

第二届国际可再生能源供热大会

青藏高原太阳能供暖蓄热系统实用设计方法

王登甲 张睿超 刘慧

西安建筑科技大学

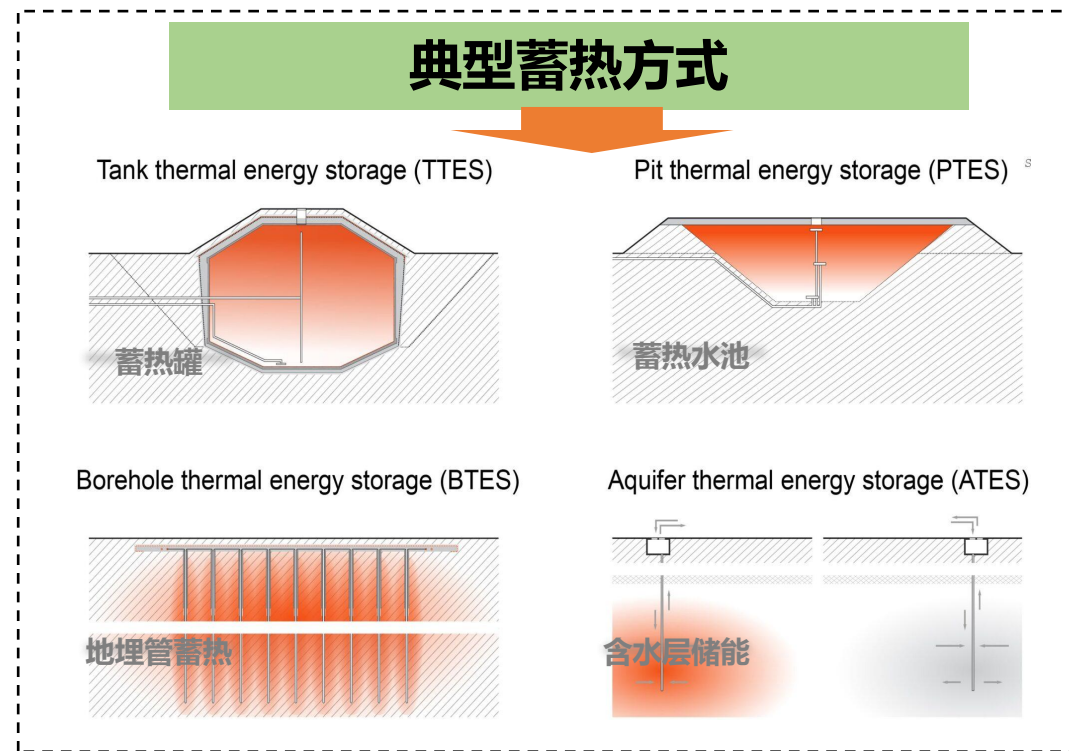
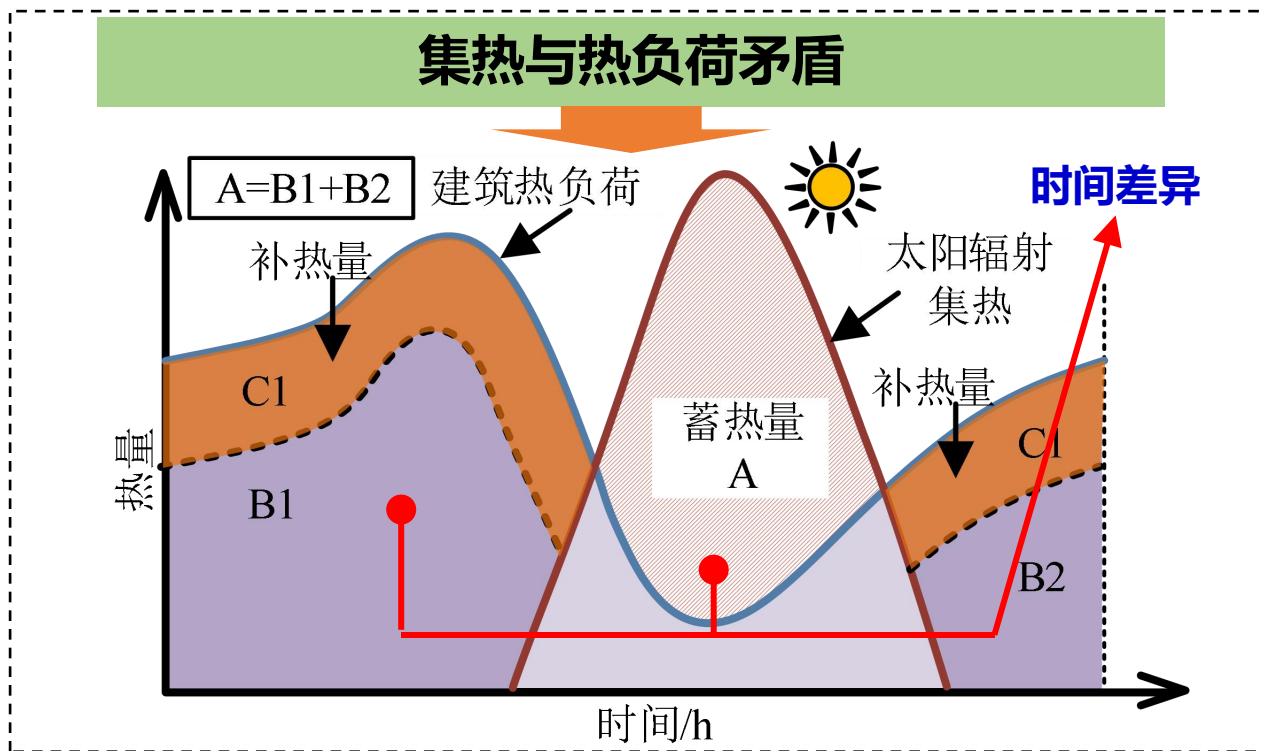
西部绿色建筑国家重点实验室

Contents 报告提纲

- 一、太阳能蓄热系统设计存在的问题**
- 二、太阳能供暖蓄热系统设计原则与要点
- 三、高原太阳能蓄热损失及保温实用设计方法
- 四、结论

蓄热系统是太阳能供暖系统的核心

- 蓄热系统是缓解太阳能供暖系统随机性、波动性的**不可或缺的重要部件**。
- 显热储热在太阳能供暖系统中应用最广泛，价格低廉的**热水储热**是主要蓄热方式。



蓄热系统特点：**热量调配/平衡波动**

问题1：太阳能蓄热系统选型依据宽泛、精确度低

蓄热容量设计是太阳能热水蓄热系统设计的关键；现有工程设计精细化程度不够，导致太阳能供暖系统设计存在缺陷

蓄热容量不合理的危害



- 蓄热容量过小易过热汽化
- 容量过大温度提升困难

工程技术标准规定

UDC		中华人民共和国国家标准		GB										
P		GB 50495-2019												
太阳能供热采暖工程技术标准														
Technical standard for solar heating system														
6.2.2	系统的总贮热水箱或水池容积应根据设计蓄热时间周期及蓄热量等参数通过模拟计算确定。短期蓄热液体工质太阳能集热系统对应的太阳能集热器单位采光面积的贮热水箱或水池的容积范围可按40L/m ² ~300L/m ² 选取。	6.3.2	季节蓄热系统的蓄热体容积宜通过模拟计算确定。简化计算时，不同规模季节蓄热系统的单位太阳能集热器采光面积对应蓄热水池或贮热水箱容积范围应按表6.3.2选取。	<table border="1"> <tr> <th colspan="3">表 6.3.2 不同规模季节蓄热系统的单位太阳能集热器采光面积对应蓄热水池或贮热水箱容积范围</th> </tr> <tr> <th>系统规模</th> <th>中型季节蓄热系统 (太阳能集热器面积<10000m²)</th> <th>大型季节蓄热系统 (太阳能集热器面积≥10000m²)</th> </tr> <tr> <td>贮热水箱、蓄热水池容积范围</td> <td>1.5m³/m²~2.5m³/m²</td> <td>≥3m³/m²</td> </tr> </table>		表 6.3.2 不同规模季节蓄热系统的单位太阳能集热器采光面积对应蓄热水池或贮热水箱容积范围			系统规模	中型季节蓄热系统 (太阳能集热器面积<10000m ²)	大型季节蓄热系统 (太阳能集热器面积≥10000m ²)	贮热水箱、蓄热水池容积范围	1.5m ³ /m ² ~2.5m ³ /m ²	≥3m ³ /m ²
表 6.3.2 不同规模季节蓄热系统的单位太阳能集热器采光面积对应蓄热水池或贮热水箱容积范围														
系统规模	中型季节蓄热系统 (太阳能集热器面积<10000m ²)	大型季节蓄热系统 (太阳能集热器面积≥10000m ²)												
贮热水箱、蓄热水池容积范围	1.5m ³ /m ² ~2.5m ³ /m ²	≥3m ³ /m ²												
6.2.3	太阳能集热系统、生活热水系统、采暖系统与贮热水箱的连接管位置应布置合理，实现不同温度供热或换热需求。	6.2.4	贮热水箱进出口处流速宜小于0.04m/s，宜采用水流分布器。	6.2.5	蓄热水池槽体结构、保温结构和防水结构的设计应符合国家现行相关标准的规定。									
6.2.6	贮热水箱和蓄热水池宜采用外保温，其保温设计应符合现行国家标准《民用建筑供暖通风与空气调节设计规范》GB 50736和《设备及管道绝热设计导则》GB/T 8175的规定。	6.3.3	当设计季节蓄热水池或贮热水箱容量时，应校核计算蓄热水池或贮热水箱的最高蓄热温度；最高蓄热温度应比蓄热水池或贮热水箱工作压力对应的工质沸点温度低5℃。	6.3.4	季节蓄热水池应采取温度均匀分层的技术措施。									

规定1：
短期蓄热工质太阳能系统的蓄热容积取40L/m² ~ 300L/m²

规定2：
季节蓄热系统的容积中型系统取1.5m³/m²~2.5m³/m²；大型系统取≥3m³/m²

太阳能供暖蓄热系统现状

青藏高原太阳能集中供暖工程一

项目供热面积 8.26 万m²，集热面积 22275 m²，埋地蓄热水池容积1.5万m³

集热蓄热比0.67 m³/ m²

浪卡子县城

青藏高原太阳能集中供暖工程二

项目供热面积8.82万m²，集热面积 32175 m²，储热钢罐容积 1.5万m³

集热蓄热比0.47 m³/ m²

集热场

太阳能集热

青藏高原太阳能集中供暖工程三

项目供热面积8.08万m²，集热面积1.8万m²，蓄热水箱4500 m³

集热蓄热比0.25 m³/ m²

青藏高原太阳能集中供暖工程四

项目供暖面积6600 m²，集热面积2100 m²，蓄热水箱150 m³

集热蓄热比0.07 m³/ m²

问题2：太阳能蓄热系统损失及保温实用方法模糊

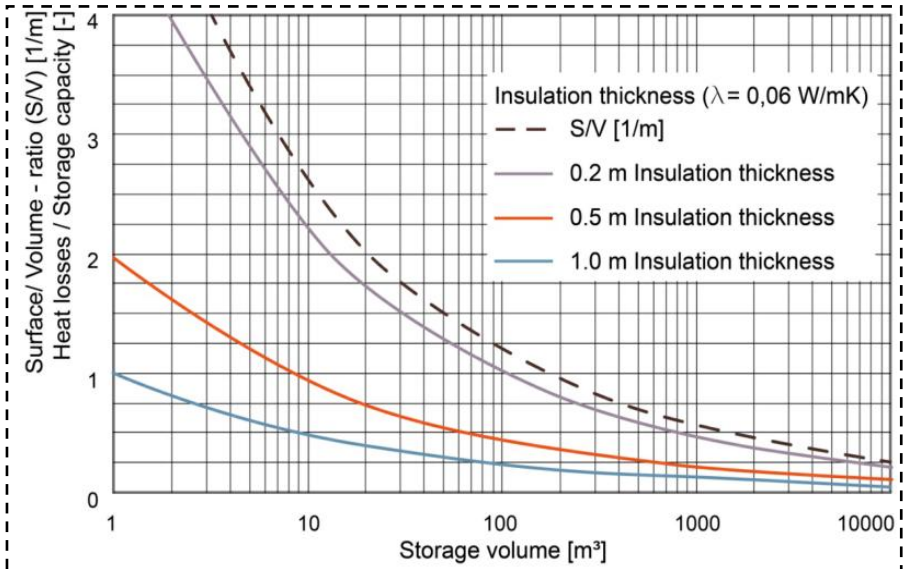
提高蓄热系统保热能力、减少蓄热损失是太阳能供暖蓄热系统稳定运行保障



高原气压低，空气密度小，
对流换热系数小

空气稀薄，夜间长波辐射
损失大

青藏高原某太阳能蓄热罐保温施工现场



蓄热体的热损失/蓄热能力关系图

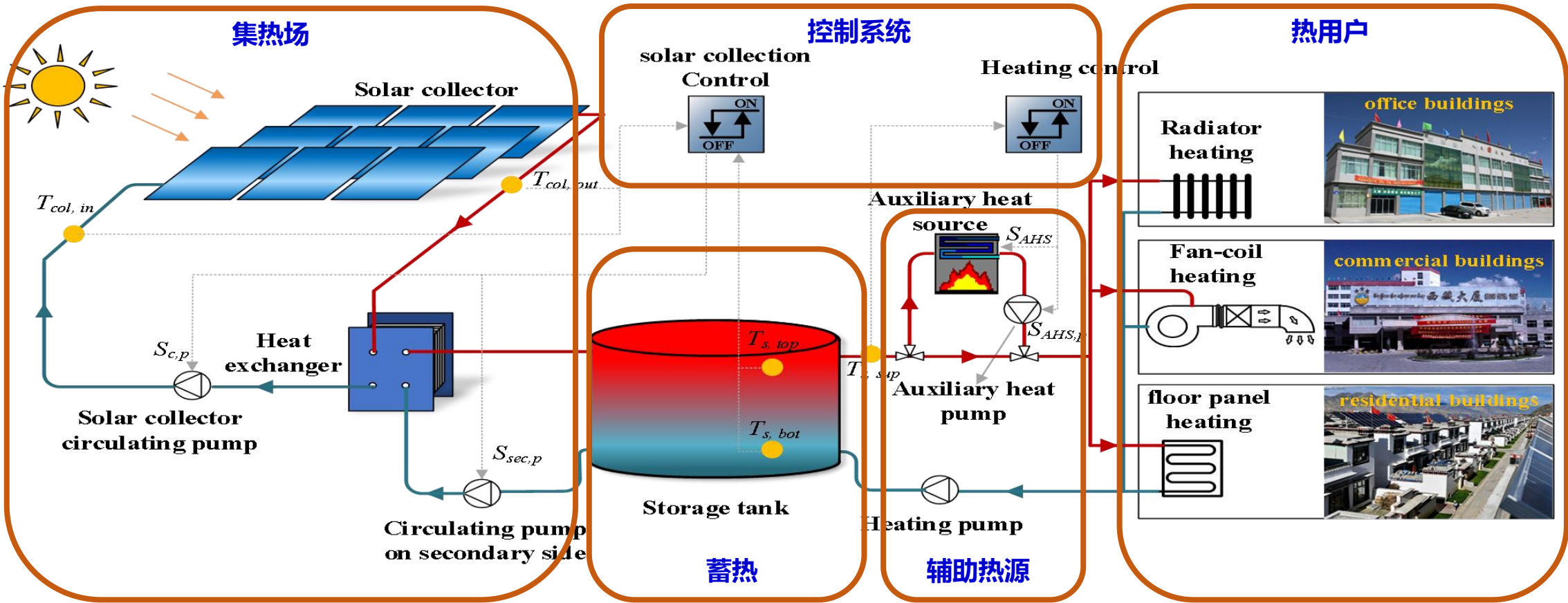
- 保温越厚，损失越小，初投资高
- 蓄热容量大，单位热损失小

Contents 报告提纲

- 一、太阳能蓄热系统设计存在的问题
- 二、太阳能供暖蓄热系统设计原则与要点**
- 三、高原太阳能蓄热损失及保温实用设计方法
- 四、结论

2.1 太阳能供暖蓄热系统的影响机制

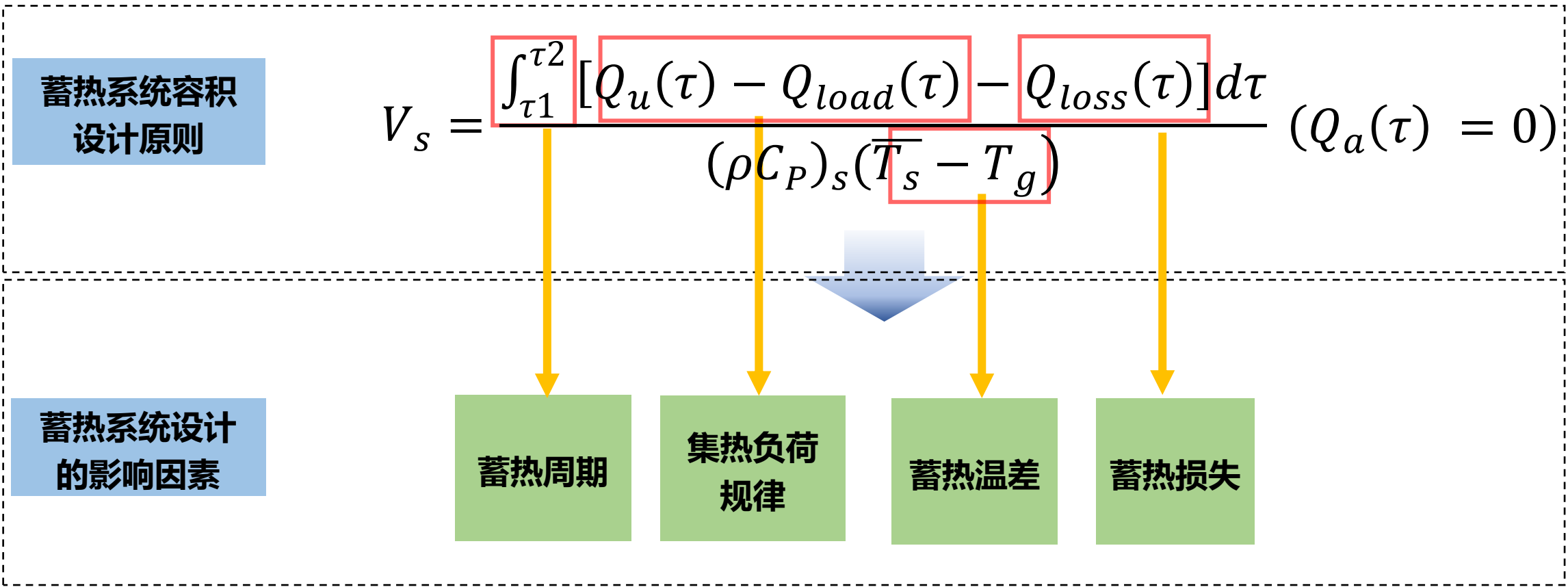
- 太阳能供暖蓄热系统设计主要关注蓄热容积选型匹配、蓄热损失及保温优化及高效蓄热取热等问题



太阳能供暖蓄热系统的工作原理

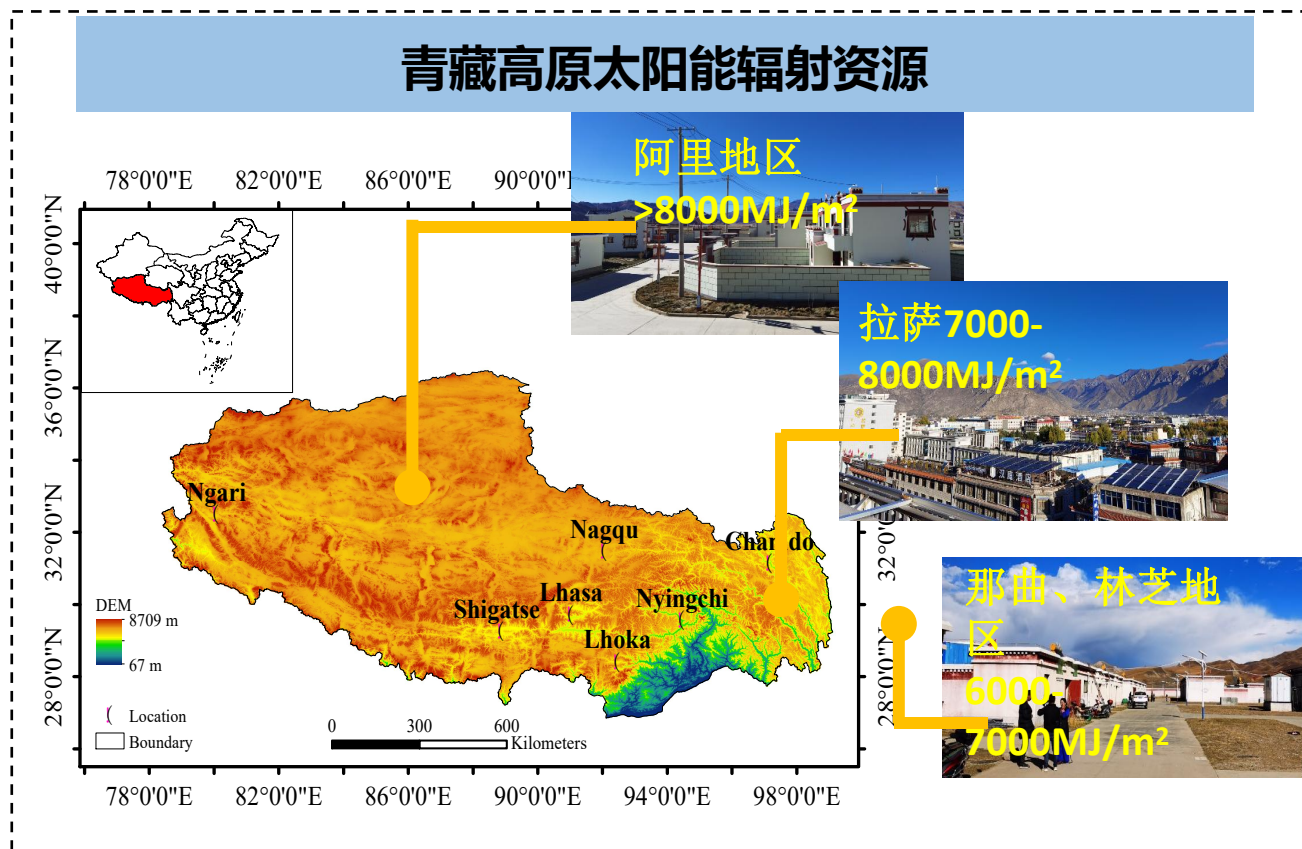
2.1 太阳能供暖蓄热系统的影响机制

- 太阳能供暖蓄热系统设计匹配的主要影响因素为**不同地区及建筑的集热负荷规律、蓄热周期、蓄热温差、蓄热损失问题**



2.2 太阳能供暖蓄热系统设计的特征分析

■ 高原地区太阳辐射强烈、昼夜温差大、采暖期阴雨天概率低



□ 采暖季阴雨天概率低、连续阴雨天数少

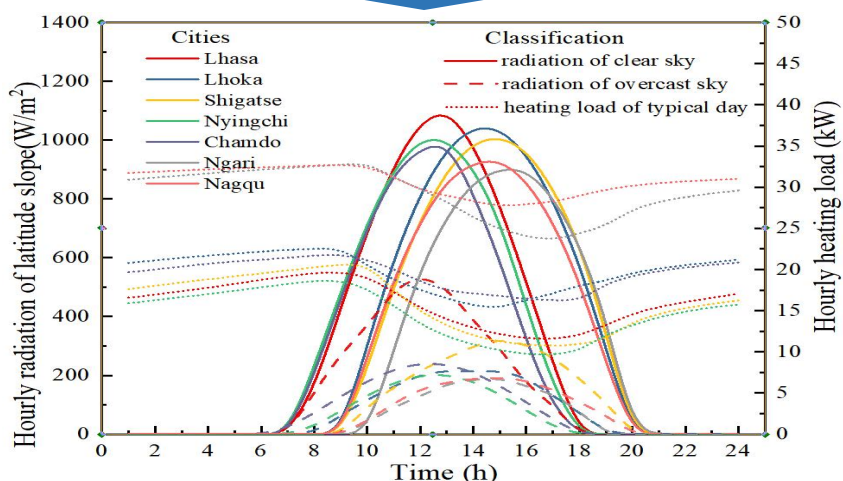
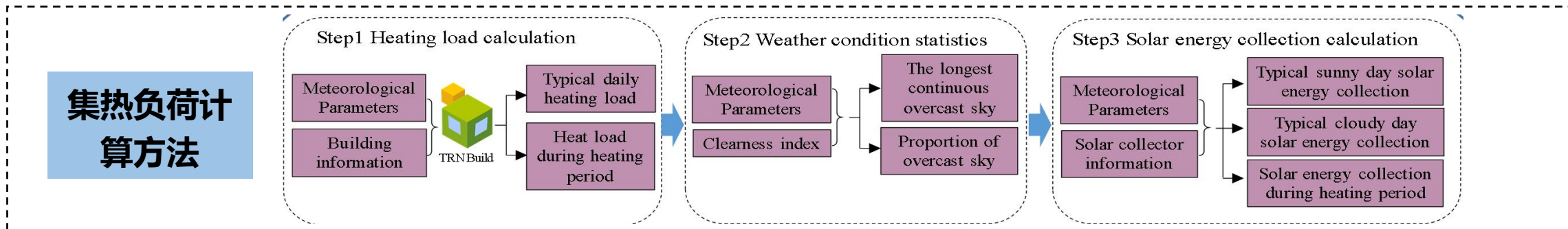
(西藏采暖季的阴雨天概率低于12%，如日喀则阴雨天概率3%；平原地区如西安阴雨天概率约为43%)

□ 冬季寒冷漫长，日较差大，供暖期长

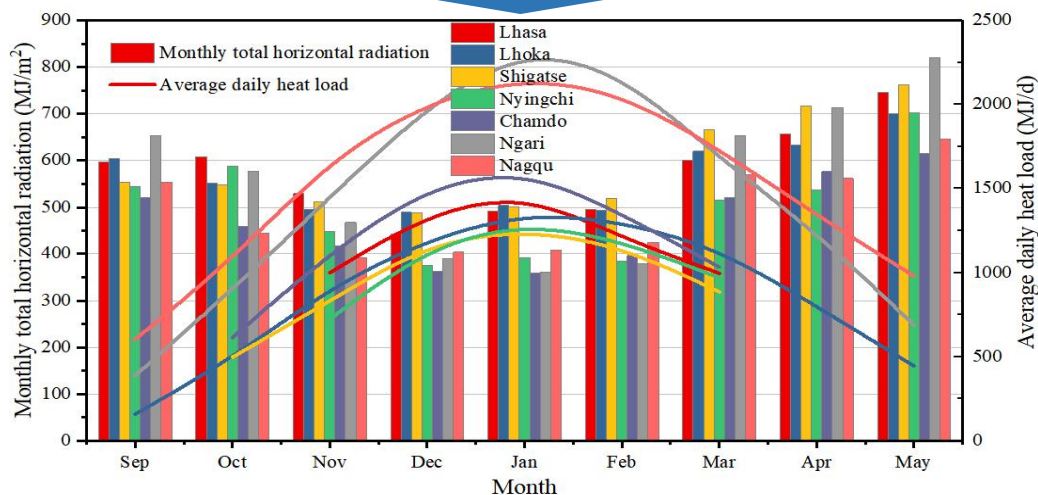
(拉萨极端最低温度-16.7℃；山南、那曲和阿里等地极端最低温度-37℃，供暖期约250天)

2.2 太阳能供暖蓄热系统设计的特征分析

■ 高原寒冷昼夜温差大，集热负荷规律波动大；冬季月总辐射量大、热负荷均值高



短周期蓄热规律

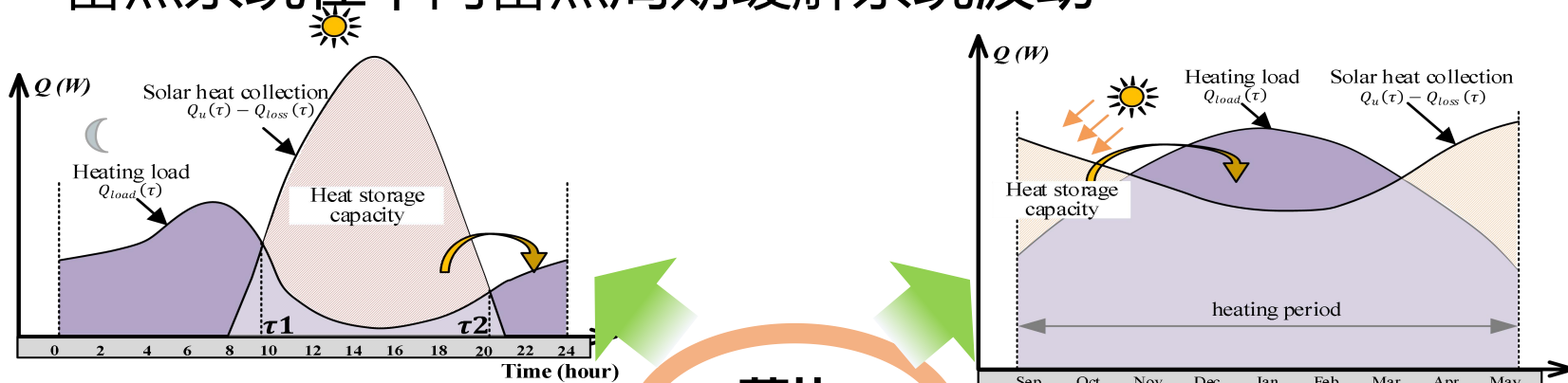


长周期蓄热规律

解决青藏高原的太阳能供暖蓄热问题，我们应真正从实际出发，不能照抄以往经验

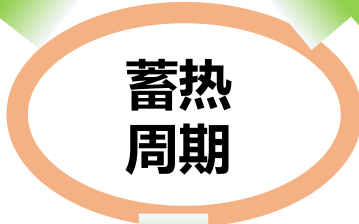
2.2 太阳能供暖蓄热系统设计的特征分析

蓄热系统在不同蓄热周期缓解系统波动



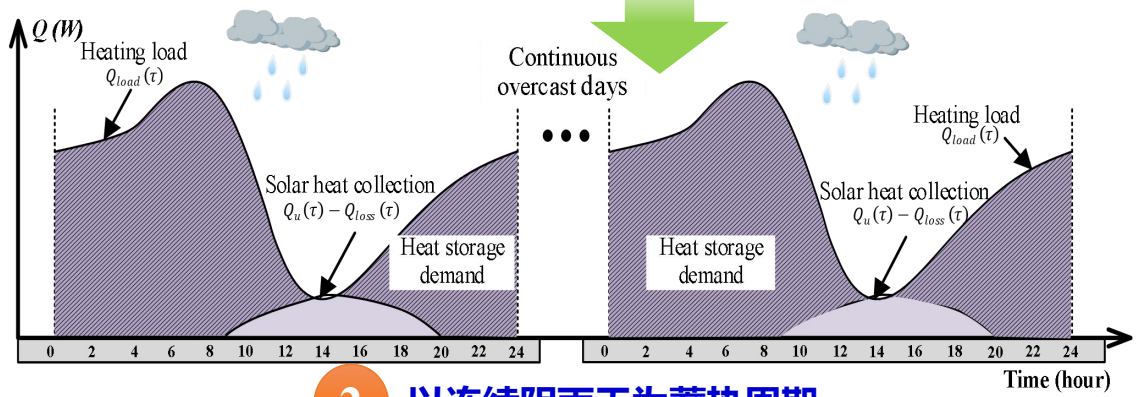
1 以典型日为蓄热周期

3 以采暖季为蓄热周期



典型日:
平衡昼夜间的集热量和热负荷;
蓄热水箱温度单日波动20~30°C

连续阴雨天:
在采暖期安全度过连续阴天的蓄热周期 (约3~7天); 蓄热水箱单日温度波动约5°C左右

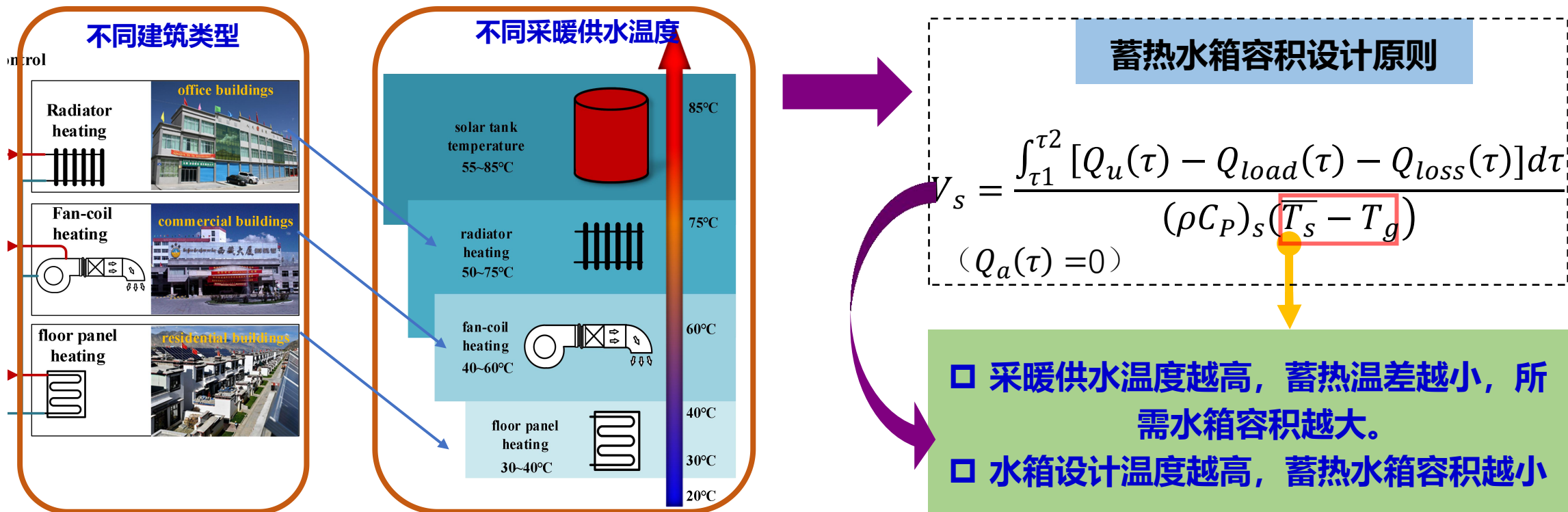


2 以连续阴雨天为蓄热周期

采暖季:
采暖季初期蓄存热量以平衡整个采暖期波动; 蓄热水箱单日平均水温波动不明显, 非采暖期蓄热水箱自然降温

2.2 太阳能供暖蓄热系统设计的特征分析

- 蓄热温差由采暖供水温度和蓄热水箱设计温度决定
- 不同建筑类型适宜不同的采暖末端，采暖末端对应的工作温度决定蓄热温差，从而影响蓄热水箱容积。



Contents 报告提纲

- 一、太阳能蓄热系统设计存在的问题
- 二、太阳能供暖蓄热系统设计原则与要点
- 三、高原太阳能蓄热损失及保温实用设计方法**
- 四、结论

3.1 太阳能蓄热水箱/罐体热损影响机制

蓄热系统容积设计原则

$$V_s = \frac{\int_{\tau_1}^{\tau_2} [Q_u(\tau) - Q_{load}(\tau) - Q_{loss}(\tau)] d\tau}{(\rho C_p)_s (\bar{T}_s - T_g)} \quad (Q_a(\tau) = 0)$$

蓄热损失明确, 修正蓄热容积

蓄热容积确定,
决定蓄热表面积

蓄热罐体热损计算原则

$$Q_{loss,all} = \int_{\tau_1}^{\tau_2} \left\{ \sum_{j=1}^N A_{Sj} U_{Sj} [t_{tank,j}(\tau) - t_a(\tau)] \right\} d\tau$$



(1) 蓄热时间的影响

- 供暖时期
- 非供暖期、预热期

(2) 蓄热水箱表面积

- 蓄热形式
- 蓄热水箱体形系数、高径比

(3) 蓄热罐体表面热损系数

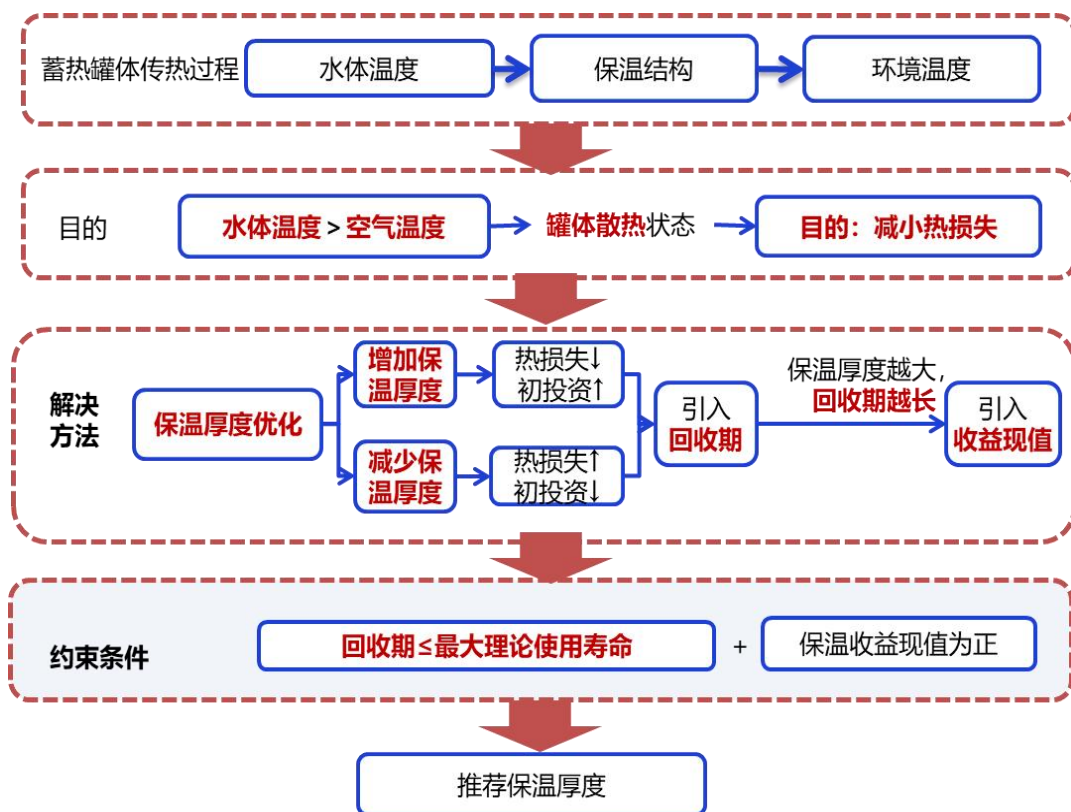
- 高海拔极端气候下热损系数
- 保温材料及厚度
- 非均匀保温

(4) 蓄热工质与环境温差

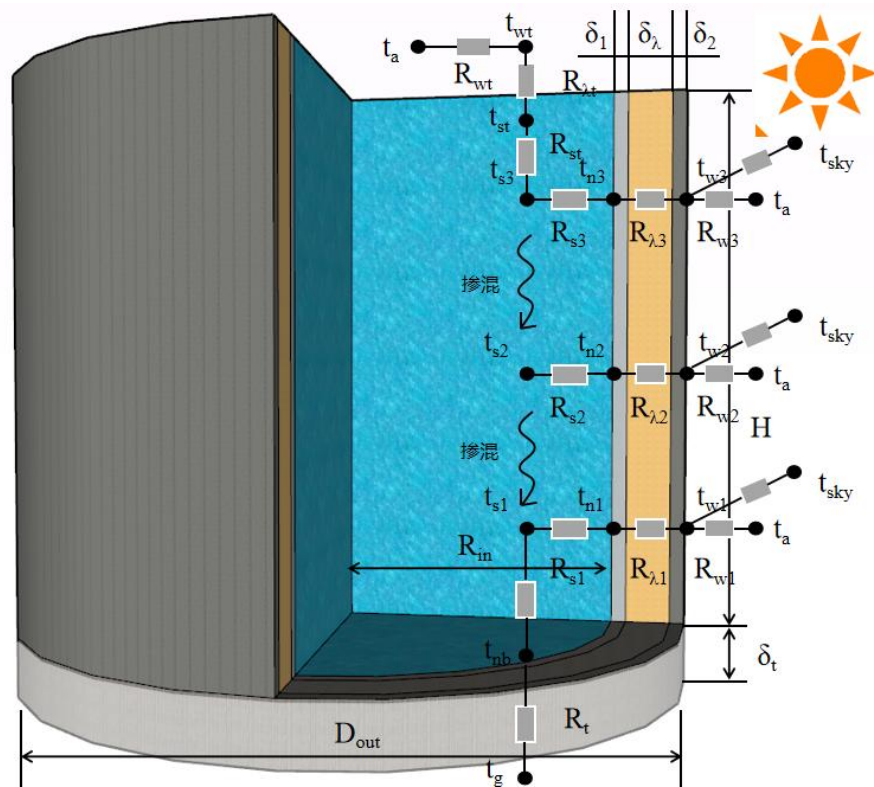
- 罐体内部各节点水温变化规律
- 外界环境温度变化规律

3.3 太阳能蓄热水箱/罐体热损失特征分析

蓄热水箱/罐体热损失的保温优化，受保温材料初投资、保温收益及使用寿命的影响



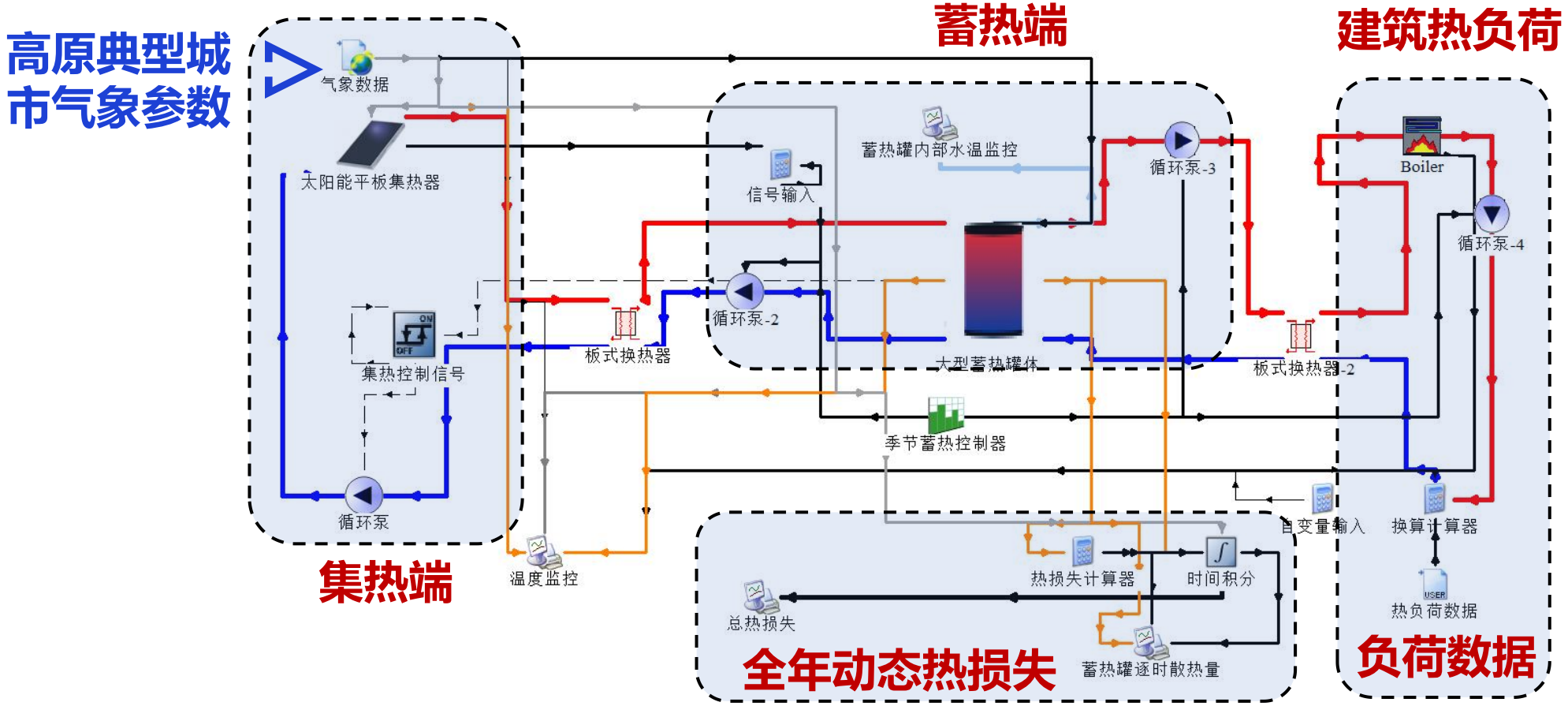
蓄热罐保温优化设计思路



蓄热罐热阻网络图

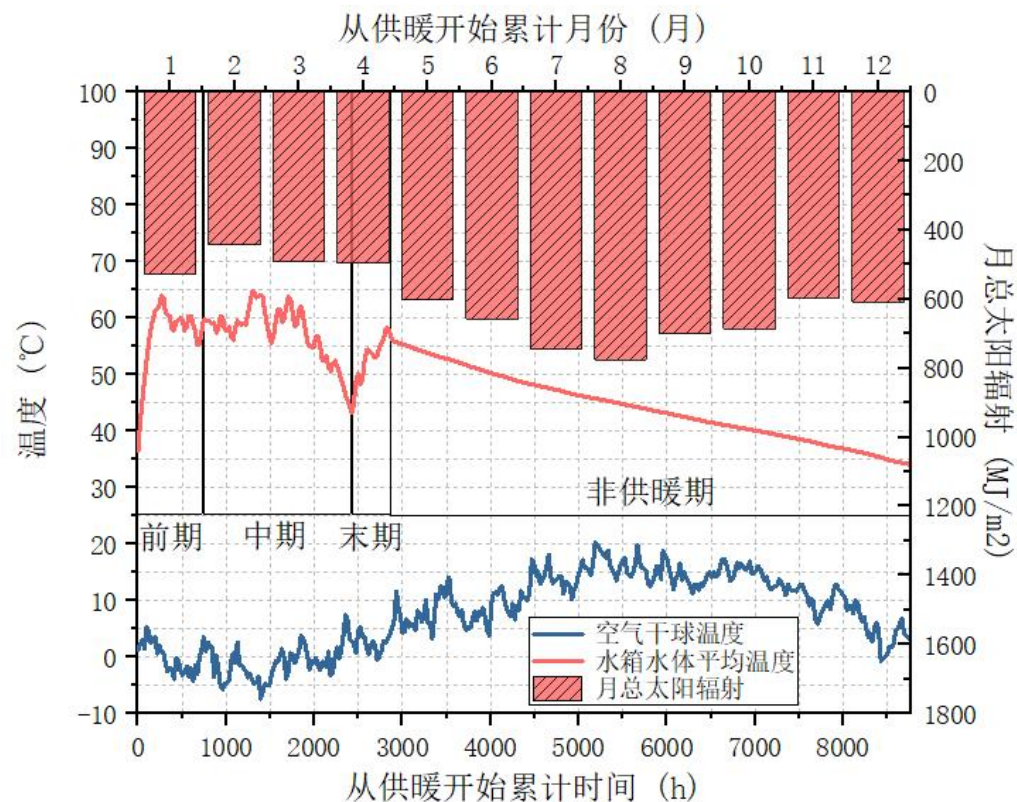
3.3 太阳能蓄热水箱/罐体热损失特征分析

- 通过TRNSYS建立太阳能集、蓄、用热系统仿真模型，分析太阳能蓄热体温度变化规律，得到热损失变化特征



3.3 太阳能蓄热水箱/罐体热损失特征分析

- 通过TRNSYS分析了典型年工况下蓄热体水温变化情况
- 将水温变化分为了蓄热前期，蓄热中期，蓄热末期以及非供暖期四个阶段来分析水体温度变化规律





3.4 高原太阳能蓄热体保温实用设计

通过技术经济分析得到高海拔地区大型太阳能蓄热罐体保温设计方法

防腐性能	聚氨酯 > 岩棉 > 橡塑		
防水性能	岩棉 > 聚氨酯 > 橡塑		
导热系数	岩棉[0.044W/(m·K)] > 橡塑[0.034W/(m·K)] > 聚氨酯 [0.024W/(m·K)]		
密度	岩棉(150kg/m ³) > 聚氨酯(50kg/m ³) > 橡塑(45kg/m ³)		
比热容	橡塑[1700J/(kg·K)] > 聚氨酯[1380J/(kg·K)] > 岩棉[750J/(kg·K)]		
高原地区保温材料价格	聚氨酯(a ₁ 元/m ³)	橡塑(b ₁ 元/m ³)	岩棉(c ₁ 元/m ³)
高原地区使用寿命	聚氨酯(a ₂ 年)	岩棉(b ₂ 年)	橡塑(c ₂ 年)

注：以拉萨地区为例，其保温材料价格根据拉萨市面平均价格取值，a₁取400，b₁取380，c₁取330；使用寿命a₂取20，b₂取20，c₂取20

保温选取原则：在水箱外壁不设外保护层的情况下优先选择聚氨酯保温，其次岩棉，最后橡塑；若设外保护层，则都可选择

3.4 高原太阳能蓄热体保温实用设计

基于高原蓄热装置保温材料厚度确定方法，给出了不同地区不同容积蓄热水箱推荐保温厚度值

拉萨地区推荐取值

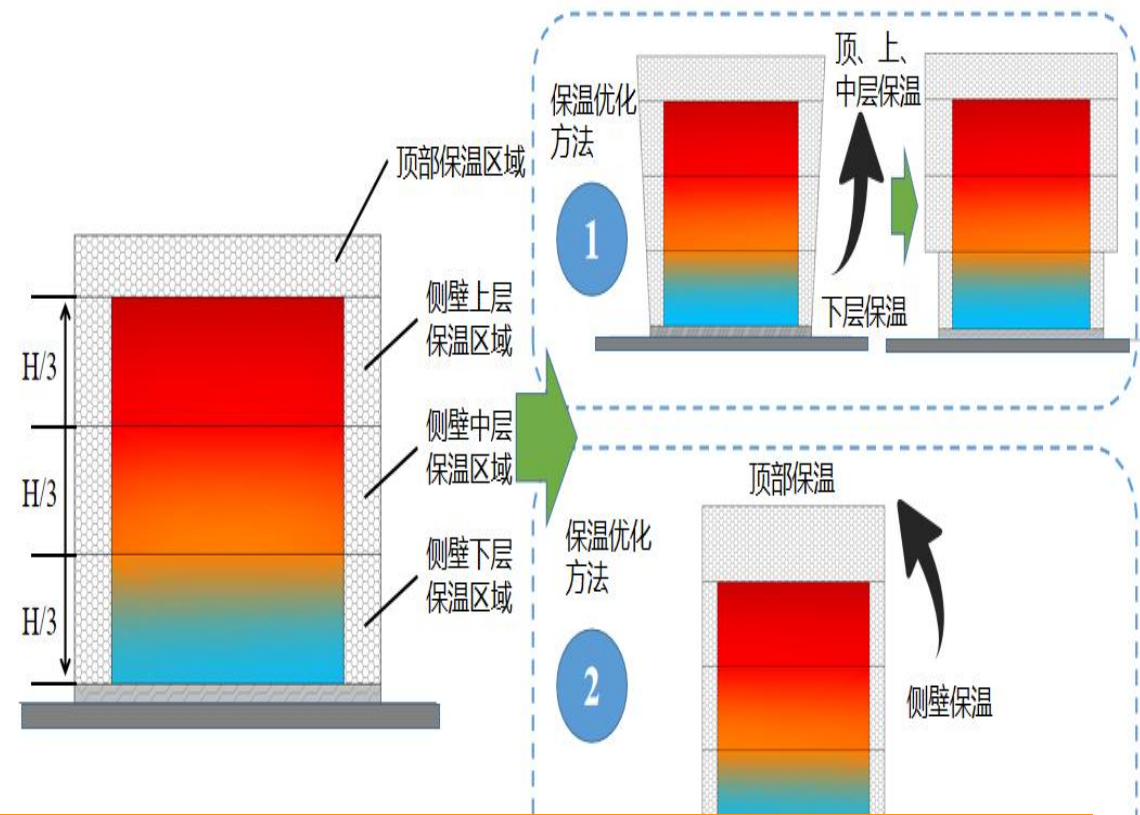
林芝地区推荐取值

西宁地区推荐取值

蓄热罐体积/(m ³)	集热面积/(m ²)	保温材料及推荐厚度			蓄热罐体积/(m ³)	集热面积/(m ²)	保温材料及推荐厚度			蓄热罐体积/(m ³)	集热面积/(m ²)	保温材料及推荐厚度		
		聚氨酯	橡塑	岩棉			聚氨酯	橡塑	岩棉			聚氨酯	橡塑	岩棉
5000	0~6000	50mm	50mm	70mm	5000	0~6000	40mm	40mm	50mm	5000	0~6000	50mm	50mm	60mm
	6000~10000	70mm	70mm	90mm		6000~10000	50mm	60mm	70mm		6000~10000	70mm	70mm	90mm
	10000~16000	70mm	80mm	100mm		10000~16000	60mm	60mm	80mm		10000~16000	80mm	80mm	110mm
10000	0~12000	70mm	70mm	90mm	10000	0~12000	50mm	50mm	60mm	10000	0~12000	60mm	60mm	80mm
	12000~20000	70mm	70mm	100mm		12000~20000	60mm	60mm	80mm		12000~20000	80mm	80mm	110mm
	20000~32000	80mm	80mm	110mm		20000~32000	70mm	60mm	90mm		20000~32000	80mm	90mm	110mm
15000	0~18000	70mm	70mm	90mm	15000	0~18000	50mm	50mm	70mm	15000	0~18000	80mm	80mm	110mm
	18000~30000	70mm	80mm	100mm		18000~30000	60mm	70mm	90mm		18000~30000	80mm	90mm	110mm
	30000~48000	80mm	80mm	110mm		30000~48000	70mm	70mm	90mm		30000~48000	90mm	100mm	130mm

3.4 高原太阳能蓄热体保温实用设计

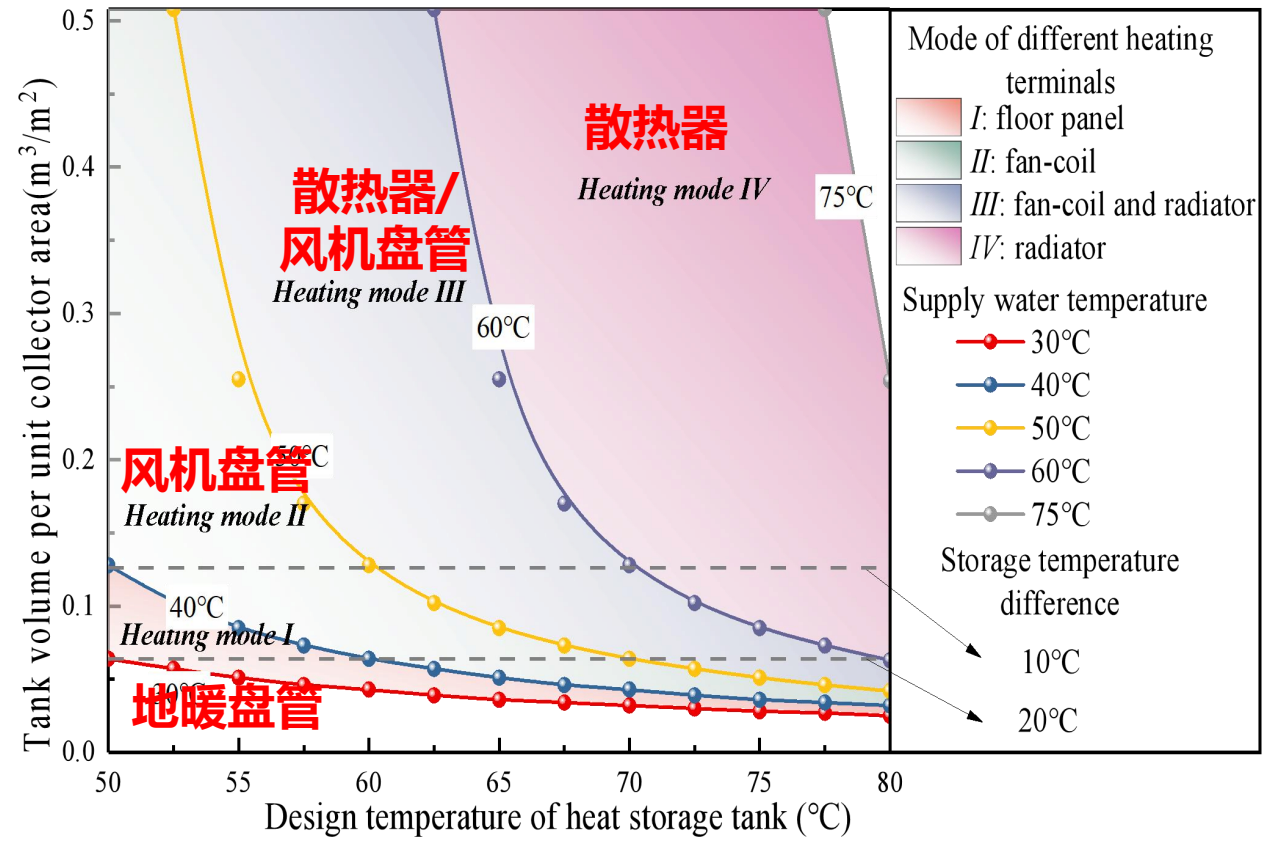
基于水箱上下节点的温度差异，提出了差异化水箱保温方法，对水箱保温进行再优化



在均匀保温基础上，上将下层保温厚度25%~50%的保温用量附加到中上层和顶部，进一步节能效果可达到15%

2.3 高原太阳能蓄热实用选型设计

不同蓄热周期及不同采暖末端形式的蓄热容积推荐范围



不同末端形式单位集热面积的蓄热容积

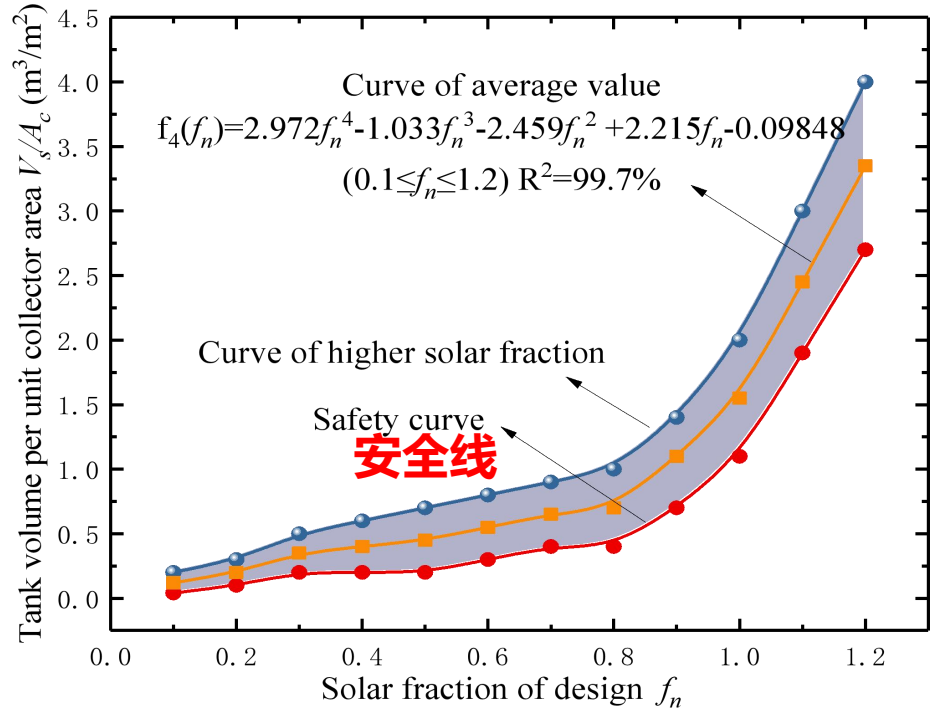
城市	典型天 (m³/m²)	连续阴雨天 (m³/m²)	采暖季 (m³/m²)
Lhasa	0.064~0.128	0.40~0.81	0.5~0.7
Lhoka	0.068~0.137	0.45~0.90	0.6~1.2
Shigatse	0.069~0.138	0.10~0.21	0.9~1.3
Nyingchi	0.060~0.120	0.11~0.22	0.5~0.8
Chamdo	0.056~0.112	0.32~0.65	0.7~1.0
Ngari	0.057~0.113	0.27~0.55	1.6~1.8
Nagqu	0.058~0.116	0.34~0.69	1.1~1.2
GB50495-2019	0.04~0.3		≥1.5

研究结果与规范对比

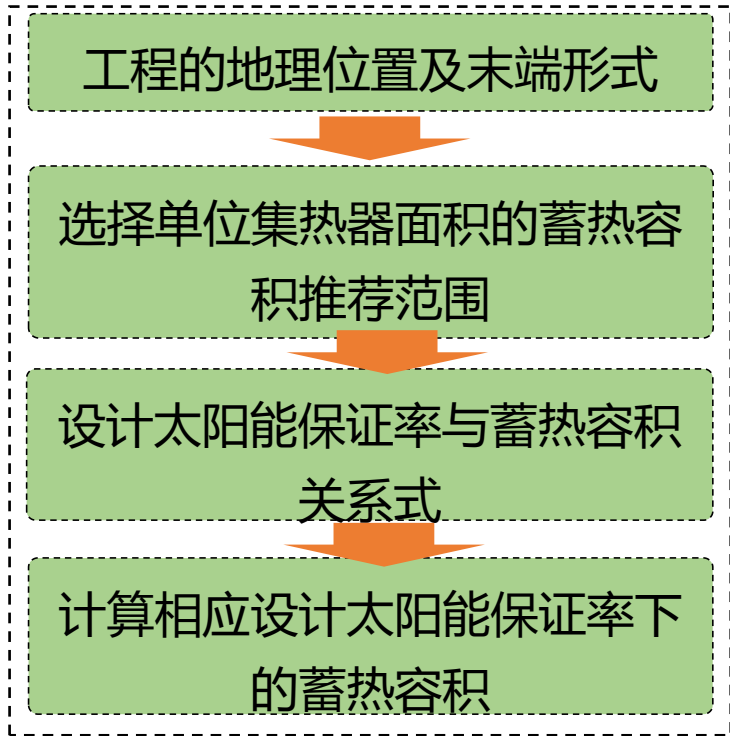
得到了不同蓄热周期、不同采暖末端形式适宜的蓄热容积范围；与规范相比，进一步**精细化了高原地区的蓄热容积选型范围**

2.3 高原太阳能蓄热实用选型设计

实际工程中设计太阳能保证率 $f_n \neq 1$ ，以保障系统安全性（不过热）及较高的太阳能出力的容积均值进行拟合，得到设计太阳能保证率与蓄热容积的关系式



设计太阳能保证率与蓄热容积的关系图



研究结果在蓄热设计时的应用流程

提出并形成了适用于实际工程的蓄热容积选型设计完整链条

Contents 报告提纲

- 一、太阳能蓄热系统设计存在的问题
- 二、太阳能供暖蓄热系统设计原则与要点
- 三、高原太阳能蓄热损失及保温实用设计方法
- 四、结论**

结论

- 太阳能集热系统是热量收集的关键，但是蓄热系统是热量的“调节器”，是系统**可靠稳定运行的基础**；
- 蓄热容量设计是太阳能热水蓄热系统设计的关键，精细化设计水箱容量可有效避免过热、蓄热温度低等现象的发生；
- 青藏高原太阳能供热系统蓄热水箱的保温优化设计同样重要。

谢谢大家！

wangdengjia@xauat.edu.cn

