

# 面向建筑-电力友好交互的 建筑新型储能容量配置方法

张涛, 陈琪, 刘晓华

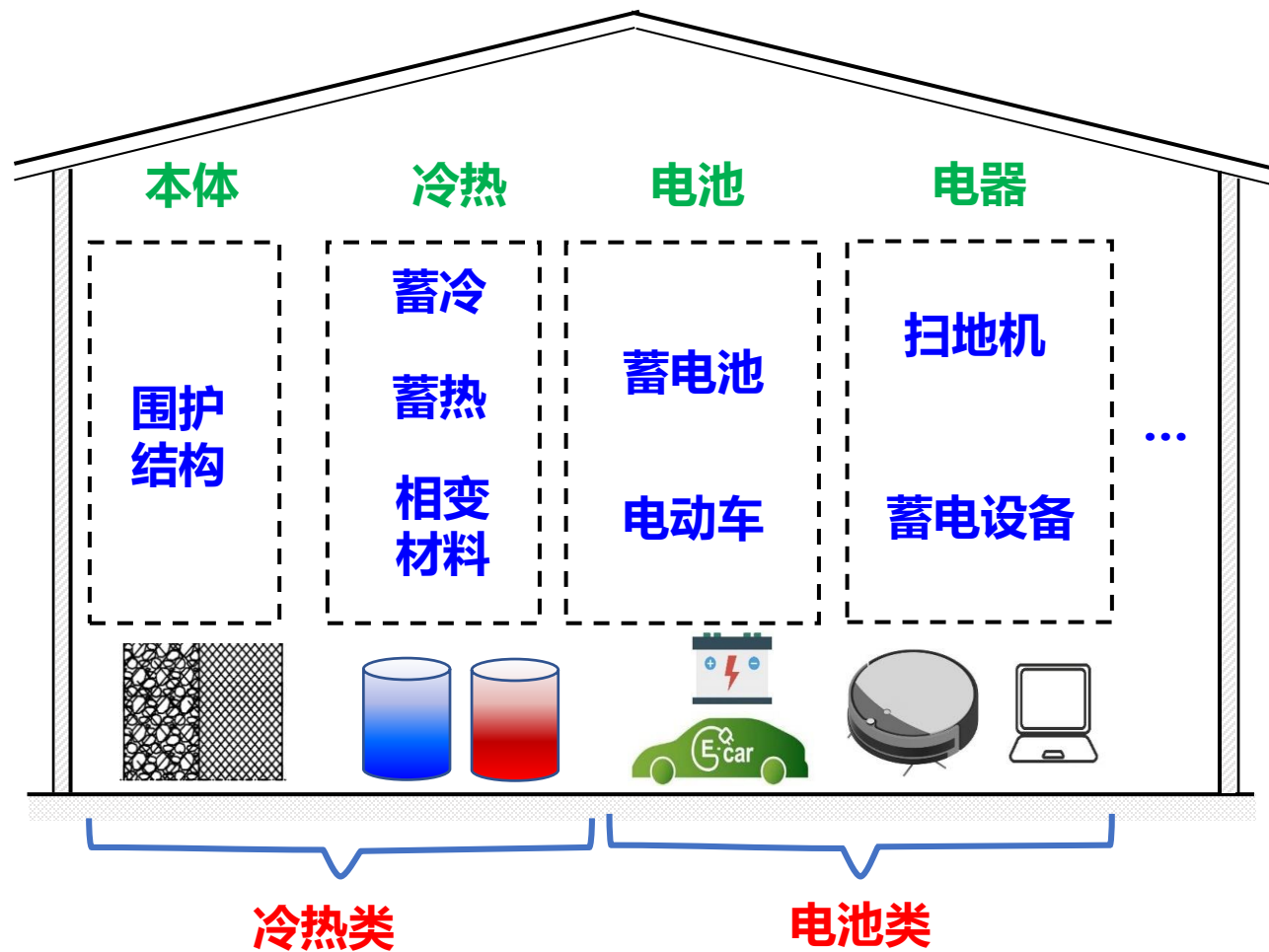
清华大学 建筑学院

2024年4月

# 目 录

- 1. 背 景
- 2. 如何描述
- 3. 如何量化
- 4. 如何配置
- 5. 总 结

## 建筑新型储能资源



# 1. 新型电力系统中的储能资源

- 支撑双碳目标下能源系统转型的基础：**储能资源**

## 电源侧储能

电源侧配置集中储能

光热发电

...

## 电网侧储能

抽水蓄能

集中储能电站

盐穴压缩空气

Power grid 电网

进气 Air in

热管理 and storage system 热量管理与存储系统

压缩机 Compressor

膨胀机 Expander

发电机 Generator

电动机 Motor

空气出气 Air out 出气

Compressed air 压缩空气

300-1500米深 300-1500m depth

盐穴 Salt cavern

...

## 用户侧储能/等效储能

本体

围护结构

冷热

蓄冷

蓄热

相变材料

电池

蓄电池

电动车

电器

扫地机

带蓄电设备

...

冷热类

电池类

零碳能源系统各环节需要大量储能、柔性资源，满足调节、稳定等需求



# 1. 双碳目标需发挥用户侧储能作用

## • 新型电力系统发展要求+建筑节能降碳发展要求

中华人民共和国国家发展和改革委员会  
National Development and Reform Commission

信息公开·政策·通知

国家发展改革委 国家能源局关于新形势下配电网高质量发展的指导意见  
发改能源〔2024〕187号

各省、自治区、直辖市，新疆生产建设兵团发展改革委、能源局，北京市城市管理委员会，国家能源局各派出机构，有关电力企业：配电网作为重要的公共基础设施，在保障电力供应、支撑经济社会发展和新型电力系统建设等方面发挥着重要作用。配电网正逐步由单向供电、单向输电向双向供电、双向输电转变，配电网与用户的电力网络转变为源网荷储融合互动，与上级电网深度融合的电力网络，在促进分布式新能源消纳、承载新型负荷等方面作用日益显著。为推动新形势下配电网高质量发展，助力构建清洁低碳、安全高效、经济灵活、供需协同、灵活智能的新型电力系统，现提出以下意见。

一、总体要求

(一) 指导思想

以习近平新时代中国特色社会主义思想为指导，全面贯彻党的二十大精神，深入贯彻落实“四个革命、一个合作”能源安全新战略，紧扣新形势下电力保供和转型目标，有序推进配电网投资、提质增效，协同推进配电网建设改造，系统推进配电网与源网荷储融合发展，全面提升配电网供电保障能力和综合承载能力，以配电网高质量发展助力新型能源体系和新型电力系统建设，服务经济社会发展，推动实现“双碳”目标，加快中国式现代化进程。

(二) 基本原则

坚持安全供电。保障配电网安全可靠供应作为首要任务，适度超前规划建设配电网，持续优化网架结构，保持合理电压等级，缩小城乡供电差距，适当提高供电标准，协同提升重要用户应急保障水平，夯实本质安全基础。

坚持绿色发展。助力能源转型。加快配电网建设改造和转型升级，强化源网荷储协同互动，切实满足分布式新能源发展需要，全力支持电动汽车充电桩设施体系建设，积极推广新型储能多元发展，全面推进配电网绿色低碳转型。

坚持统筹协调。强化规划引领。牢固树立系统思维，加强配电网规划与国家发展战略、城市发展规划、产业发展规划在编制、实施过程中的衔接互动，深化多部门联动协作，实现源网荷储协同的科学有序配置。

坚持科学管理。促进提质增效。建立健全配电网科学管理机制，强化全过程管理，创新配电网运营管理模式，提升标准化水平，推进先进科技研发和应用，深化电力体制机制改革，进一步提升配电网质量和效益。

**国家发展改革委 国家能源局关于新形势下配电网高质量发展的指导意见 发改能源〔2024〕187号**

**推动新型储能多元发展。支持用户侧储能安全发展...围绕分布式新能源、充电设施、大数据中心等终端用户，探索储能融合应用新场景，支持参与电网互动。推动长时电储能、氢储能、热（冷）储能技术应用。**

中华人民共和国中央人民政府  
www.gov.cn

首页 | 简 | 繁 | EN | 登录 | 邮箱

首页 > 政策 > 国务院政策文件库 > 国务院文件

字号: 默认 大 超大 | 打印 | 收藏 | 留言 | 分享

索引号: 000014349/2024-00027  
主题分类: 城乡建设、环境保护\其他  
发文机关: 国务院办公厅  
成文日期: 2024年03月12日  
标题: 国务院办公厅关于转发国家发展改革委、住房城乡建设部《加快推动建筑领域节能降碳工作方案》的通知  
发文字号: 国办函〔2024〕20号  
发布日期: 2024年03月15日

国务院办公厅关于转发国家发展改革委、住房城乡建设部《加快推动建筑领域节能降碳工作方案》的通知

**国家发展改革委、住房城乡建设部《加快推动建筑领域节能降碳工作方案》**

**推广应用高效柔性智能调控技术。推动建筑群整体参与电力需求响应和调峰。**

## 建筑等用户侧新型储能资源

### 如何描述?

- 建筑用户侧有多少等效储能资源

### 如何量化?

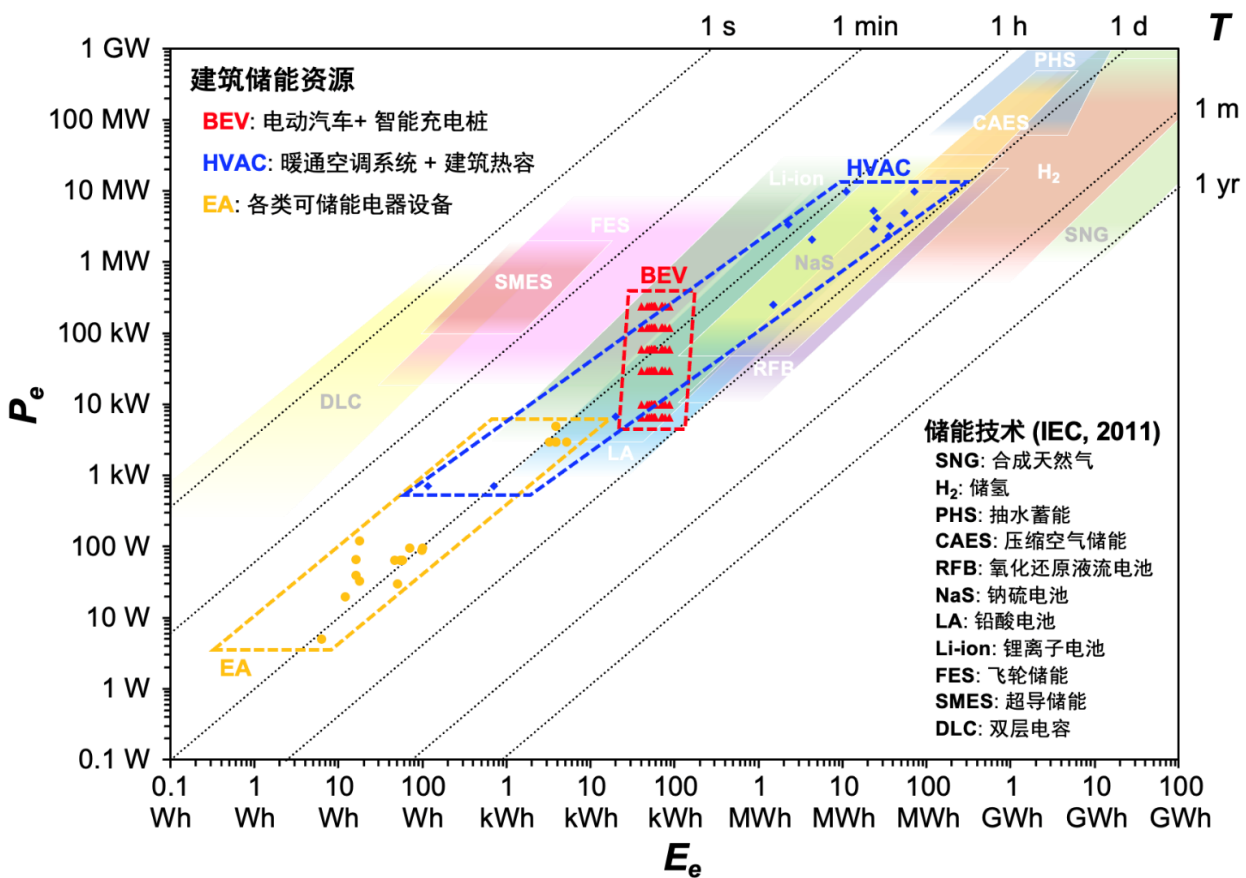
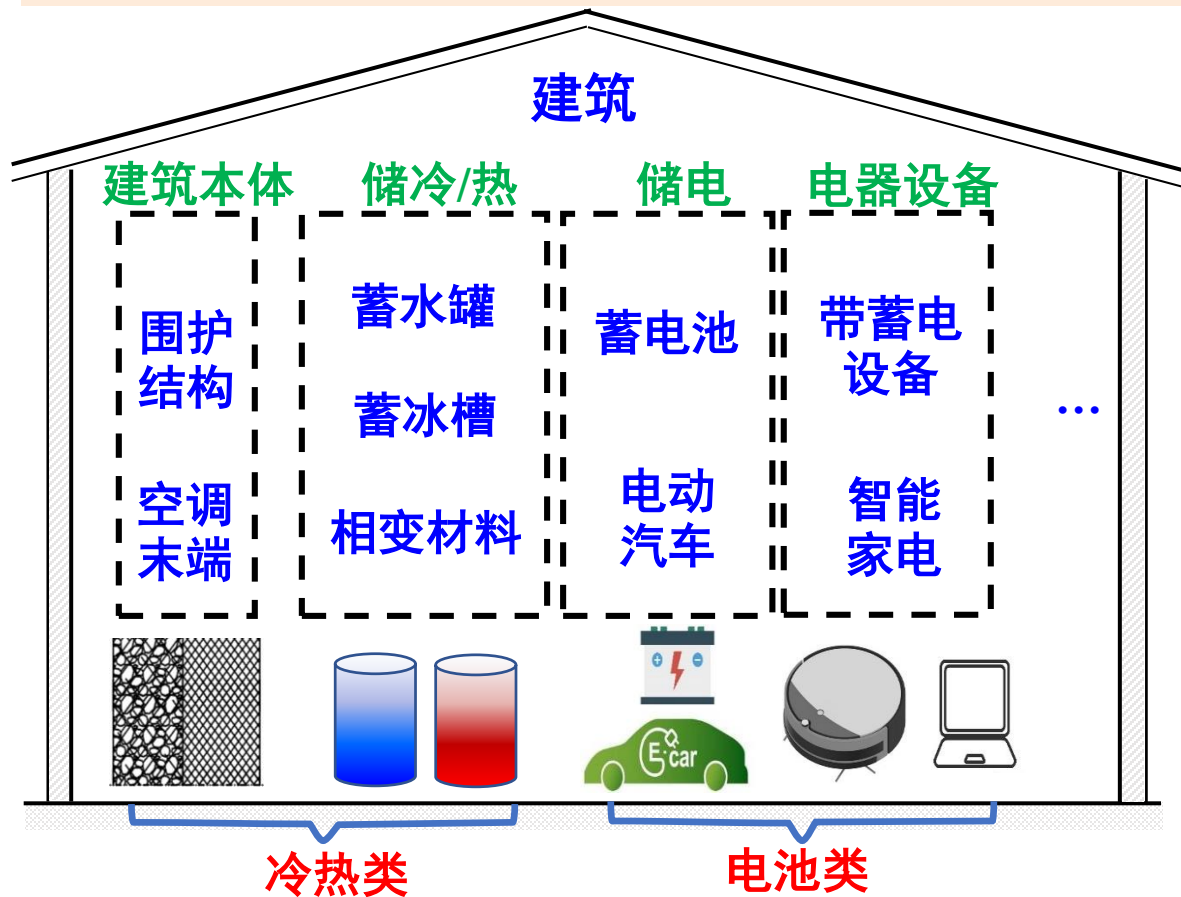
- 统一量化评价用户侧不同类型储能资源

### 如何配置?

- 不同类型建筑储能资源的优化配置

# 2. 如何描述?

系统认识用户侧**可利用蓄能/储能资源**，两大类-**冷热类+电池类**（**电动汽车、电器设备**），建立了建筑中等效储能/柔性资源的统一刻画方法-**“等效电池”**

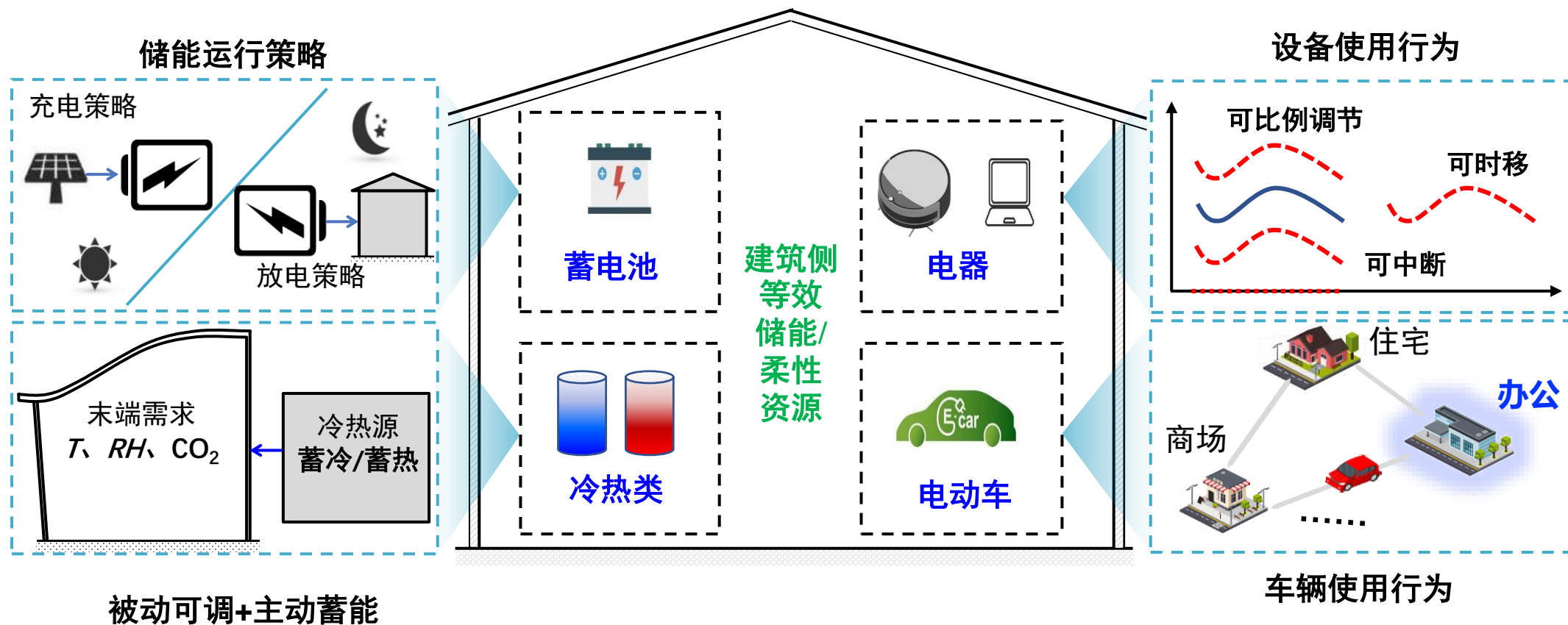


\*刘效辰, 刘晓华, 张涛, 江亿. 建筑区域广义储能资源的刻画与设计方法. **中国电机工程学报**



## 2. 如何描述?

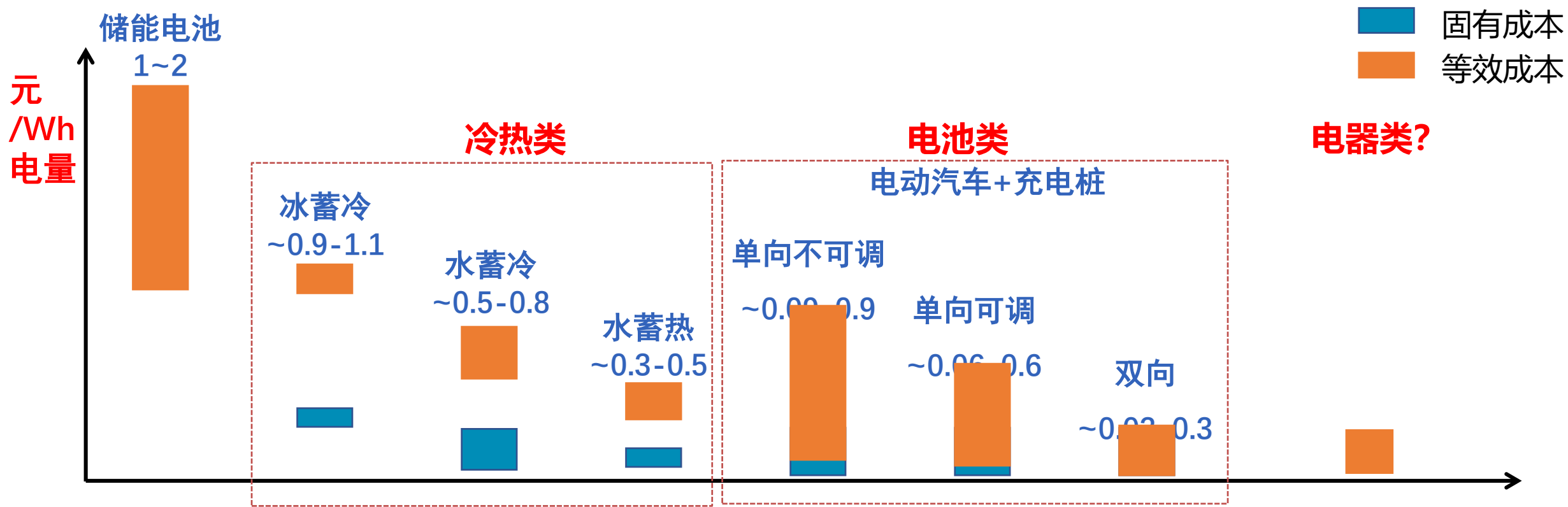
- 用户侧可利用的柔性/等效储能资源，与**用户侧使用规律、功能特征**等密切相关，需进一步认识其在电力系统调节中可发挥的作用





## 2. 如何描述?

- 考虑可发挥的等效储能能力 (vs蓄电) 后, 得到用户侧各类可利用储能资源**等效储能成本**的大致范围, 为系统合理设计、运行提供重要参照

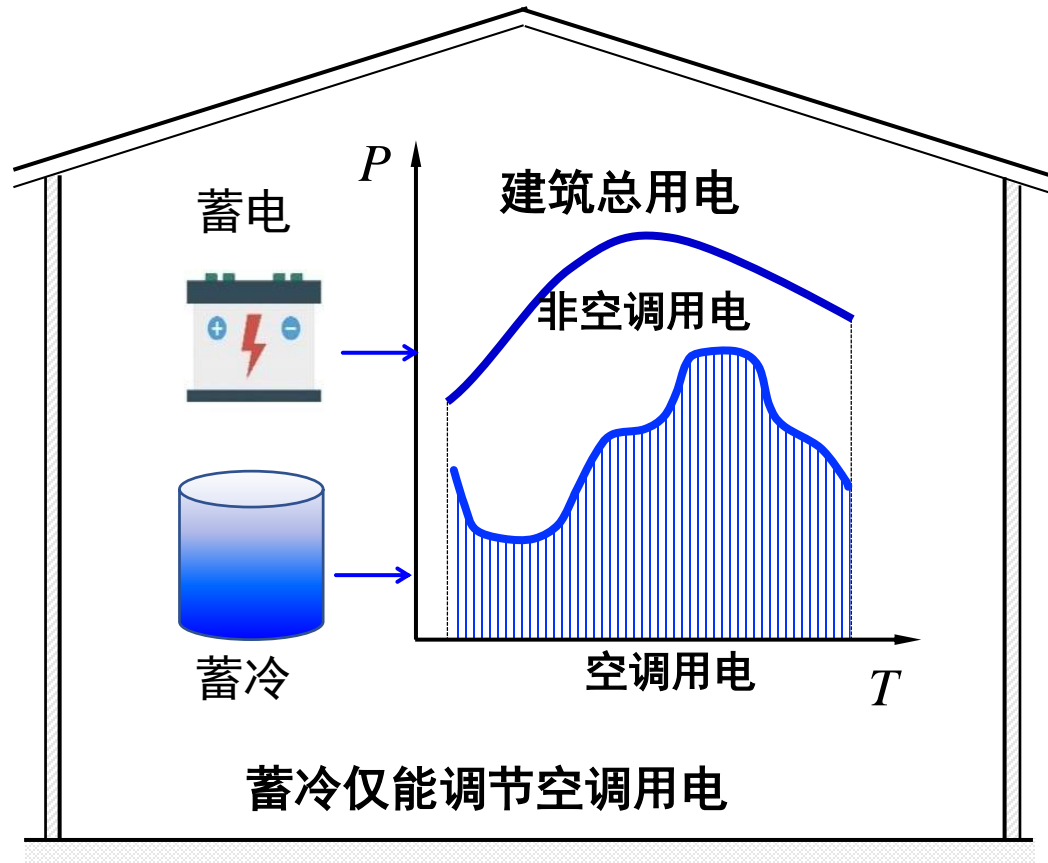


- 考虑等效折算系数后, 当前等效储能的成本仍显著低于蓄電池



# 3. 如何量化?

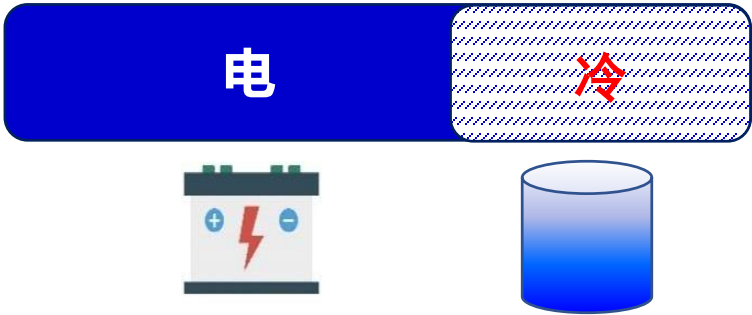
- 量化评价储能资源:** 建筑侧蓄冷仅可实现对空调用电 (冷源) 的柔性调节, 可发挥的效果受限; 而蓄电可实现对全部用电的柔性调节



**蓄冷vs.蓄电**

发挥同样效果时,

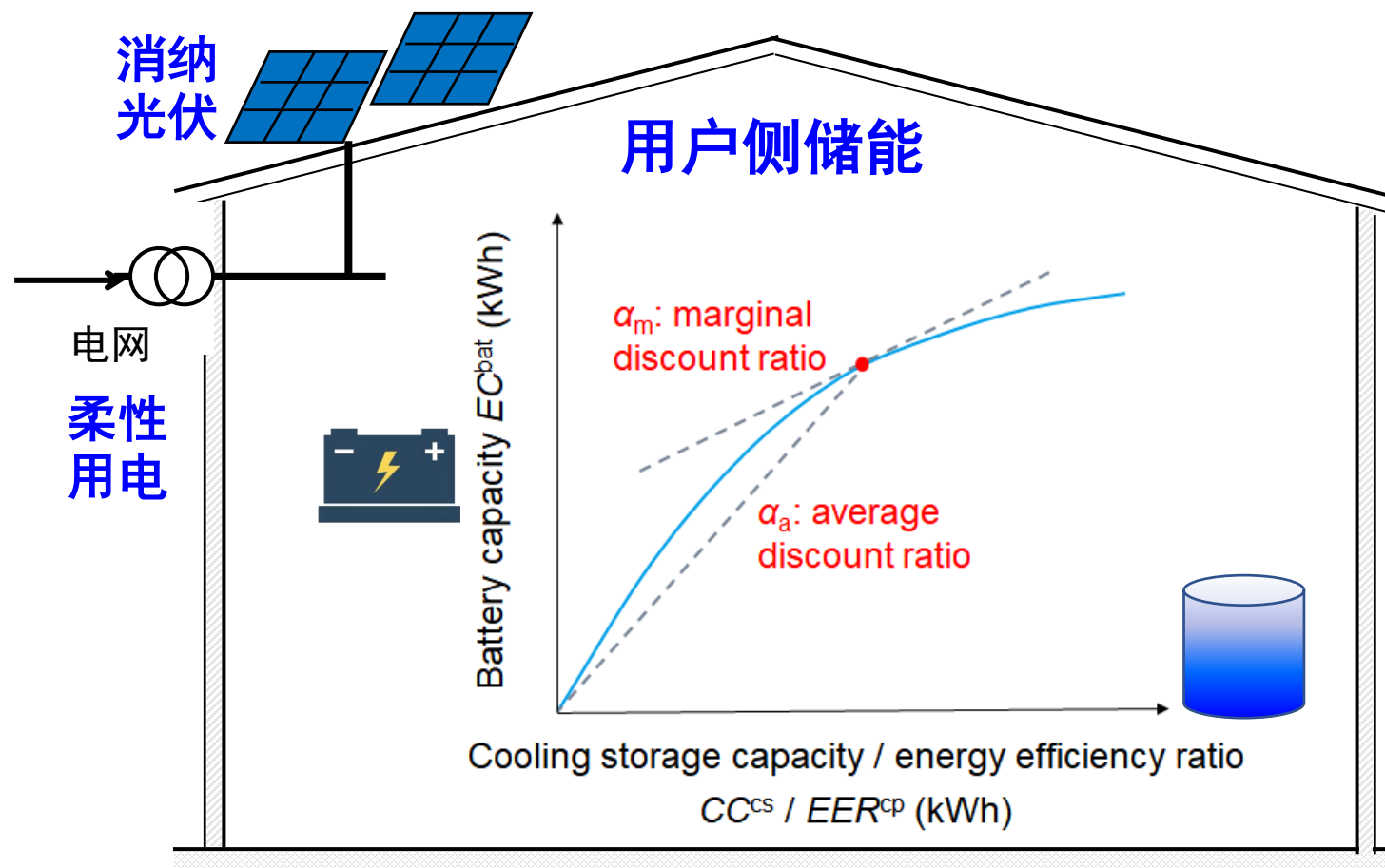
**1Wh蓄冷等效电=? 蓄电?**



\*Chen Q, Kuang ZH, Liu XH, Zhang T. Techno-economic comparison of cooling storage and battery for electricity flexibility at long and short timescales in buildings. *Energy Conversion and Management*, 289 (2023) 117183

# 3. 如何量化?

- 刻画蓄冷与蓄电池间差异，定义**等效系数 $\alpha$** 为实现同样效果（柔性用电、电网取电）时，所需蓄电池电量与蓄冷等效电量之比（ $< 1$ ）



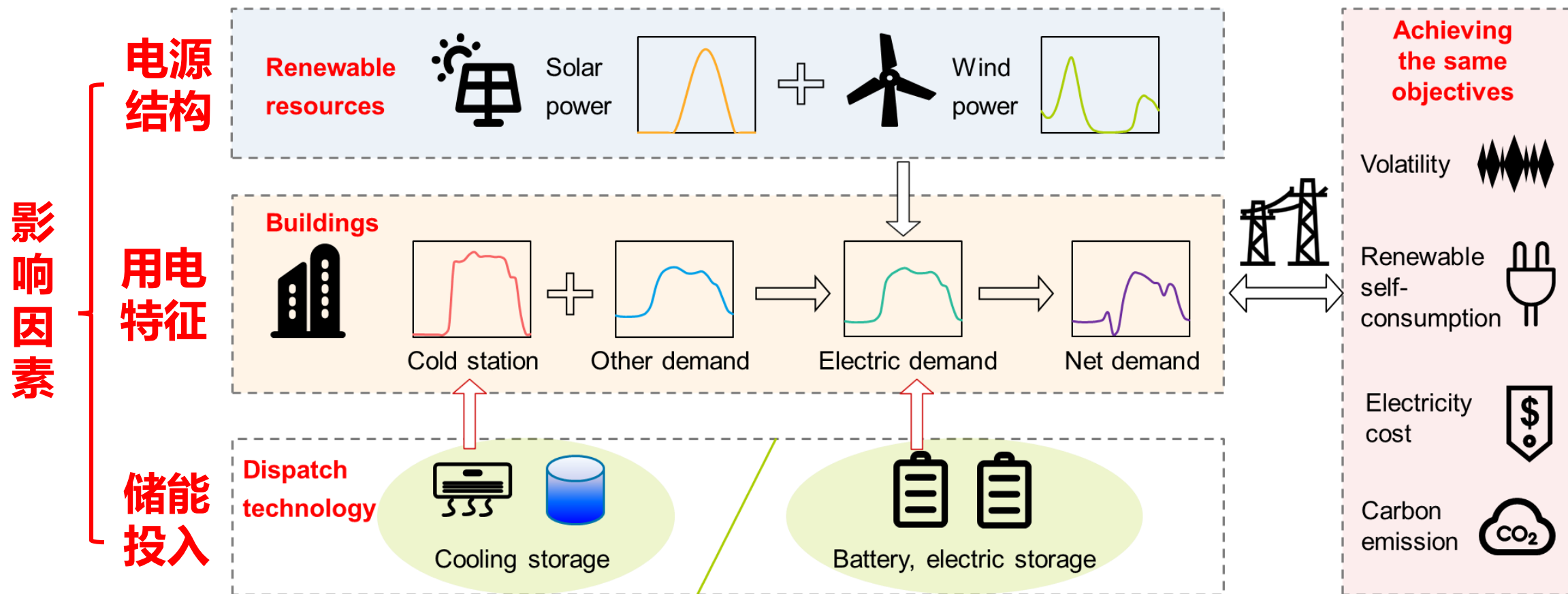
等效系数  $\alpha = \frac{EC^{bat}}{EC^{co}}$

$EC^{co}$ -蓄冷等效电量

$EC^{bat}$ -蓄电池容量

# 3. 如何量化?

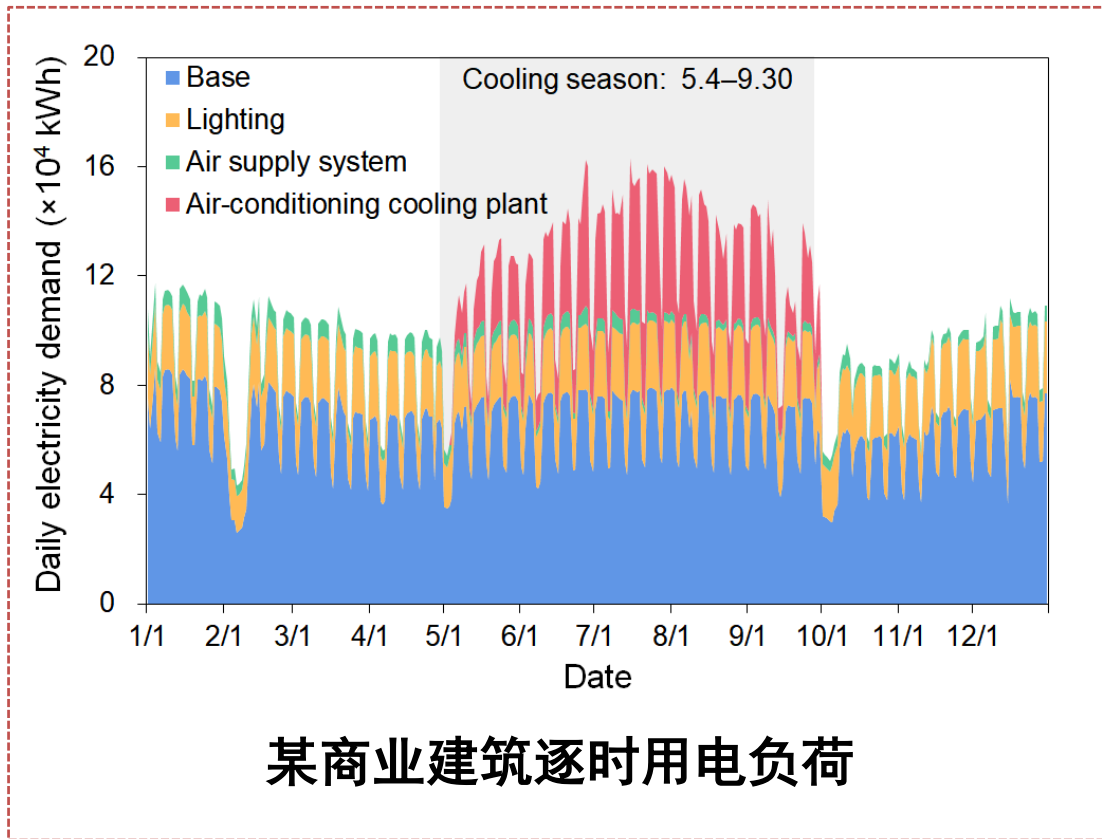
• 用户侧储能方式的对比：蓄冷vs.蓄电，实现同样的效果时有何差异？





# 3. 如何量化?

- 算例：某建筑，实现相同的净负荷波动目标时蓄冷vs.蓄电的投入差异



	蓄冷	蓄电
	$h_{dur}^{co}=8h, EF^{co}=0.8, DE^{co}=0.8$	储能时长 $h_{dur}^{bat}=2h$
	制冷 $COP^{ref}=5.5$ , 蓄冷 $COP_{sto}^{ref}=4.9$	循环效率 $EF^{bat}=0.9$
	冷冻 $COP^{chwa}$ 、冷却 $COP^{cowa}$	放电深度 $DE^{bat}=0.8$
等效容量	蓄冷容量 $LC^{co}$	蓄电容量 $EC^{bat}$



目标：实现最小的净负荷波动 [1]

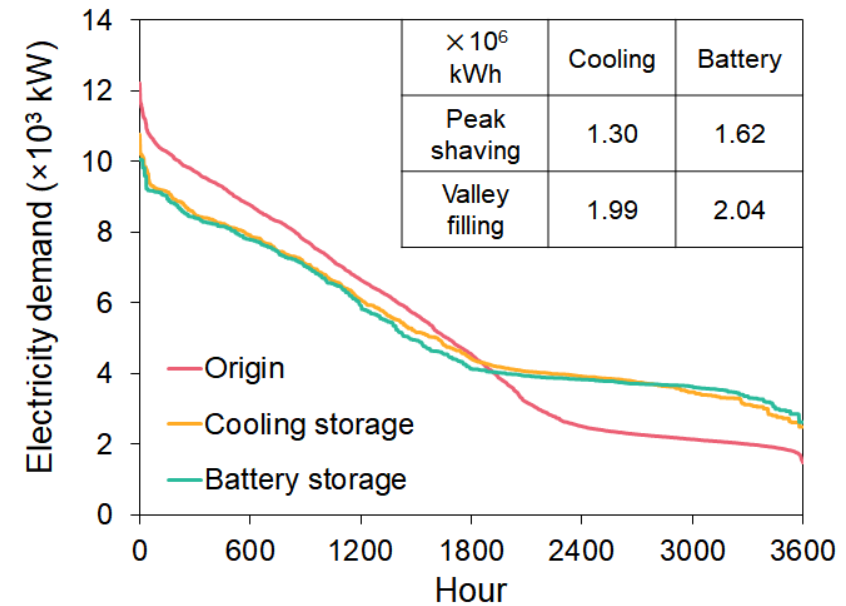
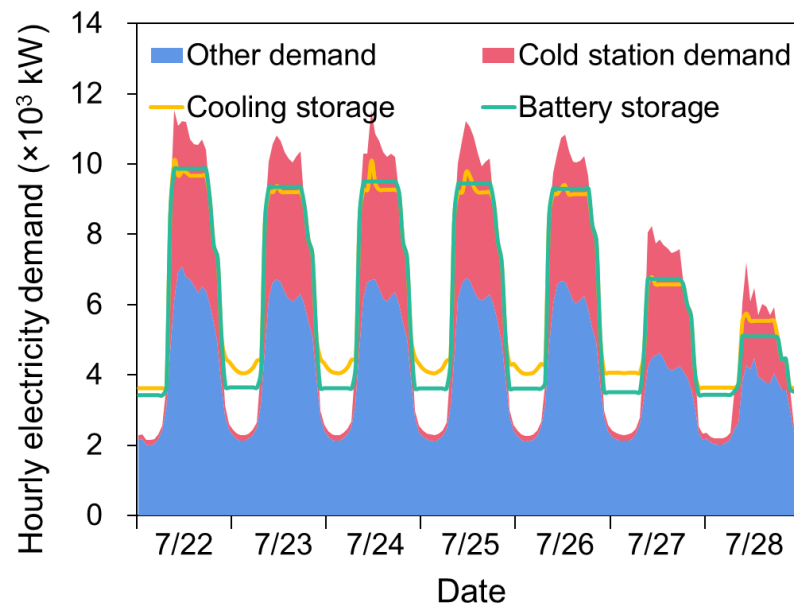
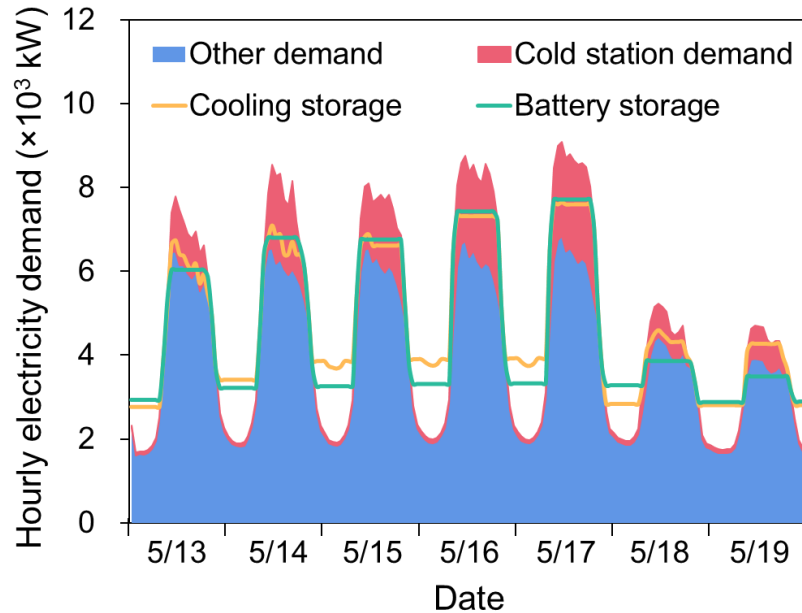
$$\min \sum_{\tau=1}^T W_{net}^{de}(\tau)^2$$

[1] Xi, L., et al. Combined solar power and storage as cost-competitive and grid-compatible supply for China's future carbon-neutral electricity system. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America 118, 42, (2021)

# 3. 如何量化?

• **用电特征影响**: 蓄冷容量=30%标准日冷负荷, 电池容量=蓄冷量/ $COP$

• 48000kWh冷量蓄水罐 (8727kWh等效蓄电) = 5820kWh电池,  $\alpha=0.67$



- 每天的冷负荷限制了容量的使用, 5月存在一天内没有完整循环
- 释冷功率限制导致白天仍有尖峰用电 (7月)

# 4. 如何配置?

## 影响因素

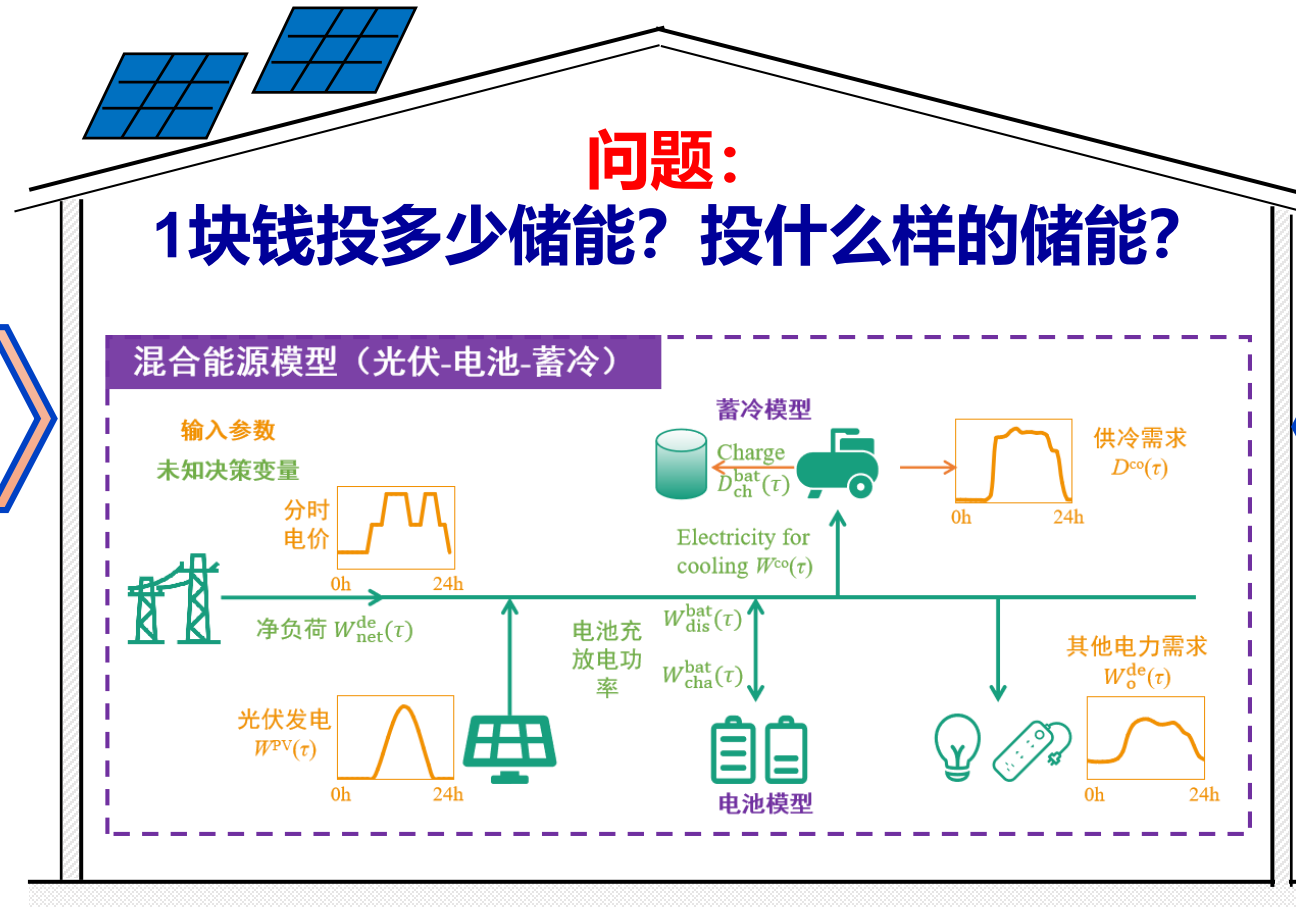
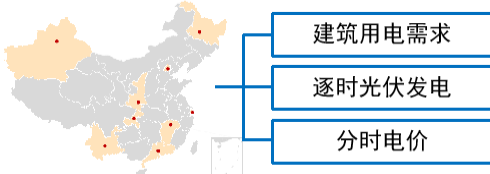
- 1. 光伏发电比例
- 2. 储能投资



- 3. 建筑类型



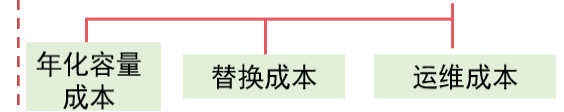
- 4. 不同城市



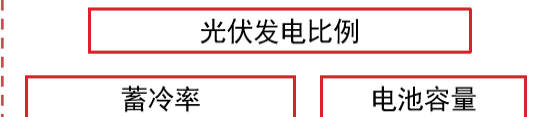
## 评价指标

- 1. 电力成本减少比例

$\Delta$ 安装储能前后的电费 — 混合能源系统成本



- 2. 最小电力成本下光伏与储能容量安装





# 4. 如何配置?

## ▶ 电池+蓄冷混合储能系统优化模型(MILP)

### 充放功率约束

净负荷 <b>电池</b>	$W^{bat}(\tau) = W_{cha}^{bat}(\tau) - W_{dis}^{bat}(\tau)$
充电功率	$0 \leq W_{cha}^{bat}(\tau) \leq EC^{bat} / H_{dur}^{bat} \cdot B_{cha}^{bat}(\tau)$
放电功率	$0 \leq W_{dis}^{bat}(\tau) \leq EC^{bat} / H_{dur}^{bat} \cdot (1 - B_{cha}^{bat}(\tau))$

净负荷 <b>蓄冷</b>	$W^{co}(\tau) = \frac{D^{co}(\tau)}{EER} + D_{dis}^{cs}(\tau) \cdot \left( \frac{1}{WTF^{chi}} - \frac{1}{EER} \right) + D_{cha}^{cs}(\tau) \cdot \left( \frac{1}{COP^{cs}} + \frac{1}{WTF^{chi}} + \frac{1}{WTF^{co}} \right)$
充电功率	$0 \leq D_{cha}^{cs}(\tau) \leq CC^{cs} / H_{dur}^{cs} \cdot B_{cha}^{cs}(\tau)$
放电功率	$0 \leq D_{dis}^{cs}(\tau) \leq CC^{cs} / H_{dur}^{cs} \cdot (1 - B_{cha}^{cs}(\tau))$ $D_{dis}^{cs}(\tau) \leq D^{co}(\tau) \cdot (1 - B_{cha}^{cs}(\tau))$

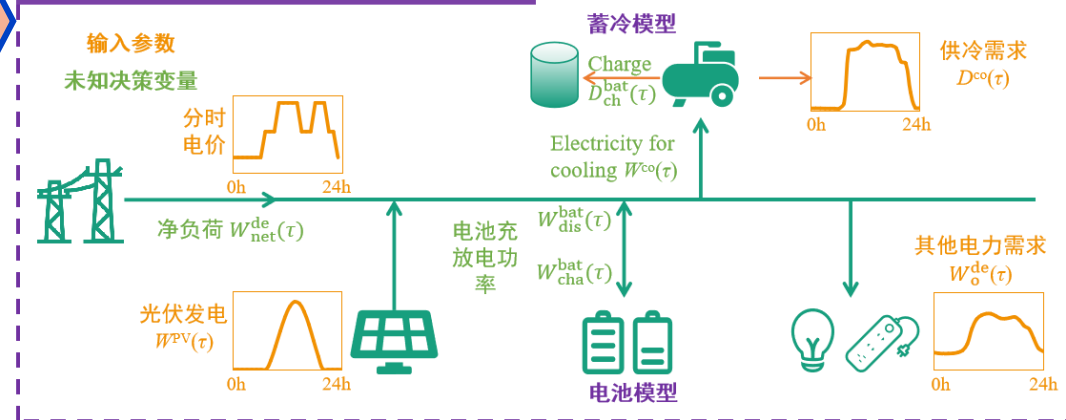
### 电池

储能容量	$EC^{bat} \text{ (kWh)}$
充/放电功率	$W_{cha}^{bat}(\tau) \text{ and } W_{dis}^{bat}(\tau) \text{ (kW)}$
0、1 变量	$B_{cha}^{bat}(\tau) \in \{0,1\}$
储能初始 SOC	$SOC^{bat}(0)$

### 蓄冷

储能容量	$CC^{cs} \text{ (kWh)}$
充/放电功率	$D_{cha}^{cs}(\tau) \text{ and } D_{dis}^{cs}(\tau) \text{ (kW)}$
0、1 变量	$B_{cha}^{cs}(\tau) \in \{0,1\}$
储能初始 SOC	$SOC^{cs}(0)$

### 混合能源模型 (光伏-电池-蓄冷)



### SOC约束

$$SOC^{bat}(\tau) = SOC^{bat}(0) + \left( \sum_{t=1}^{\tau} W_{cha}^{bat}(t) \cdot \sqrt{R^{bat}} - \sum_{t=1}^{\tau} W_{dis}^{bat}(t) / \sqrt{R^{bat}} \right) / EC^{bat}$$

$$1 - DOD^{bat} \leq SOC^{bat}(\tau) \leq 100\% \quad \tau = 1-(T-1)$$

$$SOC^{bat}(0) \leq SOC^{bat}(T) \leq 100\%$$

$$SOC^{cs}(\tau) = SOC^{cs}(0) + \left( \sum_{t=1}^{\tau} D_{cha}^{cs}(t) \cdot \sqrt{R^{cs}} - \sum_{t=1}^{\tau} D_{dis}^{cs}(t) / \sqrt{R^{cs}} \right) / CC^{cs}$$

$$1 - DOD^{cs} \leq SOC^{cs}(\tau) \leq 100\% \quad \tau = 1-(T-1)$$

$$SOC^{cs}(0) \leq SOC^{cs}(T) \leq 100\%$$

**确定蓄冷、电池容量以实现最大经济效益**

最小化电费

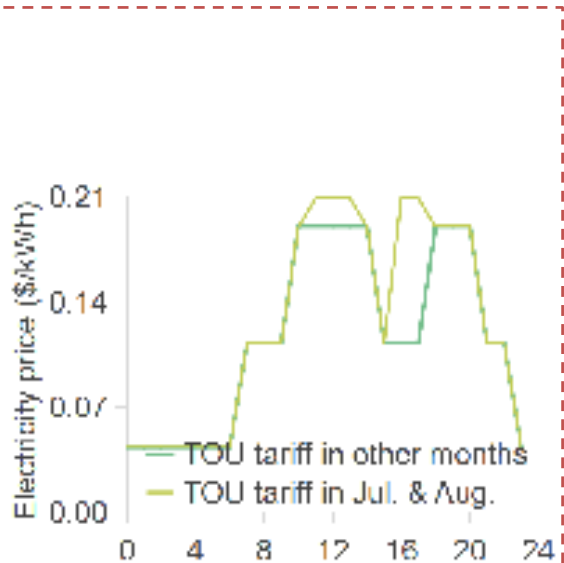
$$\min \sum_{\tau=1}^T C^{ele}(\tau) \cdot \max(W_{net}^{de}(\tau), 0) / \sum_{\tau=1}^T W^{de}(\tau)$$



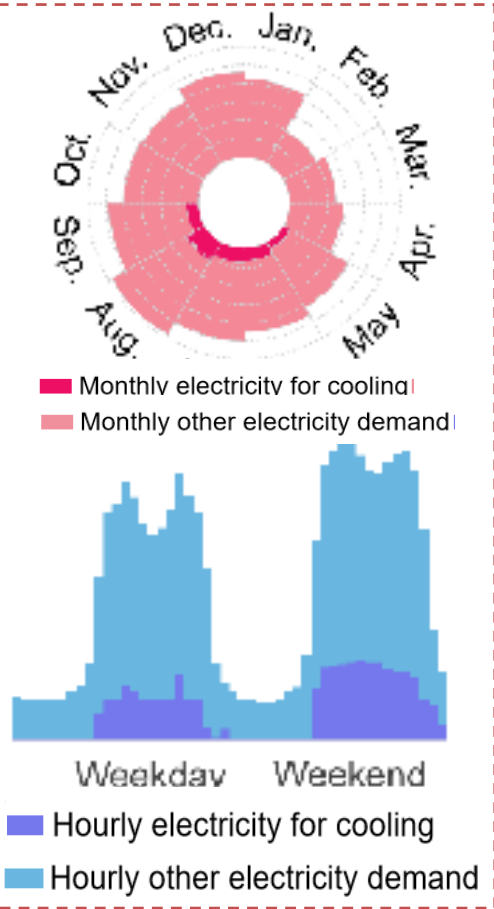
# 4. 如何配置?

## 蓄冷与电池的最优配置比例

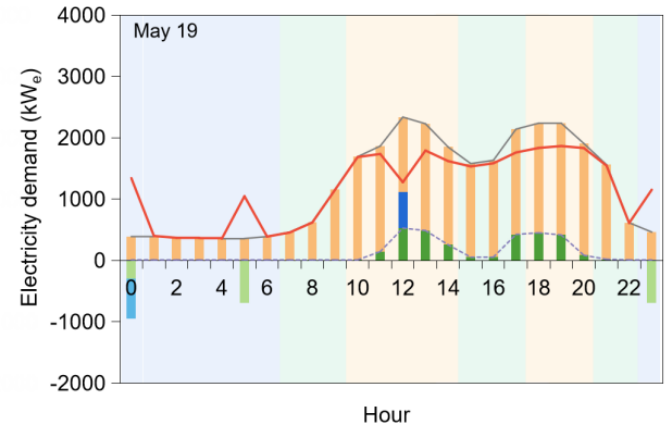
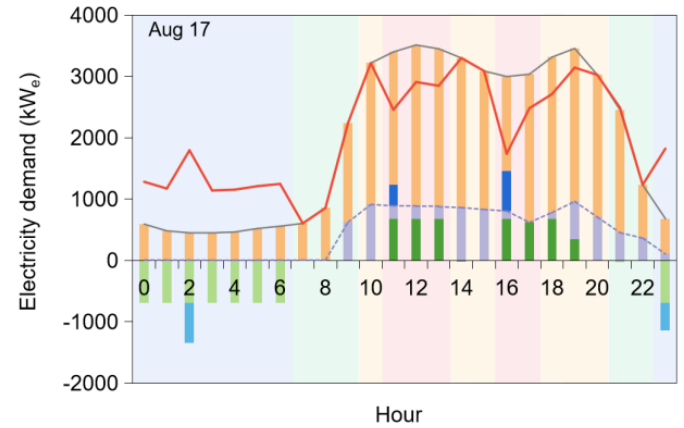
### 北京分时电价



### 北京商场为例



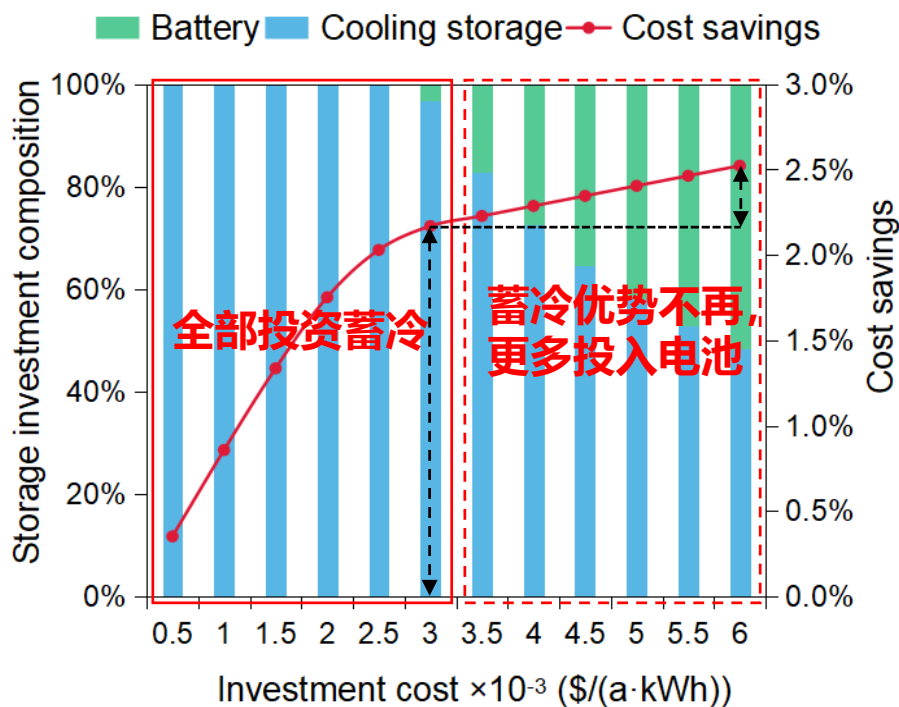
### 典型天运行



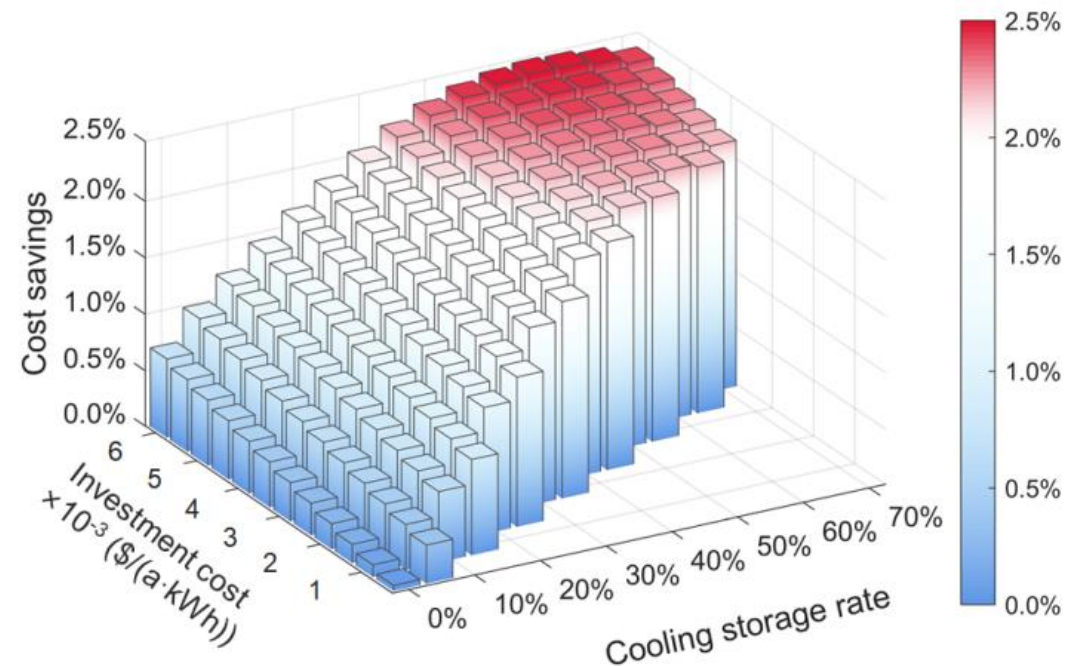
■ Cooling storage    ■ Cooling release    ■ Chiller load    ■ Battery charge    ■ Battery discharge    ■ Other electricity demand  
--- Cooling load    — Original electricity demand    — Modulated electricity demand  
 Time-of-use electricity price (\$/kWh)    0.04   0.11   0.19   0.21

# 4. 如何配置?

## 不同储能投资下的最优储能配置



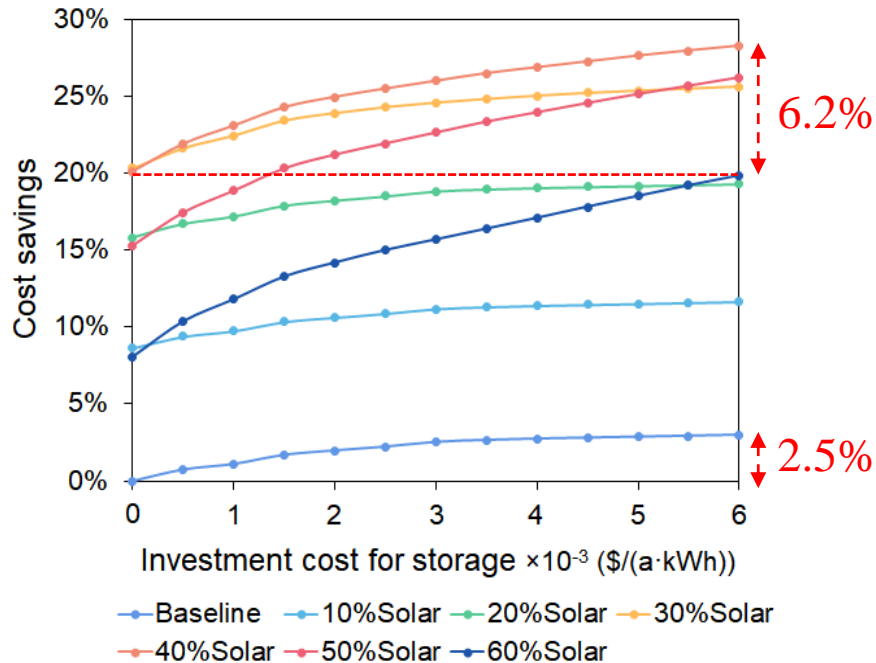
## 全部工况统计



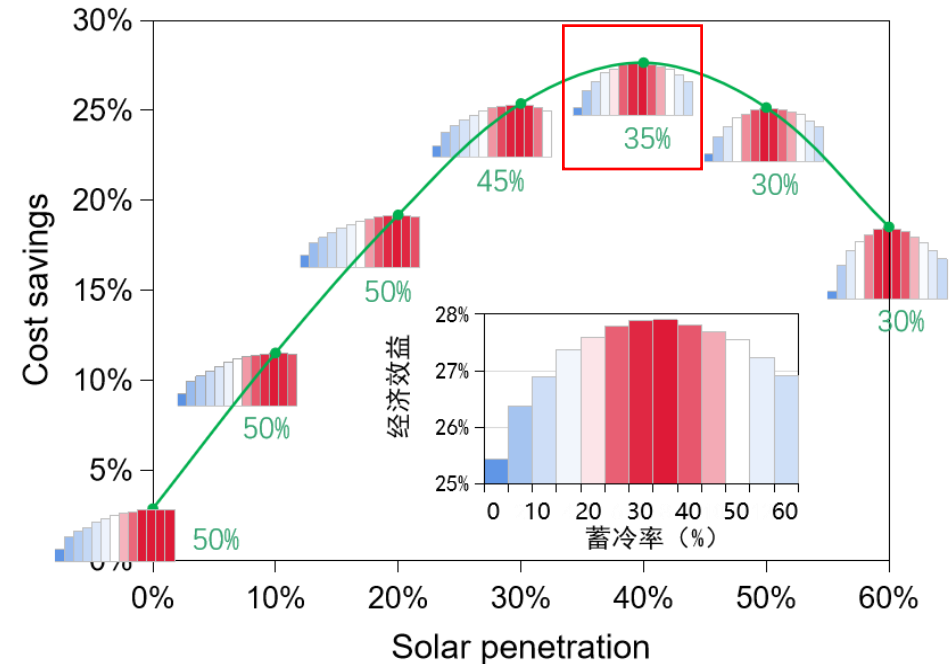
- ▶ 商场**最优蓄冷率为55%**（与利用等效系数计算结果相同）
- ▶ **电池的经济性弱于蓄冷**。55%蓄冷率的等效电池容量为2倍平均负荷，带来2.2%的效益。  
额外相同投资可安装容量为1.2倍平均负荷的电池，经济效益仅有0.3%

# 4. 如何配置？

## 光伏比例、储能投资对经济性影响



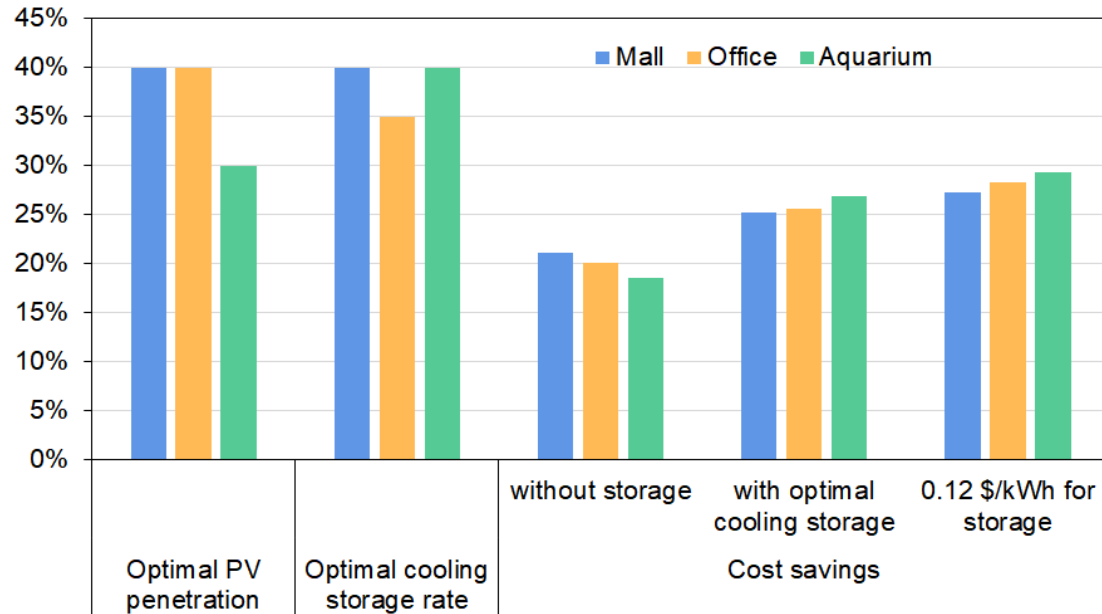
## 光伏发电比例与最优蓄冷率的关系



- ▶ **光伏**促进储能整体效果与电池的使用，但由于其不确定特性使得蓄冷可发挥效果变差
- ▶ 最优光伏发电比例约**40%**，最优蓄冷率由55%**下降**到**40%**，储能经济性由节省2.5%的成本**上升**至**6.2%**，混合能源系统共降低**27.3%**的电力成本

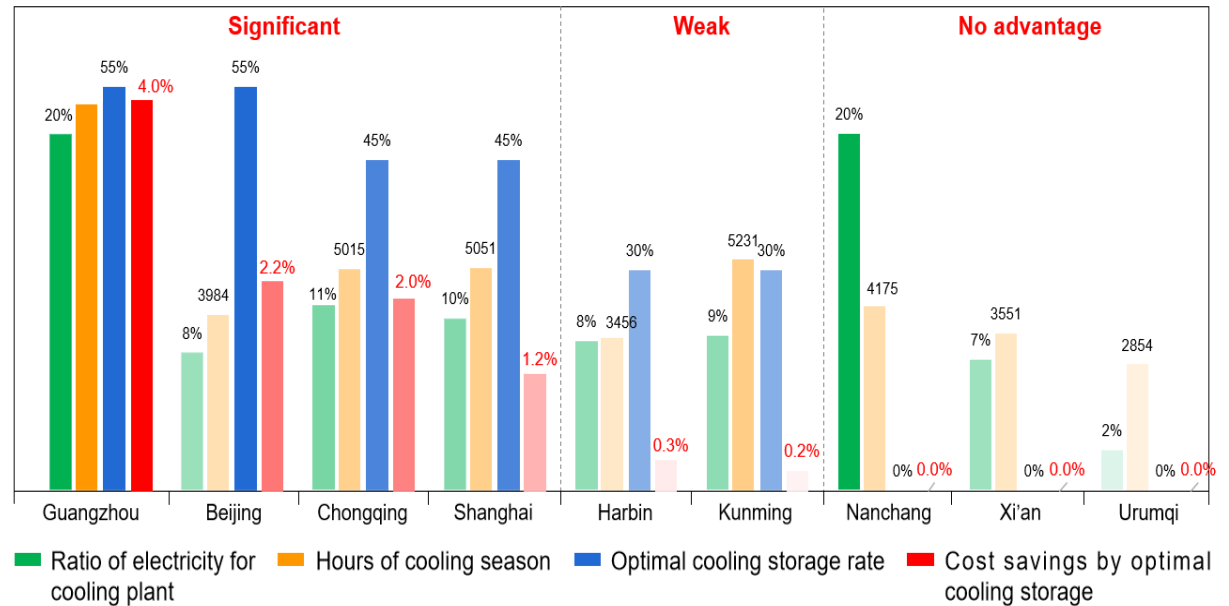
# 4. 如何配置?

## 北京不同类型建筑最优配置与经济性



- ▶ 最优蓄冷率：商场55%、办公建筑50%、水族馆45%（夜间冷负荷对应当前低电价时刻）
- ▶ 成本节约：商场、办公建筑和水族馆分别27.3%、28.3%和29.3%

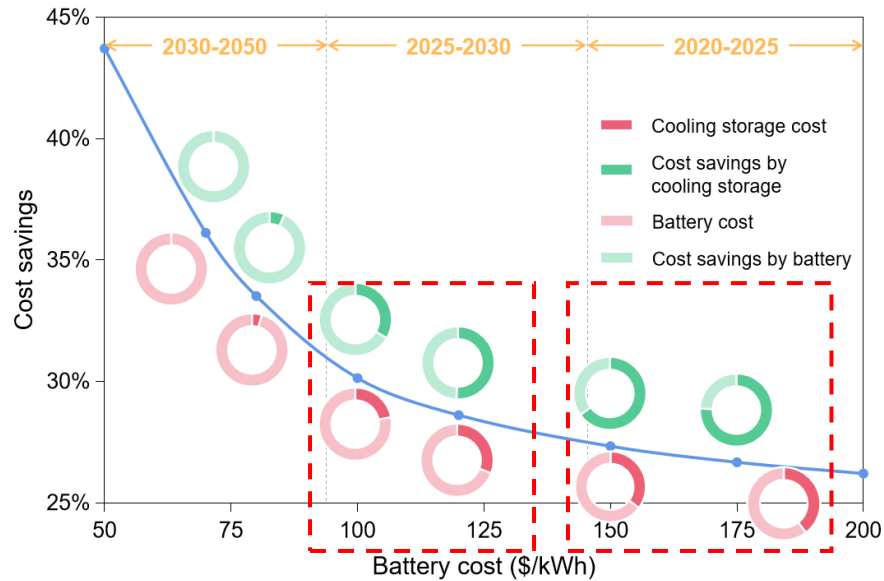
## 蓄冷在不同城市的经济性



- ▶ 蓄冷经济性取决于**电价波动幅度及其与建筑冷负荷的匹配程度**
- ▶ 电池的经济效益取决于**电价波动幅度**

# 4. 如何配置?

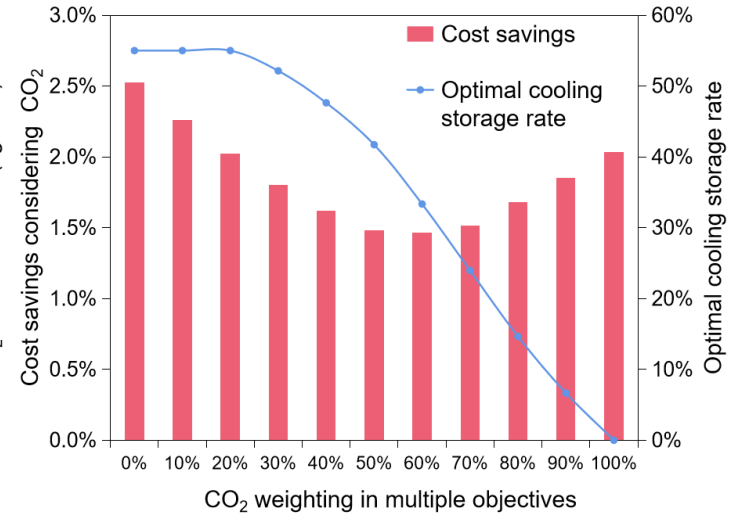
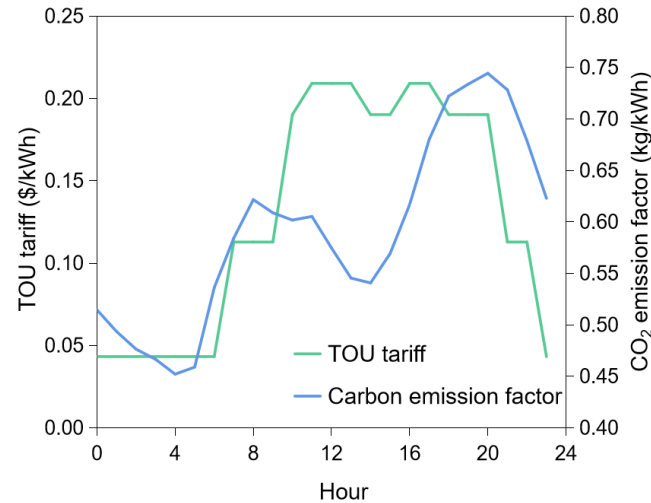
## 电池成本对储能经济效益的影响



- ▶ **电池成本影响：无光伏且电池成本70\$/kWh，可以完全取代蓄冷**
- ▶ **40%光伏电池+成本80\$/kWh，可以完全取代蓄冷，储能系统效益显著变大**

## 指标波动性对最优蓄冷率、经济性的影响

分时电价与实时碳排放指标对比



- ▶ **未来电价由分时电价逐渐转换为实时电价，波动性不确定性增加**
- ▶ **蓄冷难以响应不确定的电价，评价指标中碳排放的比重越大，最优蓄冷率越低，未来电池逐渐取代蓄冷**



## 建筑等用户侧新型储能资源

### 如何描述?

- 建筑储能资源:  
电池类+冷热类

### 如何量化?

- 蓄冷vs.蓄电: **折算系数统一量化评价**

### 如何配置?

- 确定合理的建筑**最优蓄冷比例**

### 如何利用?

- 建筑储能资源的**调节利用**

未完待续.....

# THANKS

清华大学 建筑学院

## 本报告研究成果主要发表在:

Chen Q, Kuang ZH, Liu XH, Zhang T. Techno-economic comparison of cooling storage and battery for electricity flexibility at long and short timescales in buildings. **Energy Conversion and Management**, 289 (2023) 117183

Chen Q, Kuang ZY, Liu XH, Zhang T. Optimal sizing and techno-economic analysis of the hybrid PV-battery-cooling storage system for commercial buildings in China. **Applied Energy**, 355 (2024) 122231