

寒地高校生产性更新模式构建及其校园实践

王元凤 郭晓君

河北建筑工程学院, 河北张家口, 075000;

摘要: 在双碳目标与寒地城市转型背景下, 高校既是能源消耗单元, 也是潜在生产空间。针对寒地冬季活力不足、资源利用率低等问题, 提升校园活力与优化资源结构成为现实议题。以张家口高校为例, 系统分析寒地校园空间与能源条件, 构建屋顶、绿地及基础设施三层级整合框架, 提出光伏发电、农业与生态循环协同策略。通过产能测算与碳排放评估, 结果显示校园具备生产性更新基础, 可实现自给率提升与碳减排, 验证了气候约束下生产性转型的可行性, 为寒地校园低碳更新提供系统化路径。

关键词: 生产性城市理论; 寒地高校; 校园更新

DOI: 10.69979/3029-2727.26.04.075

引言

在全球气候变化与资源环境约束日益强化的背景下, 城市已成为能源消耗与碳排放的核心载体。研究指出, 全球大部分自然资源消耗与温室气体排放集中于占比有限的城市空间; 中国快速城镇化进一步强化了资源环境压力^[1]。“双碳”战略为城市低碳转型提供制度动力。寒地城市因供暖需求高及气候条件复杂, 能源效率与碳减排矛盾更为突出。高校作为功能复合的“微缩城市”, 拥有屋顶、灰空间及绿地等可再开发资源, 但现有更新多集中于单一技术, 缺乏系统整合^[2]。寒地条件下, 这种割裂布局进一步削弱冬季空间活力与资源协同潜力^[3]。本文引入生产性城市理念, 构建“光伏-农业-教育”复合系统, 并以案例分析其空间整合路径与综合效益。

1 寒地高校生产性更新模式

1.1 寒地资源与约束条件

华北寒冷地区冬季漫长、低温与冻融频繁, 对设施提出更高要求。传统校园以观赏绿化为主, 生产功能不足, 能源与土地利用率偏低。但寒地冬季日照充足, 光伏潜力较大, 农业生产则需依赖设施农业。校园绿地占比高但冬季闲置, 如何在维持教学秩序前提下嵌入生产功能, 是核心命题, 需在“气候适应-空间整合-系统协同”框架下推动转型, 使校园从消耗型走向生产型。

1.2 校园生产性空间类型

基于既有空间结构, 可识别三类生产性改造载体:

(1) 屋顶空间: 高校多为平屋顶、日照充足, 适

宜布置光伏与轻型种植。寒地需考虑雪荷载与排水, 可实现“能源为主、种植为辅”的复合利用。

(2) 灰空间与界面: 连廊、架空层等微气候稳定, 可叠加立体种植或光伏遮阳构件, 如南向立面嵌入光伏遮阳系统, 可实现能源生产与环境调节的协同。

(3) 边缘绿地与开敞空间: 利用率较低的绿地可通过模块化种植嵌入生产功能, 停车场增设光伏车棚, 实现遮阳、发电与绿化的复合利用, 形成点状能源补充节点。

1.3 三层整合模式

本研究提出“三层整合模式”, 通过“空间-能源-农业”耦合构建可持续的生产系统(图1)。

(1) 外部空间层: 复合嵌入。覆盖停车场、广场、绿地等。策略是“复合利用”, 如光伏车棚, 模块化种植单元及风光互补照明等, 通过点线设施的网络化布局, 将零散的外部空间转化为生产界面, 强调低干预和可扩展性。

(2) 建筑功能层: 分层嵌入。以建筑界面为核心进行分层组织。屋顶层以能源生产为主, 兼顾种植; 立面层侧重能源与热环境调节, 如光伏遮阳板; 地下或室内延伸空间则通过环境控制, 承担全年稳定的食物生产功能, 弥补寒地季节性波动, 增强系统连续性。

(3) 能源基础设施层: 系统耦合。该层负责整合资源流, 连接各生产单元。整合雨水收集、有机堆肥、光伏微电网, 引入基础监测, 使分散节点在资源层面形成内在联系, 实现从“物理叠加”到“系统耦合”的质变。

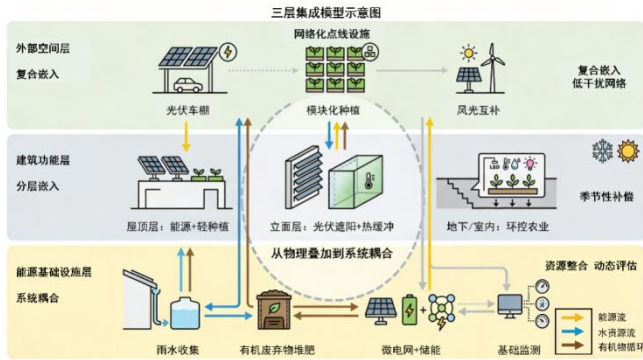


图1 三层集成模型示意图

综上，寒地高校生产性更新通过三层结构协同将外部空间、建筑界面与基础设施整合为多节点生产系统，在气候约束下推动校园向低碳生产型模式转型。

2 案例研究



图2 河北建筑工程学院校园资源现状

2.2 空间更新策略

从“屋顶—灰空间—地面”三个层级展开空间更新。

(1) 屋顶光伏+种植：屋顶作为一级能源界面，采用南向倾角支架光伏。教学楼屋顶连续排布以提高装机密度，靠近建筑核心筒形成农业种植的模块化阵列。光伏组件兼具发电与遮阳功能，可降低顶层夏季得热，改善建筑热工性能。

(2) 灰空间改造：灰空间涵盖立面窗间墙与停车区域。外挂光伏以模块化构件嵌入窗间墙，形成连续的垂直能源界面。停车区建设光伏车棚，顶部发电、下部停车，将单一交通设施转化为能源生产单元，提升地面空间利用率。形成立体分布式光伏网络。

(3) 移动农业单元植入：农业系统包括露地种植与移动农场单元。绿地改造用于露天蔬菜种植。移动农场置入采用多层种植架与LED补光，可实现全年连续生产，用电接入校园微电网，优先消纳白天光伏电力，成为能源系统的重要调节节点。

2.1 基础条件

河北建筑工程学院校园建筑以多层为主，功能分区明确，但尚未系统引入能源或生态生产功能。屋顶开发程度低，仅设置小规模光伏系统。立面未开展生产性利用。地下空间资源有限，主要为停车场及局部实验室。外部空间绿地覆盖率较高但以景观为主，灌溉依赖市政供水。道路系统排水设施完善但雨水未利用。停车设施未结合新能源。整体而言，校园建筑与外部空间在结构上完整，但能源、生态与农业潜力未被充分识别。

在能源方面，年用电量约2900万kWh，其中采暖用电（2000万kWh）已通过外购绿电供应；现有分布式光伏风电设施规模有限，未形成稳定补充体系，且未配置储能，能源生产与负荷调节缺乏协同机制。水资源和废弃物循环体系不完善，校园物质代谢未实现闭环管理（图2）。

2.3 系统整合逻辑

建立“光伏—微电网—农业”三层整合模式，实现空间更新与能源系统协同。

分布式光伏为一级能源，微电网调配电力优先就地消纳。教学区日间负荷与光伏发电高峰匹配度较高，有利于提升自用比例。

农业设施作为可调节负荷，根据光伏出力调度运行强度：白天高辐射时段增加补光与水循环，提高本地消纳率；其余时段保持基础运行。系统遵循“优先自用、余电并网”原则。

该案例通过空间界面重构与能源系统嵌入，实现建筑、基础设施与生产系统的协同整合。使年度非供暖用电自给率接近60%，并形成稳定农业产出，验证了高密度校园中分布式能源与生产空间复合利用的可行路径。

3 效益测算

3.1 计算方法与参数说明汇总表

本研究测算校园生产系统的能源与农业效益，包括

光伏发电量、能源自给率、碳减排量及农业产出。光伏发电量依据典型气象年辐射；农业产量按单位面积估算；碳减排量基于电网排放因子与食物里程法，参数见表1。

表1 校园生产系统效益测算方法与参数汇总

计算内容	计算公式	主要参数与取值	数据来源
光伏年发电量 ^[4]	$E_p = H_A \times \frac{PAZ}{E_s} \times K$	组件效率0.20,性能比0.8,面积系数0.7,单位面积发电量199kWh/m ²	Ladybug 模拟
光伏减碳量	$C_{pv} = E_{pv} \times EF$	排放因子 EF=0.7252kgCO ₂ /kWh	河北省电网
年蔬菜产量	$Y = A \times y$	单位面积产量 6.21 kg/m ²	张家口统计数据
生物碳吸收量	$C_{seq} = ca \times Y \times \frac{1-WC}{HI}$	HI=0.6, WC=0.9, Ca=0.45	文献 ^[5]
运输减排	$C_{Mile} = Y \times D_{avg} \times F_{trans}$	$F_{trans}=0.0000976\text{kg}/(\text{kg}\cdot\text{km})$, D_{avg} 按来源地加权计算	公路货运标准

3.2 年发电量

基于屋顶、立面及停车区域空间资源整合，光伏系统总布置面积 27008 m²。按表 1 测算，年发电量约 5.37GWh。其中屋顶 1.76GWh，立面 2.48GWh，光伏车棚 1.13GWh。立面光伏贡献比例最高（约 46%），表明寒地高校立面资源具有较高开发潜力。

3.3 能源自给率

校园年总用电量约 29GWh，其中常规运行电量为 9GWh。按此计算，光伏系统对非采暖用电的替代比例为 59.7%；若以全年总用电量为基准，能源自给率为 18.5%。在既有空间条件下，通过分布式整合可形成具有实际意义的能源，实现由“单向输入型”向“部分自给型”的转变。

3.4 农业产出

校园可改造露地种植面积 44404 m²，按表 1 测算，露地年产量约 275.7 吨；设置 8 个移动农场单元年产量约 11.6 吨。年总蔬菜产量约 288 吨。

校园年蔬菜消费量约 800 吨，规划实施后蔬菜自给率约 36%。按批发均价 1.61 元/kg 估算，农业系统理论产值约 46 万元/年。结合光伏系统约 261 万元/年的等效电费价值，复合生产模式在能源与食物双维度上均体现出运行潜力。

3.5 碳减排量

以校园年碳排放 50812.36tCO₂ 为参照^[6]，规划形成三类减排来源。

(1) 能源替代：按表 1 计算，5.37GWh 光伏发电可减少碳排放约 3900tCO₂ /年。(2) 农业净增碳汇：年蔬菜产量 288 吨，对应固碳量 84.6tCO₂。扣除被替代绿地碳汇 62.8tCO₂，新增碳汇约 21.8tCO₂ /年。(3) 食物里程减碳：本地化生产替代外部运输，可减少运输环节排放约 14.4tCO₂ /年。

综合计算，系统年减排总量约 4183tCO₂，占基准排放量的 8.4%。其中能源系统贡献约 92%，为主要减

排来源；农业系统虽绝对量有限，但在生产—生态耦合结构中具有协同意义。

4 讨论与结论

该模式适用于寒冷地区且屋顶资源充足的高校。寒地供暖周期长、减排需求明确，多层平屋顶便于光伏布置，校园空间封闭、产权清晰，利于统一实施。其技术应用仍受投资成本与气候条件影响，光伏与农业设施前期投入较高，冬季日照短及积雪会降低效率，自给率亦需依赖电网保障。从规划层面看，通过整合屋顶、立面与灰空间叠加能源与农业功能，可推动校园由消费型向生产型转型，提升资源利用效率，并为寒地高校低碳更新提供可复制的空间路径。

参考文献

- [1] 岳婷,周静,龙如银,etal. 中国城市居民生活碳排放因素分解与减碳潜力分析[J]. 系统工程理论与实践, 2024, 44(12): 77-92.
- [2] 张玉坤,石礼贤,张睿. 基于文献计量分析的生产性景观研究进展[J]. 景观设计, 2023, (04): 4-9.
- [3] 吴迪. 当代寒地大学校园步行空间适寒设计研究[D]; 哈尔滨工业大学, 2019.
- [4] 中国电力企业联合会. 光伏电站设计规范(GB50797-2012): [S]. 北京: 中华人民共和国住房和城乡建设部, 2012:
- [5] 黄元生,李兆蓓. 河北省农业净碳汇测算及影响因素分析[J] 华北电力大学学报(社会科学版)[J]. 2023, (05): 39-50.
- [6] 赵少铭,邓大鹏. 基于碳排放因子法校园碳排放计算——以河北建筑工程学院为例[J]. 高校后勤研究, 2025, (02): 47-51+56.

基金项目：本文系河北建筑工程学院研究生创新基金项目“多目标驱动下的高校低碳再生策略：校园屋顶光伏产能与产业产出的最优匹配平面研究”（XY2026013）研究成果