

太阳能光热发电的 现状与发展趋势

报告人：肖刚

浙江大学 能源清洁利用国家重点实验室



提纲

1

光热发电技术的潜力

2

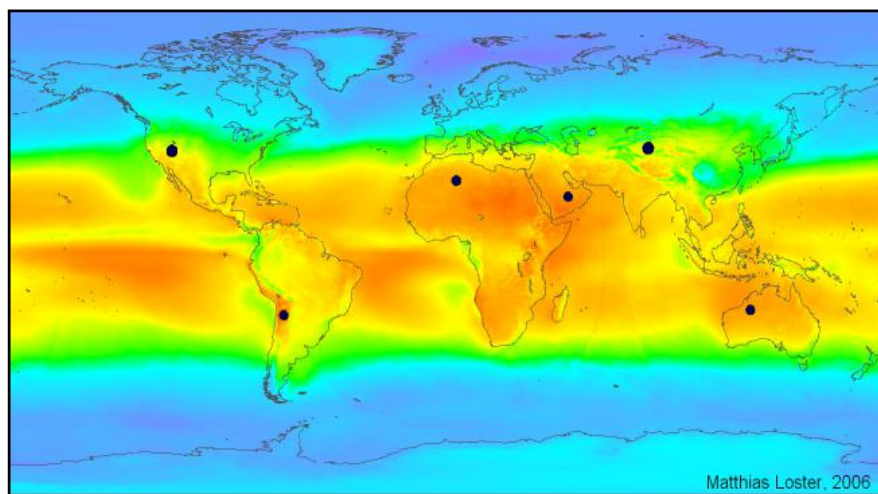
光热发电技术的现状

3

光热发电技术的发展趋势

全球太阳能资源

- 太阳辐射能 3.8×10^{23} kW，地球约接收**二十二亿分之一**，即 1.7×10^{14} kW。



0 50 100 150 200 250 300 350 W/m²

Σ● = 18 TWe

- 到达地面约 8.5×10^{13} kW（含海洋），约为世界能耗**5000倍**。
- 陆地可利用太阳能约合标煤8.7亿吨/年，是世界能耗**480倍**。
- **6个黑点**即可满足全球电力需求

太阳能光伏与光热技术

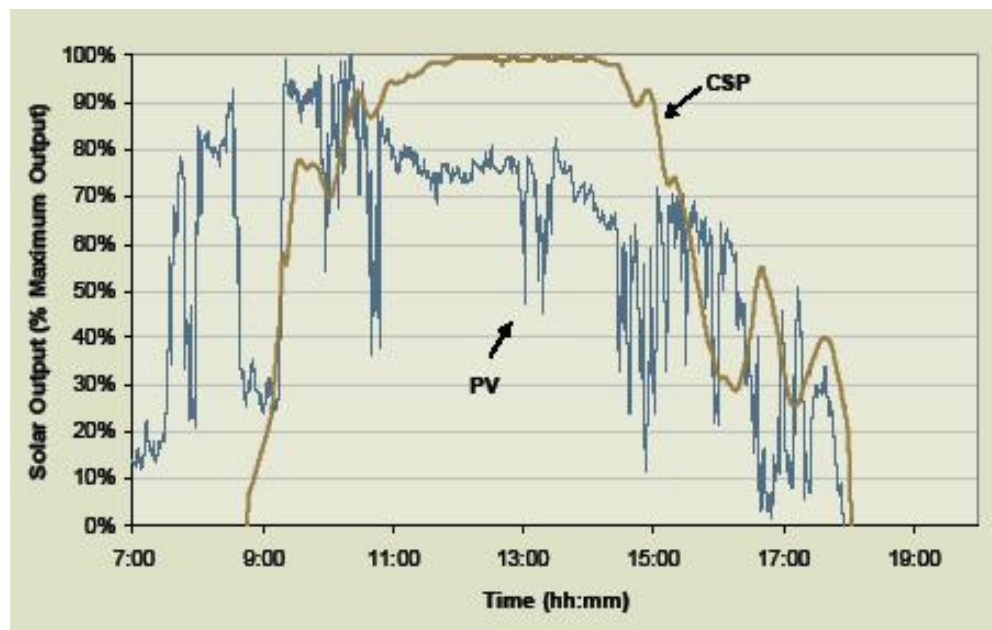


**光伏 (PV) : 直接将光能
转为电能**



**光热(CSP) : 先将光能
转为热能、热功转换之
后转为电能**

光伏与光热的特点



美国加州光伏和光热（无储热）

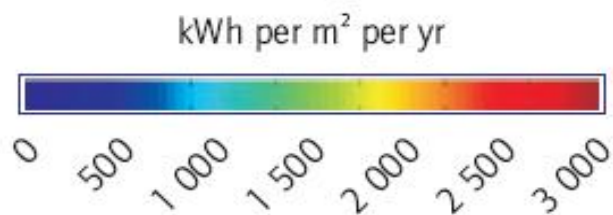
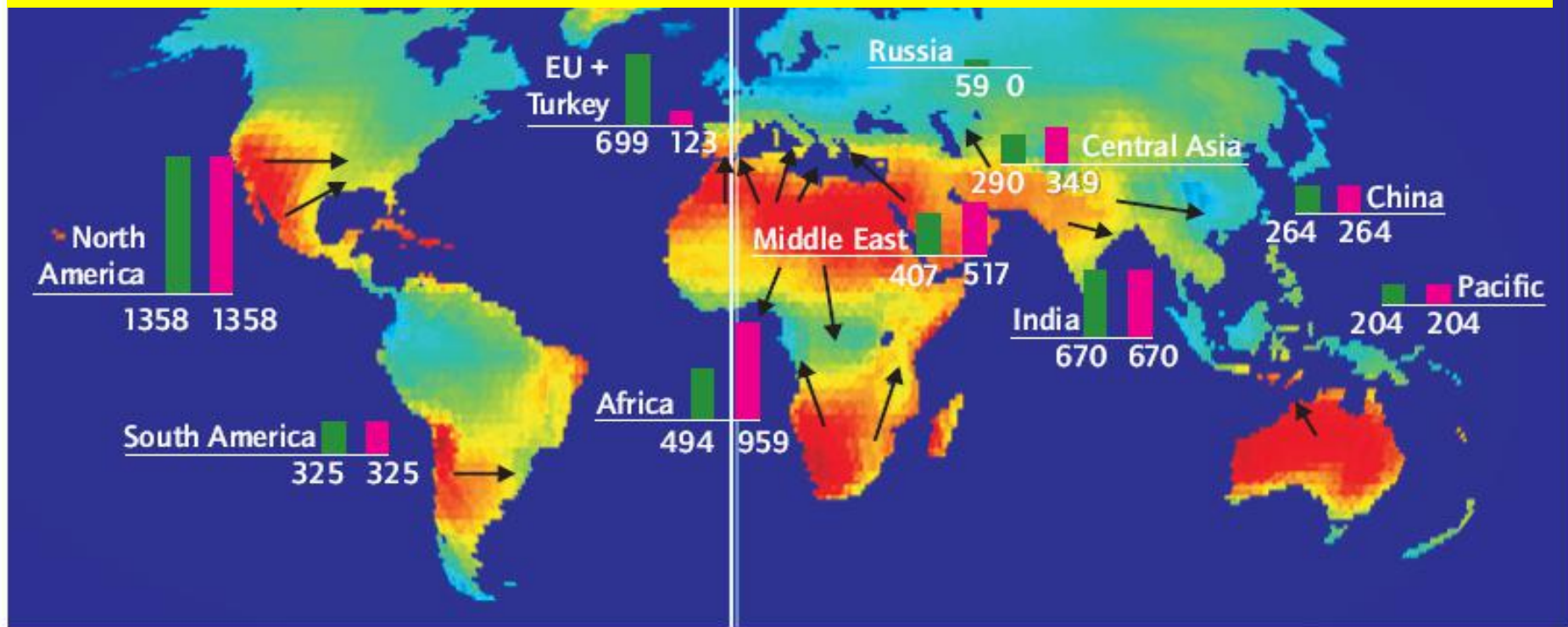
□光伏：随着辐射变化迅速变化

□光热（无储热）：热惯性，输出相对稳定

□光热（储热）：年运行5000小时，具备承担基础负荷的可能

光热发电开发潜力

国际能源署预测，2050年，光热发电装机可望达到11亿千瓦（1100GW），占全球发电量11.3%



单位TWh/y

■ Consumption

■ Production

国际能源署(IEA)2014年报告

提纲

1

光热发电技术的潜力

2

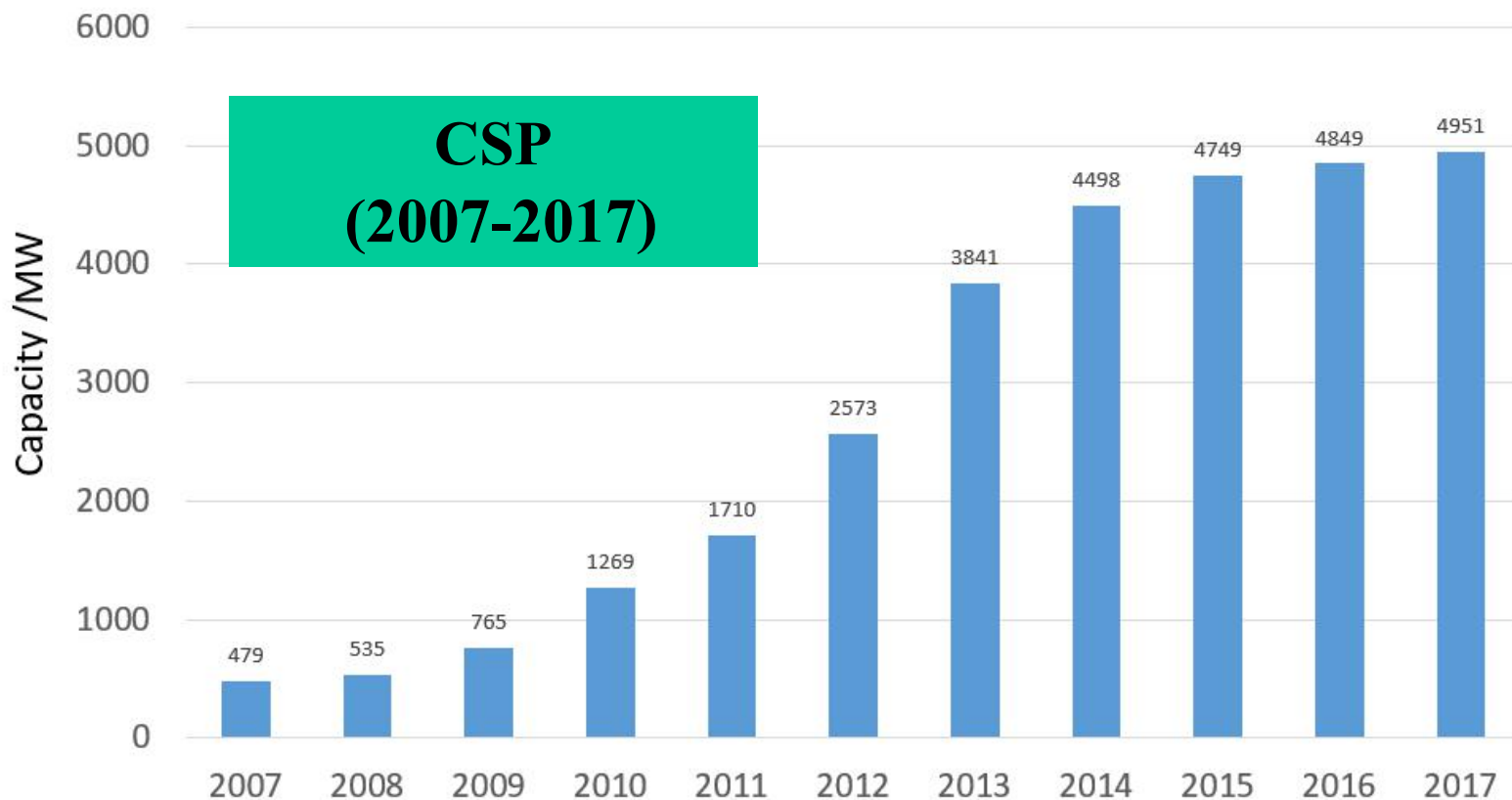
光热发电技术的现状

3

光热发电技术的发展趋势

全世界光热发电装机容量

Total installed capacity for CSP in the world (2007-2017)



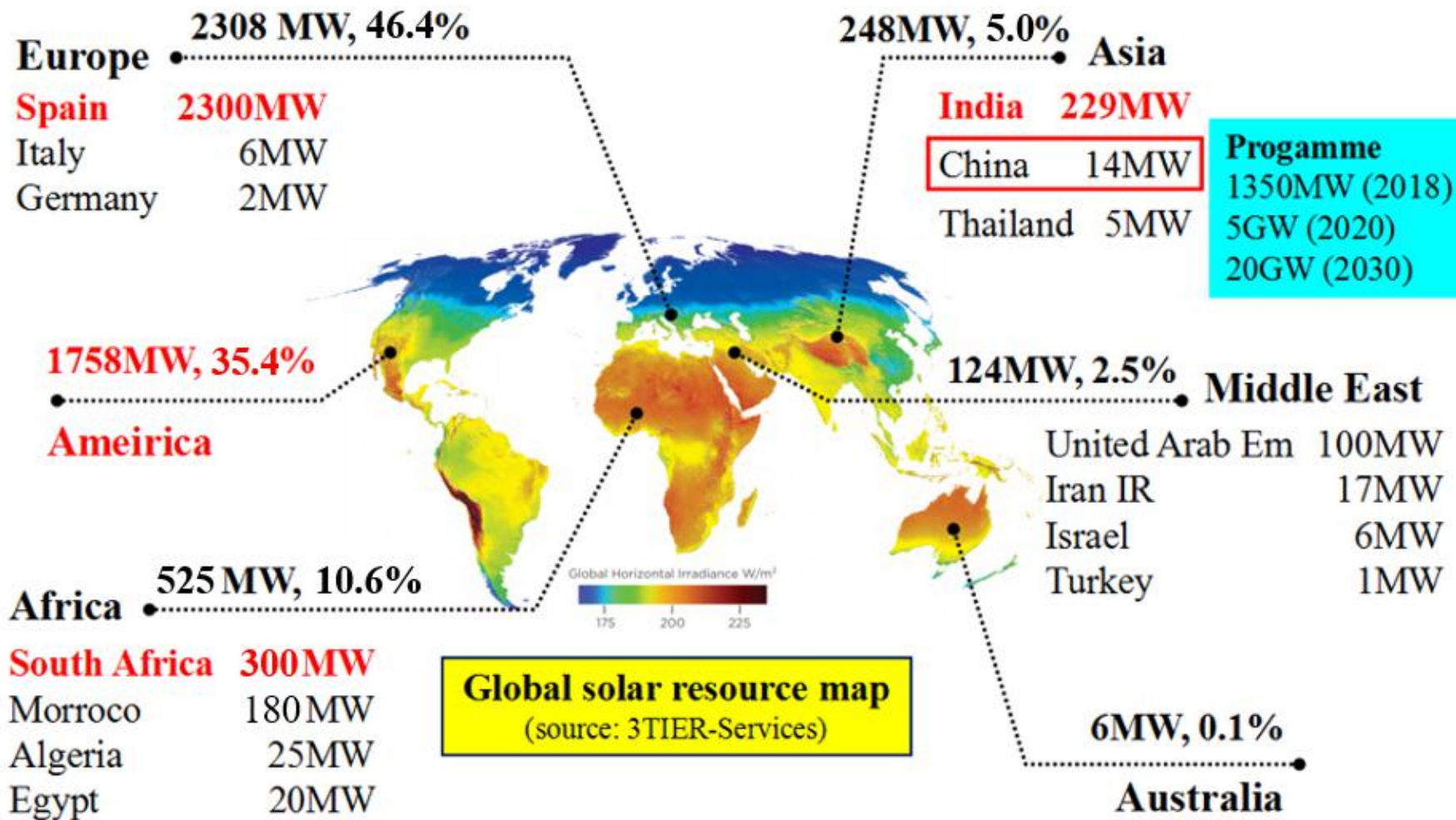
➤ 全球可再生能源装机: **2179GW**

➤ CSP装机: **~5 GW, 要努力!**

From the International Renewable Energy Agency (IRENA, 2018)

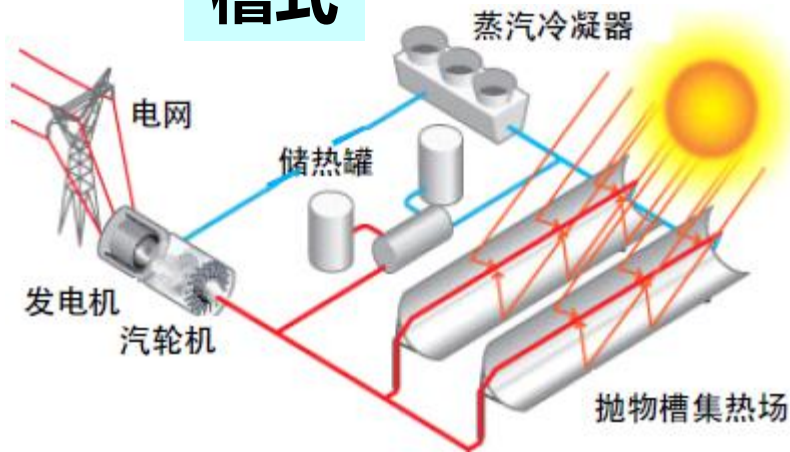
光热装机全球分布情况

**中国投运85MW
在建~700MW**

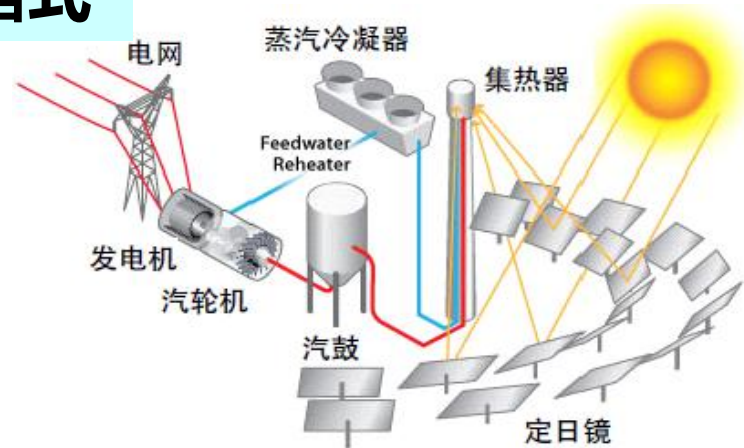


光热发电技术的四种主流形式

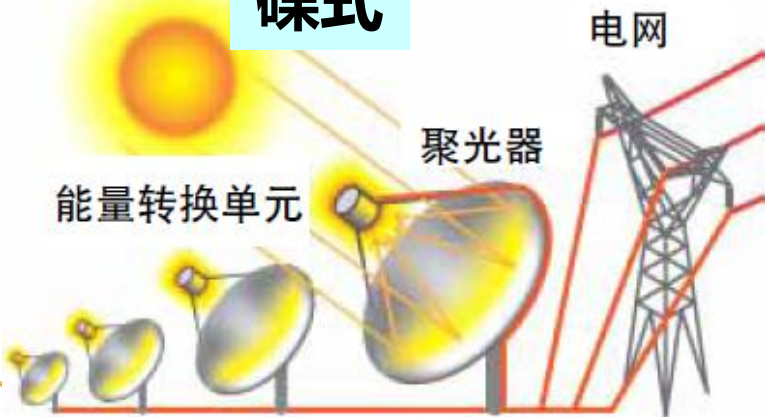
槽式



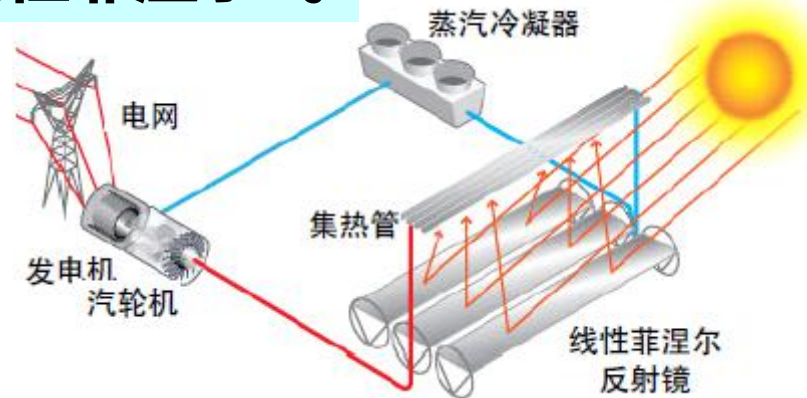
塔式



碟式



线性菲涅尔式



槽式发电系统——最早商业化

- **1984-1991年**，美国加州莫哈维沙漠先后投运9座名为SEGS的槽式电站，总容量354MW。
- 第8座投资为3011美元/kW，发电成本降低到**8.9美分/度**。

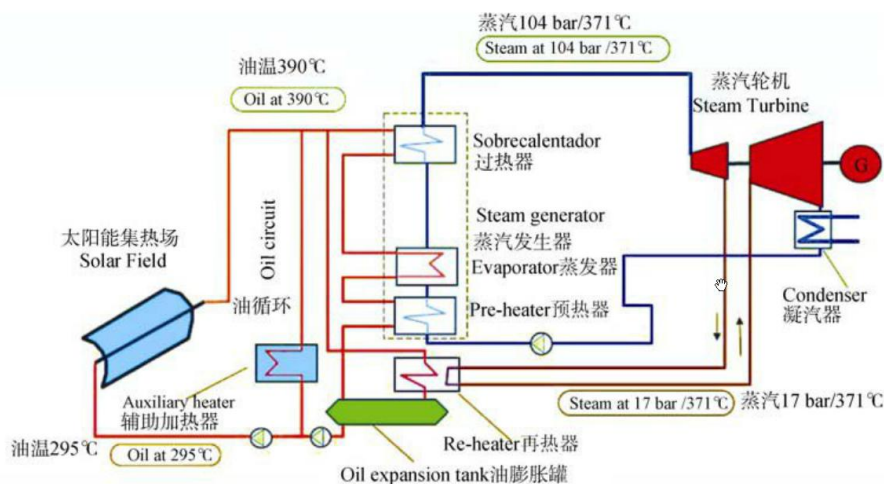


图1 槽式太阳能电站示意图^[3]

槽式系统的基本原理



塔式发电系统——24小时发电

- 2011年10月并网，全球第一座连续24小时太阳能电站
- 20MW+15h储热，6500h/y，年发电110GWh (PV2.9倍)
- Torresol (阿联酋西班牙合资) 投3亿欧元 (融1.7亿)



西班牙Gemasol电站 (20MW)

□ 塔高140m，占地2800亩

□ 120m²×2650定日镜

□ 1000~1500倍聚光

°C熔盐，540°C蒸汽



碟式发电系统——模块化（分布式、规模化）

- 美国陆军，1.5MW (3.5kW×430)
- 自由活塞斯特林发动机，氦工质
- 碟35m²，聚光倍率800
- 峰值效率24%



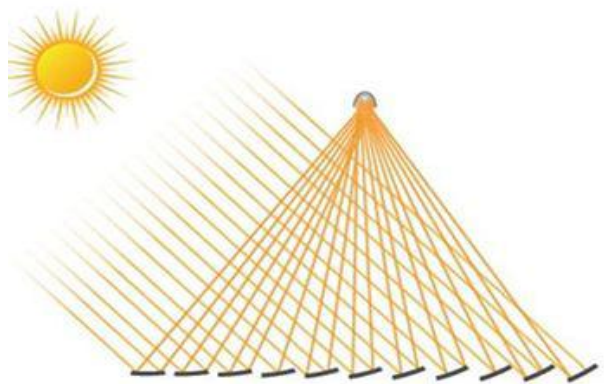
Cleanergy(瑞典)，太阳能碟式斯特林系统（10×12kW）

线性菲涅耳发电系统——布置紧凑

- 西班牙Novatec2012年建成，装机30MW，年发电49GWh
- 蒸气 270°C （55bar），熔盐储热0.5h
- 48条回路（宽16m，长940m）
- 占地 0.65km^2 ，塔式的 $2/3$



西班牙30MW的Puerto Errado 2光热电站



中国光热发电的潜力与现状

我国太阳能资源总量丰富（约为总能耗的700倍）

◆效益可行地区*

($DNI \geq 1800 \text{ kWh/m}^2/\text{y}$)

可装机160亿kW，年发电
42万亿kWh

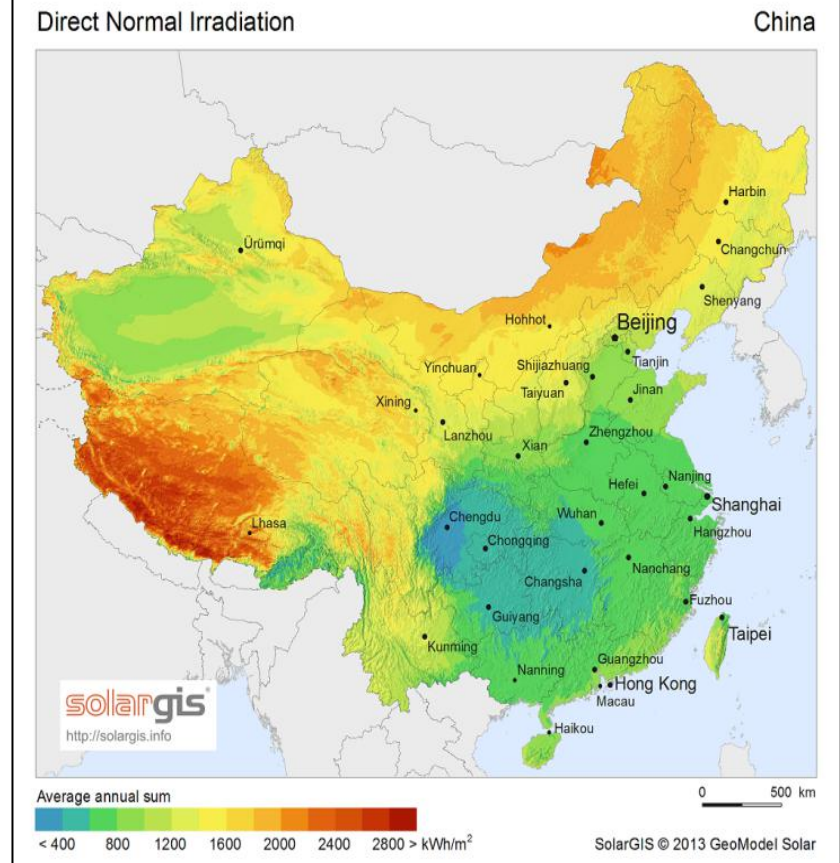
为我国电力消费7倍

◆效益很好地区*

($DNI \geq 2500 \text{ kWh/m}^2/\text{y}$)

可装机14亿kW，年发电3.7
万亿kWh

为我国电力消费~70%



*中国太阳能热发电的可行性及政策研究报告
(国家能源局指导编制, 2013)

中国20-4个示范项目分布情况

新疆哈密(1)

1个 熔盐塔式

甘肃敦煌、玉门(9)

4个 熔盐塔式

3个 导热油槽式

1个 熔盐槽式

1个 熔盐菲涅尔式

青海德令哈、共和(4)

3个 熔盐塔式

1个 导热油槽式

内蒙乌拉特 (2)

1个 导热油槽式

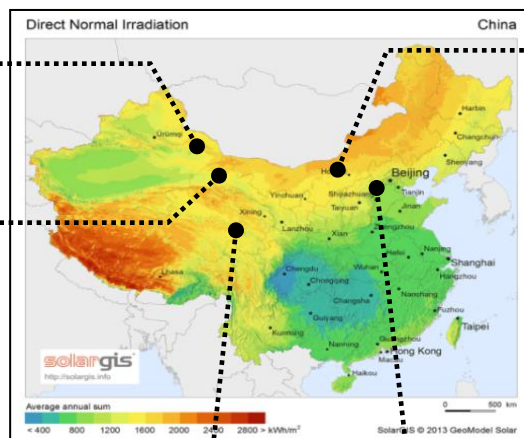
1个 导热油菲涅尔式

河北张家口(4)

1个 熔盐塔式

1个 熔盐槽式

2个 水工质菲涅尔式



➤ 9-2 个塔式

➤ 7 个槽式

➤ 4-2个菲涅尔式

提纲

1

光热发电技术的潜力


2

光热发电技术的现状

3

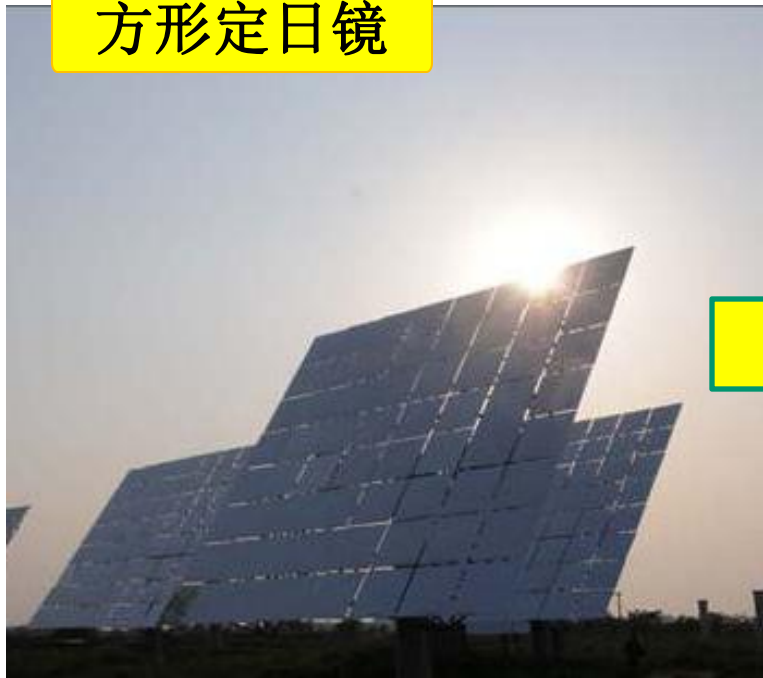
光热发电技术的发展趋势

发展趋势：高温、高效、节水

比较项目	槽式 菲涅尔式	塔式	碟式
聚光比	60~100	400~600	500-1000	400-1500
传热工质	导热油	熔盐/直流	氢气/氦气	气体/固体
做功介质	水/蒸汽	水/蒸汽	氢气/氦气	空气/CO2
热功循环	朗肯	朗肯	斯特林	布雷顿
集热储热	<400°C	<580°C	650~750°C	>800°C
			高温、高效、节水	
发电效率	15~20%	15~25%	20~25%	>30%
耗水量 (空冷)	~1.70 (0.2~0.3) kg/kWh	~1.40 (0.15~0.25) kg/kWh	~0.02 kg/kWh	~0.01 kg/kWh

国际发展——聚光

方形定日镜



五边形巨蜥定日镜



- 镜面反射面积 47.5m^2 。
- 五边形形状，可以减少定日镜之间的遮挡，提高镜场利用效率，定日镜场的成本降低20%。

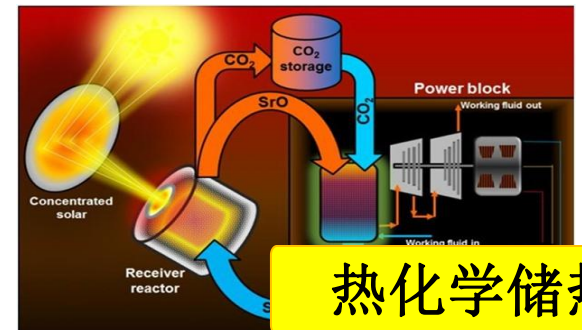
德国Schlaich Bergermann Partner (SBP)与西班牙Masermic、Ingemetal研发

国际发展——高温集热储热 ($>800^{\circ}\text{C}$)

- 美国桑迪亚国家实验室 (SNL) 粒子吸热器集热和储热温度 840°C ，可望 1200°C 。
- 美国俄勒冈州立大学和佛罗里达大学研发基于碳酸锶的热化学储热系统，运行温度高达 1200°C 。
- 美国阿贡国家实验室，胶囊内为熔盐，体积热容提高 50% ，温度超过 800°C



粒子吸热器



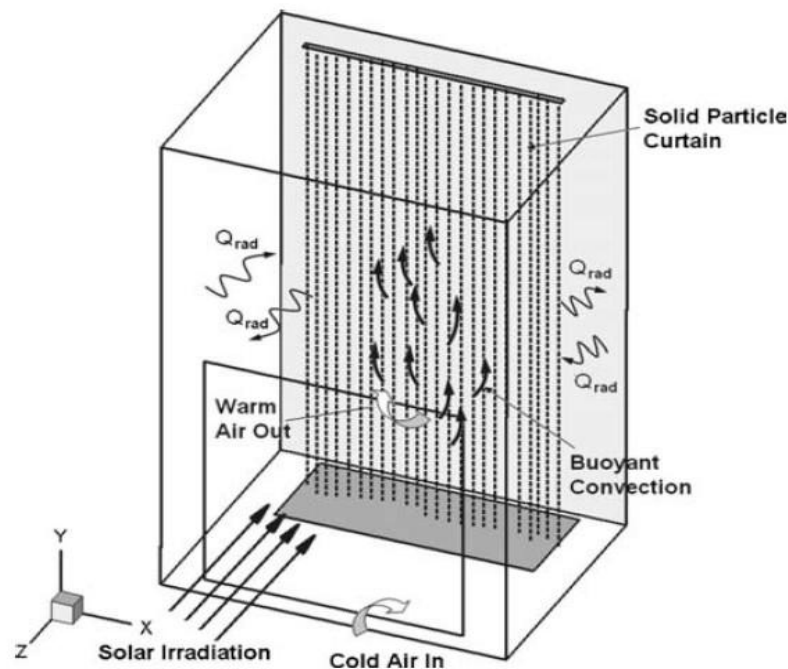
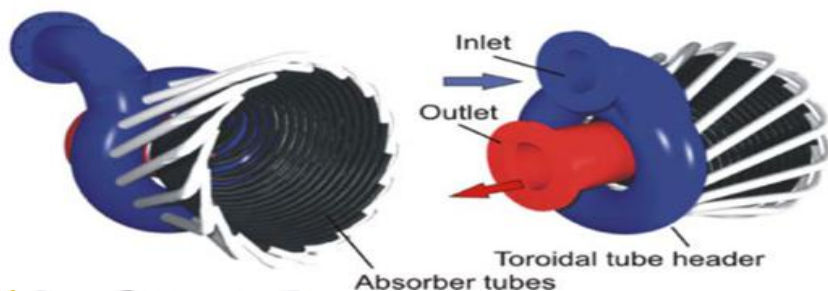
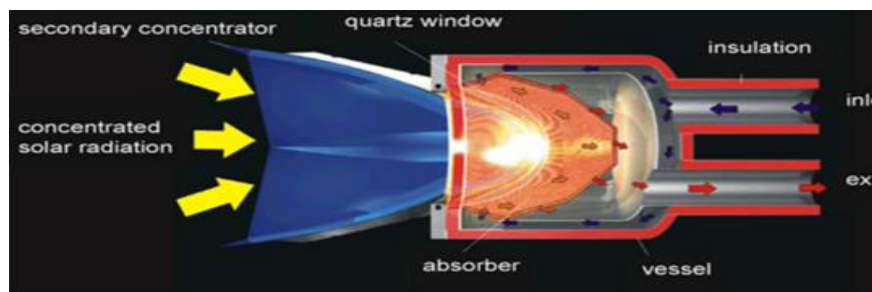
热化学储热



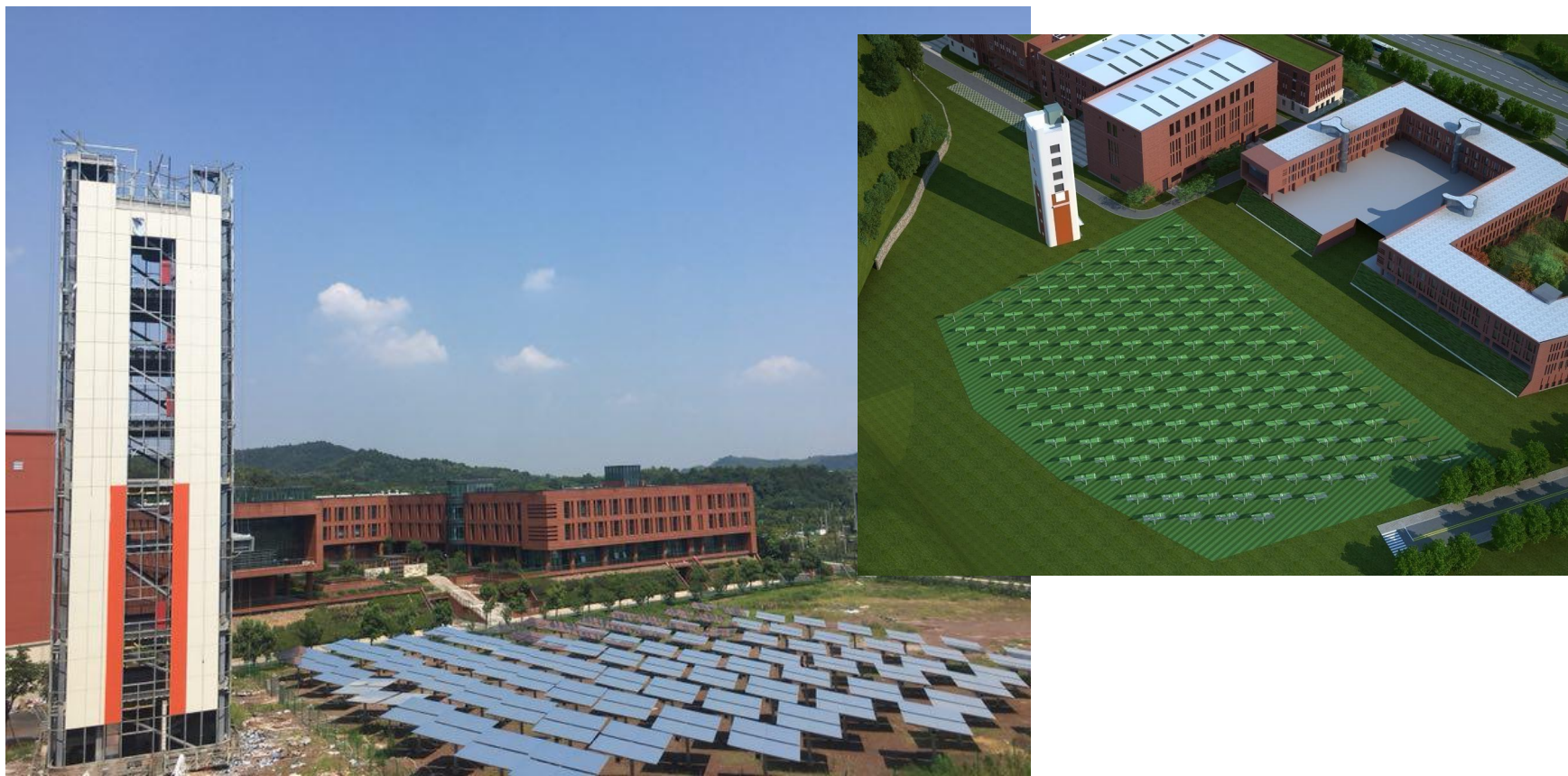
相变胶囊储热

国际发展——高温集热 (800-1000°C)

- 导热油 → 熔盐 → 直接加热 (过热蒸汽)
- 饱和蒸汽 → 过热蒸汽
- 高温空气 → Brayton循环
- 超临界CO₂循环



MW级太阳能光热发电研发基地（浙大）



地点：杭州市临安区（距玉泉校区40km；1h车程）

规模：塔高40米、塔内面积 $10\text{m}\times 10\text{m}$ ，总镜面积 2000 m^2
（一期，可拓展），峰值热功率1.2 MW

总结：基本观点和判断

- 光热发电技术（带有储热）优势比较突出
- 光热发电即将迎来一个全球发展期
- 产业链形成，光热成本已经处于快速下降通道
- 高温、高效、节水，是技术发展的重要主题
- 高温储热和先进循环，最值得关注
- 多联供、与其他工业农业设施结合，需要进一步探讨



**谢谢！
敬请批评指导！**

