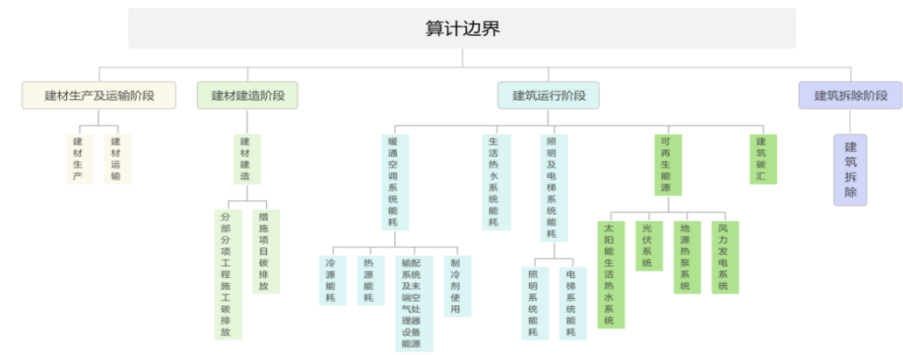
3.4 生命周期分析方法学

3.4.1 建筑生命周期分析

全生命周期评价(Life Cycle Assessment, LCA)过程既能实现评价目标的系统性分析,又能达到量化分析的目的。基于 LCA 方法所获得的评价结果,能够帮助生产单位识别关键环境问题 以及造成环境影响的主要工艺环节,从而避免环境问题从某一个生命周期阶段转移到另一个生命周期阶段,或者从某一类环境影响转化成其他类型的环境影响。

3.4.2 系统边界

建筑碳排放核算的核心环节之一是明确建筑碳排放计算的系统边界,包括对建筑系统边界的详细描述和绘制建筑与环境之间的边界以及确定建筑整个生命周期的相关个体过程。在本体系框架内,建筑物的系统边界确定为:在建筑物基地范围内形成建筑实体和功能的一系列中间产品和单元过程流组成的集合,包括建筑材料的生产和运输阶段、建筑建造阶段、运行阶段(暖通空调系统、生活热水系统、照明及电梯系统、可再生能源与建筑碳汇)以及建筑生命终止阶段直接和间接的温室气体排放。如图 3-2 所示。



本体系框架将建筑生命周期分为建材生产和运输、建筑建造、建筑运行阶段以及建筑拆除阶段。其中建筑运行阶段, 包含了暖通空调系统、生活热水系统、照明及电梯系统、可再生能源和绿地碳汇等 5 个方面的计算。

3.5 数据来源与取舍原则

3.5.1 用量（活动）数据来源

- 建筑材料用量: 建筑工程量清单。
- 建筑材料运输: 建筑工程量清单及国家标准《建筑碳排放计算标准》(GB/T51366-2019)。
- 施工建造能源消耗: 建筑工程量清单。
- 建筑运行: 斯维尔超低能耗计算软件 PHES 2022 模拟。
- 建筑拆除: 根据《建筑物拆除预算定额》SH00-31-2019 对拆除阶段的碳排放进行了计算。
- 绿地碳汇: 根据台湾学者林宪德在其编著的《绿色建筑解说评估手册》提出的种植类型-面积法为基础, 结合项目实际情况计算得出。

3.5.2 排放数据来源

- 建材生产阶段: 相关碳排放因子数据来自《建筑碳排放计算标准》(GB/T51366-2019); CBCED 数据库、DH 2.0 数据库、CPCFFD 2022 数据库;
- 建材运输阶段: 相关碳排放因子数据来自《建筑碳排放计算标准》(GB/T51366-2019)、CBCED 数据库;
- 建筑建造阶段: 相关碳排放因子数据来自《建筑碳排放计算标准》(GB/T51366-2019)、CBCED 数据库;
- 建筑运行阶段: 相关碳排放因子数据来自《建筑碳排放计算标准》(GB/T51366-2019);

- 建筑拆除阶段：相关碳排放因子数据来自《建筑碳排放计算标准》(GB/T51366-2019)、CBCED 数据库；

3.5.3 取舍原则

本报告采用的取舍规则以各项材料投入占产品重量或过程总投入的重量比为依据。具体规则如下：

- 普通物料重量 < 0.05%产品重量时，以及含稀贵或高纯成分的物料重量 < 0.01%产品重量时，可忽略该物料的上游生产数据；总共忽略的物料重量不超过 3%；
- 低价值废物作为原料，如粉煤灰、矿渣、秸秆、生活垃圾等，可忽略其上游生产数据；
- 大多数情况下，生产设备、厂房、生活设施等可以忽略；
- 在选定环境影响类型范围内的已知排放数据不应忽略。

3.6 生命周期分析结果

3.6.1 建材生产及运输阶段

- 数据取舍

根据取舍原则和各建材重量占比（如图 3-3 所示）通过计算各建材的重量及所占百分比,现将重量占比 < 0.05% 的建筑材料进行舍去，忽略其上游的生产数据。按照取舍原则，经过筛选现主要计算钢材、混凝土、水泥砂浆、砂石、墙体材料、瓷砖面板、保温材料、油漆涂料、防水材料等的建材生产与运输的碳排放。

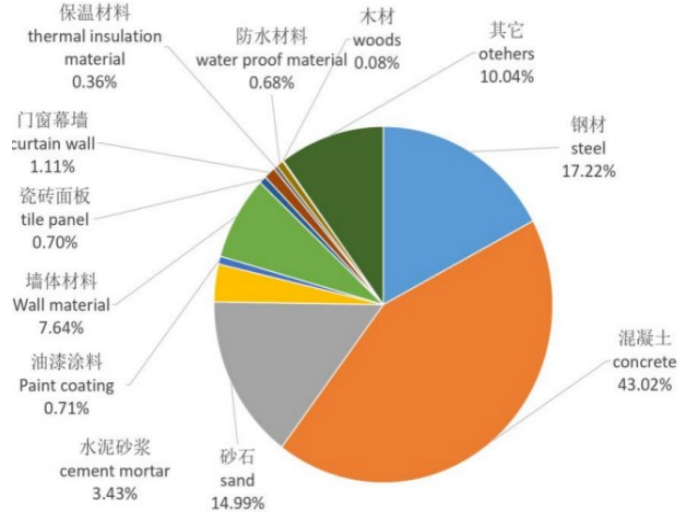


图 3-3 各建材重量占比， 图片来源，中瑞零碳建筑项目陕西留坝示范工程团队

- 建材生产阶段

本栋建筑的建材生产阶段的碳排放将建材类型分为钢材、混凝土、砂石、水泥砂浆等。以项目工程量清单为依据，通过汇总各类别建材的用量，在国家标准《建筑碳排放计算标准》（GB/T51366-2019）、DH2.0、CBCED、CPCFFD 2022 等数据库中寻得建材对应的碳排放因子，按照第二章中式 2.2.2 - 6 进行计算。

分别按建材种类和分部分项工程计算了建材生产阶段的碳排放，经计算其中，钢材占据了生产阶段的碳排放的 53.96%，混凝土占了生产阶段碳排放的 15.49%，分部分项工程中金属钢结构生产阶段碳排放占比最高，达到 32.07%，其次为混凝土结构工程，占比为 25.15%，具体如图 3-4、图 3-5 所示。

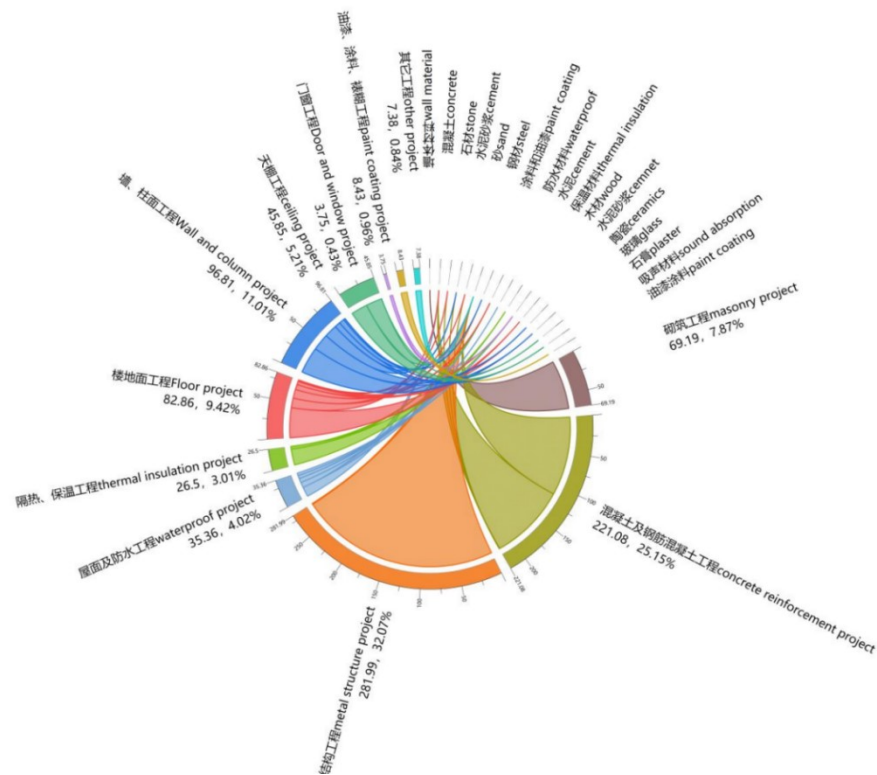


图 3-4 分部分项工程碳排放比例弦图（单位：kgCO₂e/m²），图片来源，中瑞零碳建筑项目陕西留坝示范工程团队

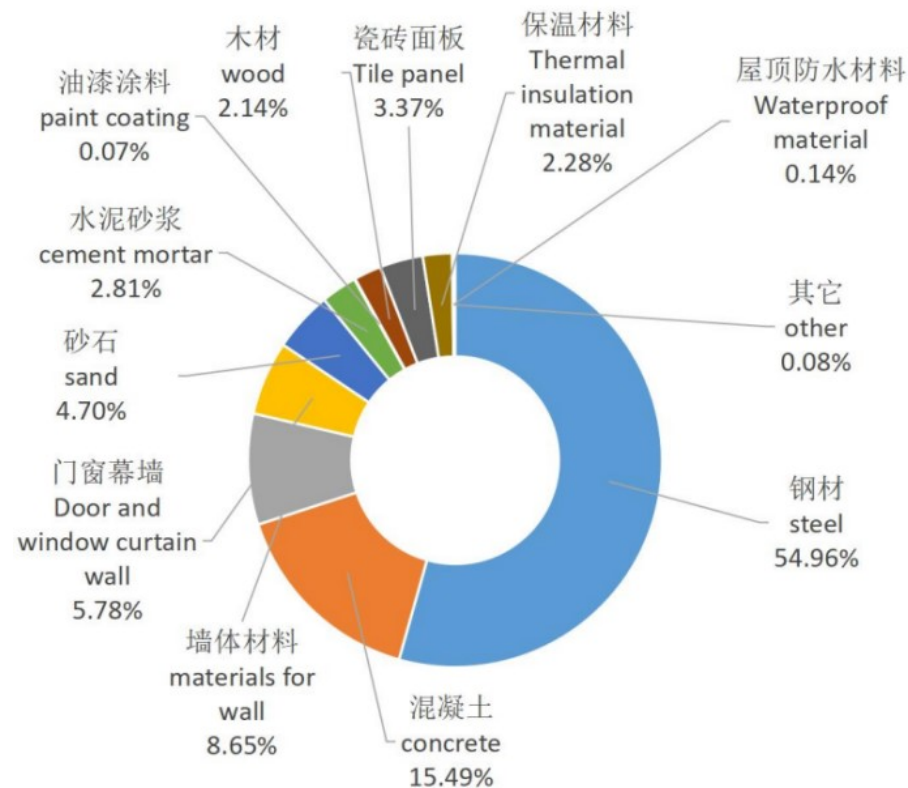


图 3-5 建材生产阶段各建材碳排放占比，图片来源，中瑞零碳建筑项目陕西留坝示范工程团队

通过计算求得该建筑建材生产阶段碳排放为 1234.66tCO₂e，单位建筑面积碳排放为 879.20kgCO₂e/m²，年均单位建筑面积碳排放为 17.58kgCO₂e/(m²·a)。

■ 建材运输阶段

建材运输碳排放的计算中，运输方式默认为重型柴油货车运输(载重 18t)，在国

家标准《建筑碳排放计算标准》(GB/T51366-2019)中其碳排放因子为0.129kgCO₂e/(t·km)；根据国家标准《建筑碳排放计算标准》(GB/T51366-2019)规定，运输距离默认值混凝土为40km，其他建材为500km。根据国家标准《建筑碳排放计算标准》(GB/T51366-2019)，建材运输阶段碳排放按第二章中的式2.2.2-9计算，具体如下。

$$C_{ys}=\sum_{i=1}^nM_iD_iT_i$$

■ 合计

在《建筑碳排放计算标准》(GB/T51366-2019)中规定，建材碳排放是将生产与运输阶段一起按照计算公式2.2.2-7计算，具体如下。

$$C_{jc}=\frac{C_{sc}+C_{ys}}{A}$$

以项目工程量清单为依据，计算得该建筑建材生产与运输阶段碳排放为1329.76tCO₂e，单位建筑面积碳排放约946.93kgCO₂e/m²，年均单位建筑面积碳排放18.94kgCO₂e/(m²·a)。其中钢材及混凝土由于工程使用量大等原因贡献了绝大多数碳排放，数值分别为693.85、196.64tCO₂e，各自占比52.18%、14.79%，其余水泥、砂浆、墙体材料及砂石等建筑材料也各自贡献了部分碳排放，如图3-6。

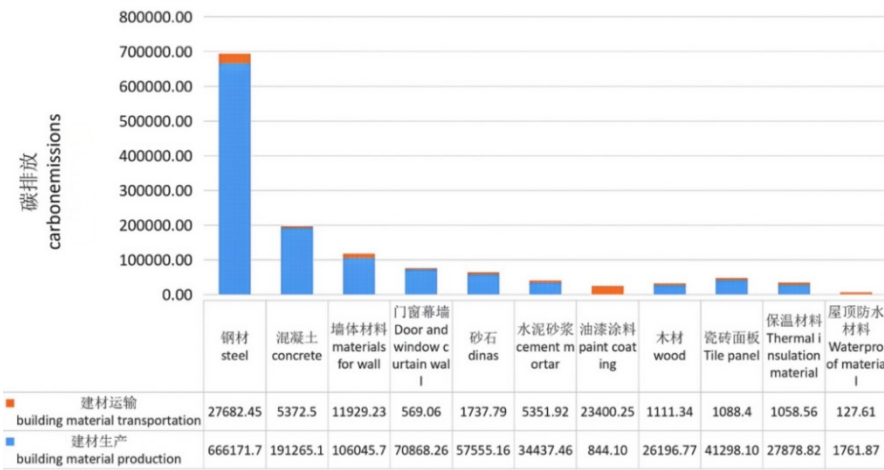


图 3-6 建材生产及运输碳排放，图片来源，中瑞零碳建筑项目陕西留坝示范工程团队

3.6.2 建筑建造阶段

建造阶段产生的碳排放主要来自施工过程中所使用的机械设备耗能，以建筑工程量清单为依据，建造阶段碳排放按第二章式2.2.2-3计算，具体如下。

$$C_{Jz}=\frac{\sum_{i=1}^nE_{jz,i}EF_i}{A}$$

建筑建造阶段所造成的碳排放为61.81tCO₂e，单位建筑面积碳排放44.01kgCO₂e/m²，年均单位建筑面积碳排放为0.88kgCO₂e/(m²·a)，具体详见表3-2。

能源种类	单位	消耗量	碳排放因子	碳排放量	合计
柴油	kg	1557.29	3.760	5855.39	
电	kWh	95857.99	0.581	55693.49	61809.59
汽油	kg	67.72	3.850	260.71	

表 3-2 建筑建造阶段能耗及碳排放，出处：西安建筑科技大学

3.6.3 建筑运行阶段

▪ 建材运行阶段能耗

本报告采用的计算分析软件为斯维尔超低能耗计算软件 PHES2023，绿建斯维尔超低能耗软件 PHES 运行于 CAD 平台，依据《近零能耗建筑技术标准》以及各个省份的超低能耗标准进行开发，支持全国各地居住建筑超低能耗阶段节能设计和模拟计算评价工作，可计算建筑全年供冷、供暖需求，照明电耗、建筑总一次能源等指标计算，如表 3-3。

类别	年均单位建筑面积电耗[kWh/(m²·a)]	年电耗(kWh)	50 年单位建筑面积电耗(kWh/m²)	50 年电耗(万 kWh)
供冷	7.76	10897.368	388.00	54.49
供暖	1.42	1994.106	71.00	9.97
照明	14.91	20938.113	745.50	104.69
插座	23.07	32397.201	1153.50	161.99
电梯	0.71	997.053	35.50	4.99
光伏	-90.86	-127594.698	-4543.00	-637.97
合计	-42.99	-60370.857	-2149.50	-301.84

表 3-3 建筑运行阶段能耗，出处：西安建筑科技大学

本报告根据委托方提供的建筑设计图纸及其他相关资料并采用能耗计算软件 PHES2022 建立留坝蜜蜂研学旅游综合体被动式超低能耗分析模型，建筑寿命取为 50 年，计算得建筑全生命周期能源消耗，并结合《建筑碳排放计算标准》(GB/T51366-2019)中给定的能源碳排放因子进行建筑运行阶段的碳排放计算。建筑运行阶段碳排放按下式计算：

$$C_M = \frac{[\sum_{i=1}^n (E_i EF_i) - C_p]y}{A}$$
$$E_i = \sum_{j=1}^n (E_{i,j} - ER_{i,j})$$

经查询，电力碳排放因子为 0.5810kgCO₂e/ kWh，故建筑运行阶段能耗带来的的

碳排放为：

$$E_iEF_i = (-3018400 \times 0.5810) / 1000 = -1753.69 \text{tCO}_2\text{e}$$

电力	类别	年均碳排放	50 年单位建筑面积碳排放	50 年生命周期碳排放
		[kgCO ₂ e/ (m ² ·a)]	(kWh/m ²)	(tCO ₂ e)
	供冷	4.49	224.5	315.265
	供暖	0.85	42.5	59.683
	照明	8.65	432.5	607.36
	插座设备	13.39	669.5	940.179
其他	电梯	0.43	21.5	30.192

可再生	类别	年均碳排放	50 年单位面积碳排放	50 年生命周期碳排放
		[kgCO ₂ e/ (m ² ·a)]	(kWh/m ²)	(tCO ₂ e)
可再生	光伏	-52.79	-2639.5	-3706.65
能源	(Ep)			
	碳汇量	-5.6	-280	-393.348
	[kgCO ₂ e/ (m ² ·a)]			
	合计	-30.58	-1529.00	-2147.175

表 3-4 运行阶段碳排放，出处：西安建筑科技大学

■ 绿地碳汇

绿地碳汇部分以台湾林宪德种植类型—面积法为基础，结合 50 年生命周期进行计算，该项目绿地类型为灌木及草地，由于项目所处位置为暖温带，气候修正因子取 0.7。故绿地碳汇按下式计算：

$$C_s = \sum_{i=1}^n A_i \times C_{pi} \times \varepsilon \tag{3.6-1}$$

式中：

Cs —— 规划范围内绿植 50 年总固碳量， kgCO₂e

A_i —— 不同绿化类型种植面积， m²

C_{pi} —— 单位面积 50 年固碳量， kgCO₂/m²

P_i —— 绿化种植方式， ε为气候修正因子

故绿地碳汇为：Cs=325×1729×0.7=453.86tCO₂，生命周期碳汇量为 393.35tCO₂e，单位建筑面积碳汇量为 280.10kgCO₂e/m²，年均单位建筑面积碳汇量为 5.60kgCO₂e/（m²·a）。

综上，建筑的运行碳排放主要来自建筑日常为满足人们采暖、制冷和照明等需求而消耗的电力等以及光伏发电和绿地碳汇的减碳，经计算建筑运行阶段碳排放为-2147.18tCO₂e，单位建筑面积碳排放为-1529.00kgCO₂e/m²，年均单位建筑面积碳排放为-30.58kgCO₂e/（m²·a），如表 3-4。

3.6.4 建筑拆除阶段

建筑拆除阶段主要包括建筑拆除及废弃物处置过程，此阶段产生的碳排放多来自

拆除施工消耗的能源以及建筑垃圾运输过程中的燃料消耗。

材料种类	回收率	回收部分重量(t)	回收部分减碳量 (tCO ₂ e)	总减碳量 (tCO ₂ e)
钢材	0.5	208.39	333.086	361.95
木材	0.5	0.99	0.881	
玻璃及铝合金	0.5	13.47	27.806	
石膏	0.5	3.86	0.181	

表 3-5 材料回收再利用数据，出处：西安建筑科技大学

▪ 建筑拆除

拆除阶段产生的碳排放主要来自施工过程中所使用的机械设备耗能，该项目根据国家标准《建筑碳排放计算标准》(GB/T51366-2019)和《建筑物拆除预算定额》SH00-31-2019 对拆除阶段的碳排放进行了计算。

$$C_{cc} = \frac{\sum_{i=1}^n E_{cc,i} EF_i}{A}$$

(2.2.2 - 4)

经计算, 拆除阶段碳排放为22.64tCO₂e，单位建筑面积碳排放为 1612kgCO₂e/m²，年均单位建筑面积碳排放为0.32kgCO₂e/(m²·a)。

▪ 废弃物处置

该阶段碳排放主要分为部分建材的回收利用和建筑垃圾运输至处理厂两部分所产生。

依据国家标准《建筑碳排放计算标准》(GB/T51366-2019)中对建筑拆除后的垃圾外运产生的能源用量的计算规定，与建材运输阶段保持一致。故垃圾外运产生的碳排放为 95.107tCO₂e，50 年生命周期单位建筑面积碳排放为 67.73kgCO₂e/m²，年均单位建筑面积碳排放为 1.35kgCO₂e/(m²·a)。其中对于钢材、铝合金等回收率较高的建材材料进行再利用，依据前文建材生产阶段碳排放计算结果可知回收利用产生的减碳量为 361.953tCO₂e，单位建筑面积减碳量为 257.75kgCO₂e/m²，年均单位建筑面积减碳量为 5.16kgCO₂e/(m²·a)，具体见表 3-5。

综上，将建筑拆除阶段与废弃物处置阶段两者相加得该阶段生命周期碳排放为 -244.20tCO₂e，单位建筑面积减碳量为-173.90kgCO₂e/m²，年均单位建筑面积减碳量为 -3.48kgCO₂e/(m²·a)。

3.6.5 结果汇总

通过前文建筑生命周期各阶段碳排放的计算可以得出本项目建筑生命周期总碳排放为 -999.81tCO₂e，单位建筑面积生命周期碳排放为 -711.96kgCO₂e/m²，年均单位建筑面积碳排放为-14.24kgCO₂e/（m²·a）。具体的各子阶段建筑碳排放量见下表 3-6。

阶段	子阶段	碳排放 (tCO ₂ e)	单位建筑面积碳 排放(kgCO ₂ e/m ²)	年均单位建筑面积碳排 放[kgCO ₂ e/ (m ² ·a)]
建材生产及运输	建材生产	1234.66	879.20	17.58
	建材运输	95.11	67.73	1.35
建筑建造	建筑建造	61.81	44.01	0.88
建筑运行	建筑运行	-2147.18	-1529.00	-30.58
建筑拆除	建筑拆除	22.64	16.12	0.32
废弃物处置	回收再利用	-361.95	-257.75	-5.16
	废弃物外运	95.11	67.73	1.35
总计		-999.81	-711.96	-14.24

表 3-6 本项目建筑生命周期碳排放量，出处：西安建筑科技大学

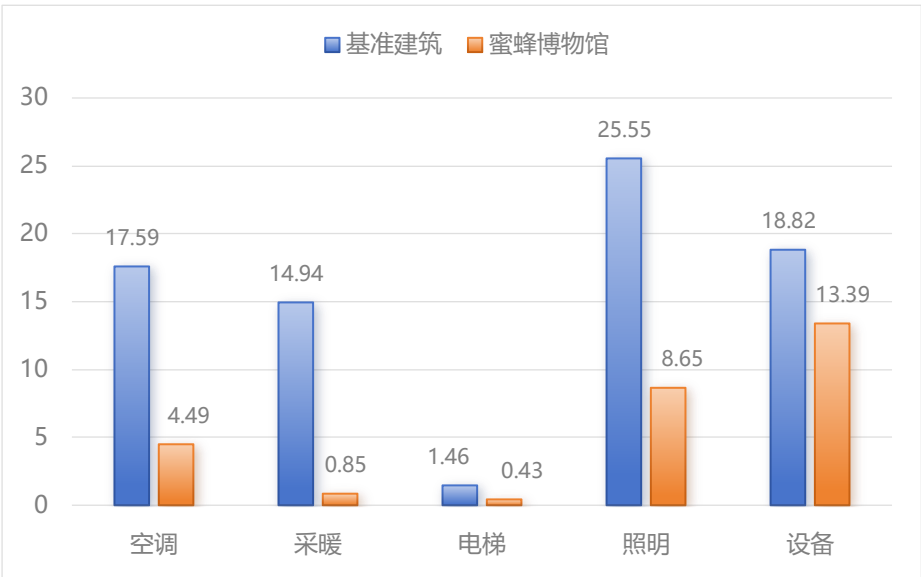


图 3-7 蜜蜂博物馆与基准建筑碳排放量对比，图片来源，中瑞零碳建筑项目陕西留坝示范工程团队

如图 3-7 所示，除去光伏发电以及绿地碳汇的碳减排量，计算得到本项目建筑本体运行碳排放量为 27.81tCO₂/a，较基准建筑碳减排率达 64%。

3.7 过程累积贡献分析

结合前文的碳排放计算结果可知，该项目产生了 -999.81tCO₂e 碳排放，单位建筑面积生命周期碳排放为 -711.96kgCO₂e/m²，单位建筑面积年碳排放 -14.24 kgCO₂e/ (m²·a)。由光伏发电和绿地碳汇产生的减碳量不仅抵消了建筑运行阶段由采暖空调、照明等产生的能耗带来的碳排放，也抵消了其它阶段的隐含碳排放；此外由于景观植物的光合作用吸收二氧化碳，产生了 393.35tCO₂e 的碳汇。其次是建材生产及运输阶段，产生了 1329.76 tCO₂e，即 946.93kgCO₂e/m²碳排放。其余过程如建造、拆除等则贡献了其余碳排放。可知建筑生产及运输是建筑全生命

周期碳排放的主要贡献者，可考虑进行优化改进。

另外，对于建筑废弃物处置阶段，由于大量可回收建筑材料的再利用如钢材、玻璃等，使建筑减少了 257.75 kgCO₂e/m² 的碳排放，使建筑环境负荷得以改善（图 3-8）。

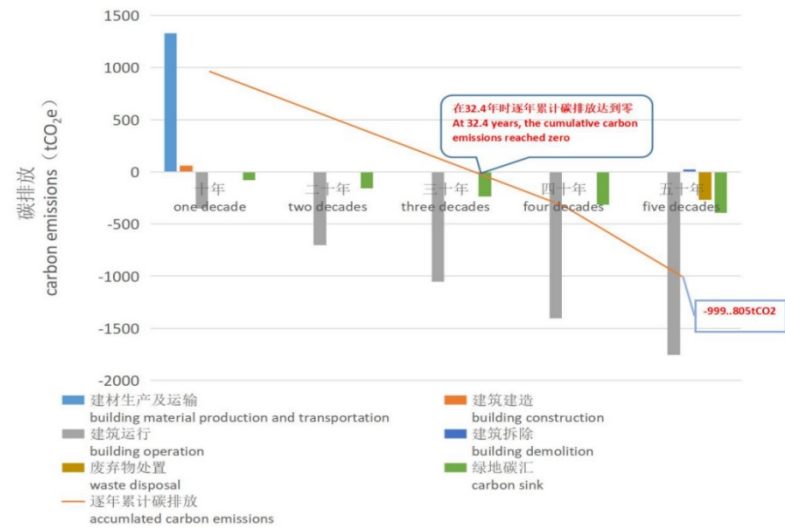


图 3-8 本项目生命周期碳排放变化，图片来源，中瑞零碳建筑项目陕西留坝示范工程团队

3.8 蜜蜂博物馆项目总结与建议

3.8.1 分析结果的总结与解释

- 完整性说明：建筑拆除阶段的碳排放按照根据《建筑物拆除预算定额》SH00-31-2019 进行计算；其余阶段数据收集及模型建立均完整。
- 数据质量评估：本报告相关活动数据取自建筑项目实际工程量清单，相关碳排放因子取自经验证的《建筑碳排放计算标准》(GB/T51366-2019)；

CBCED 数据库、DH 2.0 数据库、CPCFFD 2022 数据库进而保证数据质量。

3.8.2 项目改进建议

- 选择耐候性能好的建筑材料，可以有效延长建筑材料的使用寿命，从而相依减少能源消耗与碳排放量；
- 选择高性能且对环境影响小的建筑材料至关重要，例如木材等天然材料。首先，木材作为一种负碳材料，拥有显著的减排潜力。它不仅能够降低建筑材料的单位环境负荷，还能减少建材的使用量，从而降低经济成本。其次，木材等材料的保温隔热性能优越，能够有效减少建筑内部温度受外界环境变化的影响，进而有助于降低建筑在使用过程中的能耗。
- 增加可回收利用建筑材料的使用比例，此方法可减少新材料加工产生的资源与能源消耗，对于建筑的可持续性具有非常重要的意义，具有良好的经济和社会效益。例如回收利用率较高的钢材、铝合金、玻璃等；
- 增加建筑的屋顶绿化、绿地率，可以减少因土地利用而降低的土地碳汇。在提高绿地的空间利用率、增加绿量的同时，还可以改善基地周围的生态环境，为附近居民提供遮阳、游憩的良好条件；
- 可再生能源是来自自然界的能源，包括太阳能、水能、风能、潮汐能、地热能、生物质能等。可再生能源是“取之不尽，用之不竭”的能源。具有资源分布广泛，适宜就地开发等优点。根据各类可再生资源的特点和经济性能，目前在建筑中广泛应用的主要是太阳能，其次是和地热能、生物质能和风能；对于城市建筑而言，应用较为广泛的就是太阳能。可再生能源与建筑的结合，已经成为推动建筑节能减排的必然趋势；

4. 蜜蜂博物馆技术分析

4.1 项目主要技术措施

本项目是一个全生命周期零碳建筑，采用了多种措施来降低建筑的隐含碳和运行碳，主要技术措施如下。

4.1.1 隐含碳降低措施

- 减量化设计：一层和二层的设备管线共用一层吊顶内的桥架与空间，二层不做吊顶。合理设计层高，一层高度控制在 4.5m。
- 轻量化设计：建筑设计合理柱距，降低梁柱尺寸，减少用钢。二层露台顶部钢架采用精致钢，减少截面尺寸，降低用钢量。
- 绿色化设计：结构体系采用碳排放小的钢结构，绿色建材使用量超过 50%。可循环材料减碳量 361.95tCO₂e。
- 长寿化设计：建筑平面采用框架结构形成开敞大空间，具有足够的空间灵活性与适应性。钢结构经防腐、防火处理，具有结构寿命长的特点。
- 协同化设计：方案设计秉持设计与技术相融合的理念，形成一体化的团队。建筑能耗、碳排放计算贯穿设计全过程，指导项目优化。

4.1.2 运行碳降低措施

- 保温隔热：设计适宜的围护结构保温性能，兼顾冬季保温和夏季隔热。
- 建筑围护结构选用屋顶传热系数 $K=0.21\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ ，外墙传热系数 $K=0.30\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ ，外窗（包括透光幕墙）传热系数 $K=1.5\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ 的构造。
- 遮阳：选择太阳得热系数（SHGC）较低的建筑玻璃幕墙，并设置外遮阳板；
- 自然通风：通过合理设计玻璃幕墙开启扇、控制建筑进深等措施，增加建

筑 自然通风效果；

- 低碳空间：在满足建筑使用、布展等需求的基础上，合理控制建筑层高，降低建筑总的冷热负荷；
- 空调系统：选择一级能效多联机空调，适宜建筑部分负荷的节能；
- 新风系统：新风系统设置高效热回收模块；
- 照明系统：选择高效能的照明灯具，合理设计灯具位置，降低建筑照明功率密度；
- 监测系统：设置高水平建筑环境与能耗监测控制系统，对建筑电、水以及可再生能源进行分项计量，对建筑室内外的温湿度、空气品质、水质进行连续监测并与空调、新风、照明、水泵系统联动控制；
- 节约用水：选择一级水效的卫生器具，减少建筑用水量；
- 海绵园区：设置雨水回收再利用与污水净化再利用系统，消除雨污对汉江支流的影响。

4.2 具体技术分析

4.2.1 被动式技术可行性分析

根据当地气候特点结合生物气候图对各被动式技术进行对比分析，选取适合本项目的被动式技术。由图 4-1 所示，本项目进行被动式设计时优先考虑窗遮阳、自然通风降温等设计策略，可以获得较高的节能效果和环境效益。

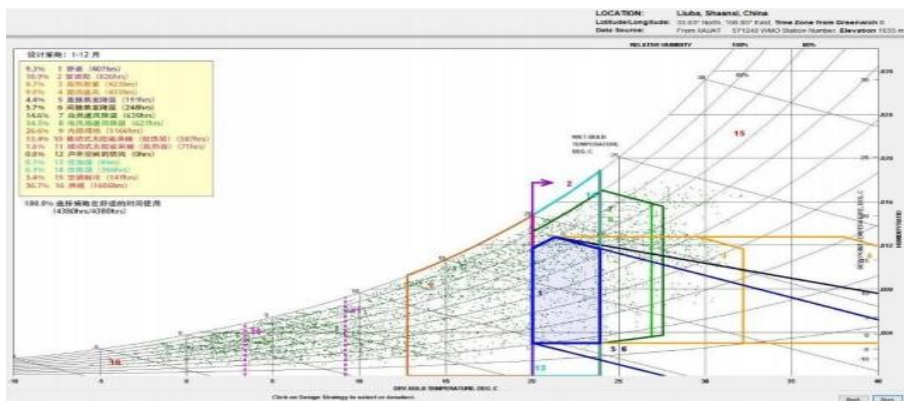


图 4-1 留坝县生物气候分析，图片来源，中瑞零碳建筑项目陕西留坝示范工程团队

■ 遮阳设计

以室外干球温度 $T > 26^{\circ}\text{C}$ 及水平面总太阳辐射 $I > 500 \text{ Wh/m}^2$ 作为条件，筛选出需遮阳的时刻。室外干球温度大于 26°C 且水平面总太阳辐射大于 500 Wh/m^2 的时间共有 248 h，占全年时间的 2.83%，集中在 6~8 月；在设计时，应考虑在这些时段进行有效的建筑遮阳。

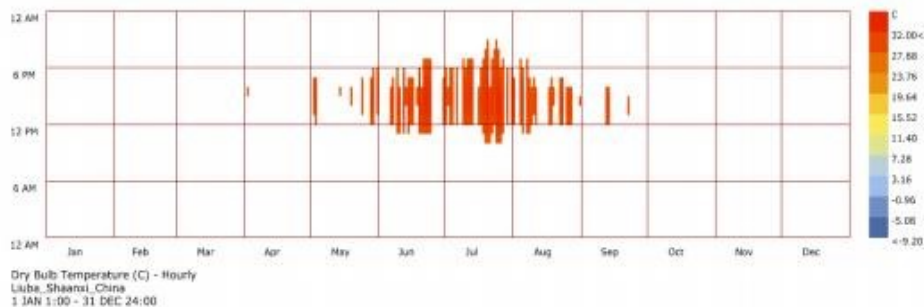


图 4-2 室外干球温度 $>26^{\circ}\text{C}$ ，图片来源，中瑞零碳建筑项目陕西留坝示范工程团队

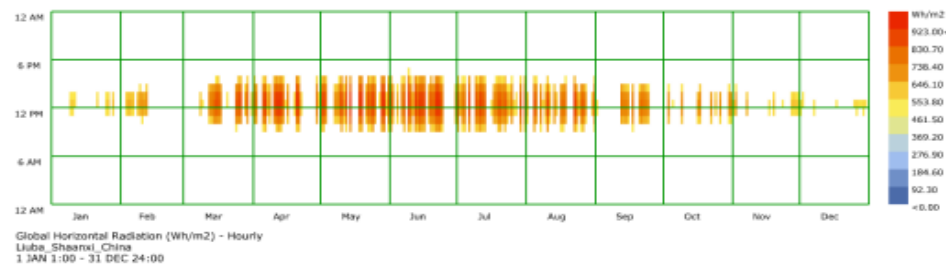


图 4-3 水平面总太阳辐射 $>500 \text{ Wh/m}^2$ ，图片来源，中瑞零碳建筑项目陕西留坝示范工程团队

综上，本项目最终通过幕墙外遮阳板设计，夏季南向幕墙的太阳辐射量得到有效控制，外遮阳板可有效阻挡太阳直射，防止室内温度过高及眩光；在冬季还可以满足日照要求，示意图如下。

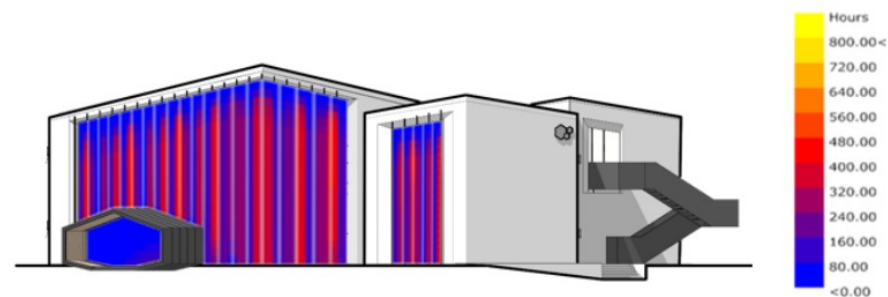


图 4-4(a) 夏季外太阳辐射示意图，图片来源，中瑞零碳建筑项目陕西留坝示范工程团队

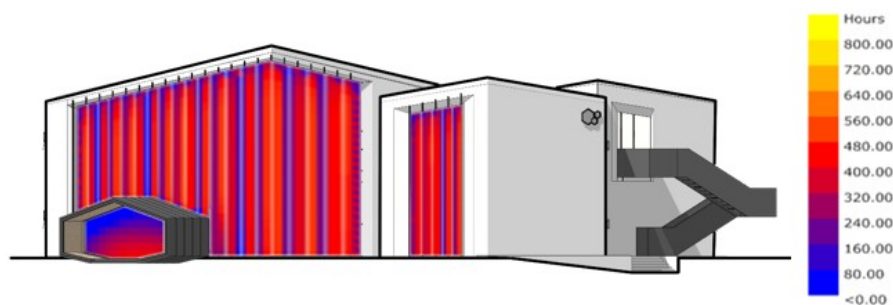


图 4-4(b) 冬季太阳辐射示意图，图片来源，中瑞零碳建筑项目陕西留坝示范工程团队

■ 自然通风

当地夏季主导风向为东南风，冬季主导风向为西北风；项目的整体布局设计需利于夏季、过度季的自然通风，并且避免主朝向垂直于冬季主导风向。

通过对项目所在地全年温湿度及室外风速进行分析，并且以室外干球温度 $20^{\circ}\text{C} < T < 28^{\circ}\text{C}$ ， $40\% < \text{相对湿度} < 90\%$ ， $0.1 \text{ m/s} < \text{风速} < 3 \text{ m/s}$ 作为条件,筛选出需相应的自然通风时段。共有 990h 适合自然通风设计，占全年时间的 11.30%；适合白天自然通风的时间共 454 h，夜间自然通风时间共 536 h。

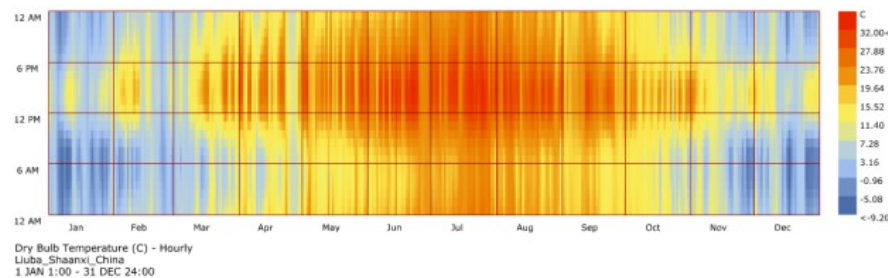


图 4-5(a) 室外干球温度 $20\sim 28^{\circ}\text{C}$ ，图片来源，中瑞零碳建筑项目陕西留坝示范工程团队

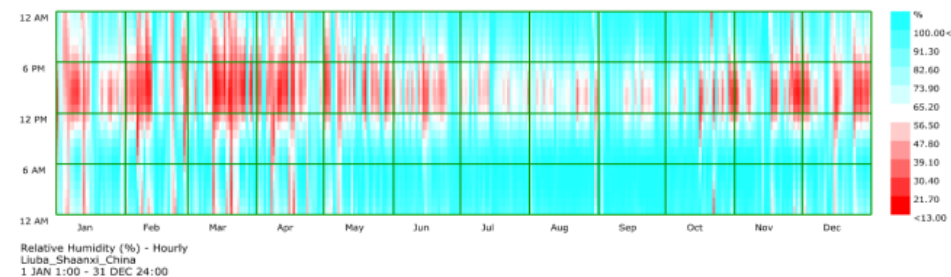


图 4-5 (b) 相对湿度 40%~90%，图片来源，中瑞零碳建筑项目陕西留坝示范工程团队

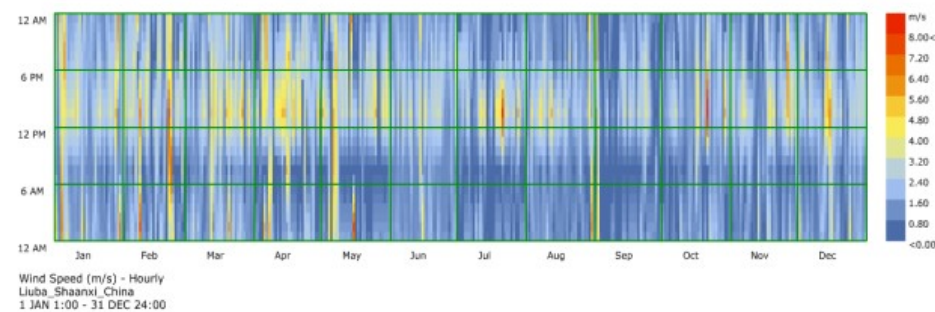


图 4-5 (c) 风速 $0.1\sim 3 \text{ m/s}$ ，图片来源，中瑞零碳建筑项目陕西留坝示范工程团队

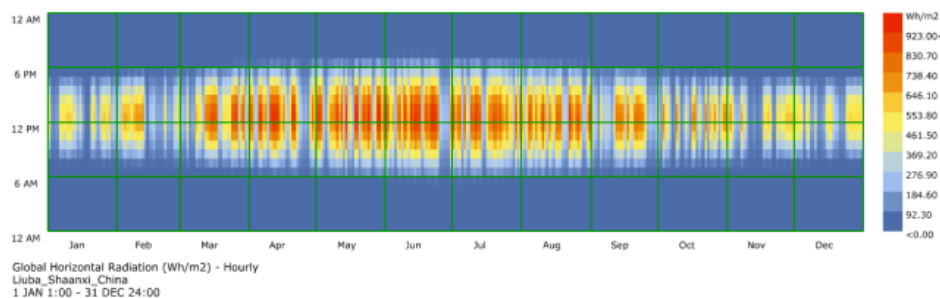


图 4-5 (d) 水平面逐时总辐射，图片来源，中瑞零碳建筑项目陕西留坝示范工程团队

在致力于实现最大程度节能减碳的目标驱动下，该建筑设计在构思与规划阶段便深度融入了被动式建筑设计理念，尤为注重自然通风的巧妙运用。设计团队通过对建筑布局、窗体配置以及开口方向的精心策划，旨在最大限度地利用自然力量来促进室内空气的流通与更新。具体而言，深入分析了建筑所处地域的风向特征，巧妙利用了风压差异这一自然现象，通过合理布局建筑物的进风口与出风口，成功构建了一套高效且可持续的自然通风系统，具体如图所示。

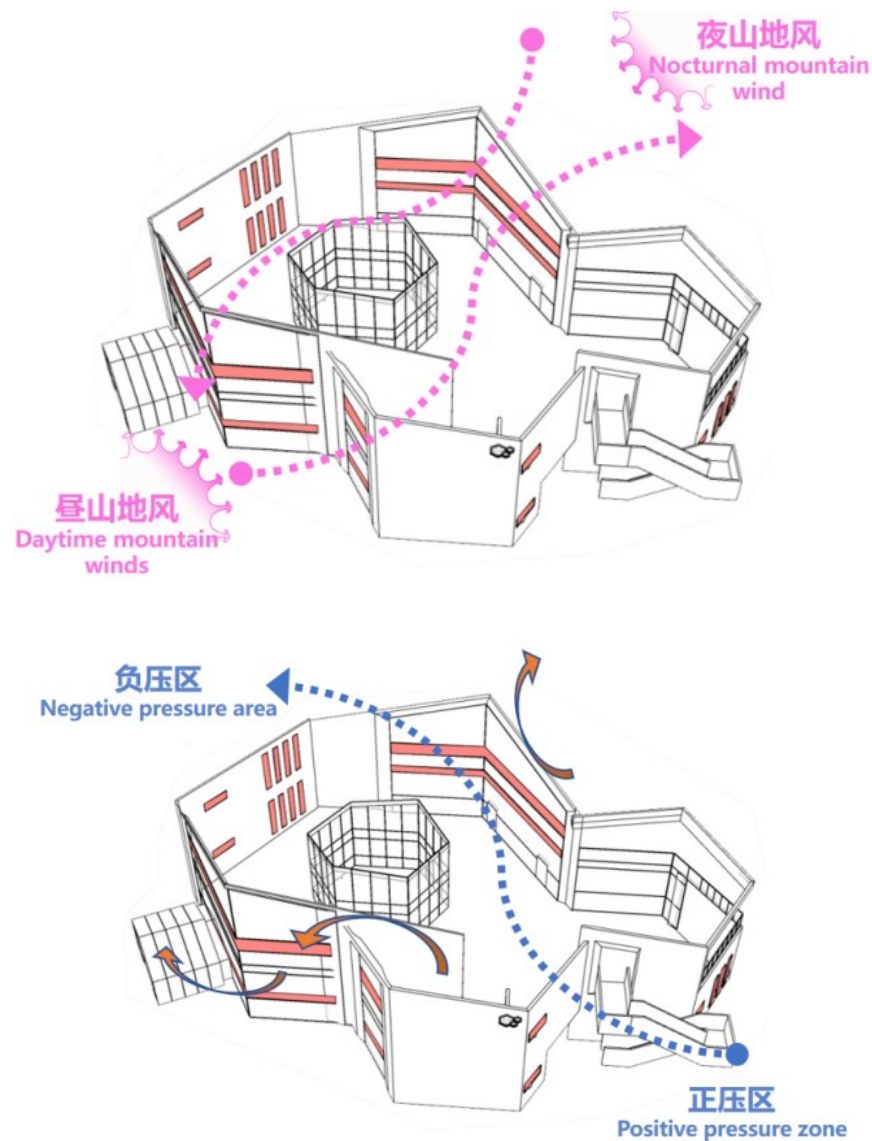


图 4-6 自然通风示意图，图片来源，中瑞零碳建筑项目陕西留坝示范工程团队

这一设计策略不仅有效减少了对传统机械通风系统的依赖,从而大幅度降低了建筑运营过程中的能源消耗与碳排放,还显著提升了居住者的舒适度与健康水平,因为自然通风能够提供更清新、更富含氧气的室内空气环境。此外,通过精确计算与模拟,设计团队确保了即便在风力条件不佳的情况下,建筑内部也能维持适宜的通风效率,必要时辅以智能调控机制,实现了自然通风与辅助通风系统的无缝衔接,进一步增强了建筑的整体能效与环境适应性。

4.2.2 可再生能源应用技术

▪ 光伏发电技术

在化石能源峰值和减排的约束下,人们积极寻求新能源,最热门的领域是太阳能。太阳照射地球一小时所产生的能量足以满足全世界全年的能源需求。与化石能源、核能和风能相比,太阳能光伏转换(光伏发电技术)应用于水电和生物质发电,绿色、清洁、安全可靠。不受地域限制,不破坏生态环境,不占用土地和粮食资源,是可持续发展的希望。

当地年平均日照时数 1804 小时;年总辐射量 4607.95 MJ/m²,具备利用太阳能的环境。基于项目所处地理位置的太阳能资源,建议光伏设置在屋顶或者采用地面光伏或者屋顶天窗采用光伏玻璃,采用高效率单晶硅光伏板。根据项目用电量需求,计算太阳能光伏板的面积,合理设计太阳能光伏发电系统。

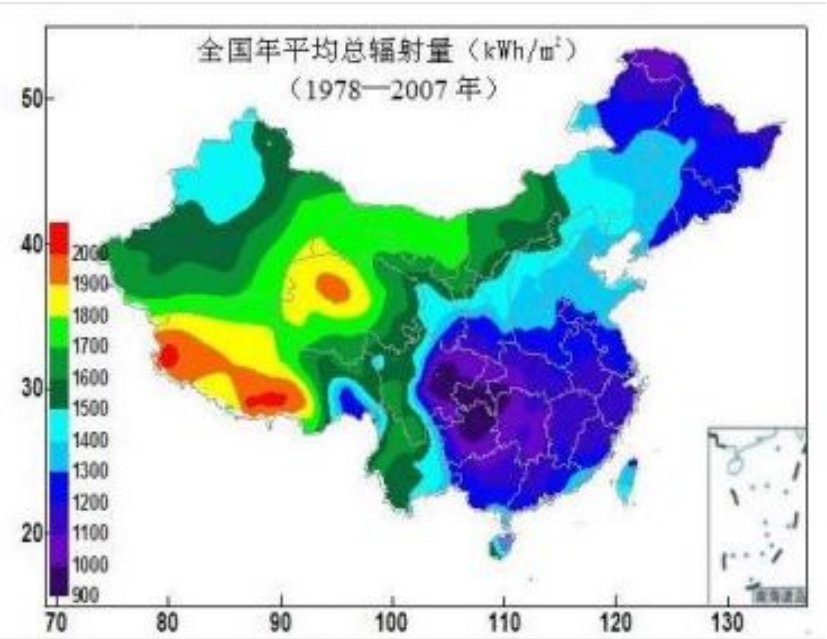


图 4-7 全国太阳能资源分布图, 图片来源, 中瑞零碳建筑项目陕西留坝示范工程团队

经测量,本项目可布置光伏板的屋顶面积约 1300m²,铺设光伏板的面积约 240m²,可铺设 120 块光伏板,装机容量 63KW,经估算本项目年发电量约为 7.4 万度。下面为本项目光伏设置位置。

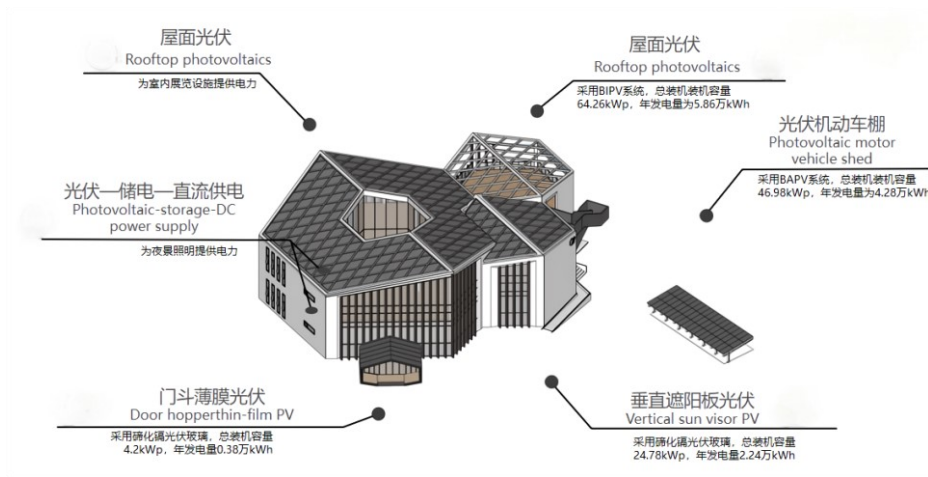


图 4-8 光伏技术应用分布图，图片来源，中瑞零碳建筑项目陕西留坝示范工程团队

4.2.3 暖通空调设计

根据本项目市政条件调查报告，本项目不具备市政供热条件，对热源方案进行了论证，结果是采用 VRF 空调系统（多联机）。

变频多联机组由室内机、铜管管路、室外机三部分组成，系统简单故障点少且系统稳定，每台室内机均可单独开启单独控制，主机变频运转，机组调节能力强。系统管路中流动的是冷媒，在零下 40 摄氏度以上不会凝结，冬季对管路无需进行防冻处理；同时，管路中的冷媒无腐蚀性。大致布置示意图如下。

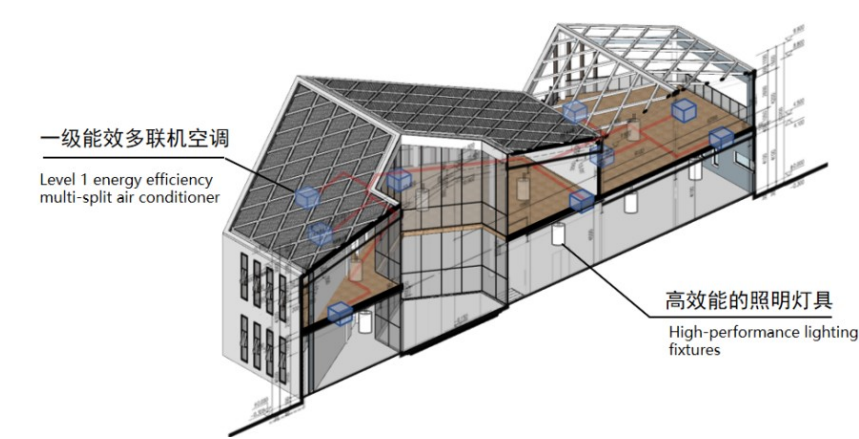


图 4-9 多联机空调布置示意图，图片来源，中瑞零碳建筑项目陕西留坝示范工程团队

■ 夏季新风

新风系统在为室内人员提供所需最小新风量的同时，还应提供室内所需的冷热量、维持室内环境指标要求，同时满足被动房对制冷、采暖能耗的需求。

根据国际标准《民用建筑供暖通风与空气调节设计规范》GB50736-2012 第 3.0.6 条规定，设置新风系统的公共建筑，主要房间每人所需最小新风量宜符合下表的规定。

建筑房间类型	新风量 $\text{m}^3/(\text{h} \cdot \text{人})$
办公室	30
客房	30
大堂、四季厅	10

表 4-1 公共建筑主要房间每人所需最小新风量，出处：中瑞零碳建筑项目陕西留坝示范工程团队

■ 冬季采暖

采用高压腔涡旋压缩机,提升机组整体制热性能,同时换热器采用新型波纹翅片,提升 换热面积。通过采用分温度控制,运行时间并结合电流、功率和部分负荷运行工况,可以进行变参数除霜并优化除霜控制,最大限度地提升机组制热能力和室内热舒适度。

增加设置新风热回收装置:空调系统采用带新风热回收的空调机组,热回收效率大于 70%。冬季室外寒冷干燥的空气经显热交换装置升温后,新风中的湿度将进一步降低。按照《近零能耗建筑技术标准》(GB/T 51350-2019)要求,新风热回收装置换热性能的显热效率不低于 75%、全热效率不低于 70%。

4.2.4 景观设计要求

建筑绿容率应按下式计算:

$$GPR = \frac{\sum(LA_i \times PA_i \times N_i) + S_f \times 3 + S_g}{S} \times 100\%$$

式中:

- GPR——绿容率, %
- LA_i ——第 i 类乔木的叶面积指数;
- PA_i ——第 i 类乔木的投影面积, m²;
- N_i ——第 i 类乔木的数量;
- S_f ——场地内灌木占地面积, m²;
- S_g ——场地内草地占地面积, m²;
- S ——场地面积, m²;

冠层稀疏类乔木叶面积指数可按 2 取值;冠层密集类乔木叶面积指数可按 4 取值;乔木投影面积应按苗木表数据进行计算;场地内的立体绿化可纳入计算。

项目场地面积约 4300m²,绿地率按 36%计算,面积约 1553m²,其中乔、灌、草相结合,所占比例 4:4:2,计算得绿容率约为 0.94,可达到《碳中和建筑评价导则》中金级建筑水平。

4.2.5 照明设计

采用节能型电气设备,电气装置满足相关现行国家标准的节能评价值要求,配电室、电井位于负荷中心。变压器节能环保型、低损耗、低噪音,接线组别为 Dyn11 的干式变压器。变压器自带温控器和强迫通风装置。

照明系统采用节能型光源、灯具及附件,照明设计 LPD 值符合并低于《建筑节能与可再生能源利用通用规范》(GB 55015-2021)限值的规定,且合理设计灯光控制方式大空间等公共区域采取分区、定时、感应等节能控制措施,走廊、楼梯间采用节能自熄开关。

房间名称	设计建筑照明功率密度 (W/m ²)	照明功率密度现行值 (W/m ²)
门厅	8	10
展览空间	8	10
教学互动	8	9
设备间	5	6
卫生间	5	6

表 4-2 各功能房间照明功率密度, 出处: 西安建筑科技大学

4.2.6 智能化监测系统

■ 环境监测系统

监测功能：

- 监测并显示室内实时干球温度、湿度、CO₂ 以及 PM_{2.5} 值并记录。
- 监测并显示室内气象参数变化趋势、关键拐点和异常特征。
- 现各功能区的气象数据统计并按后台服务指令定时向后台服务器传输监测数据 和设备工作状态，对采集的监测数据进行统计分析处理。
- 监测多联机空调系统室内机风口温度并与系统联动，调节送风温度。

报警功能：

- 污染物超标报警：当室内污染物超过限值及时报警。
- 室内机风口温度报警：室内环境监测温湿度与空调系统冷媒匹配分流和换热器变容调节室内热湿环境。

■ 能耗监测

监测功能：

- 监测并显示各用电支路或用电设备每日、每周、每月的能耗数据，形成同比、环比分析图
- 监测并显示各用电支路和用电设备能耗的变化趋势、关键拐点和异常特征。
- 实现各能耗分项和各能耗区域的能耗数据汇总统计。
- 监测并显示变电所低压柜主进线、母联的电流、电压、有功功率、无功功率、功率因数、谐波率（母联不需要）、电度、开关状态。
- 监测并显示变电所低压柜出线的电流、电压、设计安装功率、实时有功功率、无功补偿功率（电容补偿柜）、功率因数、电度、长延时电流保护整定值、开关状态。
- 监测并显示变压器的负载率、三相绕组温度和散热风机启停状态。

报警功能：

- 变压器：变压器超高温报警；
- 低压柜进出线：电压异常、过载报警。

5. 欧洲建筑碳排放计算方法分析

5.1 欧洲建筑碳排放计算研究现状

首先就建筑碳排放来源，全世界有多种不同的方法来评价，目前欧洲主流的有欧洲碳排放协议，该协议将温室气体排放源分为三个领域：直接排放；间接排放；其他间接排放。ISO 系列标准，比如 ISO 14000 环境管理系列标准，其中 ISO14064(1-3)标准是以生命周期评价 ISO 14040 标准为基础形成的碳足迹相关量化标准。2006 年发布的 ISO 14064 系列标准规定了国际上的温室气体资料和数据管理、汇报和验证模式，并于 2018 年和 2019 年进行修订。作为一个实用工具，ISO 14064 使得政府和企业能够按统一标准核算温室气体排放量，同时服务于碳排放交易。还有 EN 15978 提供了一个全面的框架，用于计算和评估建筑在其整个生命周期中的碳排放。

至于具体计算方法，下面以几个代表国家为例。

5.1.1 瑞士

瑞士作为国际标准化组织（ISO）的成员国，严格遵守 ISO 发布的国际标准。除了遵循 ISO 标准，作为欧洲经济区（EEA）的成员，瑞士同样采纳了与 ISO 标准经常保持一致的欧洲标准。以 EN 15978 为例，该标准首先界定了其适用范围，列举了规范性引用文件，明确了专业术语和定义，阐述了评估建筑环境性能的基本原则，并详细描述了评估的计算方法。此外，它推荐了计算工具和软件的使用，并通过示例来辅助理解和应用标准，最终还提供了额外的参考信息和数据。

EN 15978 标准特别强调了对建筑全生命周期的评估，这包括了设计、施工、使用、维护、翻新以及拆除等各个阶段。它覆盖了多种环境性能指标，例如一次能源需求、能效、运营能源、水资源消耗、全球变暖潜能、臭氧层破坏潜能等。该标准提供了详尽的计算方法和步骤，用于评估建筑在其生命周期不同阶段的环境

影响。同时，它推荐使用经过验证的计算工具和软件来执行环境性能评估，以提升评估的准确性和效率。

瑞士还有自己的 CO₂ 排放计算标准 SIA 2040，用于指导建筑的能耗和碳排放计算。标准明确给出了 Abgrenzung (边界)、Normative Verweisungen (规范性引用) 以及 Standard- Berechnungsverfahren (标准计算方法)。此外还有 SIA 380/1，虽然该标准主要关注的是建筑能耗的计算，而不是直接针对建筑碳排放计算。但是因为能耗直接关联到能源消耗和相关的碳排放，建筑能耗计算是评估建筑碳排放的一个重要组成部分。

此外，瑞士联邦环境局官方网站提供了一个的 CO₂ 计算器，用于估算所有建筑物在标准条件下的 CO₂ 排放量。这个计算器基于瑞士联邦统计局的建筑物和住宅登记册（RBD）的数据，包括建筑物的用途、加热面积、建造年份以及海拔和地形位置等信息。

5.1.2 英国

在英国，作为欧盟《建筑能效指令》(Energy Performance of Building Directive, EPBD)的积极执行者，政府采纳了《居住建筑能效标识标准评估程序》(Standard Assessment Procedure for Energy Rating of Dwellings, SAP)来评估住宅建筑的能耗和碳排放。该评估程序综合考虑了住宅的面积、形状、围护结构的传热系数、热水使用量、照明、家电设备以及室内设计温度等因素，以计算能耗和单位建筑面积的年碳排放量。

对于非住宅建筑，英国社区与地方政府管理局制定了《英格兰及威尔士地区除居住建筑外建筑国家计算方法建模导则》(National Calculation Methodology Modeling Guide, NCM)和《简化建筑能源模型技术导则》(A Technical Manual for Simplified Building Energy Model, SBEM)来计算能耗和碳排放。NCM 提供了计算碳排放目标值和实际建筑碳排放所需的信息和技术要求，为政府使用 SBEM 和其

他获批软件提供了详细的技术指导。

基于 NCM 的要求，不同的软件公司开发了多种建筑碳排放计算分析软件，例如英国建筑研究院(The British Research Establishment, BRE)开发的 SBEM、克莱非尔德技术研究中心开发的 TAS 系列软件、South Facing Services 公司开发的“Carbon Checker”以及 Hcvacomp 公司开发的“Hevacomp Interface”等。这些软件都能够进行建筑环境与设备系统的模拟和碳排放计算，其中 SBEM 在英国的应用最为广泛。

SBEM 根据英国的相关建筑法规计算设计建筑物的碳排放，并依据 NCM 中基于参照建筑计算得出的目标碳排放限值(Target Emission Rate, TER)来判断新建建筑是否满足法规要求。SBEM 利用数据库中提供的 20 种建筑类型和 68 种建筑功能分区数据，对建筑物能耗产生的碳排放以及可再生能源和清洁能源系统的碳减排进行综合计算，最终得出设计建筑物的碳排放量。

5.1.3 德国

2008 年，德国可持续建筑协会(The German Sustainable Building Council, DGNB)推出了 DGNB 可持续建筑评估技术体系，以每年单位建筑面积的碳排放量为计算单位，提出了建筑碳排放完整明确的计算方法，建立了建材和建筑设备碳排放的数据库。此评估技术体系将建筑全生命周期划分为建材生产与建筑建造、建筑使用、建筑维护与更新、建筑拆除和重新利用 4 大阶段。各阶段相应的计算方法分别为：

建材生产与建筑建造：考虑原料提取、材料生产、材料运输、建造等各过程中的碳排放，根据德国建筑体系将建筑分解，按结构与装修的部位及构造区分对待，计算所有应用在建筑中的建材及建筑设备的体积，考虑材料施工损耗及材料运输等因素，与相关数据库进行比较，得出不同材料和设备在其生产过程中相应产生的 CO₂当量。材料碳排放的计算时间按 100 年考虑。

建筑使用：主要包含建筑供暖、制冷、通风、照明等维持建筑正常使用功能的能耗。根据建筑在使用过程中的能耗，区分不同能源种类，计算其一次能耗，然后折算出相应的碳排放数据。

建筑维护与更新：指在建筑使用生命周期内，为保证建筑处于满足全部功能需求的状态，进行必要的更新、维护、设备更换等。计算所有建筑使用周期内(按 50 年计算)需要更换的材料设备的种类和体积，对比相关数据库，得到建筑在使用周期内维护与更新过程中的碳排放数据。

建筑拆除和重新利用：将建筑达到使用周期终点时的所有建材和设备进行分类，分为可回收利用材料和需要加工处理的建筑垃圾。对比相应的数据库，可以得到建筑拆除和重新利用过程中的碳排放数据。

5.2 对比分析

在第一章提到了现在建筑领域最为权威且应用广泛的碳排放计算方法是碳排放因子法，中外对于这种方法的应用差异更多是体现在计算边界的划分和限定。下面将主要围绕建筑碳排放计算边界的划分和建筑碳排放因子计算方法来进行对比分析。

5.2.1 计算边界的划分

首先需要明确计算边界的范围是在建筑全生命周期之内，从建筑生命周期(building life cycle)含义来看，其是指从建筑原材料开采到建筑拆除处置的全过程，一般包括：

- 原材料开采与运输。
- 材料、部品部件、建筑设备(以下简称为“材料”)生产与加工。

- 材料的场外运输。
- 建筑现场施工、安装与装饰装修。
- 建筑运行、维修、维护与加固改造。
- 建筑拆除、废弃物处置。

目前建筑生命周期碳排放计算时，对上述各过程所属阶段的划分有多种方式，见表 5.1。《建筑碳排放计算标准》(GB/T51366—2019)从计算方法的一致性角度将建筑生命周期分为三个阶段：运行阶段、建造及拆除阶段、建材生产及运输阶段。然而，目前中外学者及国际标准(如 EN 15978: 2011)，大都从建筑生命周期各阶段的时间顺序与活动特性将其分解为四个阶段：生产阶段、建造阶段、运行阶段及处置阶段。（阶段划分见表 5.2）其中，生产与建造阶段是建筑物的诞生与形成过程，也常统称为物化阶段(materialization stage)；运行阶段是建筑物功能的实际体现，一般认为其是传统建筑碳排放的主体；而处置阶段代表了建筑物寿命的终止。

阶段总数	阶段划分
2	建筑上游、建筑下游
2	建造阶段、运行阶段
3	材料生产、建筑施工、建筑拆除
3	建筑物化、运营维护、拆除处置
3	建筑建造、建筑运行、建筑拆除
4	生产、建造、运行、处置
5	原料开采、材料生产、建筑施工、使用与维护、拆除与处置
5	材料准备、建筑施工、建筑运行、建筑拆除、废弃物处理与回收

表 51 建筑全生命周期个阶段划分，出处：西安建筑科技大学

中国	欧洲
运行阶段	生产阶段
建造及拆除阶段	建造阶段
建材生产及运输阶段	运行阶段
	处置阶段

表 5.2 中国与欧洲常见建筑全生命周期个阶段划分，出处：西安建筑科技大学

根据碳排放计算目标的不同，建筑生命周期的系统边界可分为“从摇篮到工厂(cradle to gate)”“从摇篮到现场(cradle to site)”和“从摇篮到坟墓(cradle to grave)”等几类。“从摇篮到工厂”的系统边界包含原材料开采到建筑材料或部件成品离开工厂为止的上游过程；“从摇篮到现场”的系统边界在前者的基础上，增加了建筑材料与部件运输、建筑现场施工与吊装，以及施工废弃物处理等过程；而“从摇篮到坟墓”的系统边界在前两者的基础上，考虑了后续建筑运行、维护和拆除处置过程，即通常意义上的全生命周期评价。

为此，中外学者提出可以根据建筑碳排放计算的时间范围、空间尺度与技术目标，建立分级式的系统边界，见下图 5-1。

- 以时间范围为界，在生产、建造、运行与处置四个基本阶段的基础上，考虑产业上游与产业下游环节扩展为六个阶段。
- 以空间尺度为界，将系统边界分为主体结构、单体建筑、建筑小区，以及城乡建筑群与区域建筑业等尺度。
- 以技术目标为界，将系统边界分为“考虑全部因素”“考虑关键因素”和“考虑差异化因素”三个级别，分别适用于全面的建筑碳排放估计与核算、建筑碳

排放水平及减排潜力的一般性分析、不同设计与技术方案的碳排放对比与优化。

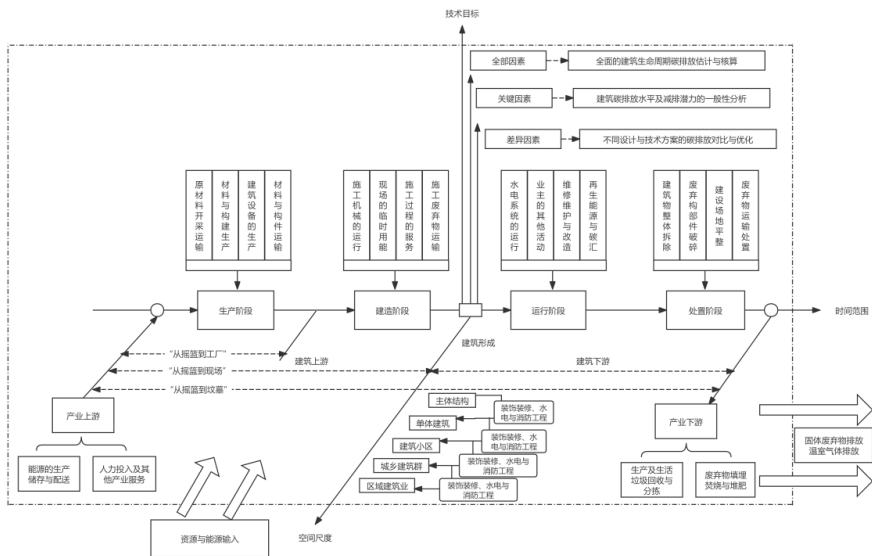


图 5-1 中外常见建筑碳排放计算边界图，出处，西安建筑科技大学

通过对建筑碳排放计算边界划分和建筑碳排放因子计算方法的对比分析可知，欧洲与中国在建筑碳排放计算方面既有相似之处，又存在诸多差异。在计算边界划分上，阶段划分方式的不同反映出双方在考量建筑全生命周期各环节的侧重点有所区别。系统边界分类则体现了不同的计算深度与广度需求。而这些差异也促使我们思考如何在未来的建筑碳排放计算工作中，互相借鉴对方的优势，不断完善各自的计算体系，以更精准地衡量建筑全生命周期的碳排放，为建筑领域的碳减排工作提供更坚实的数据支持和决策依据，推动全球建筑行业朝着更加绿色、可持续发展的方向。随着研究的深入，相信双方在建筑碳排放计算领域将不断取得新的进展，进一步缩小差距，共同应对全球气候变化挑战。

5.2.2 碳排放因子计算方法

作为碳排放因子法理论基础的碳排放因子，在很大程度上决定了建筑碳排放计算的准确性，因而对其开展标准化方法的研究与应用显得尤为重要。欧洲学者针对碳排放因子的计算展开了一系列研究，ISO 14044 和 EN 15804 标准提出了其中包括基于产品类别声明（EPD）和基于生命周期评价（LCA）的碳排放因子计算方法。其中 EPD 法是指在建筑材料或产品的生产过程中进行测试和评估，从而得出其碳排放因子的数值。

此外还有 ISO 14067 规定了碳排放因子的量化方法和步骤，包括定义其范围目标、计算方法、报告结果以及验证和审核等流程。ISO 14064-2 和 ISO 14064-3 分别对能源、交通运输行业碳排放因子计算内容如能源热值、碳含量以及运输车辆类型、燃料类型等关键因素进行了描述限定，并对其计算方法做出了原则性描述。而 ISO 21930 要求建筑产品的碳排放因子应基于整个生命周期进行计算，并从碳排放因子单位、数据来源、更新年限等方面对其进行了限定，同时要求使用 LCA 法进行碳排放因子的计算。

事实上，虽然部分国际标准已经对数据质量把控做出了基础指导，但是针对于建筑碳排放因子数据质量的评估方法还未被建立。而随着建筑碳排放研究的日趋重要，对其数据质量的关注与把控也日益强烈。

对此，有学者基于技术代表性、时间代表性、地域代表性和数据获得方式等方面提出了谱系矩阵评价方法，并在一些案例研究中，基于此方法对各个过程、阶段的数据质量进行了评估；而瑞士的 Ecoinvent 数据库则基于各单元过程清单数据的基础质量，进一步提出了 DQI 评分机制，将各清单数据质量转化为数学参数形式的整体不确定度，并在此基础上并且提出了诸如误差传递算法、加权平均算法和泰勒级数展开等方法，计算各清单数据基础不确定度在模型中的传递，进而转化为结果不确定度。

至于中国也有其他研究者对 LCA 数据质量评估方法、数据质量控制方法和 LCA 数据质量案例研究进行了初步的探讨。但是同国际上研究现状相同，这些方法对数据收集取舍过程中得到的清单数据进行的是整体式不确定度测算。这种测算并未考虑上游初始数据不确定度以及清单数据算法本身所造成的不确定度，所以无法反映初始数据值和清单数据算法对整体结果不确定度的影响。而且此方法会受到评估者研究时主观感受和判断的限制，其评分制度比较模糊，这进一步削弱了数据收集过程中数据质量评估的意义。

总的来看，现阶段对于建筑碳排放因子的研究由于计算边界划分、数据质量评估的局限性，导致其整体计算模型与评估体系有所差异，以至于尚未形成认可度高且科学规范的建筑碳排放因子标准化量算流程与方法。

6. 建筑碳排放计算方法改进潜力分析

瑞士作为先进工业国家，在各个行业有着丰富的降碳经验。如图 6-1 所示，自 2000 年以来，瑞士多个行业的二氧化碳排放量均有明显的降低，尤其是建筑行业，由 2000 年的 11MtCO₂ 为了 2022 年的 6MtCO₂。基于瑞士及欧洲的先进经验，下面将结合中国国情提出对应可改进方向。

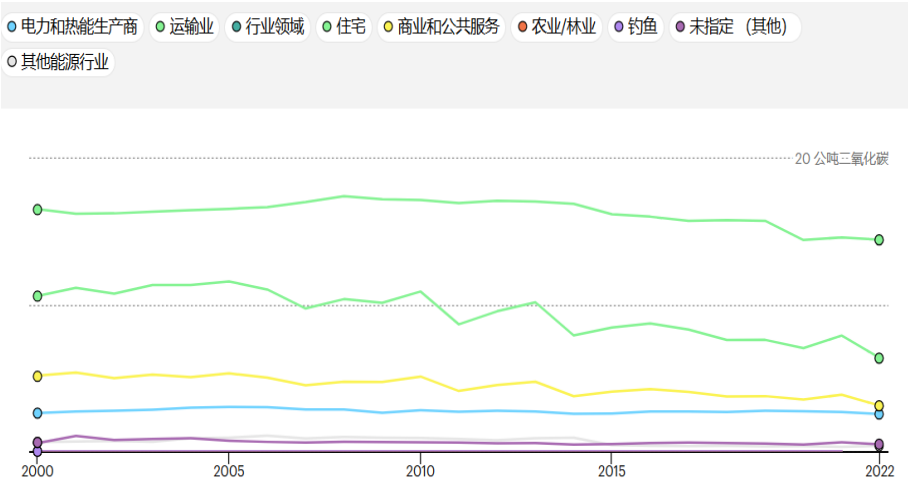


图 6-1 2000-2022 年瑞士各行业二氧化碳排放量的演变图，出处：IEA 数据服务网站 (<https://www.iea.org/countries/switzerland/emissions>)

6.1 深化不同阶段建筑碳排放计算的精准计算分析

当前建筑设计阶段对建筑属性的界定，基本上决定了建筑在其全生命周期内的碳排放量。尽管如此，我们还未进入实体构件的组合或使用阶段。建筑碳排放的实际产生过程与材料生产、建造施工以及运行阶段紧密相关，这些环节涉及的相关部门对建筑业的低碳转型具有直接影响。建筑材料的生产涉及众多制造业领域，

而建筑运行阶段几乎与所有行业都有联系。

因此，未来对建筑碳排放的计算将不再局限于设计阶段的全生命周期评估。各利益相关方需要根据自身产业的发展需求，进行更为精确的计算和分析。例如，碳排放因子将成为评估未来建筑材料和施工机械的一个关键指标。通过分阶段或分类别的精确计算，我们可以不断完善一个包含材料、能源、施工机械等在内的碳排放因子库。

6.2 数字化和信息化技术应用拓展

随着技术的进步，建筑设计和管理所依赖的建筑图纸已从传统的二维图形信息演进至多维和数字化表达。数字化设计参数的引入显著提升了计算分析的效率和精确性。将数字化设计与建筑碳排放的计算分析相结合，有助于开发出更为高效的计算工具。信息技术在建筑碳排放计算的微观和宏观层面的应用都将得到进一步的拓展。

例如，建筑行业的碳排放数据真实性与可靠性常常受到公众质疑，不透明的碳数据管理也阻碍了碳交易市场的健康发展。由政府牵头或督促利用信息化技术如区块链进行介入，通过建立注册和结算平台、构建监测与核定研究机构，可以确保数据源头的可信度和有效性，从而促进建筑碳交易市场的良性与有序发展。

6.3 碳排放核算、评价与优化的集成化平台

建筑碳排放的核算与低碳管理正成为国际学术界关注的焦点，并且对于建筑相关行业达成“双碳”目标至关重要。展望未来，建筑碳排放的计算领域有望开发出覆盖“设计——建造——运维——拆除”全生命周期的碳监测系统和碳追踪技术。

此外，未来还需要研发适用于城市、乡村、社区以及单个建筑等不同层级的碳排

放测算与分析工具，提出低碳建设的评价指标体系。构建一个综合性的碳排放评估分析模型，将全面支持动态评估与管理。在管理控制方面，通过数字建模结合人工智能、优化控制等智能技术，建立城乡建设碳排放的智能管理与优化平台。这将实现城乡建设碳排放的可测量、可评估、可管理、可降低，从而提升城乡建设领域在减碳控碳方面的智能化、高效化和科学化水平，推动城乡建设向绿色科学发展的方向迈进。

A1. 参考文献

- 瑞士使馆. 瑞士与中国签署建筑节能领域谅解备忘录 [N]. 瑞士使馆官方网站, 2020-11-24.
- 中国建筑节能协会,重庆大学城乡建设与发展研究院. 中国建筑能耗与碳排放研究报告(2023 年)[J]. 建筑,2024(2):46-59.
- 张孝存, 王凤来.建筑工程碳排放计量[M].北京: 机械工业出版社,2022.
- 吴刚, 欧晓星, 李德智编.建筑碳排放计算[M].北京: 中国建筑工业出版社,2022.
- 中国建筑科学研究院有限公司, 北京构力科技有限公司组织编写; 夏绪勇, 李书阳, 张永炜, 崔静, 朱峰磊, 王梦林主编.建筑碳排放设计指南[M].北京: 中国建筑工业出版社,2023.
- 中华人民共和国住房和城乡建设部主编.建筑碳排放计算标准[M].北京: 中国建筑工业出版社,2019.

A2. 术语表

B2B

cradle to gate

从摇篮到工厂

B2C

cradle to grave

从摇篮到坟墓

CABR

China Academy of Building Research

中国建筑科学研究院

DGNB

The German Sustainable Building Council

德国可持续建筑协会

EEA

European Economic Area

欧洲经济区

EPD

Environment Product Declaration

环境产品声明

GHG Protocol

Greenhouse Gas Protocol

温室气体议定书

ISO

International Organization for Standardization

国际标准化组织

LCA

Life Cycle Assessment

全生命周期评价

Mohurd

Ministry of Housing and Urban-Rural Development (China)

住房和城乡建设部

SDC

Swiss Agency for Development and Cooperation

瑞士发展与合作署

SHGC

Solar Heat Gain Coefficient

太阳得热系数

SIA

Swiss Society of Engineers and Architects

瑞士工程师与建筑师协会

VRF

Variable Refrigerant Flow

多联机中央空调系统

WBCSD

The World Business Council for Sustainable Development

世界可持续发展工商理事会

WRI

World Resources Institute

世界资源研究所气候观察

ZHAW

Zurich University of Applied Sciences

瑞士西北应用科学大学



让我们共同打造气候中和的未来
Building a climate-neutral future together



中华人民共和国
住房和城乡建设部



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

intep
skat Swiss Resource Centre and
Consultancies for Development