

我国建筑节能发展态势和未来路径

江亿

清华大学建筑节能研究中心

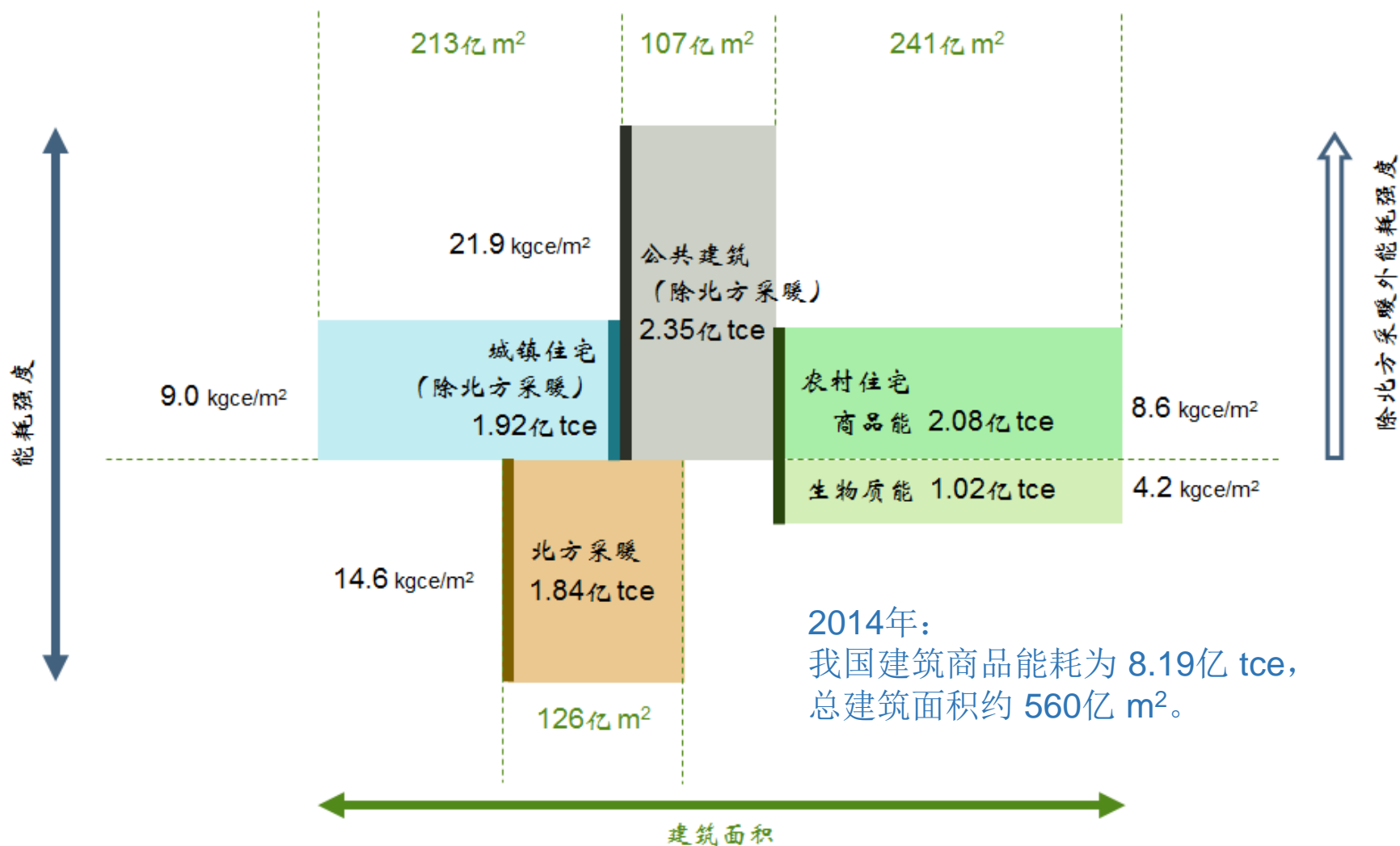
主要内容

- 我国建筑能耗现状
 - 能耗现状
 - 各类建筑用能走向
 - 中外建筑能耗对比，我国建筑能耗低的原因
 - 实现中国建筑节能的途径：发扬传统美德，不搞“奇奇怪怪的建筑”
- 当前的能源、低碳形势和任务
 - 低碳的总量控制和发展可再生能源的要求
 - 治理大气，打赢蓝天保卫战
 - 北方的清洁取暖行动
 - 未来能源规划
- 从规范技术措施向规范效果的转变
 - 十八大提出的总量与强度双控
 - 建筑能耗标准的贯彻实施

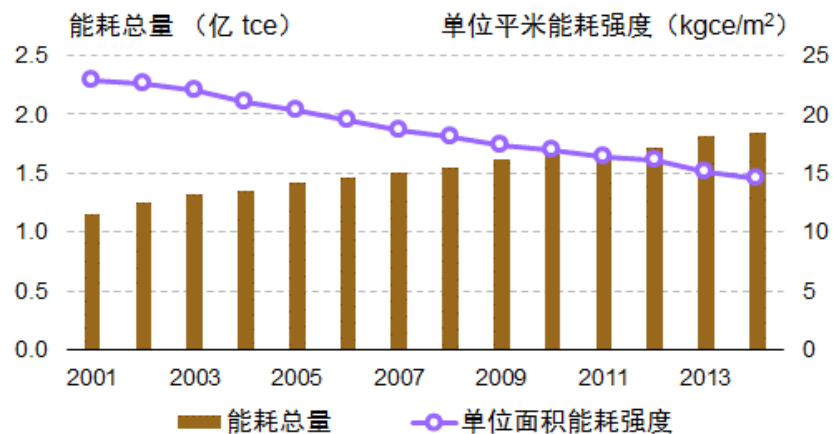
主要内容

- 贯彻落实建筑能耗标准的实施
 - 标准原理，内容
 - 应用场合：新建审查、既有建筑节能管理、碳交易、能源服务
 - 住建部“公建节能认定”标准中的问题
- 清洁取暖行动
 - 目标和途径
 - 城市的清洁取暖路径
 - 农村清洁取暖路径
- 南方城市能源系统
 - 应该发展热电冷三联供吗？
 - 区域供热供冷合适吗？

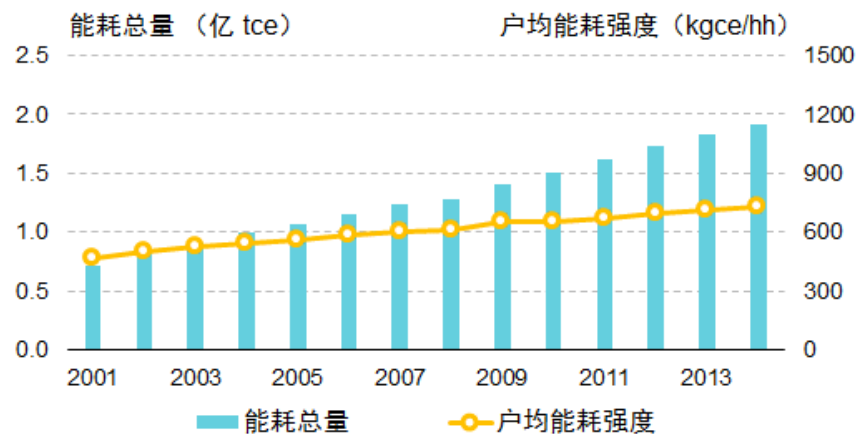
中国建筑能耗现状



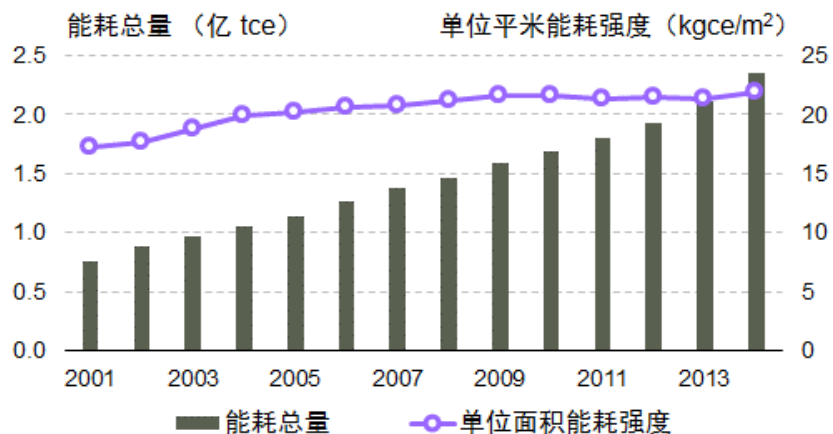
中国建筑能耗现状



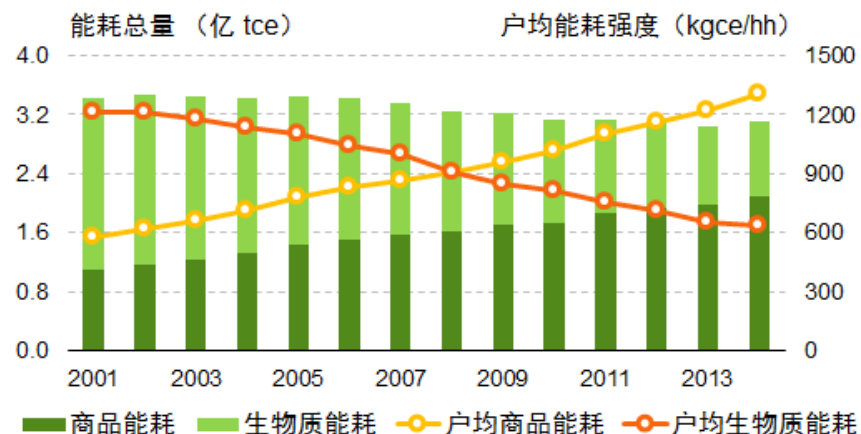
北方城镇采暖



城镇住宅 (除北方采暖)

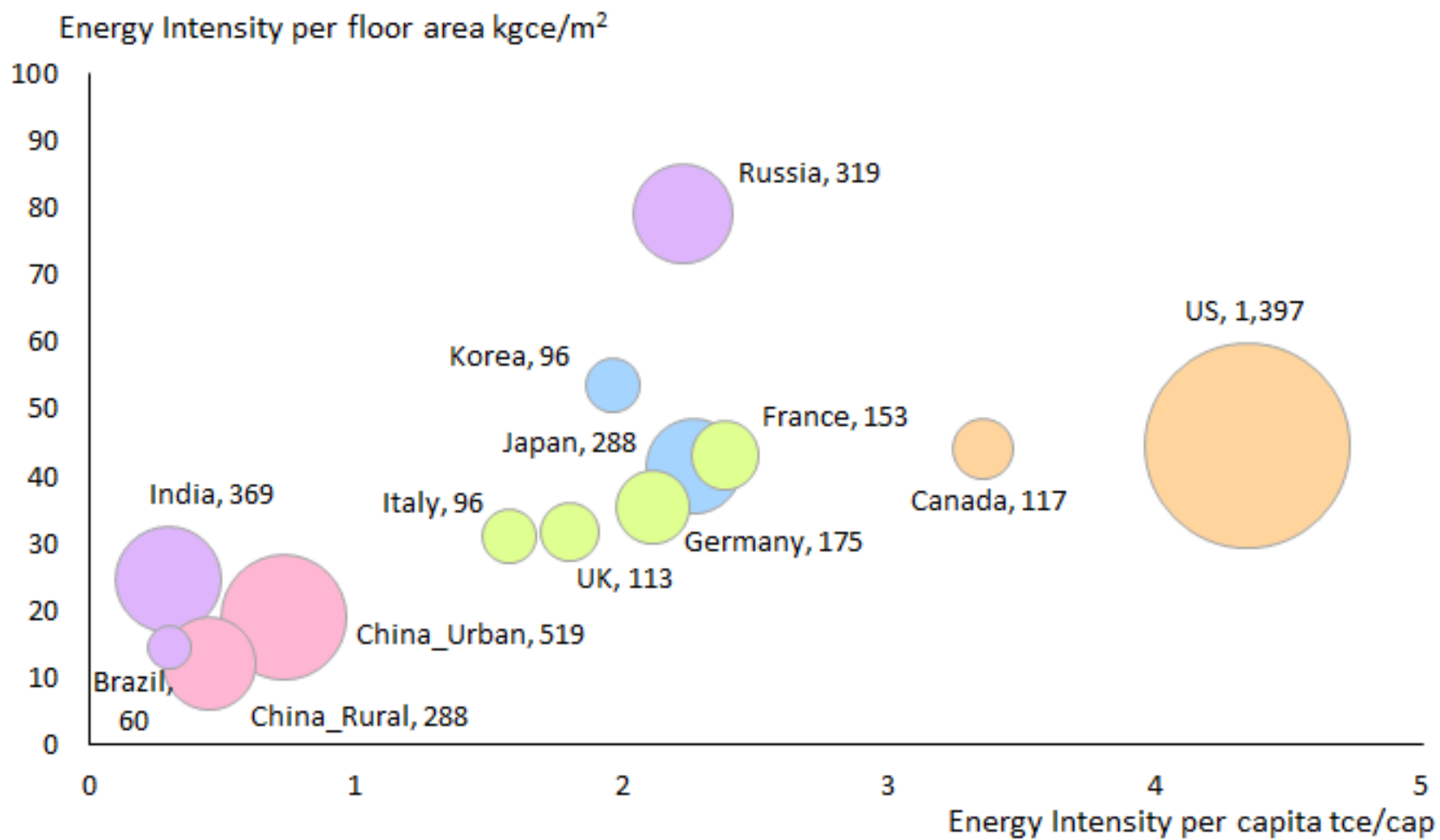


公共建筑 (除北方采暖)



农村住宅

全球建筑用能状况对比



Note: the size indicate the total building energy use (2012)

办公建筑能耗的巨大差异



Tsinghua school
4650m², 34kWh/m²·a



Tsinghua art school
64k m², 65.7kWh/m²·a



Government office A
16k m², 70.1kWh/m²·a



Government office B
37k m², 113kWh/m²·a



Towel in Shanghai
287k m², 215kWh/m²·a



Office building A, USA
6425m², 364kWh/m²·a

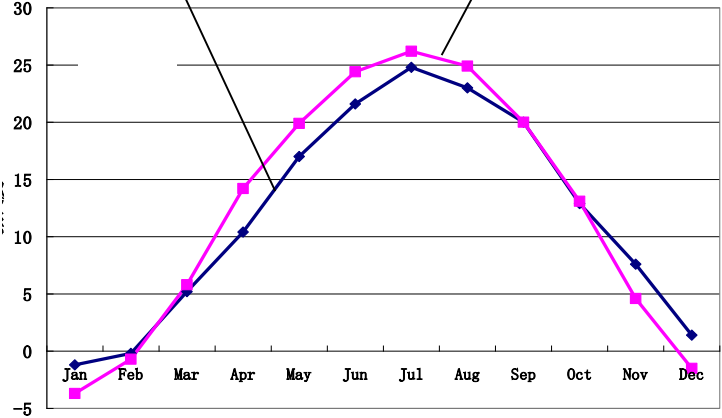
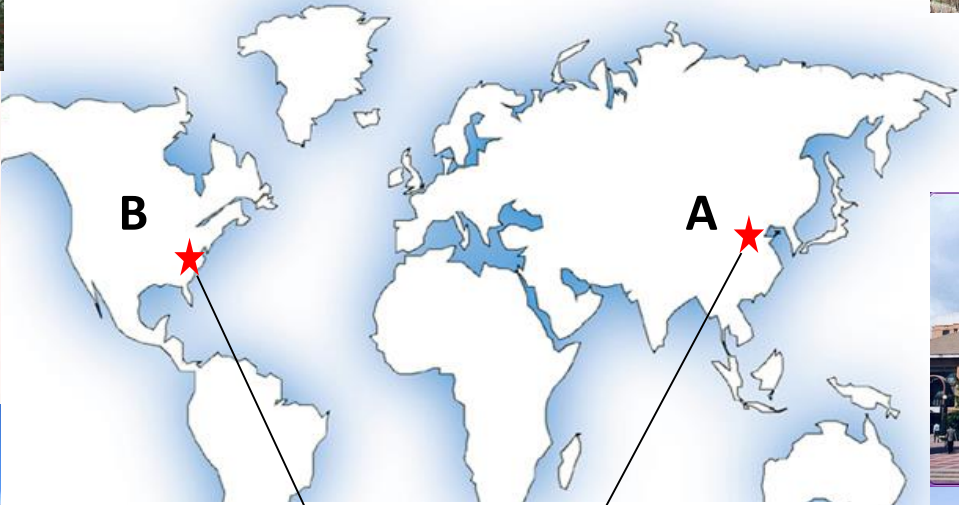
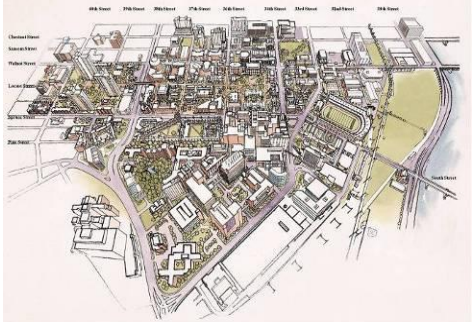


Office building B, USA
30k m², 356kWh/m²·a

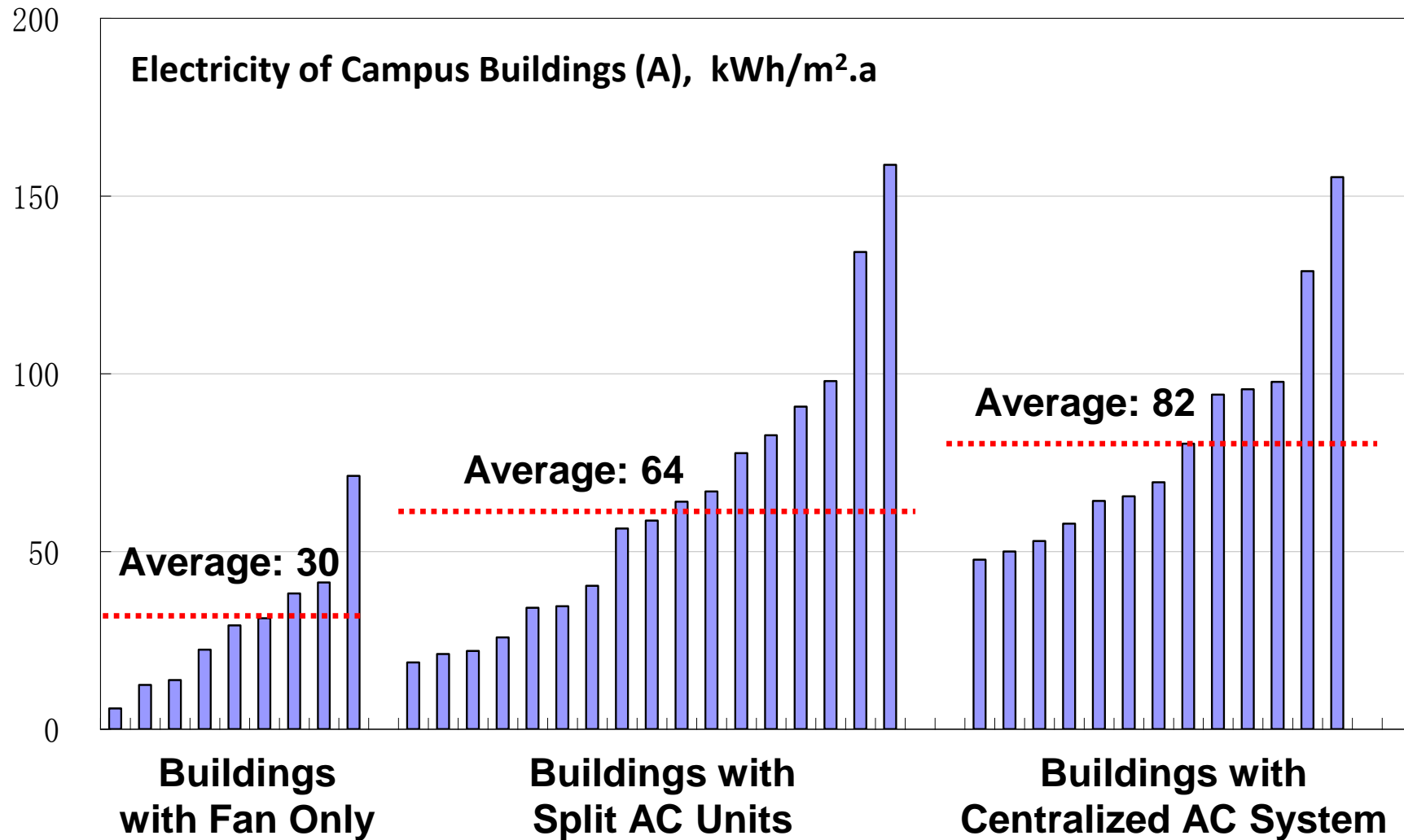


Office building, Lyon
17k m², 165kWh/m²·a

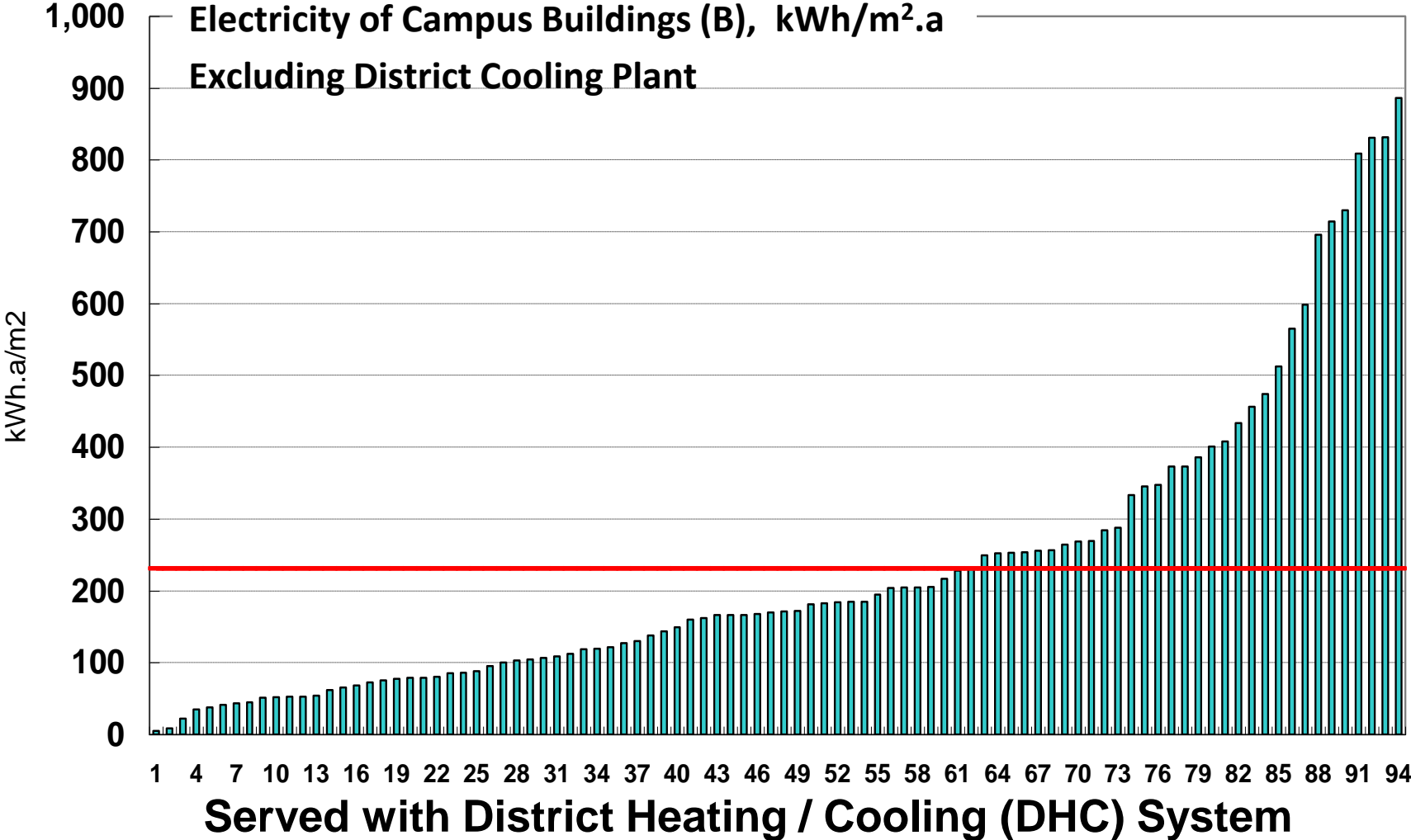
中美校园建筑能耗比较



清华大学校园建筑用电量

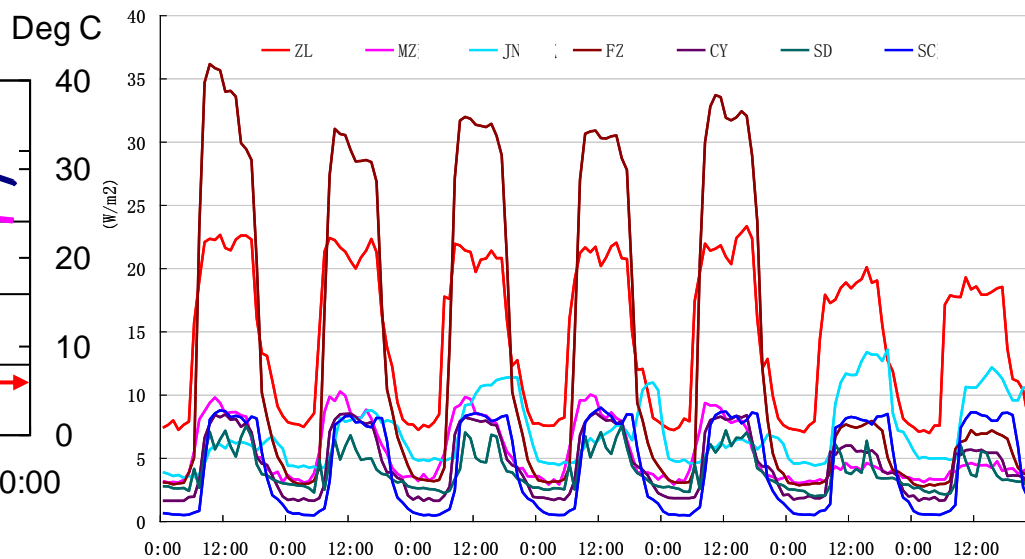
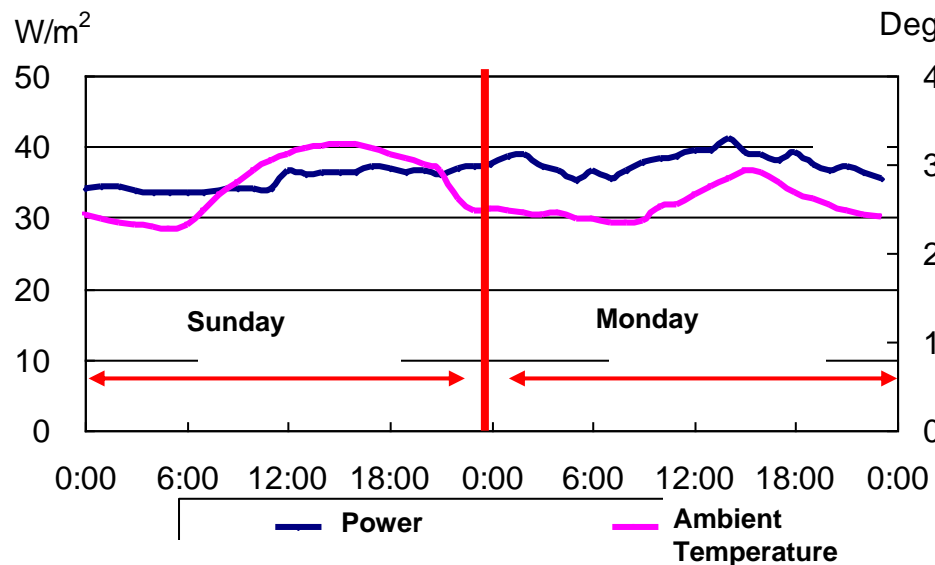


费城UPENN校园建筑用电量



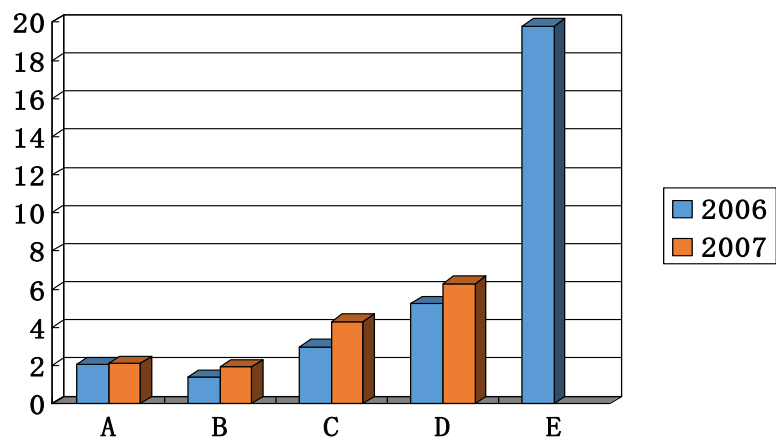
能耗巨大差别的原因

- 建筑通风的风机能耗
 - 气密性非常好的建筑: $70 \sim 110 \text{ kWh/m}^2 \cdot \text{a}$
 - 全空气系统: $30 \sim 70 \text{ kWh/m}^2 \cdot \text{a}$
 - 自然通风: $< 10 \text{ kWh/m}^2 \cdot \text{a}$
- 一天中的运行时间
- 空调系统结构与运行方式: 再热, 等



案例：北京住宅空调能耗

不同住宅楼的夏季空调能耗：kWh/m².a



A: 分体机



B: 分体机



C: 分体机



D: 一拖多

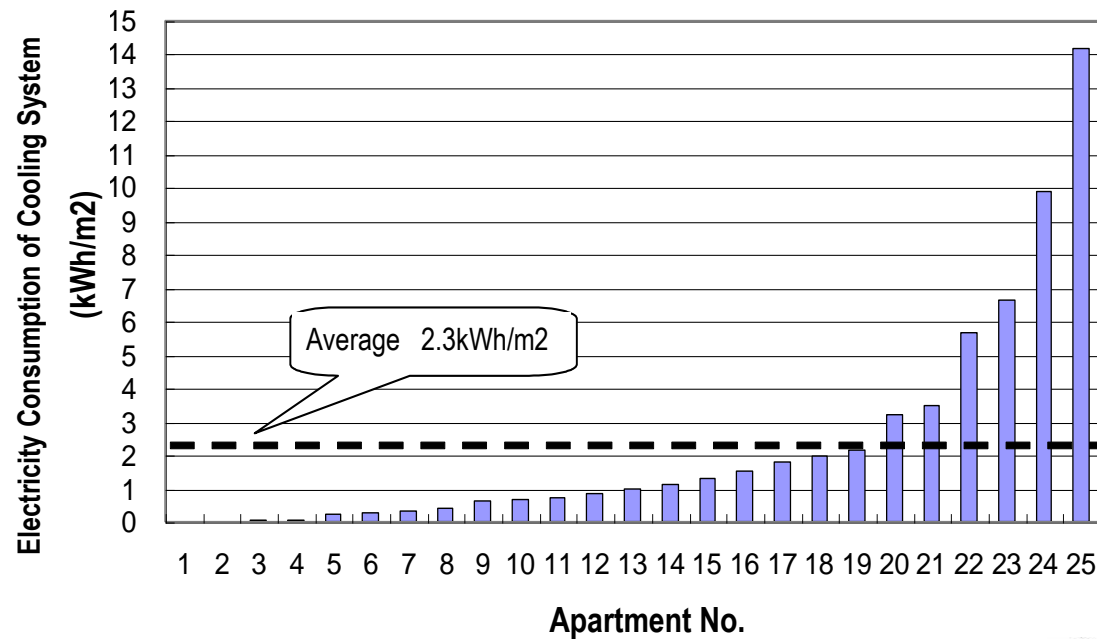


E: 中央空调



案例:北京住宅空调能耗

- The measured energy consumption of AC in every units of a residential building in Beijing,2006, split unit



中美家庭用电比较

中国家庭用电 (不包括供暖与热水) 美国家庭用电 (不包括供暖与热水)

- 中等收入家庭年用电量: <3000kWh
 - 分体空调: 300kWh (3kWh X 100 m²)
 - 照明: 300kWh (200W X 1500hr)
 - 冰箱: 700 kWh
 - 炊事电器: 1000 kWh (3kW X 300hr)
 - 洗衣机: 150kWh (200W X 750hr)
 - 电视电脑等: 400 kWh (200W X 2000)
 - 其它: 150kWh
- 中等收入家庭年用电量: ~1万kWh
 - 户式中央空调: ~3000kWh
 - 照明: 1000 kWh (500 W X 2000hr)
 - 冰柜+冰箱: 2000 kWh
 - 炊事电器 (洗碗机): 2000 kWh
 - 洗衣机(带电烘干): 1000kWh
 - 电视电脑等: 400kWh
 - 其它: 500kWh

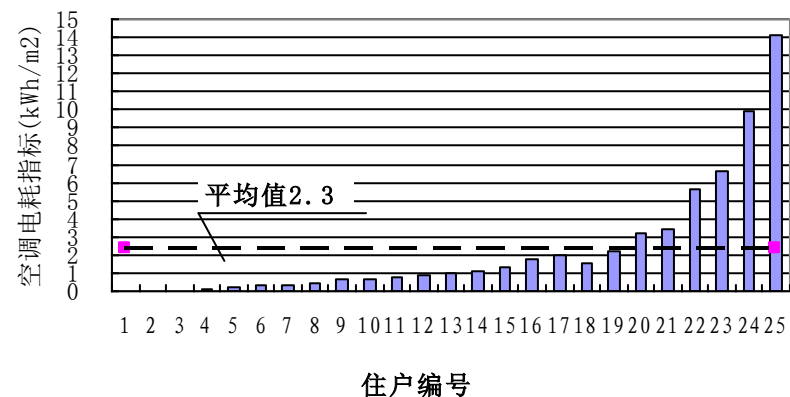
中、美、日居民生活热水用量比较

- 人均生活热水日用量：
 - 中国：~30升； 美国：~100升； 日本：~120升
- 洗浴方式：
 - 中国：淋浴为主； 美国：盆池为主； 日本：盆池为主
- 日洗浴次数：
 - 中国：不到一次； 美国：一次以上； 日本：1.5次
- 生活热水用途
 - 中国：以洗浴为主； 美国：各类日常用水； 日本：各类日常用水

住宅示范：北京某节能住宅

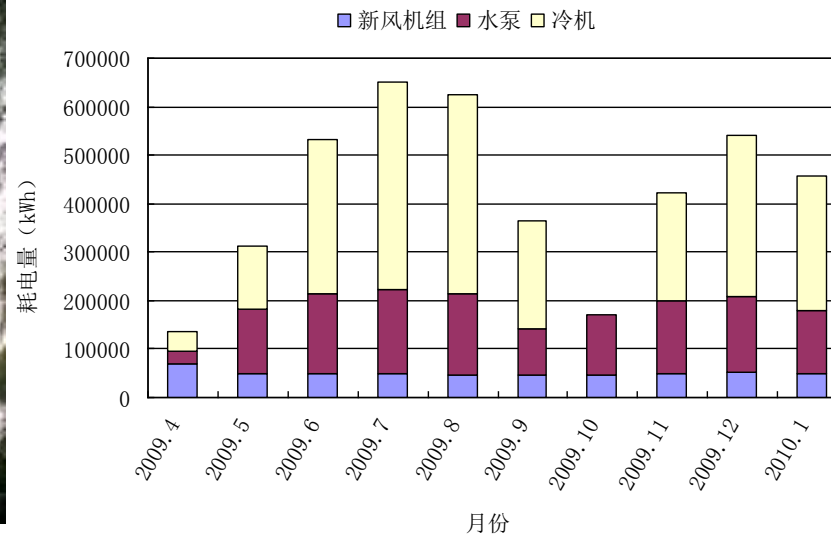


北京市某住宅楼空调能耗调查



北京某节能住宅，采用了多项世界上最好的建筑节能新技术，夏季空调能耗接近 $25\text{kWh}/\text{m}^2$ ，是一般住宅空调能耗的5-10倍

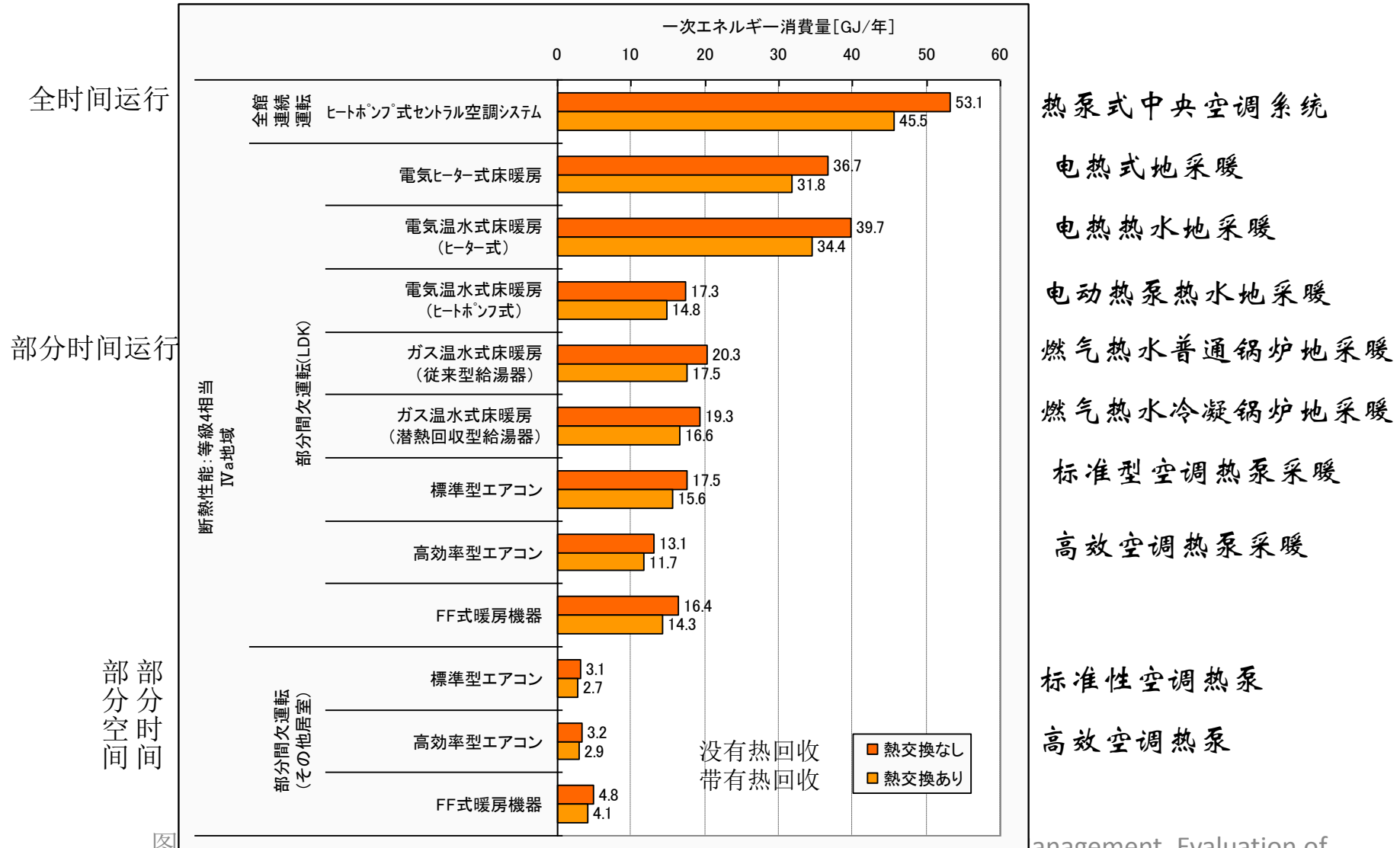
南京某节能住宅



	夏季耗电量 (5月—9月)	过渡季 耗电量 (4月、 10月)	冬季耗电 量 (11 月—3月)	总耗电 量
单位建筑面积 kWh/m ²	21.9	2.7	19.9	44.5
单位空调面积 kWh/m ²	26.5	3.2	24.0	53.7

- 地源热泵+冷辐射+地板送风+新风热回收
- 节能65%的围护结构设计
- 全年空调采暖能耗45 kWh/m², 为当地住宅能耗的3~5倍左右

日本调查发现的不同生活模式住宅采暖能耗的巨大差别



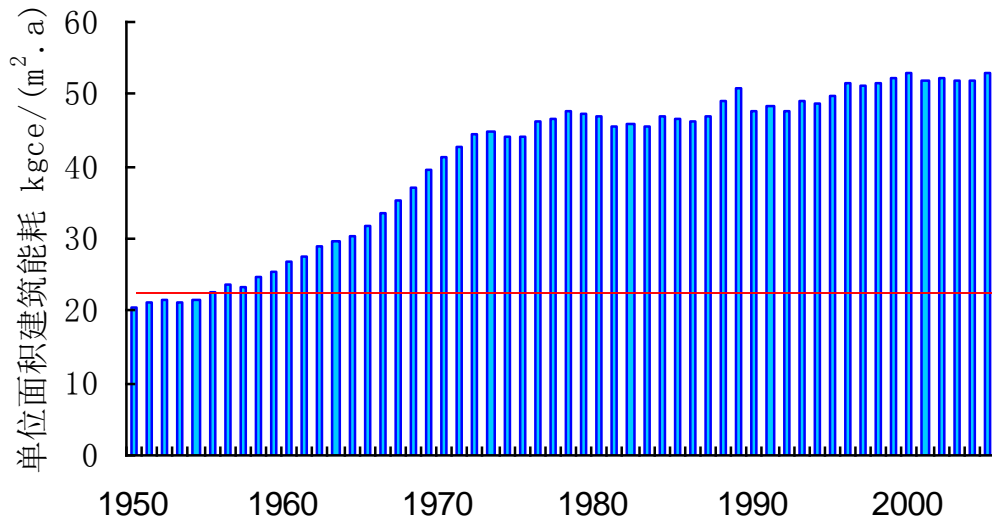
热泵式中央空调系统
 电热式地采暖
 电热热水地采暖
 电动热泵热水地采暖
 燃气热水普通锅炉地采暖
 燃气热水冷凝锅炉地采暖
 标准型空调热泵采暖
 高效空调热泵采暖
 标准性空调热泵
 高效空调热泵

图 1. 日本调查发现的住宅采暖能耗的巨大差别 (National Institute for Land and Infrastructure Management, Evaluation of Annual Energy Consumption in Residential House for Japanese Energy Efficiency Standard)

构成我国建筑用能相对较低的原因

- 传统的节约型生活模式
 - 采用“部分时间、部分空间”的系统形式
 - 开外窗，提倡自然通风
 - 相对较低的建筑服务水平
 - 未来应该是什么样的建筑，提供什么样的服务？
-
- 是“与国外接轨、三十年不落后”还是“不要搞奇奇怪怪的建筑”
 - 坚持“道路自信”、“理论自信”、“制度自信” “文化自信”

美日单位建筑面积能耗的发展变化

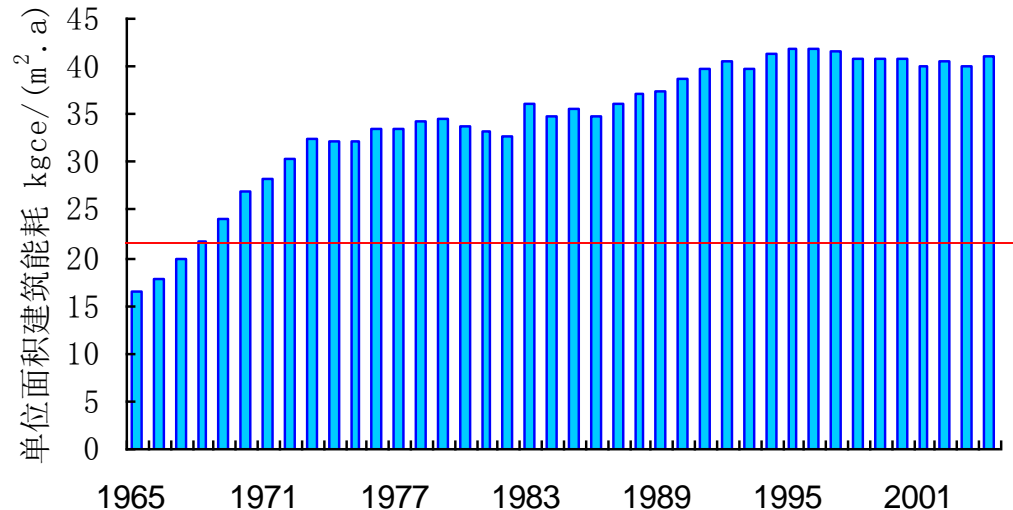


China current level

USA: kgce/m².a

美国上世纪70年代建筑节能技术远优于50年代，为什么单位面积能耗增长一倍？
日本上世纪90年代建筑节能技术显著优于60年代，为什么单位建筑面积能耗翻番？
技术的改进促进了需求增长，改变了建筑使用模式，导致最终能耗翻番

Japan: kgce/m².a

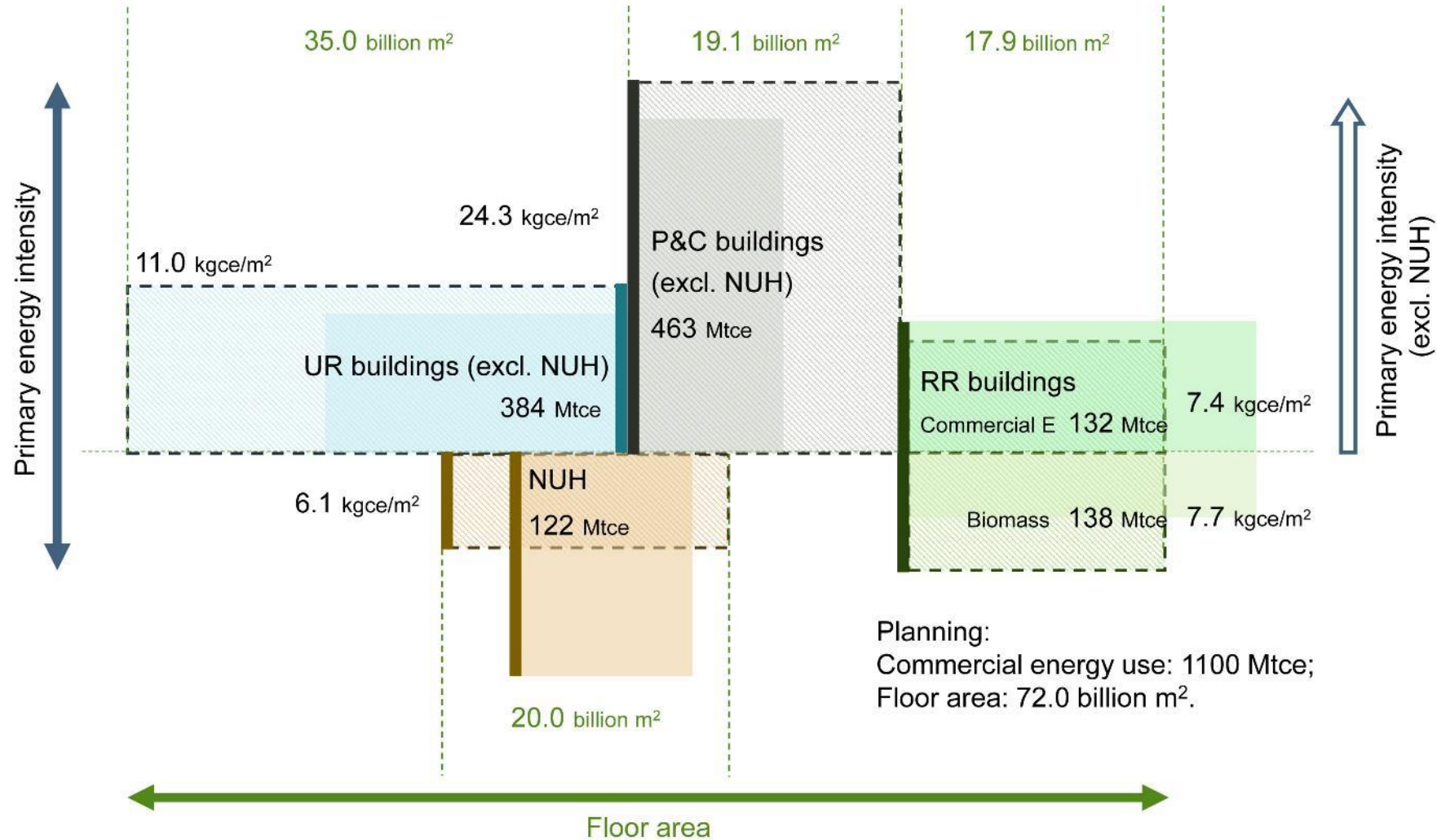


实现中国建筑节能的途径

- 从“措施导向”转为“效果约束”
 - 能源节约要实行总量和强度的双控
 - 从生态文明的理念出发，既要提高效率，又反对过度消费
 - 继承和坚持中国节俭的优良传统，开辟中国建筑节能新模式
- 不同于发达国家的室内环境营造的模式
 - “部分时间、部分空间”的室内环境营造
 - 系统形式：分散优先、尽可能不要集中
 - 由末端使用者主动地营造室内环境，而不是被动地接收服务
 - 被动优先，减少需求；主动优化，提高效率

		北方采暖	城镇住宅	公共建筑	农村住宅	总计
目前 510亿m ²	保有量	106亿m ²	2.49亿户	83亿m ²	1.66亿户	6.9亿 tce
	能耗强度	16.1kgce/m ²	670kgce/户	22.1kgce/m ²	1040kgce/户	
	总能耗	1.71亿tce	1.67亿tce	1.84亿tce	1.72亿tce	
情景1: 600亿 m ²	保有量	150	3.5	120	1.34	8.3亿 tce
	能耗强度	10	830	20	1120	
	总能耗	1.5	2.9	2.4	1.5	
情景2: 800亿m ²	保有量	210	3.5	150	1.34	11亿tce
	能耗强度	10	1110	20	1500	
	总能耗	2.1	3.9	3.0	2.0	

Target of China's building energy use



几个热点问题讨论

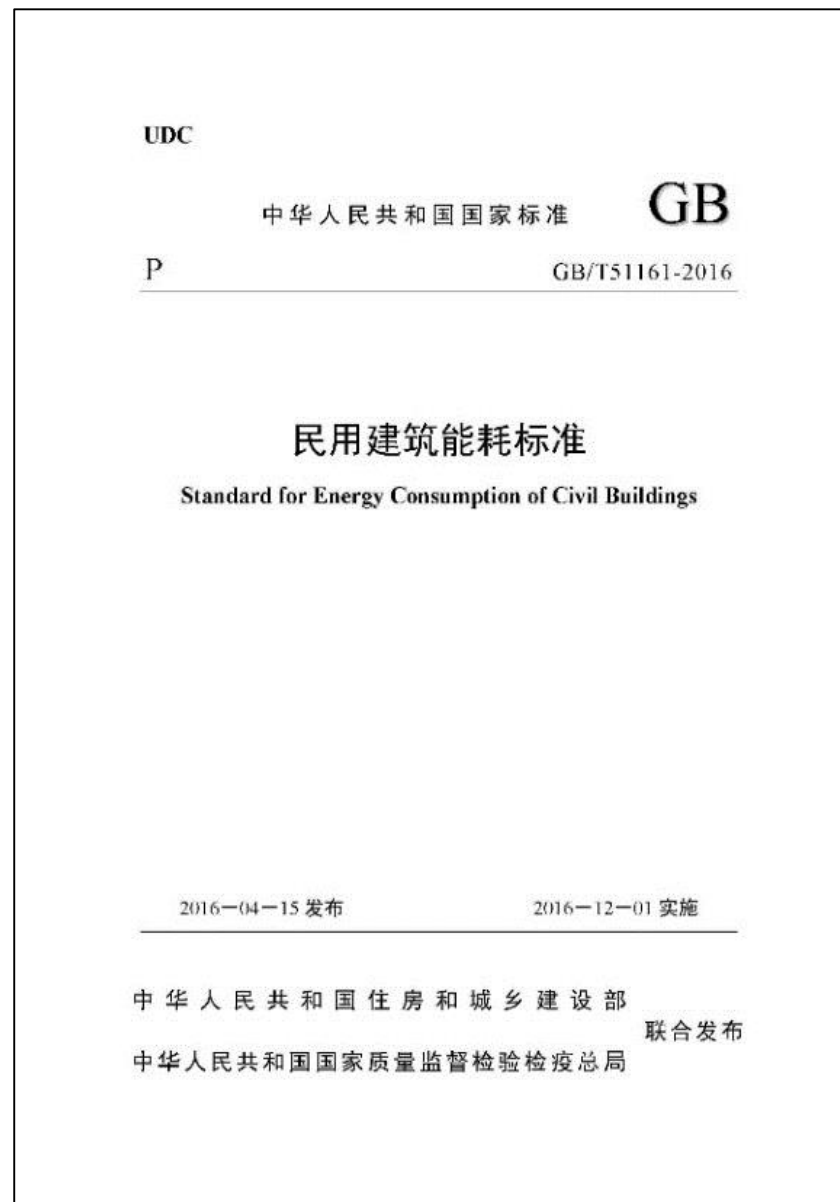
- 从规范技术措施向规范效果的转变
- 清洁取暖行动
- 南方地区的热电冷三联供和区域能源系统

从规范技术路线到规范最终效果的转变

- 十八大提出“能源节约要实行总量与强度双控”
- 提高“能效”还是降低“能耗”？
 - 在工业生产中，提高能效就是追求同样产量和质量下降低能源消耗
 - 在服务系统，如建筑运行领域，高能效不一定低能耗。
 - “部分时间、部分空间”运行供暖空调系统，与“全时间、全空间”相比，
 - 盲目提高冬天供暖温度，降低夏天空调温度，高能效的同时确是高能耗
 - 实现建筑节能目标，需要提高能效、适度消费反对奢华，这两方面的努力
- 从规范技术路线转变为规范最终效果
 - 节能30%， 50%， 75%： 是以采用了什么技术措施为基准，与实际能耗无关
 - 全面采用围护结构保温措施，可以显著降低冬季供暖能耗，但对其它能耗无影响
 - 应该以实际用能量为约束目标，追求实际能耗的真正降低

《民用建筑能耗标准》

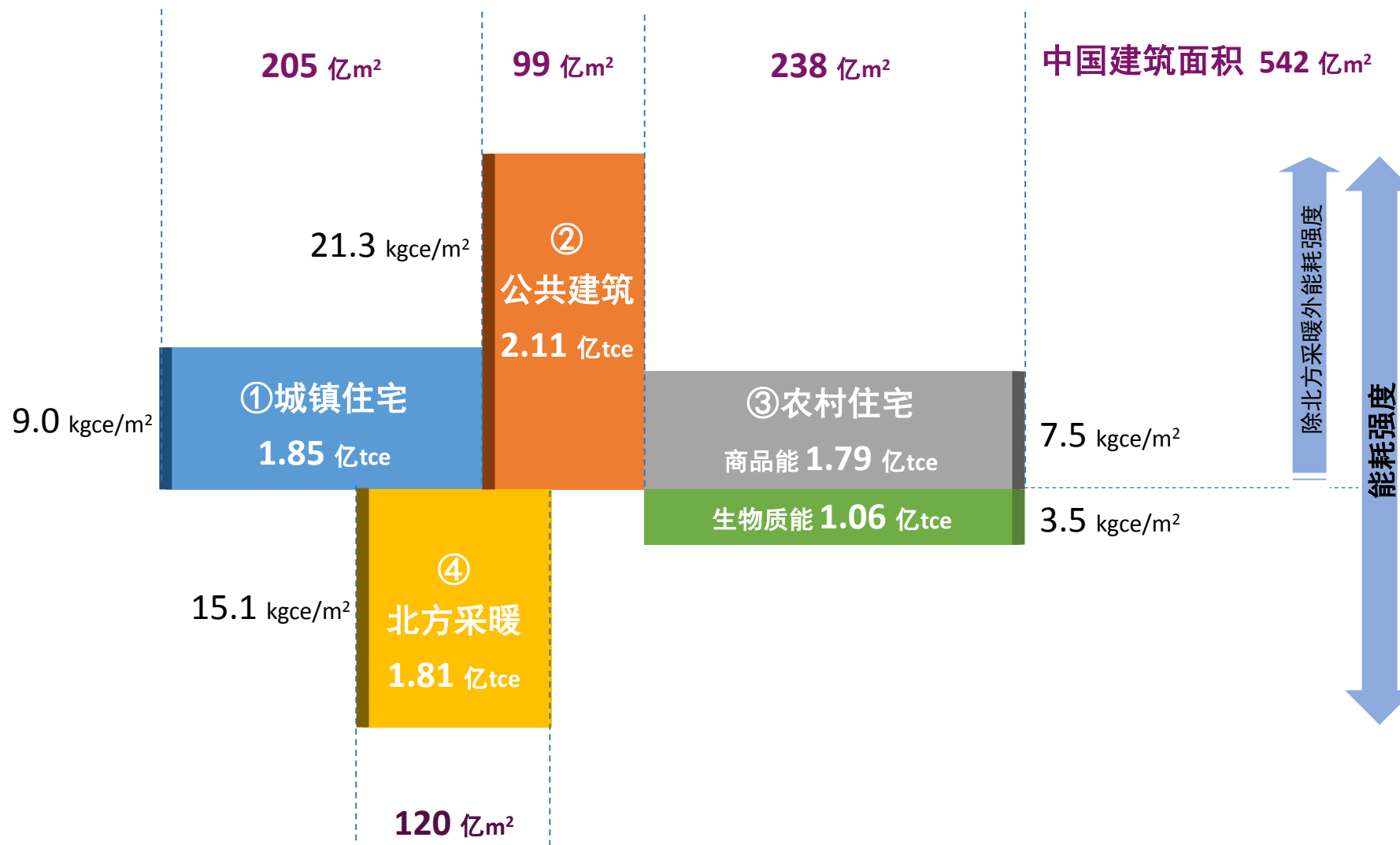
- 国家标准《民用建筑能耗标准》（GB/T51161-2016）于2016年12月1日起生效实施。



标准编制的基本考虑

- 建筑用能被分为四大部分：
 - 北方城镇采暖用能（单位面积用能指标）
 - 城镇住宅（不含北方城镇采暖）用能（每户用能指标）
 - 公共与商业建筑（不含北方城镇采暖）用能（单位面积用能指标）
 - 农村住宅建筑（每户用能指标）暂时不列入标准
- 只给用能指标（单位面积，一户），不给总量。

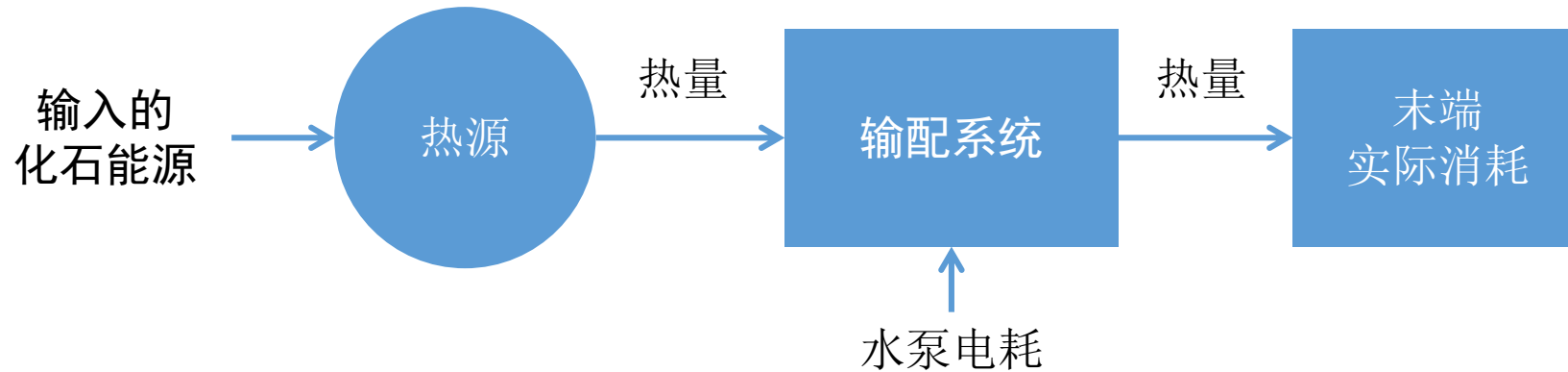
标准编制的基本考虑



标准编制的基本考虑

- 每个用能指标都给出约束值、目标值：
 - 约束值：必须满足的用能指标，超过者需要整改
 - 目标值：可以称为“节能建筑”的能耗指标
- 取值原则：
 - 约束值为目前能耗从最差排列的前30%处值
 - 目标值：如果平均达到目标值，就可以实现总量控制大目标

北方城镇供暖的指标体系



• 控制指标

- 建筑实际耗热量：热入口实测值，考核建筑保温和室内调节： GJ/m^2
- 管网输配损失率
 - 管道热损失率：热源与热入口热量之差/供热量
 - 管网输配电耗=水泵耗电/供热面积
- 热源效率 = （按照火用方法分摊的供热煤耗）/供热量： kgce/GJ
- 供热能耗 = 实际供热量/热源效率 $\text{kgce}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$

热电联产方式的火用分摊法

- 计算输出热量的火用值:

$$E(T_1, T_2, T_0) = 1 - \frac{T_0}{T_1 - T_2} \ln \left(\frac{T_1}{T_2} \right)$$

- 热量分摊的燃煤量 f_h :

$$f_h = \frac{W_h E_h}{W_e + W_h E_h} F$$

- 环境温度为0°C时, 不同供回水温度下的火用值:

水温	130/60°C	95/70°C	130/40°C
火用值	0.256	0.232	0.233

- 供回水温度 130/60 °C 时:
 - 热电比=2:1, $\eta=75\%$: $f_E=325\text{gce/kWh}$, $f_h=23.1\text{kgce/GJ}$
 - 热电比=2.5:1, $\eta=86\%$: $f_E=284\text{gce/kWh}$, $f_h=20.1\text{kgce/GJ}$

北方城镇供暖的指标体系

几个城市的采暖能耗指标

城市	热量消耗(GJ/m ²)	供热能耗(kgce/m ²)		
		当前值	约束值	目标值
北京	0.26	15.3	11.5	6.0
沈阳	0.33	21.2	14.4	8.8
哈尔滨	0.39	22.9	17.1	11.1
太原	0.29	17.0	12.6	6.9
西安	0.21	12.2	9.2	4.1
济南	0.21	12.2	9.3	4.5
郑州	0.20	11.6	9.0	4.0
兰州	0.28	16.3	12.4	6.5
乌鲁木齐	0.36	21.1	15.8	9.4

北方城镇供热能耗指标

- 热源效率:

热源	约束值	目标值
热电联产	26.1 kgce/GJ	22.5 kgce/GJ
燃煤锅炉	42.7 kgce/GJ	38.0 kgce/GJ
燃气锅炉	38.0 kgce/GJ	34.2 kgce/GJ
热泵	29.6 kgce/GJ	22.5 kgce/GJ
分户燃气壁挂炉	35.0 kgce/GJ	33.0 kgce/GJ

- 过量供热率：热源累计供应量高于末端需求量的程度

- 由于末端调节不当，导致过量供热
- 系统规模越大，可能的过量供热率越高

规模	过量供热率
城市规模	<20%
社区规模	<15%
单体建筑	<5%
单个住户	0

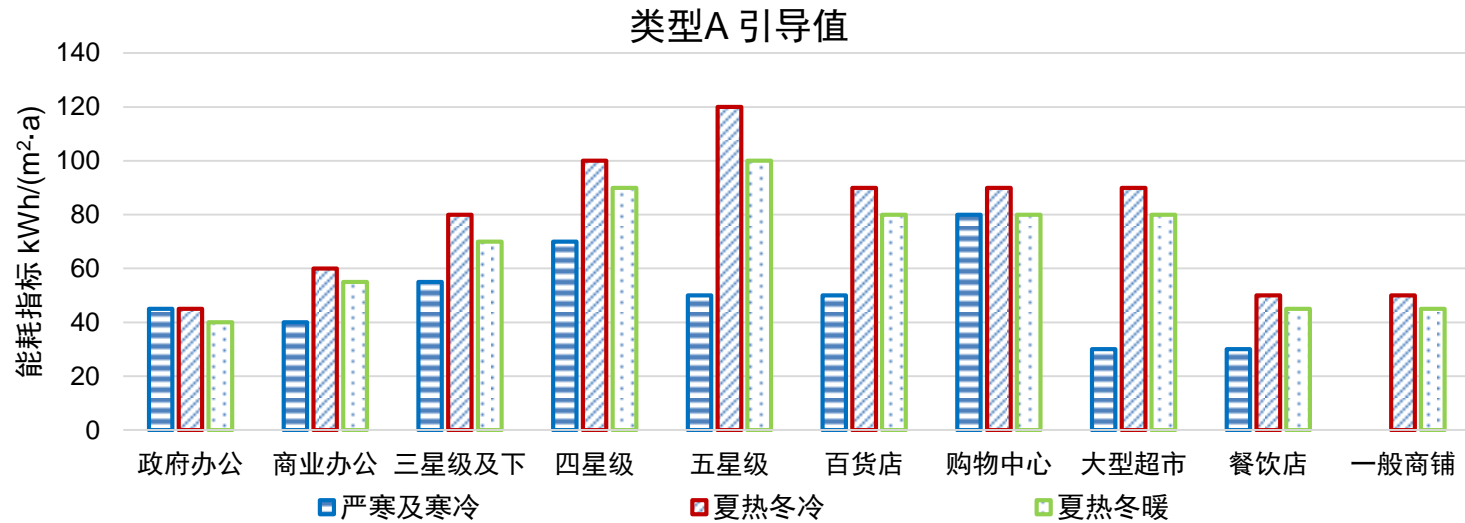
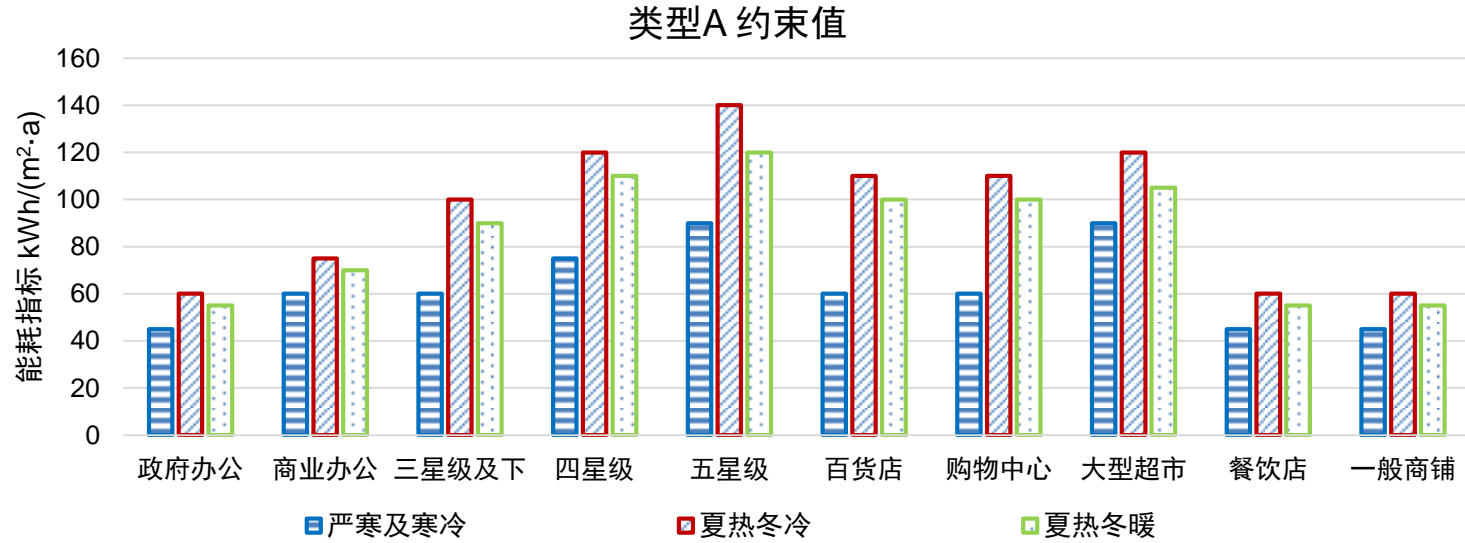
公共建筑用能指标体系

- 不包括北方采暖能耗
- 地域分类
 - 严寒与寒冷地区，夏热冬冷地区，夏热冬暖地区
- 建筑功能划分
 - 政府办公、商业办公、酒店、商场
- 充分考虑目前能耗的“二元分布”特征
 - 分为A,B两类
 - B类：局部环境恶劣，不能依靠开窗通风
 - A类：可开窗通风的建筑
 - 分别给出全密闭型建筑与一般建筑的用能指标

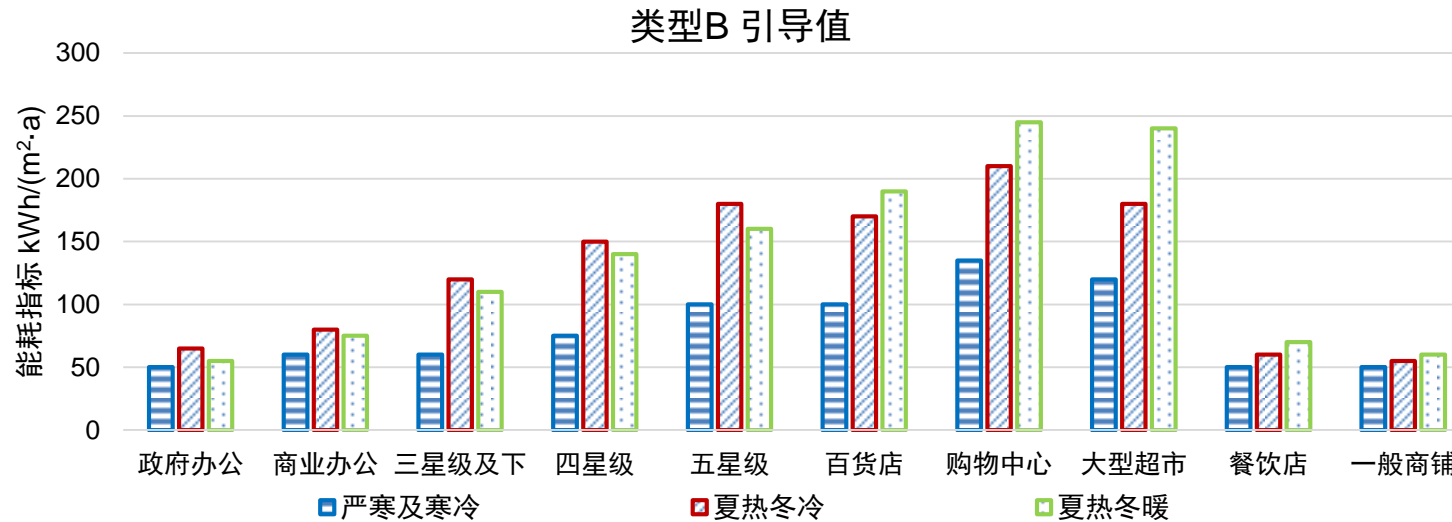
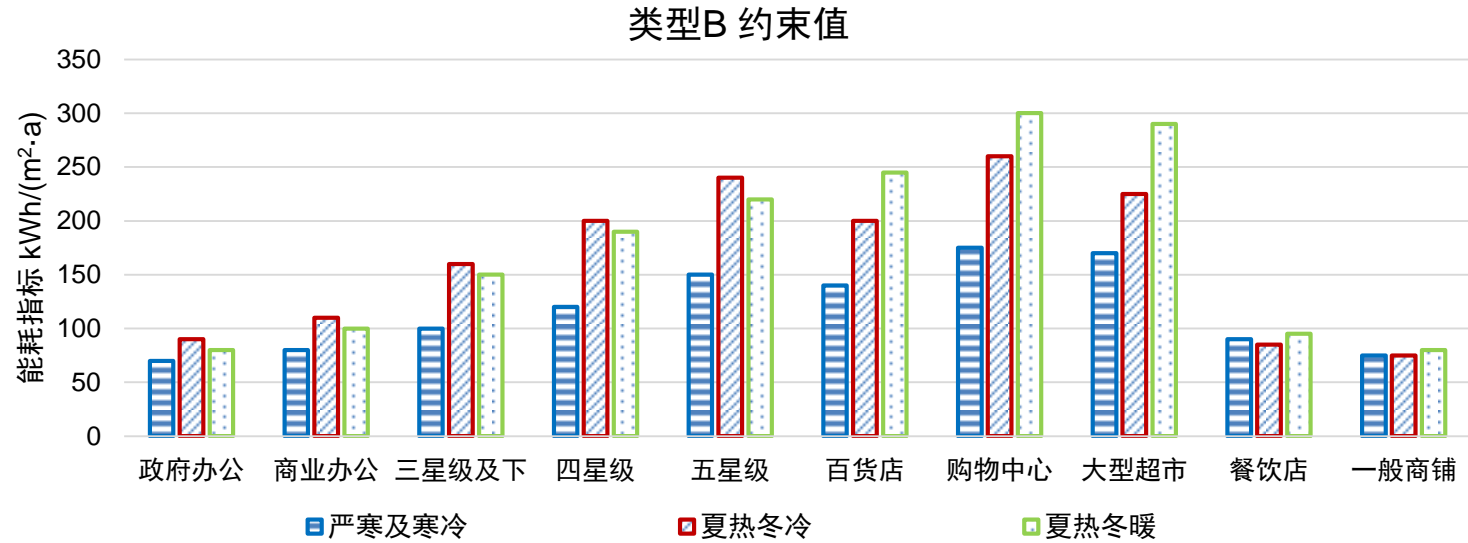
公共建筑用能指标的修订

- 使用强度的修订方法
 - 使用时间长度的修订：与使用时间长度成正比
 - 单位面积人员密度的修订：根据平均室内人数适当修正
 - 高于标准使用强度修正，低于不修正
- 为什么不考虑其它因素的修订？
 - 室温状况：是反映服务水平，从公平化原则不应修正
 - 新风量：不应该鼓励大新风量，开窗通风也无法测试
 - 工作性质：机房、餐厅、车库等分别有不同用能指标

公建用能指标的典型值（可开窗通风建筑）



公建用能指标的典型值（不可开窗通风建筑）



住宅用能指标体系

- 以户为单位，进行计量和管理，充分体现社会公平性
- 不包括北方城镇供暖能耗（单独考核）
- 分别给出电和燃气的户用量指标
- 考虑家庭常驻人口的修正

《民用建筑能耗标准》的应用

建筑能耗标准的应用

- 作为基准线，考核目前建筑用能状况；
- 作为能耗定额管理、碳交易的基准值；
- 用于节能服务公司的节能量核算
- 作为最终目标，实现新建建筑节能的全过程管理

在北方供暖节能中的应用

- 北方集中供热热源改造

- 目前大规模开展“煤改气”、“煤改电”
- 新改的热源方式是否符合节能标准？
- 燃煤热电联产：约束值 26.1kgce/GJ ，目标值 22.5kgce/GJ
- 燃气锅炉：约束值 $22\text{Nm}^3/\text{GJ}$ ，目标值 $16\text{Nm}^3/\text{GJ}$

- 案例：

- 简单的煤改电锅炉： $278\text{kWh}_{\text{电}}/\text{GJ}$ ，对于燃煤发电： 88kgce/GJ ，超标
- 大型煤改燃气锅炉： $27\text{Nm}^3/\text{GJ}$ ，只有冷凝锅炉，并减少过量供热率
- 燃气热电联产：只有回收烟气中的潜热，才能满足要求

公共建筑商业建筑能耗评估

- 什么是节能建筑？
- 根据采用的技术措施判断
 - “一步节能”，“二步节能”？
 - 30%，50%，70？
 - 以采用的保温程度、机电系统中的节能技术，可再生能源用量等判断是否节能，并不能真正表明其节能
 - 实际能耗

“十二五”期间，北京市将在全国率先执行节能75%的设计标准。北京市住建委相关负责人表示，这意味着，每平方米建筑的年采暖能耗可以再降低2.65千克标准煤。北京市还将通过新建节能建筑和绿色建筑、对既有建筑节能改造等方式，节省620万吨标准煤。

根据《规划》（征求意见稿），到“十二五”期末，建筑节能形成1.16亿吨标准煤节能能力。其中发展绿色建筑，加强新建建筑节能工作，形成4500万吨标准煤节能能力；深化供热体制改革，全面推行供热计量收费，推进北方采暖地区既有建筑供热计量

相关建筑节能规划

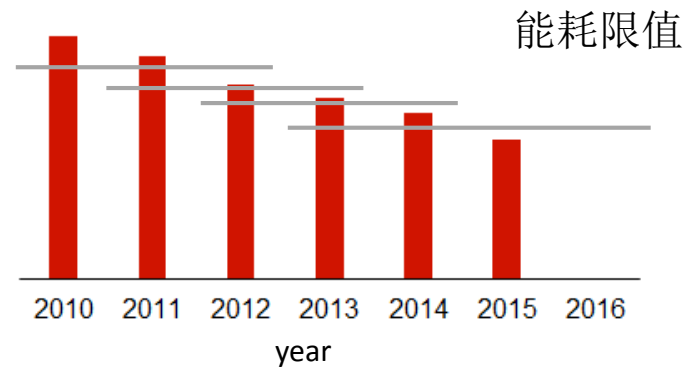
少于5项，示范工程的能耗比《民用建筑能耗标准》同气候区同类建筑能耗的目标值低10%，可再循环材料使用率超过10%。

“十三五”申报指南中对示范工程的要求

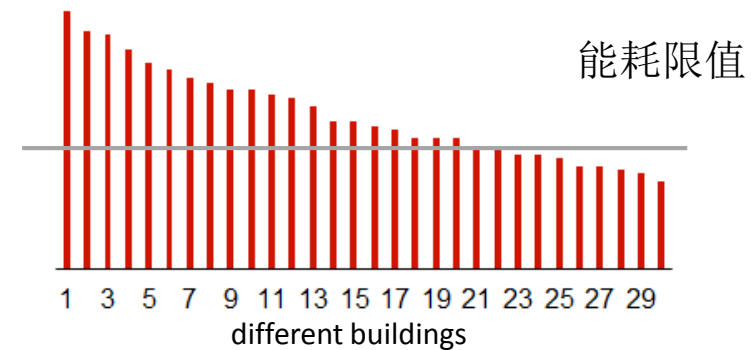
- 从“路径控制”转到“目标导向”

公建和商业建筑的节能评估

- 两种根据实际用能数据的评估方法
 - 基于历史数据的方法:取过去三年的能耗平均值
 - 基准值法: 根据功能给出统一的基准
- 能耗标准给出基准值法的参照值.



基于历史数据



基于基准值

公共和商业建筑用能定额管理和碳交易

- 公共建筑《民用建筑节能条例》（2008）：
 - 第三十二条：“县级以上地方人民政府节能工作主管部门应当会同同级建设主管部门确定本行政区域内公共建筑重点用电单位及其年度用电限额”。
- 建筑能耗标准为公建商建用能定额管理提供了基础和实施工具
 - 各地在这一标准基础上，根据当地经济发展状况，对限额值进行修订
 - 进一步给出确定强度修订的方法
 - 如何核实实际使用人数？
 - 如何核实实际运行时间？
- 建筑碳排放权交易市场
 - 十三五期间中国将建立国内建筑运行的碳交易市场
 - 参考建筑能耗标准，可以确定建筑运行碳排放基准值

居住建筑用能的阶梯价格制

- 居住建筑：已全面推行阶梯电价、阶梯气价：
 - 2011年11月：《关于居民生活用电试行阶梯电价的指导意见》；
 - 2014年3月：《国家发展改革委关于建立健全居民生活用气阶梯价格制度的指导意见》
- 建筑能耗标准中居住建筑用能与各地目前实施的定额标准完全一致
- 应用能耗标准完善梯级价格制
 - 居住建筑中央空调用电应摊入各户的用电额度中
 - 南方区域供热区域供冷的居住建筑用热用冷量应根据能源站用能情况，得到每GJ冷量、热量的电耗和燃气消耗，再根据实际用热用冷量，折合成电力、燃气，摊入各户用电用气指标

对推广节能服务公司模式的建筑节能工作的推进

- 目前节能服务公司模式在建筑运行节能中缺少参照量，结算困难
- 建筑能耗标准给出判断建筑用能水平的基准，为节能服务公司确定目标提供方向
- 重点集中于目前用能超过约束值的公建、商建
- 与建筑用能定额管理及碳交易结合
- 所节约的能源是超过定额的高价能源，增加节能服务工作的经济效益，促进其发展
- 降低能耗同时也减少了按照“基准值方法”合算的碳排放，从而从碳交易中收益

对新建建筑节能的全过程管理

- 新建建筑需先承诺用能总量；
- 使用新的模拟工具预判不同工况下的运行情况；
- 控制从设计到运行的每一个环节，最终实现节能目标



新建建筑基于“能耗数据”的全过程节能管理



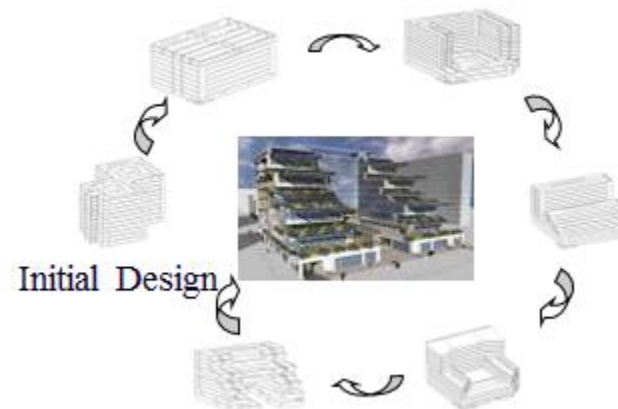
- ❖ 在建筑立项时建筑具体设计还未明确，因此不必具体落实在项目中将使用哪些具体的节能技术
- ❖ 由规划部门与项目业主商定、审批全年用能量和最大用电量

	单位	某办公建筑
暖通空调系统耗电量指标	MWh/a	820
照明系统耗电量指标	MWh/a	480
室内设备耗电量指标	MWh/a	700
电梯系统耗电量指标	MWh/a	60
给排水系统耗电量指标	MWh/a	20
总耗电量指标	MWh/a	2480
供暖耗热量指标	GJ/a	5000

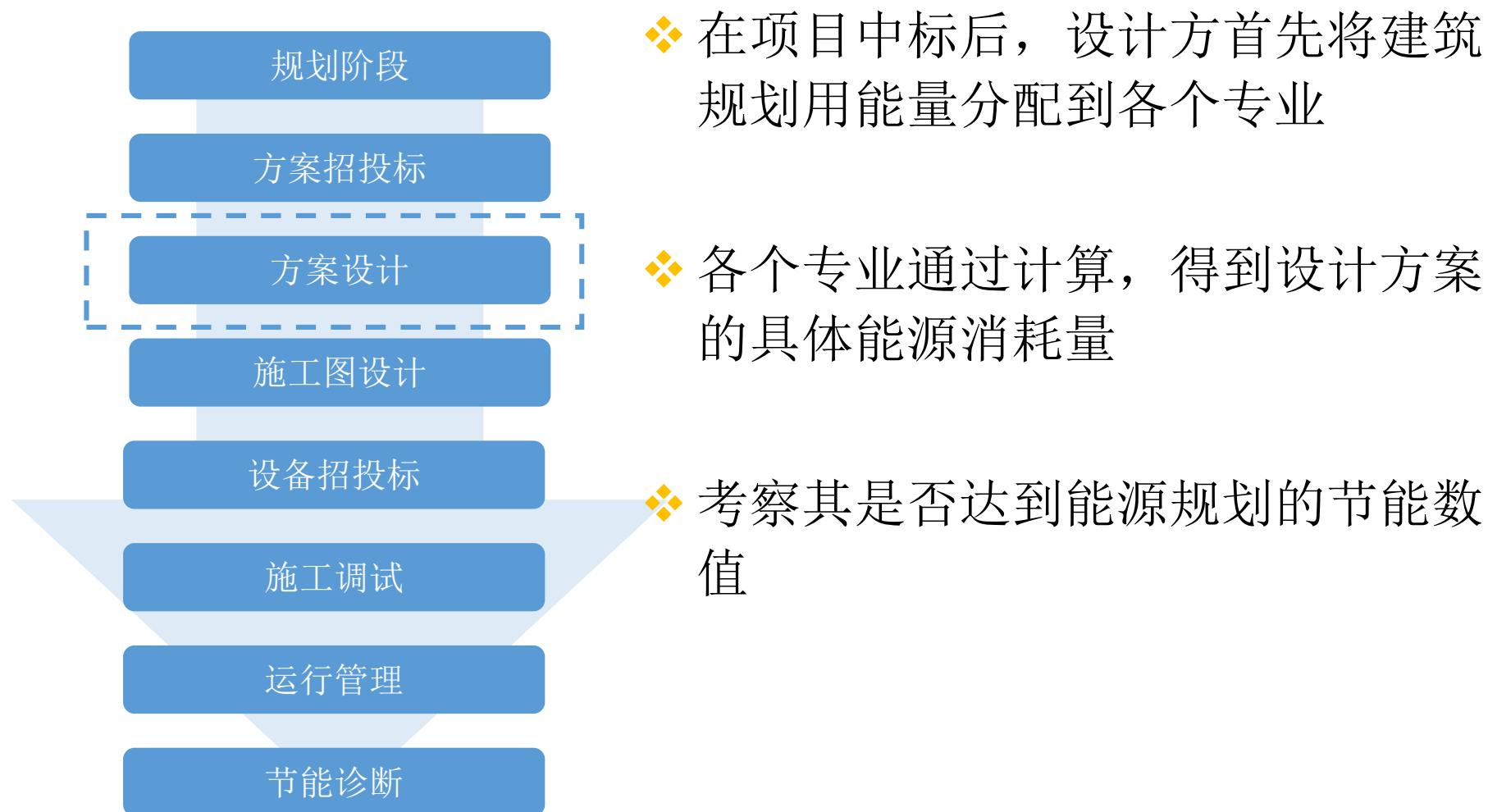
新建建筑基于“能耗数据”的全过程节能管理



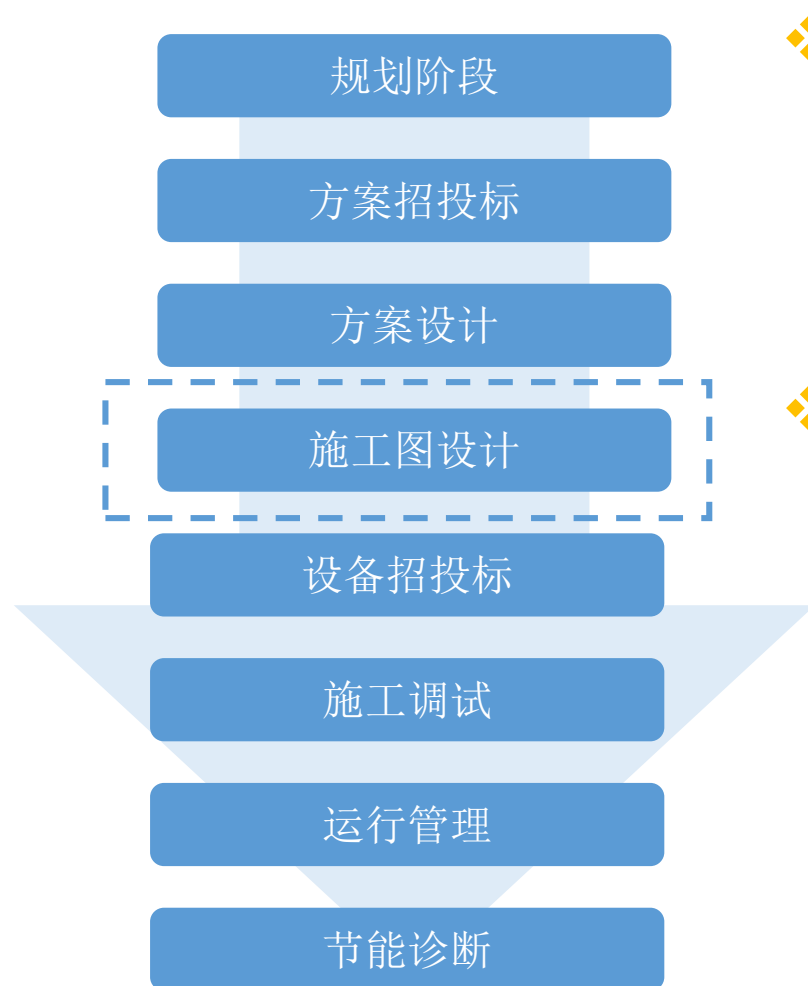
- ❖ 在方案招投标时，建筑规划用能量成为招投标的标的
- ❖ 项目投标方在标书中需要提供充分的论证材料，证明项目如何能够达到规划用能量的要求
- ❖ 项目评标方通过组织专家讨论等形式，对论证材料进行评审



新建建筑基于“能耗数据”的全过程节能管理



新建建筑基于“能耗数据”的全过程节能管理

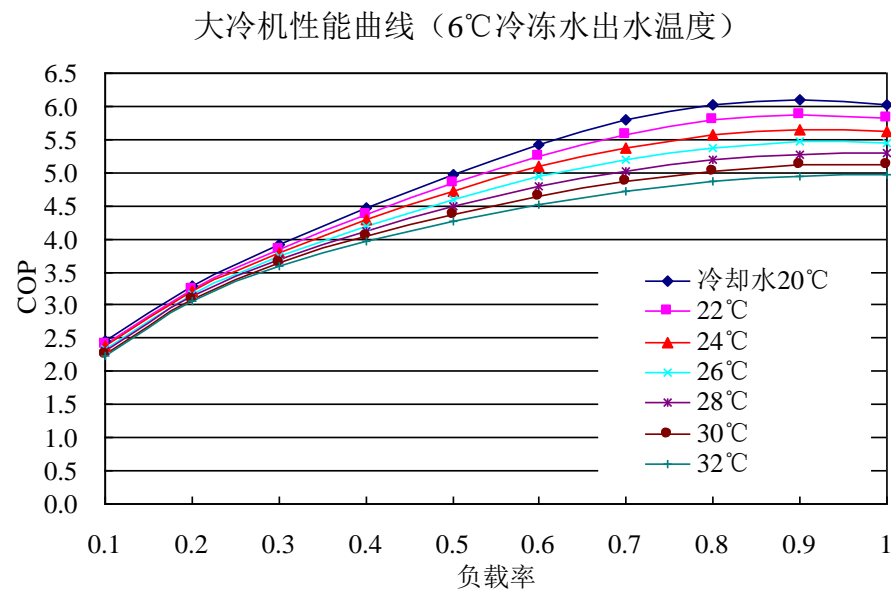


- ❖ 在施工图设计阶段，各设计专业通过计算的方法，将规划的用能量通过具体的系统方案和设备选择落实
- ❖ 通过施工图设计，确定各设备的容量及具体性能参数

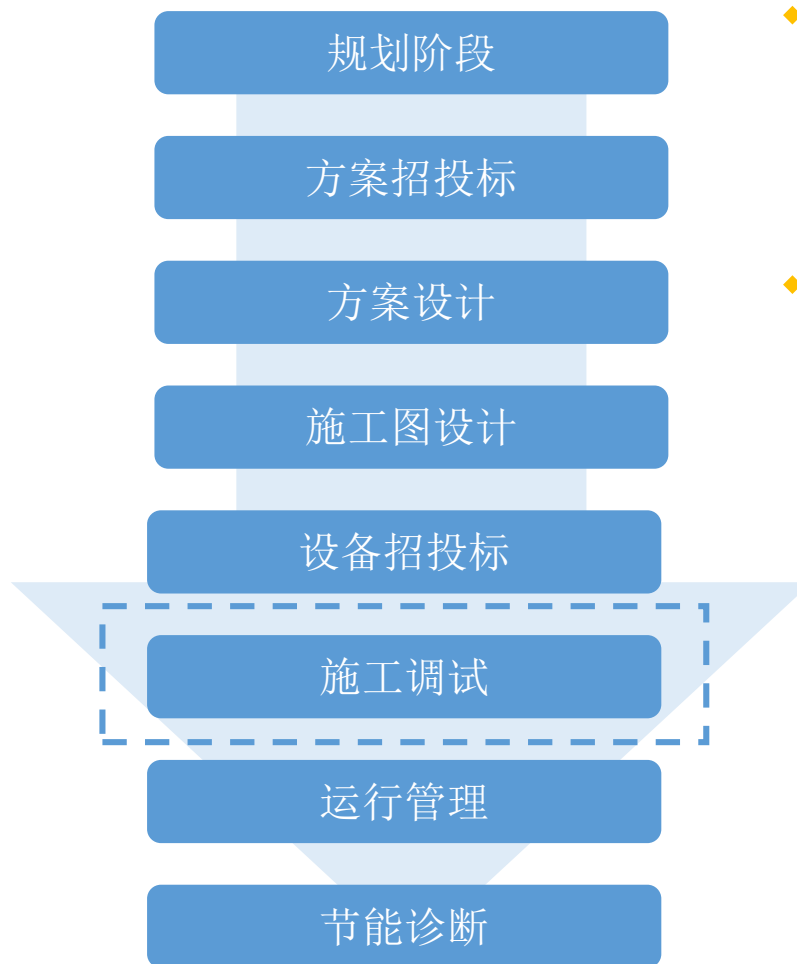
新建建筑基于“能耗数据”的全过程节能管理



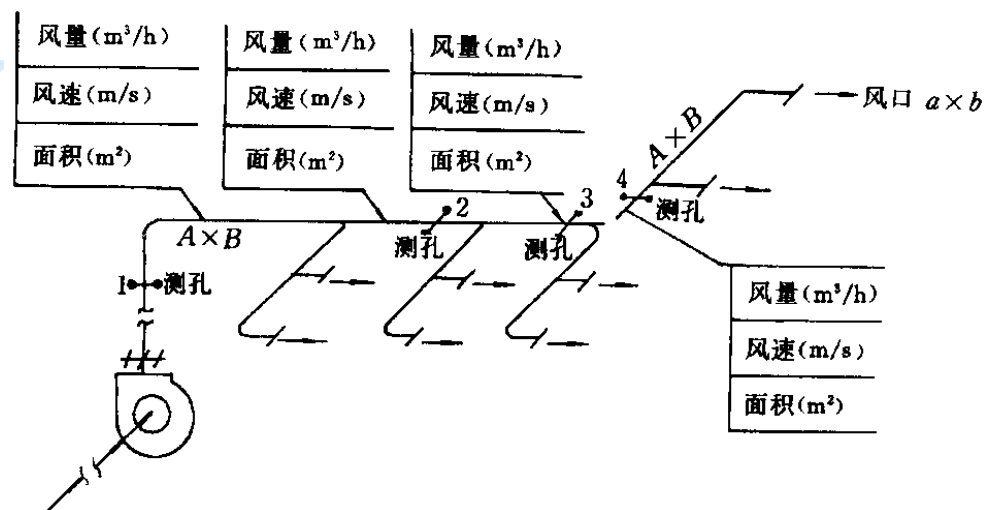
- ❖ 在设备招投标阶段，设计选择的设备具体性能成为设备招投标的标的
- ❖ 各设备投标方根据标的提出的性能要求提供相应设备



新建建筑基于“能耗数据”的全过程节能管理



- ❖ 建立工程竣工节能验收，通过现场测试各设备与子系统的性能，进而估算全年能耗
- ❖ 考察是否达到规划的用能量，确保施工过程符合要求及保证系统调试合格



新建建筑基于“能耗数据”的全过程节能管理



- ❖ 实行公共建筑“用电分项计量和数据集中采集系统”
- ❖ 对各分项系统的用能指标进行集中的动态监测与管理，不断地与用能标准进行比较
- ❖ 实行用能定额管制，对超额部分征收超定额罚款

新建建筑基于“能耗数据”的全过程节能管理



- ❖ 组织节能服务公司，以用能定额为基准，进行节能服务和节能改造，并根据定额指标进行评估。
- ❖ 同时，定额指标可以用来结算节能公司服务的节能效果。

对系统形式判断的影响

- 基于能耗标准，即实际能耗为导向可以对不同的系统形式进行评判，确定系统的适宜性。
- 应用这一标准，可以较为清晰地说明一些目前广为争论的问题：
 - 南方采暖应该用什么方式解决？
 - 室内新风应该用自然通风还是机械新风？
 - 地源水源热泵的适宜性问题？
 - 太阳能生活热水的适宜性问题？
 - 区域供冷与三联供问题？
 -

北方清洁取暖行动

- 目的

- 取消散煤燃烧，缓解雾霾状况
- 改善电力调峰和热电比问题，改善弃风弃光困境
- 改善农民冬季居住调节，提高农民生活水平

- 目标

- 城镇：2020年前取消东部地区小容量燃煤锅炉，以后逐渐解决西部问题
- 农村：取消散煤炉，取消秸秆直接进灶的高污染方式
- 2+26城市实现无煤化（不包括清洁的燃煤电厂）

清洁取暖的途径

- 靠“煤改气”能解决问题吗？
 - 天然气也是化石能源，燃烧同样排放二氧化碳
 - 使用天然气不排放微颗粒，但排放氮氧化合物，它是导致雾霾的最主要污染物
 - 北京2015年开始全面实现煤改气，四大燃煤电厂完全改为燃气电厂，但雾霾状况并没有缓解，
 - 北京2016，2017年冬季全面治理，并对周边散煤实行“煤改电”，才有成效
 - 乌鲁木齐全面“煤改气”，雪白了，雾没消
 - 北京用气量是世界第二大，（莫斯科第一），但雾霾仍严重，纽约、东京、伦敦等大都市圈，用气量都低于北京，但空气质量远优于北京
- 有安全、可靠的气源吗？
 - 国产燃气1400亿m³，进口750亿m³，全球国际贸易总量10700亿m³，我国占7%
 - 如果我国天然气用量达到15%（发达国家25%~40%），则用气6000亿m³，需要进口4000亿m³，占全球贸易总量40%，有可能吗？怎样保证供气安全？

城镇清洁取暖途径

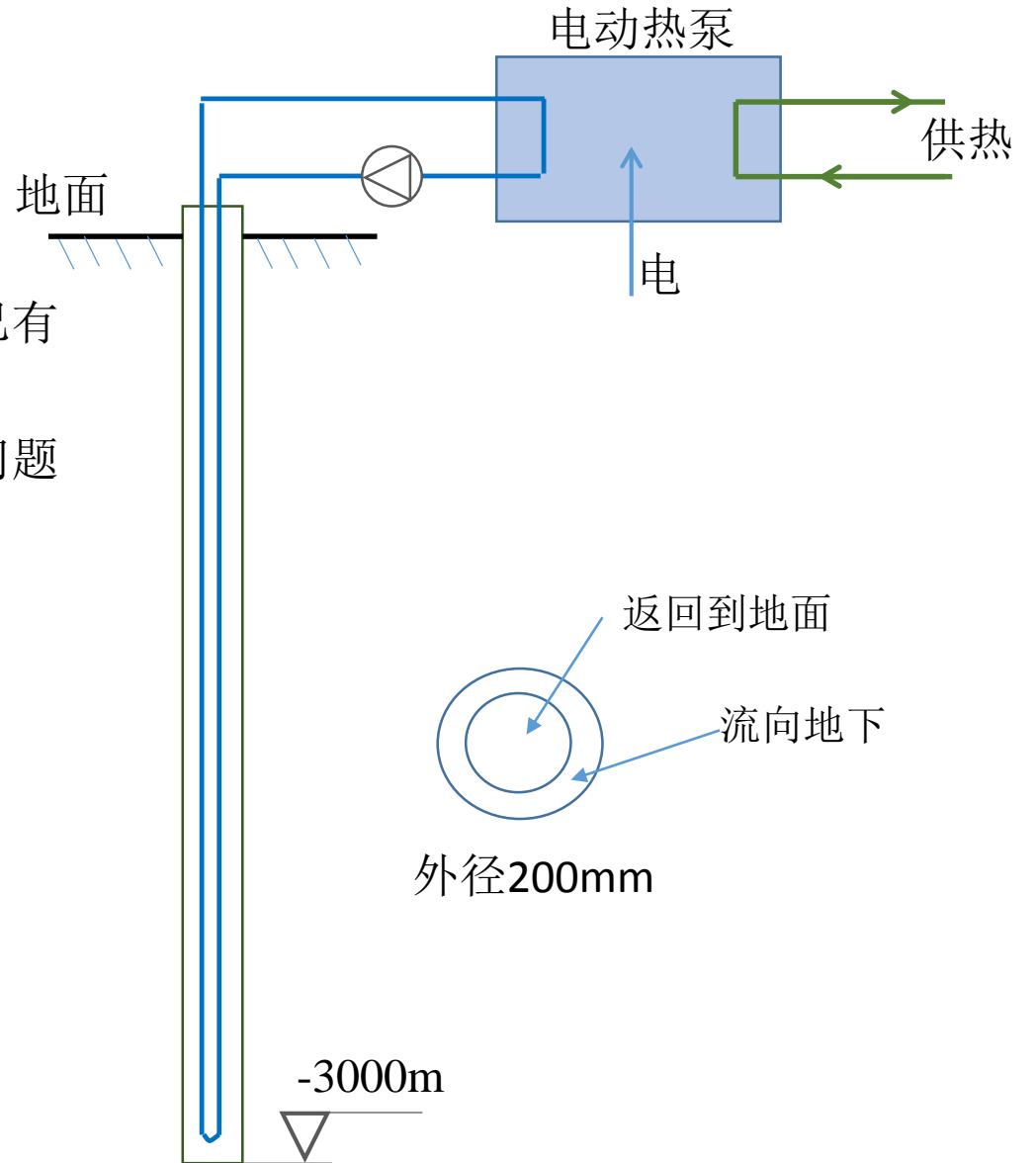
- 充分利用已有的集中供热管网，进一步扩建跨区域输热网
- 充分利用热电联产余热、乏汽废热
- 充分挖掘低品位工业余热
- 以热电联产余热和工业余热为基础，通过跨区域热网，形成城镇供热的基础负荷，为70%~80%的城镇建筑提供基础负荷
- 用小型天然气锅炉在末端调峰，补充严寒期的热量，并作为备用
- 北方地区只需要150亿立方米天然气+200亿kWh电力，即可解决100亿建筑供热
- 推动燃煤热电联产“热电协同”技术的发展和实施，使其同时承担供热和电力调峰的功能，成为“灵活电源”

非集中供热的城镇建筑的清洁取暖方式

- 多种热泵技术
 - 污水源热泵
 - 地源热泵：当地下没有充分的渗流条件时，不应大规模用于住宅
 - 地下水水源热泵：如果不能有效回灌，会严重浪费水资源，应禁止
 - 中深层地热热泵：不会产生环境问题，地域适应性强，有推广潜力
 - 空气源热泵：适合于分散供暖，除严寒地区外适应性强
 - 带蓄热功能的电驱动吸收式空气源热泵
- 天然气锅炉
 - 宜小不宜大，
 - 壁挂炉，模块化锅炉
- 直接电热锅炉
 - 是高能耗方式，只要有燃煤电厂在发电，就不应该有电锅炉

中深层地源热泵

- 从西北开始，进一步在北方多地发展起来的新方式，已有多个工程
- 水在管道中闭式循环，不会造成任何污染或其它环境问题
- 在地面处水温：20~30°C/15~22°C
- 单井流量：25~35吨/h，250~350kW
- 投资：150万~250万（井及套管）
- 适应条件：
 - 热状况依靠地下深处传热恢复，不可供冷
 - 热性能几乎不受地域限制
 - 地质条件不同钻井成本大不相同
- 发展方向：
 - 流量优化，使得单井产热量最大
 - 蒸发器侧双机串联，提高主机COP



空气源热泵

- 是目前“煤改电”中应用最广泛的方式，使用条件最宽松
- 分散式（一室一机）、多联机等应优先发展
- 外温在 0°C 左右时：
 - 是热泵传统上的应用范围
 - 蒸发器化霜模式和判断方式
- 外温在 -10°C 左右时：COP可以大于2
 - 压缩机压比及排气温度过高
 - 螺杆机、涡旋机的补气增焓；转子压缩机的双级压缩
- 外温低于 -20°C 时：COP很难超过2
 - 三缸双级转子压缩机，COP接近2

空气源热泵热风机是北方农村采暖的好方式

- 空气源热泵的技术创新
 - 双级压缩解决大温差下的热量提升
 - 可在外温 -18°C 下有效运行
 - 供热季节COP 2.5 to 3.5
 - 通过下送风方式消除吹风感，减小纵向温度梯度
- 在京郊的应用实例
 - 装机费用: 3500元/台, 3台/户
 - 室内温度 $18\sim 22^{\circ}\text{C}$ 严寒期不低于 15°C
 - 外温为 -10°C 时COP=3
 - 整个冬季用电量 2000~3000kWh/户
 - 已有2000户以上的农户安装使用实例
- 易安装，免维护



为什么选择热泵热风机，而不是热水机？

- 一室一机，安装简单，少故障、维护方便
 - 热水机需要安装水系统，水泵电耗、故障、水系统堵塞、停机后冻结等
- 热风机惯性小，可快启快停，适合于间歇采暖
 - 热水机末端为辐射方式，热惯性大，需要5~10个小时预热，不适合间歇
- 热风机一室一机，可实现平时人少仅开一室，假日人多全开
 - 热水机需要调节水阀，而且启停缓慢，很难分室启停
- 辐射方式和好的热风方式可以实现同样的热舒适
- 热风方式用电量在20~40kWh/m²，而热水辐射方式在40kWh/m²以上，二者的初投资也相差一倍（一户是1万元还是2万元）
- 电网增容问题：蓄能式电热12kW，风一机8kW，风一风机5kW /户

清洁地利用好农村的生物质能源

- 主要粮食产区，林区，半农半牧区有丰富的生物质能源
- 目前问题：燃烧效率低，污染排放高，储存困难，污染环境
- 解决途径：
 - 生物质成型技术
 - 生物质燃气技术
 - 除个别地区特殊条件，不应发展生物质发电，应优先解决农民用能
- 核心问题：机制，国家支持和市场化运作相结合

对区域供冷、热电冷三联 供、分布式能源的认识

发展与绿色生活模式适应的基础设施

- 分布式能源站
 - 广州大学城，珠江新城
 - 深圳前海
 - 江苏省
 - 珠海横琴岛
- 绿色能源技术
 - 热电冷三联供
 - 地埋管获取浅层地热
 - 冰蓄冷
 - 集中供热集中供冷

这些真的符合绿色低碳发展吗？真是我们未来的方向吗？

南方地区能源供应方式辨析

- 建筑对冷热的需求与供给方式
- 冷量热量的输送
- 冷热源与分布式能源
- 地源热泵与太阳能
- 冰蓄冷
- 一些典型案例
 - 广州大学城
 - 深圳太子湾
 - 江苏省某区域能源站

供冷与供热的不同

- 供热的目的
 - 由于室外寒冷，通过围护结构损失热量
 - 补充围护结构散失的热量
 - 如果室内外存在巨大温差（哈尔滨-28°C，室内20°C，温差48K），需要连续供热
- 供冷的目的
 - 室内人员、设备、灯光散热，占总热量50%~70%
 - 排除室内产生的过多热量使空调的主要任务
 - 由于产热量的间歇性，随机性，间歇性排热即可

两种不同的供冷方式

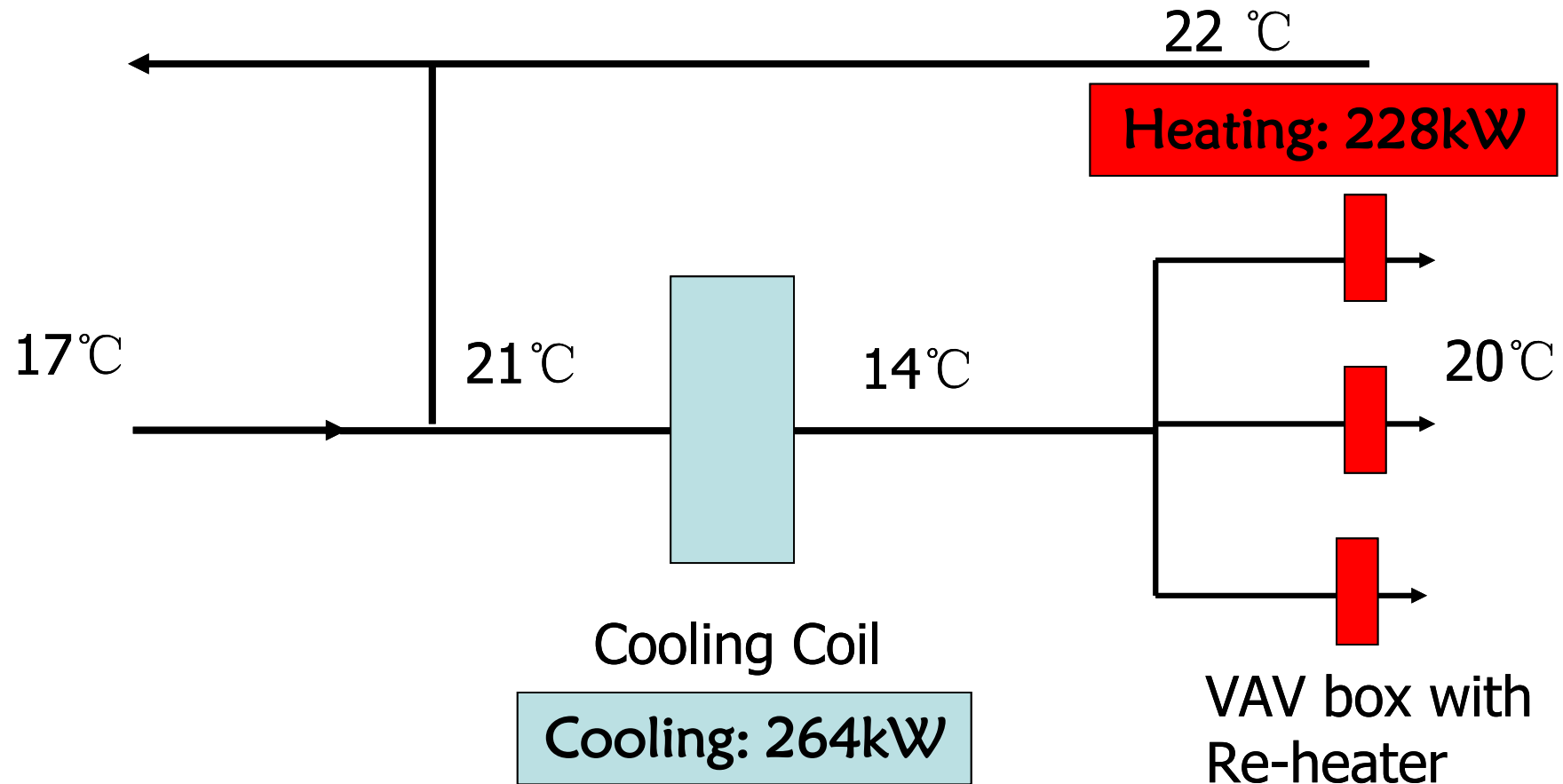
- 连续供应
 - 例：美国校园的集中供冷方式
 - 24小时连续供冷，末端消耗基本不变
 - 依靠调整末端再热量解决需求的变化，避免过冷
 - 结果：冷量、热量消耗是我国现状的5~8倍
- 间歇供应
 - 我国住宅现状：“部分时间、部分空间”空调
 - 每台空调机夏季平均运行时间仅为7%
 - 办公建筑也不是完全连续运行

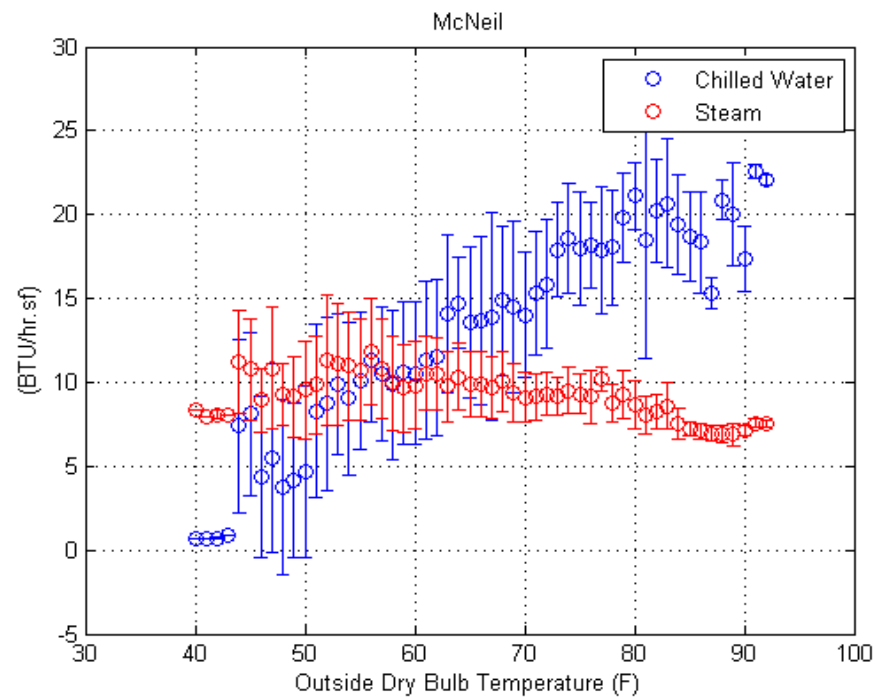
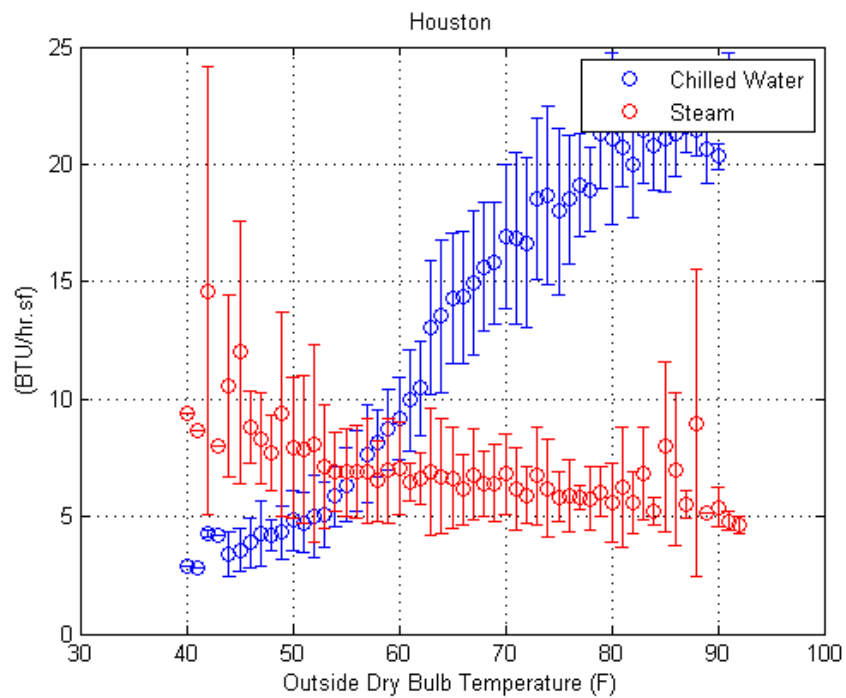
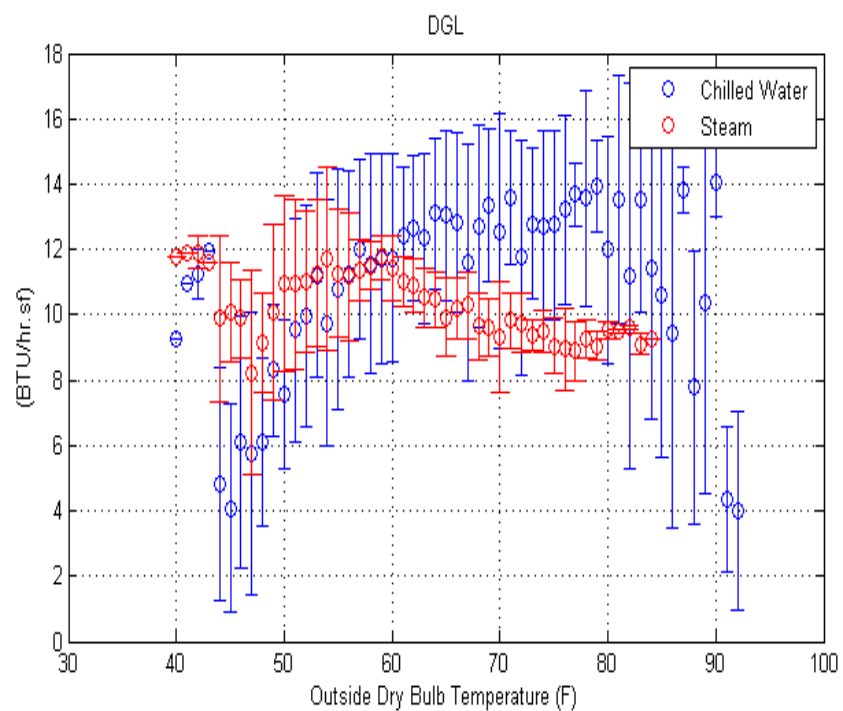
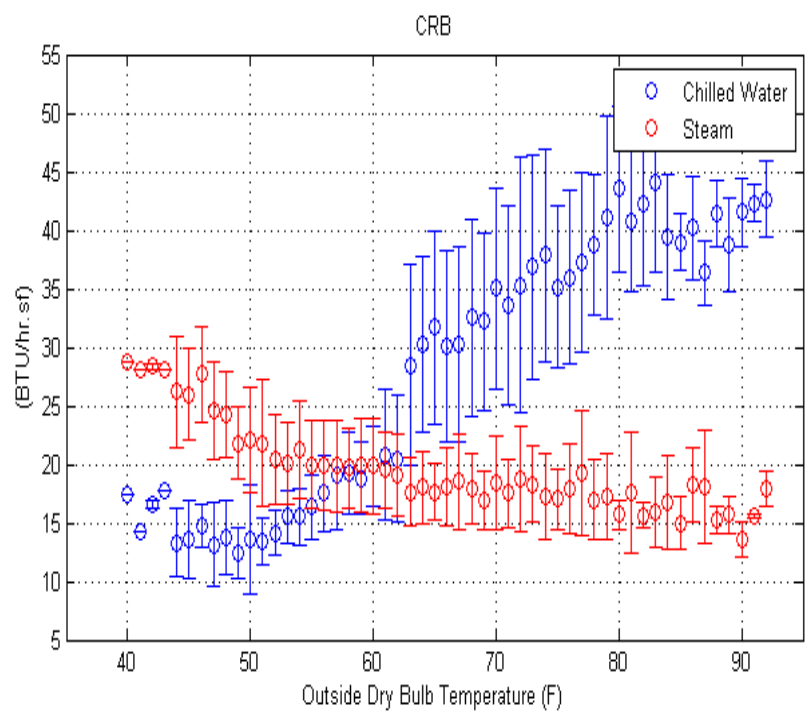
美国校园的冷量和热量

- 冷量, 2005-2006
 - 1,344,744 GJ
 - 1.02GJ/m²
- 典型办公建筑 (GJ/m²)
 - 北京: 0.25~0.35
 - 东京: 0.43
 - 上海: 0.36
- 典型居住建筑 (GJ/m²)
 - 北京: 0.03~0.15
 - 东京: 0.05~0.15
- 热量, 2005-1006
 - 1,108,598 GJ
 - 0.84GJ/m²
- 典型办公建筑 (GJ/m²)
 - 北京: 0.15~0.35
 - 东京: 0.45
 - 上海: 0.2
- 典型居住建筑 (GJ/m²)
 - 北京: 0.15~0.25
 - 东京: 0.1~0.15

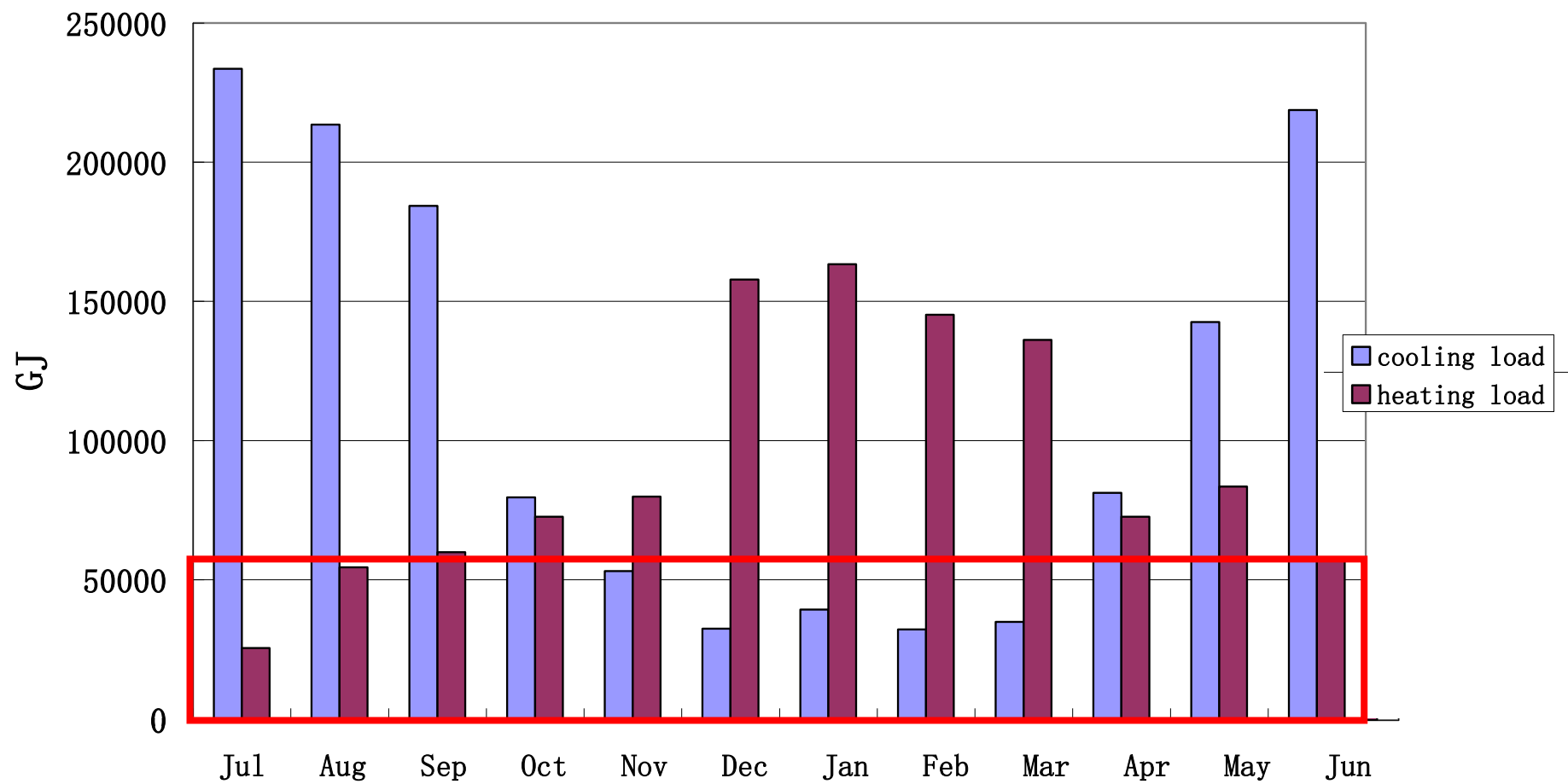
空调系统中的再热

- 美国建筑中空调的典型工况: VAV + 再热





美国校园案例全年冷热量



两种不同的供冷方式

- 全部连续供应
 - 管网按照最大负荷设计和运行
 - 管网中水的循环流量不变或小范围变化
 - 系统可以正常运行，但高能耗
- 按照末端间歇需求的模式供应
 - 一天内供冷负荷会在100%~5%之间变化
 - 如果最大负荷时流速3m/s，则最小负荷时0.15m/s
 - 由于管内水温相同，因此热损失相同。若最大负荷时末端温升0.5K，则最小负荷时末端温升8K，不能运行
 - 结果： 或大流量小温差，低效运行；
或变小负荷为较大负荷，过量供应

冷和热在输送过程中的差别

- 通过水循环长途输送热量和输送冷量：
 - 供热：典型工况：供水 130°C ，回水 60°C ，
温差 70K
 - 供冷：典型工况：供水 4°C ，回水 18°C
温差 14K
 - 一般建筑冷负荷是热负荷的2倍，因此供冷需要的循环水量为供热需要的循环水量的10倍
 - 供热系统循环水泵电耗转换为热量，用于供热
 - 供冷系统循环水泵电耗转换为热量，抵消冷量

集中供冷可以提高能源利用效率吗？

- 大型集中冷源是否合适？
 - 电动制冷机：单机容量大于4MW后，效率不再随容量增大而提高。建筑规模：5万m²
 - 热电联产，余热吸收制冷：
 - 只能用>100°C的余热通过吸收式制冷
 - 抽取1kWh热量减少发电量0.2~0.25kWh
 - 用这些热量驱动吸收式制冷， $COP_c=1$ ，等效于 $COP_c=4\sim 5$ 的电动制冷机，任何离心机都可达到
 - 用这些热量驱动吸收式热泵制热， $COP_H=1.8$ ，等效于 $COP_H=7.2\sim 9$ 的电动热泵，很难有电动热泵达到
 - 热电联产，吸收式热泵供热节能，吸收式制冷不节能

分布式能源系统

- 建筑内用天然气发电、余热供热和通过吸收机制冷，充当空调冷源
- 典型系统性能：发电效率40%，供热效率40%，或者供冷效率45%（大型内燃机组）
- 可以参照的常规系统：
 - 纯燃气电厂：发电效率55%，考虑输送损失后，50%
 - 纯燃气锅炉：热效率90%
 - 电动制冷：COP = 5 以上
- 分布式热电联产： $0.4 / (1 - 0.4 / 0.5) = 200\%$ 比锅炉节能
- 分布式冷电联产： $0.4 + 0.45 / 5 = 49\%$, 略低于纯发电机组

分布式能源系统

- 实际运行：当热、冷负荷都不大，但需要电时，运行发电机、排除热量，能源利用率很低，但有经济回报：
 - 燃气价格2元/m³，成本0.66元/kWh，低于0.8元的电价
- 因为初投资已经发生，为了经济效益，就要发电，但导致能源浪费
- 结论：除了常年需要热量，如宾馆、医院，采用分布式能源热电联产，可以节能，大多数情况都不应发展分布式热电冷联供方式

集中是为了实现冰蓄冷？

- 冰蓄冷目前全球发展状况
 - 日本：新建项目基本采用水蓄冷
 - 美国：从未推广冰蓄冷
 - 欧洲：目前也很少采用冰蓄冷
- 冰蓄冷/水蓄冷？
 - 水蓄冷：储存温度等于使用温度，可以实现高效
 - 冰蓄冷：体积约为水蓄冷一半，但系统效率也仅为水蓄冷2/3
 - 紧凑型设计，挖掘空间潜力，发展水蓄冷

长江流域的热电冷三联供和冷热联供

- 以燃煤或燃气-蒸汽联合循环电厂作源，实行热电冷三联供
 - 供应半径很难小于3公里，长途输送冷量不合适
 - 长途输送蒸汽，到用户侧通过吸收式制冷机制冷，既不节能也不经济
 - 100元/吨蒸汽，用于吸收式制冷，相当于0.5元/kWh电价下的电制冷
- 内燃机发电，用缸套水和烟气的热量供热和制冷
 - 制冷效率不高，40%发电，产冷量相当于8%，合起来相当于发电效率48%
 - 电力负荷与冷量负荷很难同步，导致部分余热不能利用
- 地源、水源热泵集中供热供冷
 - 当规模小时，是可行的方式
 - 应严格控制单个系统的规模，不应该搞大型系统



谢谢 恳请提问

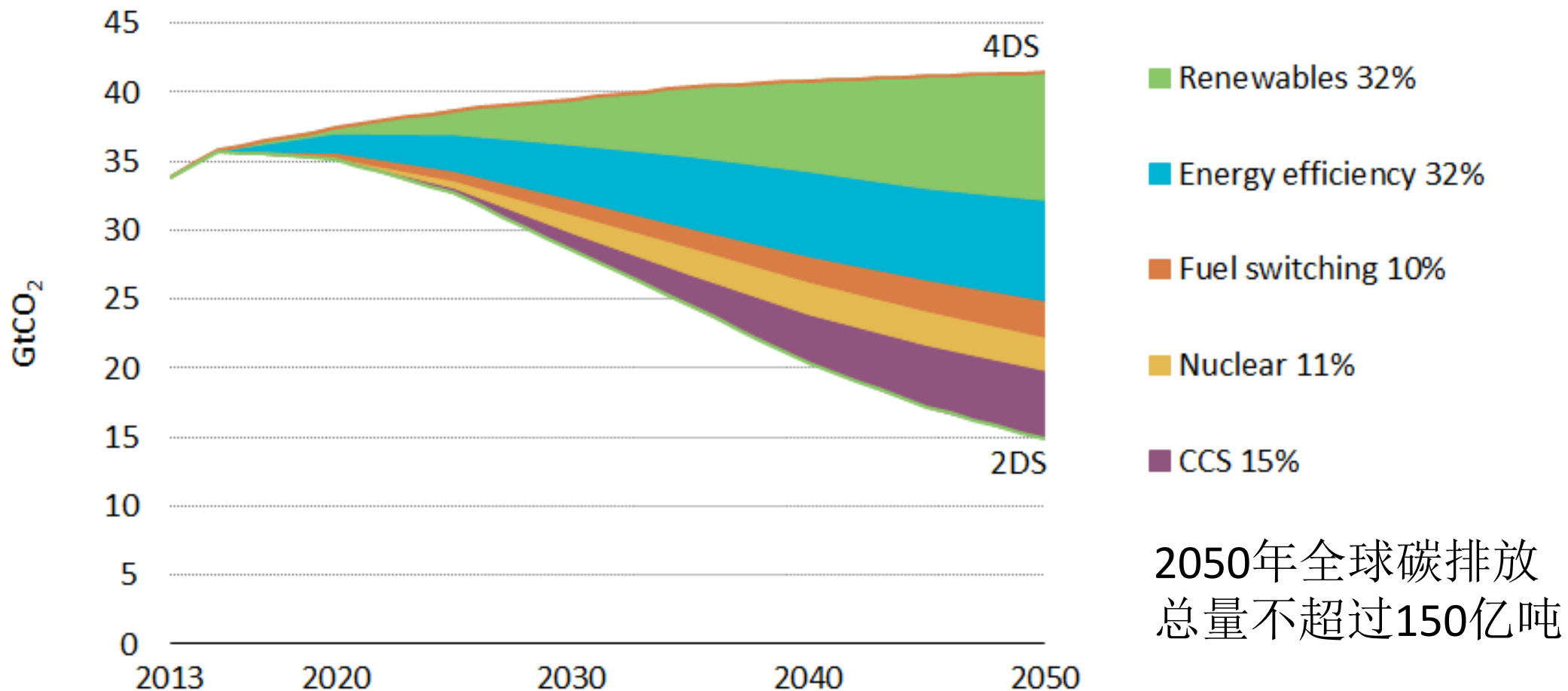
jiangyi@Tsinghua.edu.cn

当前的节能低碳与环保形势

- 低碳的总量控制和发展可再生能源的要求
- 治理大气，打赢蓝天保卫战
- 北方的清洁取暖行动
- 未来能源规划



按照升温不超过2K碳排放的控制目标

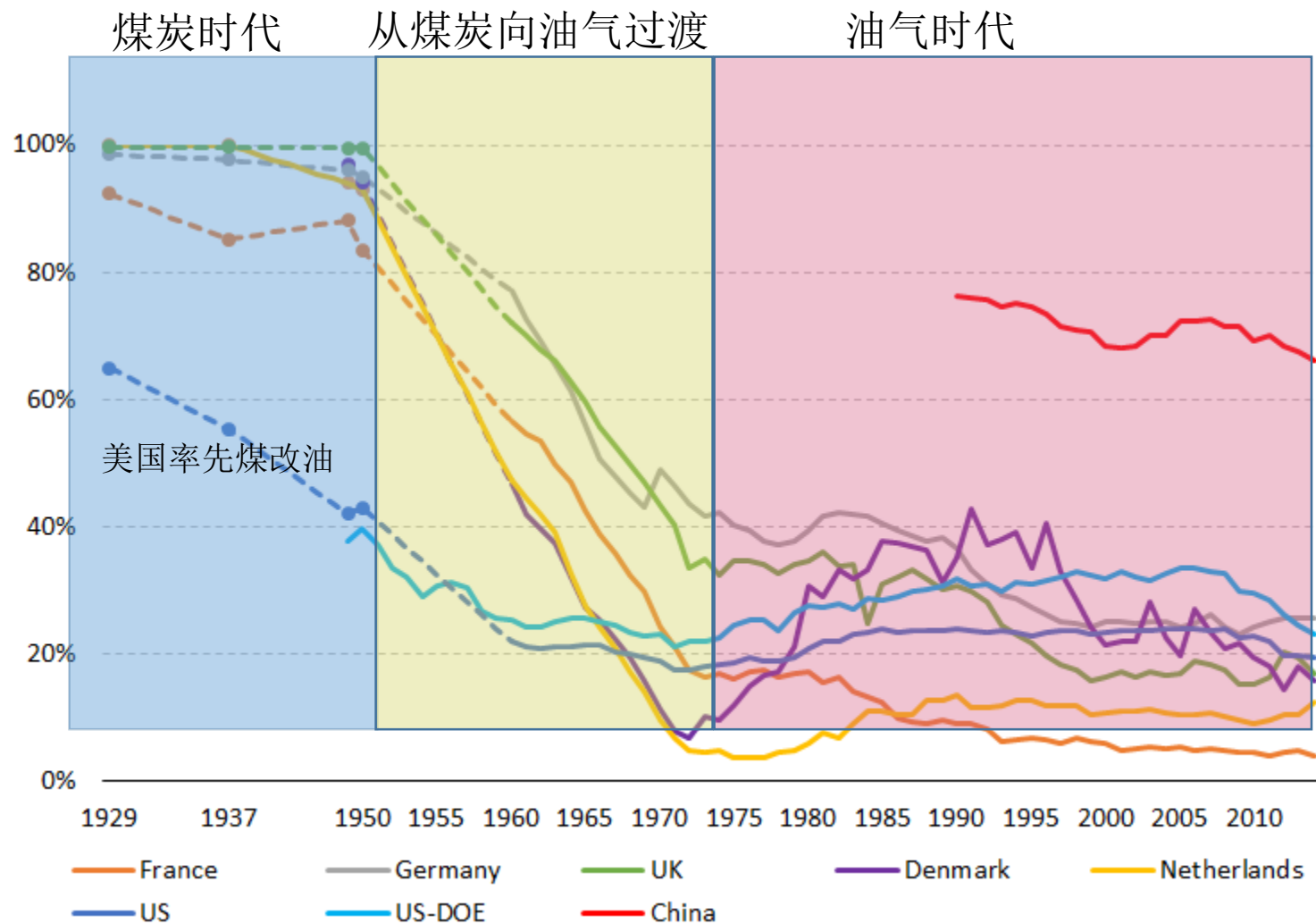




我国政府已经批准巴黎协定

- 全球2050年之前碳排放总量下降到150亿吨/年
- 我国现在碳排放总量已超过100亿吨/年
- 到2050年我国可以得到的碳排放额度应该在30~35亿吨/年之间
- 如何在33年之后，使我国碳排放总量下降三分之二？

世界主要国家能源结构变化历史



煤炭占总能耗的比例



世界主要国家的低碳规划

- 欧盟：
 - 碳排放：与1990年相比，到2050年减排80-95%；
 - 可再生能源：2030年达到27%。
- 丹麦：
 - 碳排放：2050年实现零碳；
 - 可再生能源：2050年全部使用可再生能源；
- 芬兰：
 - 碳排放：与1990年相比，到2050年减排80%；
 - 可再生能源：2050年占用能比例高于60%；
- 德国：
 - 可再生能源：2050年可再生能源发电比例高于50%；
- 瑞典：
 - 可再生能源：2020年可再生能源发电比例高于50%。
- 中国：
 - **2030年之前碳排放达到峰值**
 - **2030年可再生能源达到总能源20%以上**



我国实现低碳能源的途径

- 由“煤炭”时代向“油气”时代过渡？
 - 目前天然气占我国能源总量5%，发达国家为30%~40%
 - 我国目前天然气对外依存度30%，要加大天然气用量只能加大进口
 - 由目前的“煤炭能源”转向“天然气能源”需要巨额基础设施投资
 - 我国目前在燃煤的清洁高效利用领域的技术处世界领先水平
 - 用10~15年时间建成“油气能源”，然后再用15~20年时间向低碳能源转型？
- 集中人力物力，直接向低碳能源转型？
 - 弯道超车，与发达国家同步进入低碳和零碳能源时代
 - 变我国“缺气少油”的不利条件为促进可再生能源发展的有利条件
 - 延缓煤炭时代，完成城镇化“楼、路、桥、坝、能”高能耗基础设施建设任务
 - 避免“油气能源”基础设施的重复建设和重复投资



我国未来的低碳能源结构

- 电力供应：8.5~9万亿度/年， 建筑2.5万亿， 交通1.5万亿， 工业5万亿
 - 水电： 1.5万亿， 目前1万亿
 - 核电： 1万亿， 目前1500亿
 - 风电： 1万亿， 目前2000亿
 - 光伏发电： 1万亿， 目前1000亿
 - 燃气、燃煤电厂提供4.5万亿电力， 并承担电力调峰， 形成碳排放22亿吨
- 燃料供应： 17亿吨标煤， 生活消费1亿吨， 交通3亿吨， 工业13亿吨
 - 生物质能源： 折合8.5亿吨标煤
 - 农业秸秆： 5亿吨； 林业秸秆： 4亿吨； 动物粪便： 2亿吨； 餐厨垃圾： 1亿吨
 - 制成生物燃气1800亿方， 压缩颗粒燃料4亿吨， 其中生物燃气可形成负碳1亿吨
 - 生物燃气的剩余物又成为优质肥料， 返回农田
 - 戈壁滩、盐碱地种植能源作物： 2亿亩， 生产生物质燃料2亿吨
 - 燃气、燃油、燃煤提供8.5亿吨标煤的化石能源， 形成碳排放15亿吨

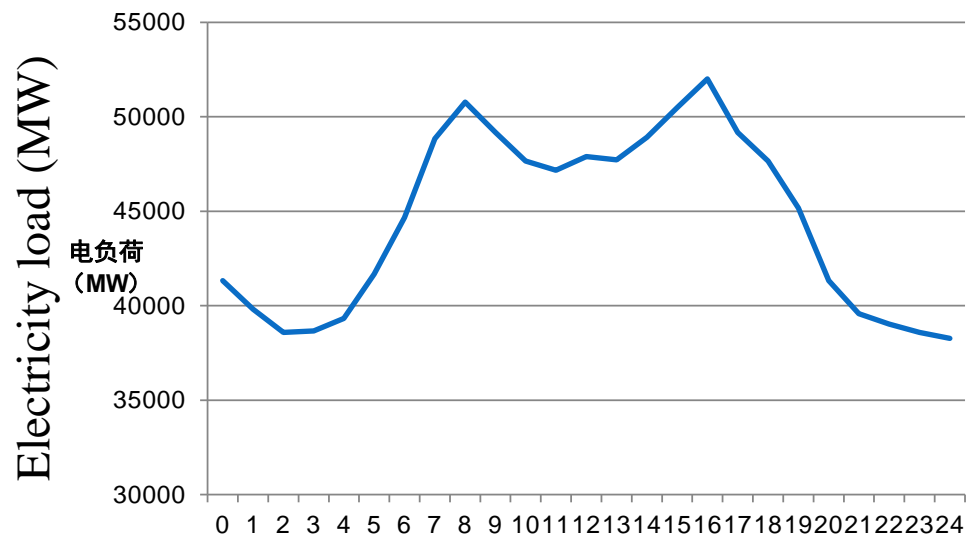


未来能源的低碳与可持续发展的供给结构

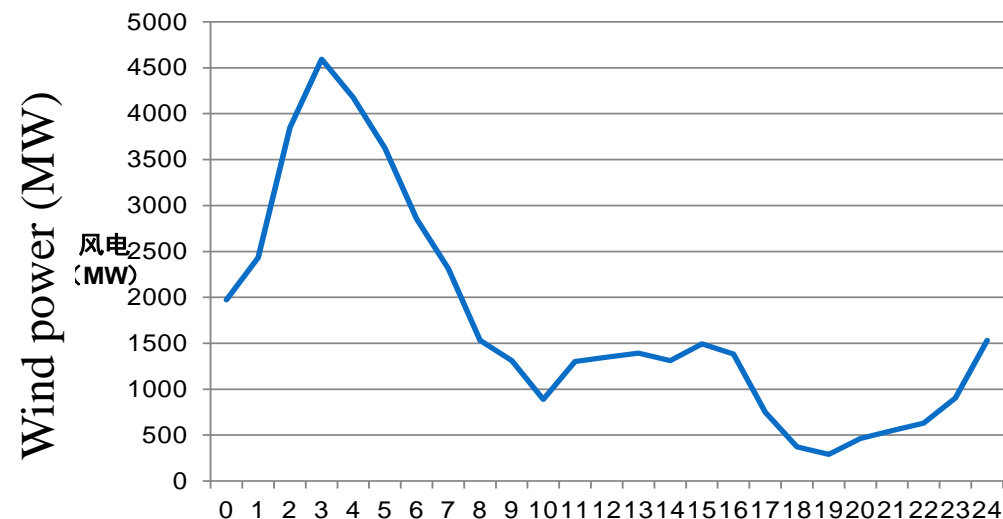
- 风电、光电占电力供应的25%
- 燃煤、燃气、燃油仅承担50%的电力供应和50%的非电力燃料供应
- 建筑运行：电力和少量燃气
- 交通运行：电力和部分燃油、燃气
- 突出问题：
 - 电力需求侧的峰谷差和供给侧的不确定性矛盾
 - 北方建筑供暖热源替换

电力系统面临的挑战

- 严重的弃风、弃光现象：全国20%~25%，西北30%
- 有效上网成为进一步发展风电、光电的瓶颈
- 弃风弃光的原因是电力需求的严重峰谷差状况



京津唐电网负荷一日内的变化

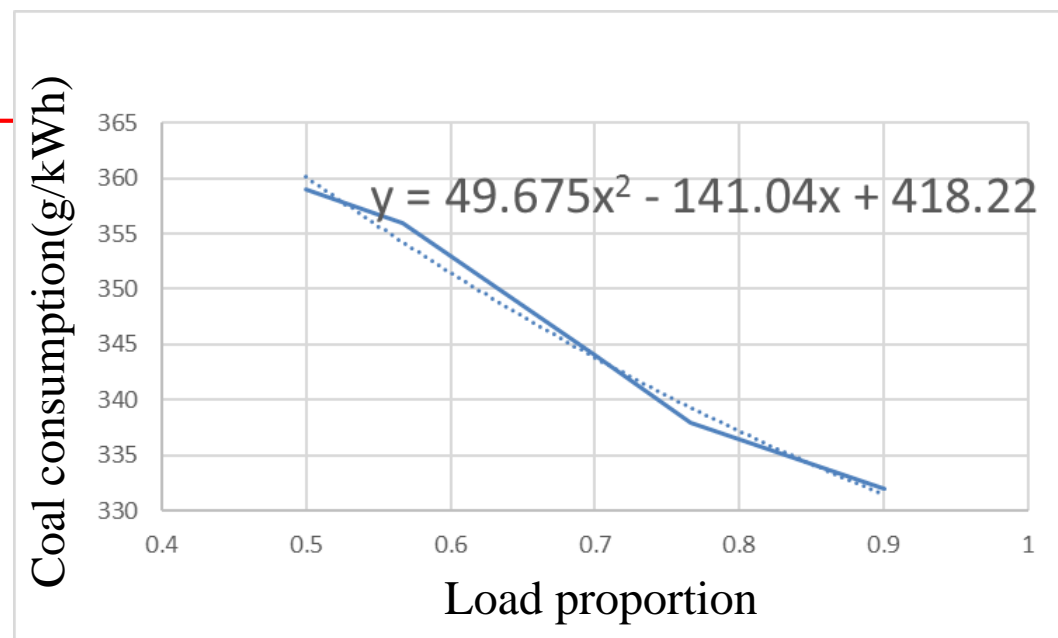


坝上风电一日内的变化



电力系统面临的挑战

- 目前电力调峰主要依靠燃煤电厂调节
- 大量超临界高效电厂低效运行
- 北方地区50万MW火电机组，热电联产电厂不到1/3，必须保留足够的纯发电机组作为调峰电源
- 东北地区由于电力需求的基荷不足，导致部分热电联产机组不能运行，造成冬季热源不足
- 电力调峰和解决风电光电有效利用问题已成为我国能源革命的关键
- 电力需求的峰谷差在很大程度上是建筑用电模式造成，“解铃还须系铃人”



30万kW燃煤机组发电煤耗与负载率关系
The cost of coal to generate electricity at different load for a 300 MW unit



供热热源与供暖方式面临的挑战

- 我国北方城镇建筑供暖面积不到全国建筑总量20%，供暖能耗占全国建筑运行总能耗的22%，北方供暖居住建筑单位面积能耗是南方的2.6倍
- 北方供暖造成的污染物排放占冬季燃料造成的污染物排放的一半，是构成冬季雾霾的主要污染源
- 取消供暖燃煤锅炉，也不能简单地用燃气锅炉替代，必须彻底改变供热热源方式
- 两大问题： 电力调峰， 供热热源

治理雾霾，打赢蓝天保卫战

- 雾霾已成为关系百姓身心健康、生活质量和城市可持续发展的重大问题
- 雾霾成因：直接排放与二次生成
- 北京“煤改气”的巨大投入改善了雾霾了吗？
- 乌鲁木齐全面“煤改气”是否改善了雾霾？
- 目前华北一带雾霾污染源的主要构成
 - 高污染天集中出现在冬季供暖季节
 - 散煤燃烧释放的污染物已经占到燃煤释放污染物总量的50%以上
 - 根治散煤，减少污染排放量，而不是减少燃煤总量
 - 高度关注天然气和汽车尾气排放的氮氧化合物
- 北方清洁取暖行动是治理雾霾、缓解电力供需矛盾、改善农民生活水平的重大工程