

碳中和导向的气候适应性建筑设计演绎

——以英属哥伦比亚大学可持续发展互动研究中心为例

Interpretation of Climate Responsive Building Design Base on Carbon-neutrality : A Case Study of CIRS in UBC

舒欣 | SHU Xin 陈晨 | CHEN Chen 唐超 | TANG Chao

摘要: 在“双碳”目标的背景下, 本文从气候适应性建筑的理念出发, 提出将碳中和作为气候适应性建筑平衡机制的约束条件, 进而以可持续发展互动研究中心(CIRS)为例, 从场地环境、建筑体形、表皮系统、技术设备和材料体系5个层级分别探讨了碳中和导向的气候适应性建筑设计的主要策略与方法。

关键词: 气候适应性建筑、碳中和、平衡机制、设计方法

Abstract: In the context of “dual carbon” goals, starting from the concept of climate responsive buildings, it is proposed that carbon neutrality is a constraint condition for the balance mechanism of climate responsive buildings. Taking the Center for Interactive Research on Sustainability (CIRS) as an example, the main strategies and methods of carbon neutral-oriented climate responsive building design were discussed from five levels: site environment, building shape, skin system, technical equipment, material system.

Keywords: Climate responsive building, Carbon-neutral, Balance mechanism, Design method

自人类建造庇护所以来, 气候与建筑就不可避免地交织在一起。贯穿整个建筑史, 本地建造者已经学会运用智慧营建更为舒适的场所以适应当地气候, 代代相传的乡土材料和建筑技术形成了原生的建筑语言^[1]。自然力作用、场所环境和建筑物的关系复杂而多变, 每种解决方式都是对气候、文化和技术的综合回应。因此, 无论在理论研究领域或是建筑设计实践层面, 气候适应性建筑都是建筑师关注的焦点和探索的前沿。^[2]

另一方面, 在气候变化的阴霾笼罩下, 节能减排成为人们日益重视的问题。习近平总书记提出“2030 碳达峰, 2060 碳中和”的双碳目标更是将建筑行业的深度减排提升为应对气候变化目标中的核心议题。碳排放作为环境影响指标融入了更多跨学科的内涵, 建筑师将节能、节水、节地、节材等环境友好的可持续指标与建筑设计流程有机关联, 赋予建筑学语境下的碳排放路径, 带来

知识领域、技术应用和设计方法的改变。^[3]

加拿大英属哥伦比亚大学的可持续发展互动研究中心(CIRS)被誉为北美最具创新性的高性能建筑, 经过综合监控和集中控制的集成建筑系统旨在实现隐含碳排放, 运行碳排放、场地环境和水系统等四个方面的净零目标。同时, 建筑在投入运营后也获得了卓越的可持续性能。本文基于作者在英属哥伦比亚大学访学的交流体验, 以CIRS为例来分析气候适应性建筑的设计方法, 同时梳理在不同尺度运作下的设计策略, 为当代气候适应性建筑探索更多的可能性。

一、理论基础: 基于碳中和的气候适应性建筑平衡机制

气候变化的威胁以及对于抑制气候变化日益迫切的需要, 催生出建筑新的使命, 即必须在其

作者:

舒欣(通讯作者), 南京工业大学建筑学院副教授, 中国建筑学会主动式建筑学术委员会理事;

陈晨, 南京工业大学建筑学院硕士研究生;

唐超, 南京工业大学建筑学院本科生。

国家自然科学基金资助项目(51908279);

江苏省自然科学基金资助项目(BK20190680)。

DOI: 10.12285/jzs.20211108001

建造和使用过程中尽可能地减少碳排放。如何通过建筑设计实现运行低碳或是碳中和，是时代赋予当代建筑师的责任。^[4]气候适应性建筑运行遵循的是一种平衡机制，即室外气候资源和室内环境的动态平衡。自然条件下室外气候资源与室内舒适度要求往往难以同步，这就需要额外的能源供给满足建筑功能需求。因此，气候适应性建筑并不回避能耗，但必须使碳排放尽量最小化，应当充分结合自然气候资源以提供被动式策略以及可再生能源措施来优化环境控制和性能，以此对可持续环境作出贡献。^[5]

1. 气候与环境

气候适应性建筑应当如同定制西服一般，需根据其气候环境特别剪裁。建筑场所的位置决定了气候资源的可用性，而设计则可以定义这些气候资源以何种方式影响建筑的室内环境。建筑外部的气候环境是由围绕建筑物的大气及其构成要素组成的综合状态，包含气温、气压、湿度、太阳辐射、风速和风向、附近的植被和水体等气候要素。^[6]

气候数据向我们展示了外部环境的参数和范围，这些数据为寻求气候适应性建筑的最佳解决方案提供了评估基础。为了恰当地理解任意场所的气候数据，由热动力学模型、流体动力学、热环境与光照模拟为代表的“性能仿真工具”能够准确地

模拟复杂体量和能量流动、能量与空间的作用，以及表皮的性能变化，从而使建筑师清晰地了解建筑性能表现以及其设计如何影响到使用者舒适度和能耗状况^[7]（图1）。气候与环境分析能够促成真实有效的设计循环反馈，并通过一种设计策略予以综合考虑，实现建筑与环境的动态平衡。

2. 人体舒适度

人体通过一套复杂的平衡系统调节内外的能量交换，来保持器官正常运转所需的平均37℃体温。人体的舒适感被描述为身心的愉快，以我们各种感官（视觉、听觉、味觉、嗅觉和触觉）的感受为基础。人体的舒适度是限制在一定范围内的，并

与活动和环境状况有关。1950年代发端于美国的室内气候精准控制理念认为舒适的室内环境气温范围是20~25℃，湿度则为20%~70%（图2），其后却被证实对舒适、健康并无助益。^[8]事实上，人体舒适感远比量化的温湿度数据更为复杂和细微，它取决于室内外空气温度、湿度、空气流速以及个人的新陈代谢、能量转换和感知能力。

不同的建筑设计因素都能影响到室内舒适度（图3），随着时间的推移建筑需将室内环境维系在相对稳定的状态。^[9]建筑需要通过控制一系列室内环境参数来确保舒适，包括温度、湿度、光、声、视觉景象、气流和空气质量。为了使整体设计最优化，在考虑各种环境变量的情况下，将室内环境舒适性与建筑碳排放关联起来，被动式

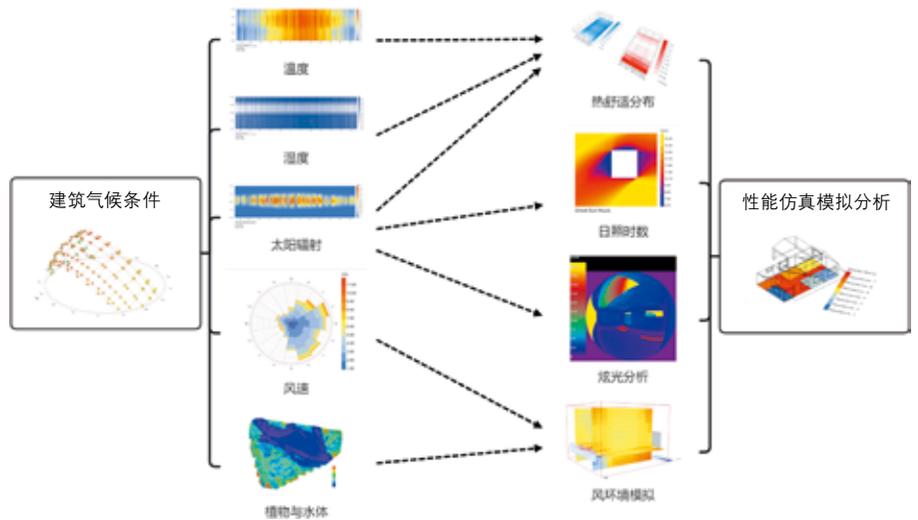


图1: 建筑气候条件与性能仿真模拟分析之间的关联

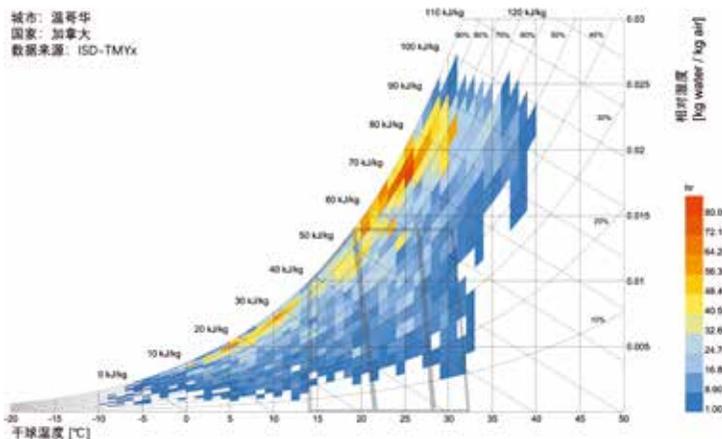


图2: 反映室内舒适水平的温湿图

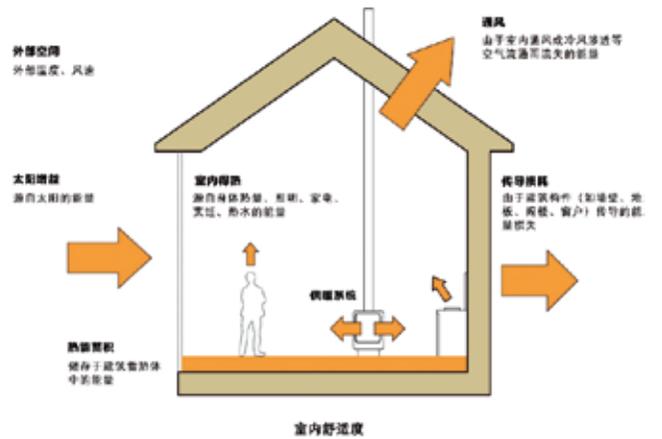


图3: 室内舒适度影响因素

或主动式地控制能量传递，对气候适应性建筑而言是至关重要的。

3. 碳中和作为平衡机制的约束条件

为了保证室内外气候环境的动态平衡，建筑碳排放成为制约平衡机制的约束条件。由于气候资源与舒适度要求之间并不总是保持一致，往往需要采取额外的碳补偿策略，结合多种技术手段，通过能源节约、分配、缓冲、回收和存储等方式实现建筑的碳平衡。碳中和的成功关键取决于被动式设计策略与可再生能源策略的高效结合。^[10] 气候适应性建筑设计应当始于对选址、光照、通风的整体思考，并贯穿整个设计过程，通过一切可行的被动式气候资源利用措施使建筑运行碳降至最低，并运用可再生能源装置满足剩余的室内的加热、冷区、通风和照明需求，最终实现零碳排放^[11]（图4）。

气候适应性建筑必须成为一个富有“脱碳”潜力的元素来优化环境控制和性能，以此对能源供给做出贡献。脱碳必须兼顾运行碳和隐含碳两方面因素，同时考虑减少两种类型的碳排放。^[12] 相应地，建筑师的责任是通过建筑设计优化能源效率并尽可能降低碳足迹。为了全面控制碳排放，减少建筑对气候环境的负面影响，建筑师主导的气候适应性建筑设计应当遵循一个涉及各个层级的整合设计框架，从建筑材料、表皮细节到空间形式乃至更大尺度的场所环境，都将是整个设计过程的重要组成部分，综合各方面因素以更有效地回应碳中和理念。^[13]

二、案例演绎：碳中和导向的气候适应性建筑设计策略——CIRS

作为碳中和导向的气候适应性建筑，CIRS 不追求创造复杂多样的形式，也不刻

意维持恒定不变的室内环境，而是使建筑有效地适应气候并保持相应地敏感度。同时，CIRS 还通过整合各种系统，满足人体的舒适度需求，并实现碳排放与气候资源的动态平衡。依循世界资源研究所提出的优先级排序，CIRS 从三个不同层面实现脱碳：通过被动式优先的整体设计策略提升能源利用效率，减少建筑运行碳；运用可再生能源等主动式系统的产能满足剩余的低能耗需求^[14]，进一步降低运行碳；选择木材、本土材料和可回收材料，消除新建筑在其全生命周期内的隐含碳。

CIRS 作为一个生动、高效、舒适的建筑，并不依赖于一种拼贴式的堆砌操作。它的设计策略经过综合权衡，关乎了整体的各个部分，从而形成能够在多种尺度下运作的设计演绎。CIRS 的气候适应性设计遵循系统规律，整体的组织结构优先于细节要素^[15]。通过与气候在微观尺度上的层级特征和人的气候感知进程相呼应，CIRS 构建了基于“场地环境—建筑体形—表皮系统—技术设备—材料体系”的气候适应性设计层级，全面推进建筑设计进程（图5）。

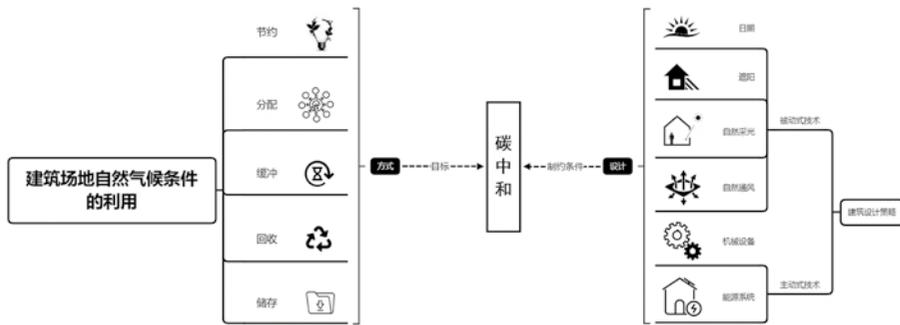


图4：碳中和作为气候条件与建筑设计策略之间的制约条件

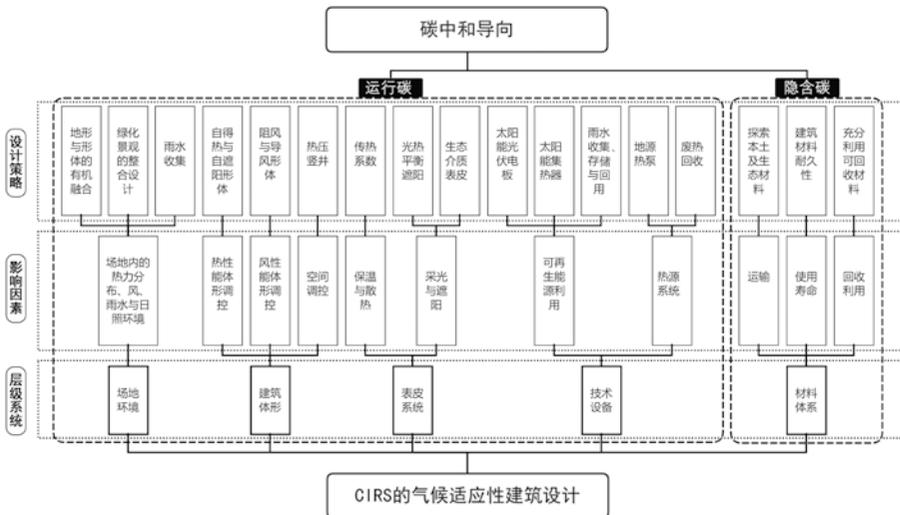


图5：碳中和导向的CIRS气候适应性建筑设计框架

1. 场地环境

在建筑布局层面，地形地貌与建筑形体的有机融合不仅为 CIRS 创造出非用能的室外活动场所，也为建筑的气候适应性低碳设计营造了良好的场所环境^[16]，通过优化场地内的热力分布、风与日照环境，最大程度地减小建筑的运行碳^[17]。同时基于场地周边的生态条件，CIRS 通过绿化景观的整合设计、雨水收集与回用等可持续设计策略来解决建筑与场地相融的问题，形成循环的生态系统。

在 CIRS 的设计中考虑了诸多场所的气候适应性驱动因素，包括场地条件、小气候、周围环境、校园可达性、建筑尺度与交通。场地环境的两个关键要素是其东西向海拔约三米的高差和与可持续发展街道的毗邻。可持续发展街道是结合景观和城市基础设施的项目，交通基础设施，无障碍步行，本地种植，雨水保留，生物过

滤和地下水补给。为了呼应城市界面关系，建筑外轮廓几乎延伸到用地边缘，以满足建筑密度和增加建筑可见性的需求（图6）。

建筑占据了大部分场地，仅留出沿用地西南侧的一小片景观区域。景观区域设计为雨水花园和生态廊道，结合西立面的绿化墙面和礼堂顶部的生态屋顶，使场地内达到45%的景观覆盖率（图7）。设计巧妙地运用了丰富的景观元素，通过植物的绿地碳汇中和建筑对场地的生态影响。景观植物由本地灌木、地被植物、爬藤、多年生植物与蕨类植物等混合搭配而成，以吸引本地的鸟类、蜜蜂、蝴蝶和苍鹭等动物。植物的混合种植与鸟类、昆虫共同构成了具有生物多样性的适应性微型生态系统。同时场地内的100%的雨水在现场进行处理、使用或是渗透，有效解决了降

雨与雨水径流问题。旱季无需额外的灌溉，雨季多余的水量则疏导至毗邻的可持续发展街道景观渗水池中，具备完全的场地适应性。

2. 建筑体形

CIRS的体形是由建筑物的功能需求、场地的局限性以及各种机遇共同驱动的，通过建筑构形、空间组织等被动式设计策略最大程度地减少建筑运行碳^[18]。建筑的体形适应性设计主要表现为热性能体形调控与风性能体形调控两种方式。通过热环境性能模拟，CIRS被设计为四层的“U”形体量，以环抱的半围合布局融于场地之中，并将体形系数控制为0.28。“U”形折面以延展热交换界面的方式进行热量补偿，在冬季保证室内获

得足够的太阳辐射热，夏季则形成部分形体自遮阳，屏蔽了过多的太阳辐射热（图8）。

在风性能体形调控上，“U”形体量同样顺应当地主导风向和环境需求，通过导风形体扩大了建筑夏季对自然通风的利用，背风面负压区压力的提升也进一步加强了拔风效果^[19]（图9）。建筑利用负体形的风调控机制，在大进深平面中置入热压竖井。设计首先将南北首层打通，实现了南北空间贯通的穿堂风，结合中庭设置狭长的竖向通风空间，通过调整竖井体形高宽比和口底比，以及屋顶自动通风口强化拔风效果^[20]（图10）。有效的风性能体形调控能达至每年超过32%的时间可用自然通风（空气速率>0.6m/s），达到优化室内热环境的目的，降低空调能耗。



图6: CIRS建筑周边的场地环境

3. 表皮系统

建筑表皮作为联系室内外环境的界面，对建筑的气候适应性表现起着举足轻重的作用^[21]。CIRS的表皮系统强调被动式的调节手段，试图以材料、形态、空间与构造类型上的优化设计促使绿色建筑的自主性回归^[22]。在操作层面上，依循表皮与复杂气候环境的作用机制，CIRS采取控制传热系数、生态介质表皮、光热平衡遮阳等表皮设计策略来解决当地冬夏两季的采光与遮阳、保温与散热等差异化需求的矛盾。

温哥华冬季的室外气温约为0~13℃，而采暖的室内设计温度维持在20℃左右。在室内外温差较大的情况下，建筑表皮的传热系数（U值）在冬季和夏季的能耗就起到非常巨大的作用。CIRS选取了高性能窗，包括采用PVC窗框的三层玻璃幕墙和铝合金窗框的双层玻璃窗，其窗体的综合U值仅为0.85W/m²K。同时，表皮外墙大范围采用了当地生产的杉木饰面，其U值为0.14W/m²K，而建筑端部采取的白色混凝土砖的U值也控制在0.17W/m²K。考虑到导热传热，较

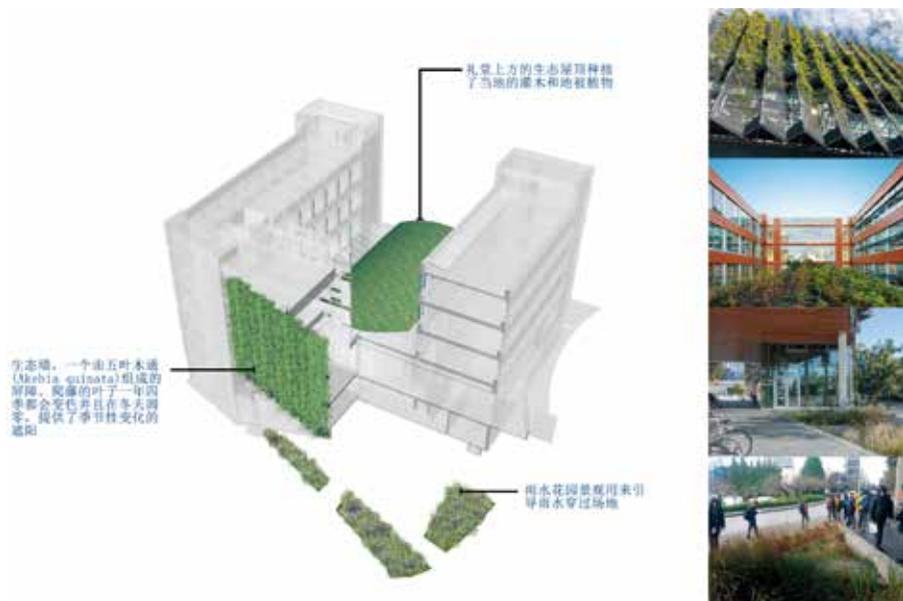
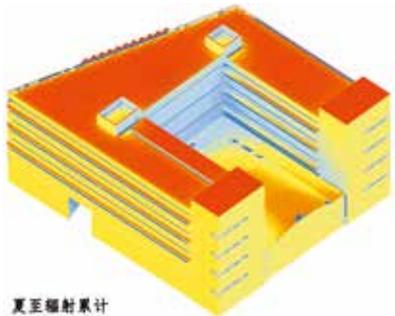
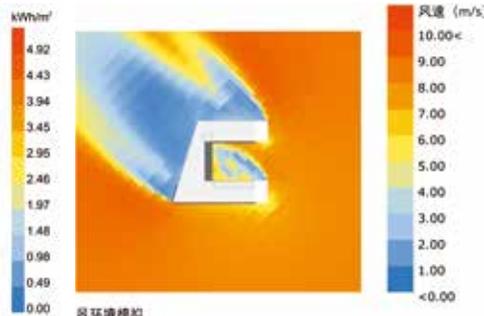


图7: 由雨水花园、绿化墙面和生态屋顶组成的建筑场地景观系统



夏至辐射累计

图8: “U”形体量的太阳辐射热分析



风环境模拟

图9: “U”形体量的自然通风分析



图10: CIRS中热压竖井的拔风效应

低的表皮U值可以在夏季降低空调热损失，而在冬季避免表皮的得热。

对CIRS而言，建筑环境与自然系统之间的整合也至关重要。作为建筑生态整合系统的视觉呈现，建筑巧妙运用了生态介质表皮，利用植物的整体性生态覆盖实现表皮单元与气候的交互。建筑西立面的立体绿化结合了栽种式与攀援式的优势，将种植槽设置于每个楼层底部，外布金属框

架与细密格网，攀爬力强的落叶葡萄藤包裹整个立面形成绿色屏障（图11）。其枝叶一年四季都在变化，夏季茂盛的枝叶能够提供遮阳，冬季叶落又能满足采光需求。一年中跟随季节变化的颜色，也增添了表皮的动态变化，为CIRS营造出动感十足的公众形象（图12）。礼堂屋顶覆盖着原生植物园，涵盖了多样的本土地被植物与灌木，以适应干旱的气候条件及较浅的土壤

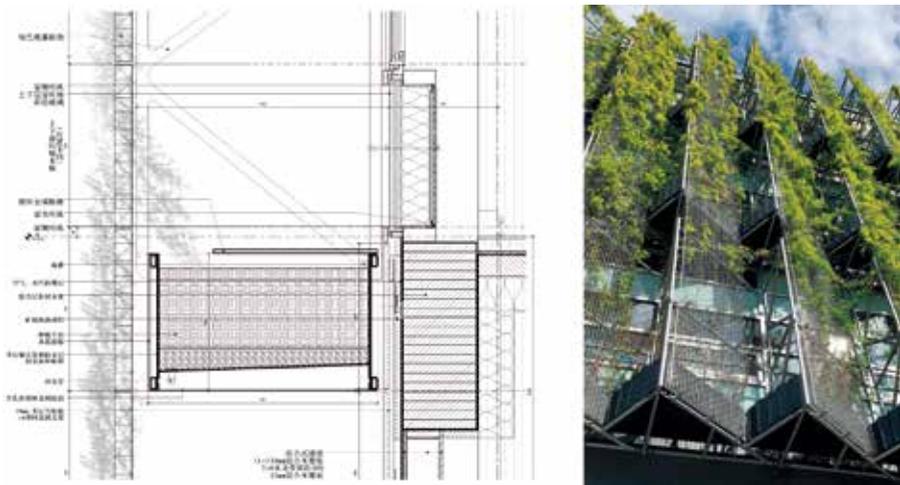


图11: 建筑立体绿化构造节点与实景

层。屋顶花园也是建筑水管理系统的一个组成部分，土壤层下方的波纹排水层通过吸收和利用屋顶上的雨水作为灌溉并减少雨水径流。

建筑南立面需要在自然采光与太阳辐射之间寻求平衡，建筑师采用光热平衡遮阳来解决这一矛盾。根据建筑对光热环境的需求，遮阳构件被设计为覆盖光伏电池的铝制水平遮阳板，旋转 30° 的设置则在保证光热效率的同时能够有效遮挡夏季的太阳辐射，在冬季时又有利于适宜的自然光线渗透（图13）。这一设置可减少70%的光能耗，实现了环境舒适度与降低碳排放的双重目标。

4. 技术设备

在CIRS的气候适应性设计中，建筑师优先运用各种被动式设计策略最大程度地减少建筑能耗，然后通过主动式技术系统收集可再生能源和废弃能源来满足剩余的能耗，消除运行碳。^[23]CIRS充分利用多重主动式技术设备的协同合作，采取分布式能源系统和水系统，整合太阳能和雨水以满足建筑供暖、照明及灌溉等需求。^[24]

作为场地内能够直接获取的可再生能源，CIRS运用太阳能集热器和光伏电板对太阳能进行转化和利用。这些能源组件不仅为建筑减碳提供了有效的技术支撑，其与建筑表皮的结合也赋予了建筑表达更多的可能性。CIRS屋顶上 40m^2 的真空管集热器在夏季能够提供 15100kWh 的热量； 25kW 功率的光伏电板被整合于建筑立面和中庭屋顶之中，形成光伏建筑一体化(BIPV)，在为建筑提供有效的遮阳的同时其每年 22148kWh 的产电量也能满足建筑10%的用电量。

CIRS的加热与冷却源由三个不同的热源系统提供。主热源来自于热回收系统从相邻的地球与海洋科学大楼(EOS)的通风柜收集的排气废热，并转移至CIRS的热泵中。热泵通过辐射地板和置换通风系统为建筑提供加热与冷却。第二个热源是



图 12: 建筑立体绿化的四季动态变换

CIRS 自身的废热回收，用于建筑热水系统；最后的热源来自于场地内的地源热泵，它是对热交换系统的有利补充，并在运行时保证将 CIRS 多余的热量返回给 EOS。CIRS 每年输送给 EOS 的热量为 622070kWh，而从 UBC 电网获取的电量仅为 613540kWh，在实现负碳的同时也满足了 CIRS 的能源平衡与碳中和目标（图 14）。

CIRS 的水系统被设计为完全自给自足，1000m² 的屋顶全年可收集雨水约 1220kL，所有的饮用水皆由收集到的雨水提供。设计采取简单的系统，雨水从建筑物的屋顶收集并储存在建筑物下方的蓄水池中。雨水经过现场过滤、消毒以及 pH 值调整，分布于建筑物内，作为饮用水（图 15）。同时，建筑中所有的再生水 100% 来自于建筑和校园下水道，通过固定的装置收集并在现场进行处理和再利用。大楼西南角的太阳能水生系统（The Solar Aquatic System）是一个模拟天然水净化过程的生态工程体系，通过它处理过的水在建筑物内重新用于灌溉和冲厕，形成闭环水循环（图 16）。

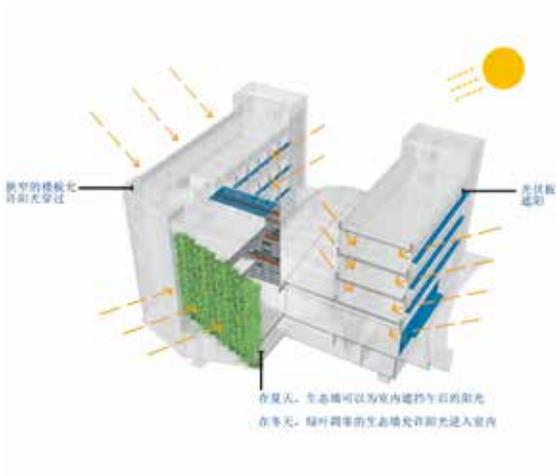


图 13: 建筑表皮的光热平衡遮阳

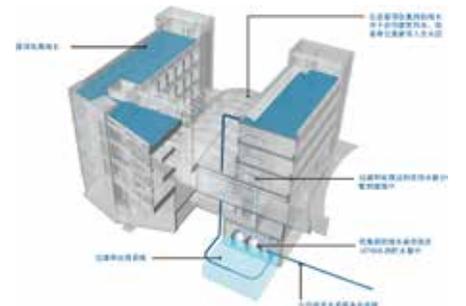


图 15: 建筑雨水的收集、处理、储存和利用

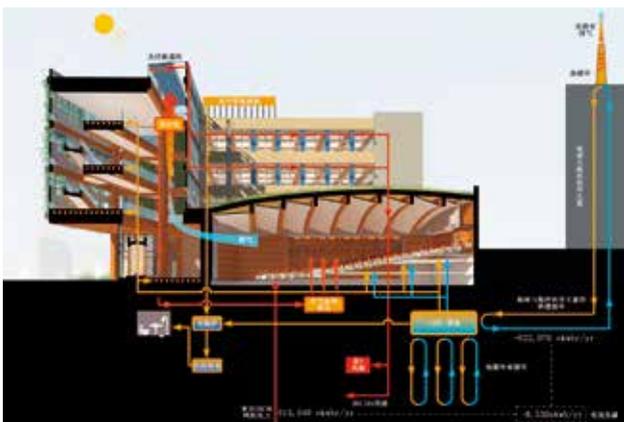


图 14: 建筑可再生能源系统运转机制分析图

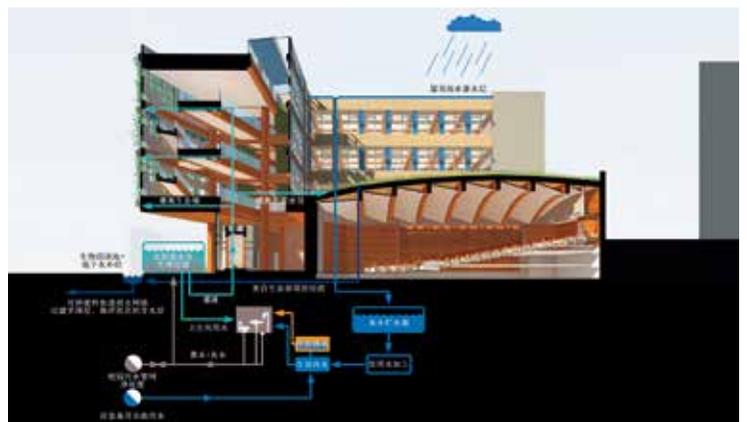


图 16: 建筑水系统闭水循环分析图

5. 材料体系

CIRS 的材料选择充分关注对环境和人体健康的影响，是建筑的视觉表达、成本、耐久性、再利用以及全生命周期碳排放等方面综合考量的结果。建筑的材料体系主要包括木材、白砖、透明玻璃和中性色混凝土。建筑师通过探索本土及生态材料，关注建筑材料的耐久性，充分利用可回收材料等方式中和了建筑的隐含碳^[25]。

1) 结构材料

在建筑结构材料选择中，设计团队综合比较了钢筋混凝土和胶合木的碳足迹，发现胶合木结构比钢筋混凝土结构碳排放少 74%。建筑的重型结构构件采用 GLT，而规格材胶合木构件则用于结构装饰和地板。在设计之初，设计师打算选取加拿大森林资源管理委员会（FSC）认证的胶合木产品，但考虑是本地木材产

品具有材料获得性强，加工强度低，以及较低的碳排放强度等优势，最终 50% 的结构木制品来自本地，其余的来自 FSC 认证的木产品（图 17）。通过综合计算，CIRS 的木结构在木材的采伐、加工和运输全过程的净碳排放为 0.9 吨 /m³。整个建筑使用的木材在其使用阶段能够存储 600 吨的二氧化碳，比其他建筑材料制造和运输中消耗的 525 吨二氧化碳还少，因此 CIRS 实现了建筑材料的负碳足迹（图 18）。

2) 表皮材料

为了延续历史文脉，UBC 校园内大量使用的白色烧窑黏土砖成为建筑表皮的首选材料。然而烧窑砖远在 500 公里以外的地方制作，而当地盛产混凝土砖，设计最终选择了白色混凝土砖，以同时满足建筑的文化审美以及碳排放需求。彩色雪松板是另一种能够满足建筑可持续目标及 UBC 校园准则的木制覆层材料，能够在当地的

气候条件下维持 10 年以上，同时替换拆除时可回收用于居民家庭生活装饰，将材料的蕴能量降至最低。表皮中最为突出的元素是西立面的垂直绿化和礼堂的屋顶绿化，生态表皮不仅通过遮蔽建筑减少热岛效应、降低碳排放，同时也提供各类小动物的栖息场所，并传达出作为气候适应性建筑的独特气质（图 19）。

三、思考总结：碳中和视角下气候适应性建筑的设计要点

经过各个层级的整合设计，CIRS 的卓越性能获得了 LEED 铂金级的认可，评委认为它在可持续场地、用水效率、能源、材料以及室内环境质量等 5 个层面均实现了净零碳的目标：1) 建筑场地的植被覆盖率为 44%，且全部为本地的适宜性植物，所有的雨水均在场内进行处理、使用与渗透；2) 现场收集的雨水能够 100% 满足饮用水需求，并在现场运用生物系统过滤净化废水，实现闭水循环；3) 建筑充分利用太阳能与建筑中的废热，并与地源进行供暖和制冷交换，每年将 600 兆瓦时的剩余能源反馈校园，同时减少 170 吨的温室气体排放；4) 建筑的木材固碳量高达 904 吨，与 UBC 校园内的其他建筑相比，碳足迹减少了近 90%。5) 建筑的工作区域实现了日间 100% 的自然采光，室内公共区域大部分时间使

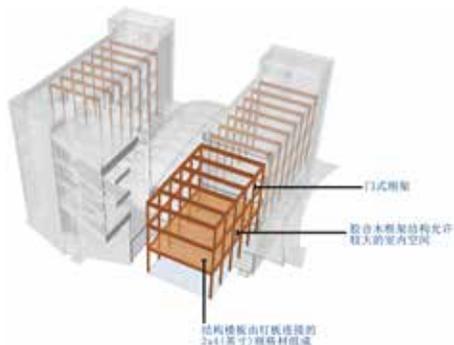


图 17: 建筑中木结构材料的运用

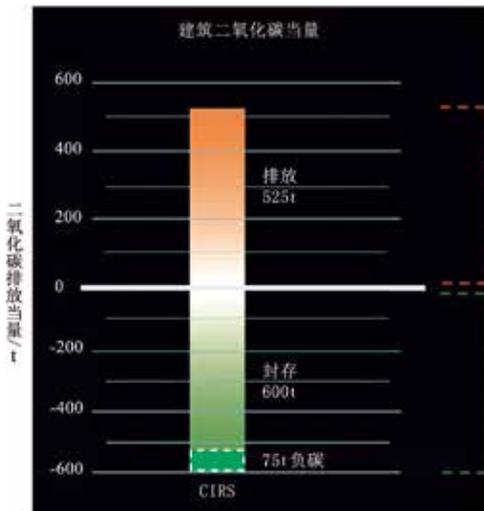


图 18: 建筑综合建材实现负碳足迹



图 19: 由白色黏土砖、彩色雪松板和绿色植物组成的表皮材料

用自然通风, 风速维持在适宜的 0.6~1.2 m/s 区间内, 建筑的垂直绿化为室内环境持续供氧, 并提供适应个人需求的可调控空间。

CIRS 通过建筑场地、形式、表皮、技术和材料的整体设计来响应气候, 实现能量交换, 满足人体舒适度需求^[26], 并在此过程中逐级实现了碳中和目标。本文通过对其设计策略的详细剖析, 可形成如下认识:

1. 在理论机制上, 首先强调的是将碳平衡作为气候适应性建筑的衡量目标与效果导向。建筑师应充分挖掘自然气候资源, 采取适宜的设计策略, 在实现零碳排的同时满足建筑的气候适应性需求。这使设计过程成为一个复杂的平衡行为, 建筑师必须在一个逻辑清晰的策略框架下将这些问题重新整合, 并最终体现在气候适应性建筑的高性能表现中^[27]。

2. 在物质要素上, 大力推进以减少运行碳和隐含碳为核心指向的建筑诸要素优化设计。按照优先等级, 可以在三个不同层次上实现建筑的脱碳: 1) 将被动式设计策略置于气候适应性建筑的上位, 通过充分利用气候资源降低建筑的运行碳; 2) 使用可再生能源设备体系来满足剩余的低能源需求, 其中现场可再生能源优先于场外可再生能源; 3) 发挥本土材料、可再生材料的积极作用, 在建筑的整个生命周期内减少其隐含碳。

3. 在方法策略上, 始终贯彻场地环境、建筑体形、表皮系统、技术设备和材料体系等逐个层面的全程控制与整合设计。其中, 场地环境依赖于有效的绿植固碳和雨水收集, 优化场地内的微气候; 建筑体形设计作为首要的调控策略, 以自遮阳与自得热、导风与阻风、空间梯度组织、热压竖井为代表的关键技术是促成风热协同工作, 整体优化建筑性能的有效设计有段; 建筑表皮的“界面”属性导致其需要合理应对与气候环境间的相互影响与作用, 生态介质表皮、光热平衡遮阳、被动式气候调节腔层、热质动态调储等交互式技术策略能够赋予

建筑表皮类似生命体般更为复杂的调控机制, 保障建筑需求与气候资源间的能量平衡; 可再生能源技术设备是对建筑能耗的有效碳补偿。关注太阳能的有效利用, 推进光伏建筑一体化设计, 尤其光伏系统与建筑表皮的一体化集成, 以及相关系统的模块化整合应成为当前着力发展的新方向; 建筑材料的选择过程需充分考虑其隐含碳量。原生材料(木材储碳)、本土材料(砖石、夯土低碳)的优先选配, 可回收材料的装配、整合与全生命周期利用, 是降低碳排放至关重要的途径, 应予以足够的重视。

碳中和导向的气候适应性建筑设计首先依赖于合理的场地布局、外部形体和表皮构造, 其次是适宜的可再生能源设备与表皮材料。建筑师需要掌握气候适应性建筑的基本原理, 理解建筑所在场域的气候环境, 以碳平衡为诉求综合权衡各层面设计要素, 运用集成化设计策略回应碳中和理念^[28], 持续推动建筑的可持续发展。

参考文献

- [1] Zhai Z J, Previtali J M. Ancient vernacular architecture: characteristics categorization and energy performance evaluation[J]. *Energy and Buildings*, 2010, 42 (3): 357-365.
- [2] Nguyen A-T, Tran Q-B, Tran D-Q, et al. An investigation on climate responsive design strategies of vernacular housing in Vietnam[J]. *Building and Environment*, 2011, 46 (10): 2088-2106.
- [3] 刘念雄, 张竞予, 刘依明等. 建筑师视野的碳排放与建筑设计[J]. *建筑学报*, 2021 (2): 50-55.
- [4] 薛峰, 王清勤, 宋晔皓, 叶依谦, 景泉, 曾宇, 贺静, 郝石盟, 俞彤霖, 汤洋. 碳中和目标下的绿色建筑[J]. *当代建筑*, 2021 (09): 6-15.
- [5] 朱颖心. 碳中和目标下的建筑环境营造[J]. *建筑节能(中英文)*, 2021, 49 (08): 37-43.
- [6] 闵天怡. 生物气候地方主义建筑设计理论与方法研究[J]. *动感(生态城市与绿色建筑)*, 2017 (02): 97-104.
- [7] 毕晓健. 目标导向的参数化建筑节能设计方法研究[D]. 天津: 天津大学, 2019.
- [8] 朱颖心. 热舒适的“度”, 多少算合适[J]. *世界建筑*, 2015 (7): 35-37.
- [9] Aguilera José Joaquín, Bogatu Dragos-Ioan, Kazanci Ongun Berk, Angelopoulos Charalampos, Coakley Daniel, Olesen Bjarne W.. Comfort-based

control for mixed-mode buildings[J]. *Energy & Buildings*, 2021, 252.

- [10] 周杰. 碳中和目标下零碳建筑标准体系研究[J]. *中国质量与标准导报*, 2021 (03): 21-23.
- [11] 王清勤. 绿色建筑助力碳达峰与碳中和[N]. *中国建设报*, 2021-05-25 (006).
- [12] 江亿, 胡姗. 中国建筑部门实现碳中和的路径[J]. *暖通空调*, 2021, 51 (05): 1-13.
- [13] 王有为. 谈“碳”——碳达峰与碳中和愿景下的中国建筑节能工作思考[J]. *建筑节能(中英文)*, 2021, 49 (01): 1-9.
- [14] Energy; Reports from University College London (UCL) Advance Knowledge in Energy (Heat Decarbonisation Modelling Approaches in the UK: An Energy System Architecture Perspective) [J]. *Energy Weekly News*, 2020.
- [15] 李麟学, 郭岸. 以气候响应为线索的当代建筑地域性实践[J]. *新建筑*, 2021 (02): 79-83.
- [16] 刘涤宇. 吴地风土建筑的场地适应研究——以同里古镇漆字圩与洪字圩建造肌理为例[J]. *建筑师*, 2016 (01): 84-94.
- [17] 阿里桑德罗·柴拉·波罗, 李可可. 外围护材料和环境本体论[J]. *时代建筑*, 2020 (03): 38-44.
- [18] 肖葳, 张彤. 建筑体形性能机理与适应性体形设计关键技术[J]. *建筑师*, 2019 (06): 16-24.
- [19] J. Roldán-Fontana, R. Pacheco-Torres, E. Jdraque-Gago, J. Ordóñez. Optimization of CO₂ emissions in the design phases of urban planning, based on geometric characteristics: a case study of a low-density urban area in Spain[J]. *Sustainability Science*, 2017, 12 (1):
- [20] 肖葳. 适应性体形绿色建筑空间调节的体形策略研究[D]. 南京: 东南大学, 2018.
- [21] 吴浩然, 张彤, 孙柏, 马驰. 建筑围护性能机理与交互式表皮设计关键技术[J]. *建筑师*, 2019 (06): 25-34.
- [22] 舒欣. 气候适应性建筑表皮——应对气候变化的设计研究[J]. *新建筑*, 2018 (06): 92-96.
- [23] 焦舰. 碳中和目标下的绿色建筑展望[J]. *当代建筑*, 2021 (09): 48-50.
- [24] 仇保兴. 城市碳中和与绿色建筑[J]. *城市发展研究*, 2021, 28 (07): 1-8+49.
- [25] 龙惟定, 梁浩. 我国城市建筑碳达峰与碳中和路径探讨[J]. *暖通空调*, 2021, 51 (04): 1-17.
- [26] 吉沃尼. 人·气候·建筑[M]. 陈士麟译. 北京: 中国建筑工业出版社, 1982.
- [27] 舒欣. 气候适应性建筑表皮的设计模式研究[J]. *建筑师*, 2018 (06): 112-117.
- [28] Lin Yola, Utaberta Nangkula, Olutobi Gbenga Ayegbusi, Mokhtar Awang. Sustainable Architecture and Building Environment[M]. 2021-08-23.

图片来源

图1~图5、图8、图9: 作者自绘

图6、图19: 作者自摄

图7、图10~图18: 作者根据UBC提供的资料翻译改绘