



面向碳中和目标的 高精度土地利用和电力建模

Zhang Da, **Zhu Ziheng**, Chen Shi, et al. Spatially resolved land and grid model of carbon neutrality in China[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2024, 121(10): e2306517121.

朱子恒

mrziheng@outlook.com

2025/05/18

CONTENTS



清华大学能源环境经济研究所
INSTITUTE of ENERGY, ENVIRONMENT and ECONOMY
TSINGHUA UNIVERSITY

01 | 研究背景

02 | 风力和光伏发电的资源评估

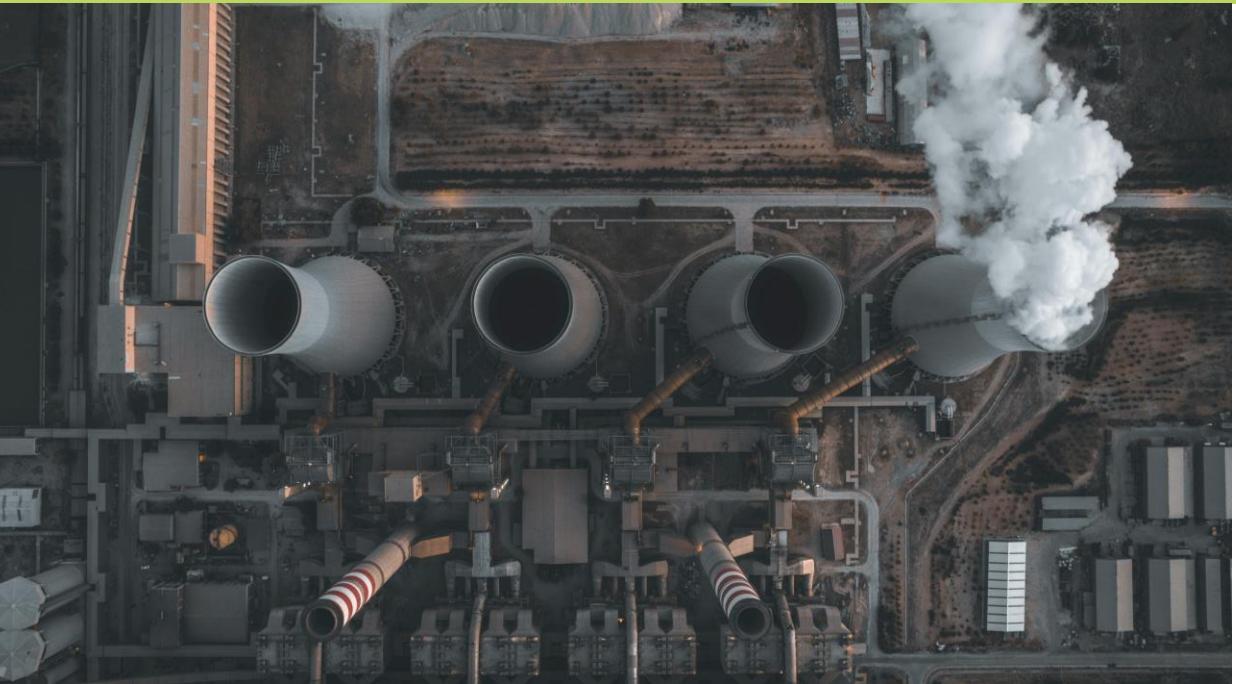
03 | 可再生能源布局与电力系统优化模型

Renewable Energy Siting and Power-system Optimization Model

04 | 主要研究发现

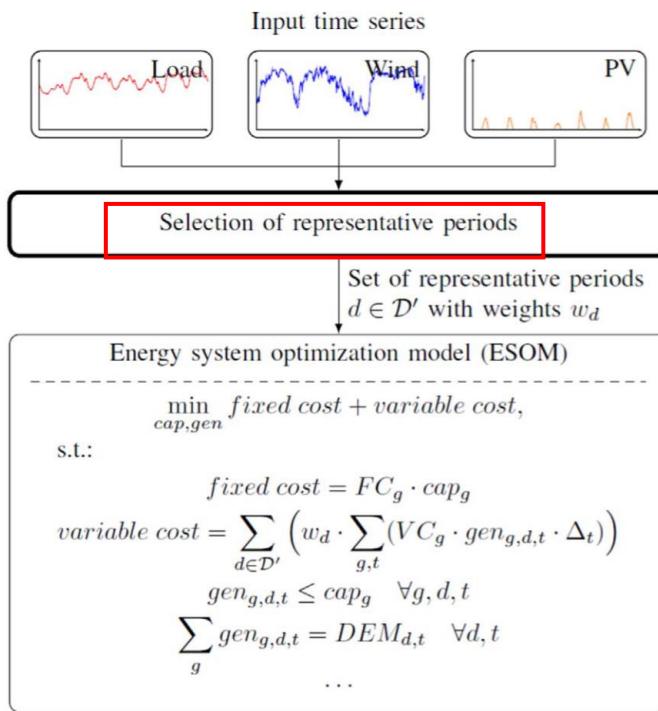
研究背景

- 发展以风能和太阳能为代表的可再生能源对我国推动电力系统脱碳、实现“碳中和”目标具有重要意义
- 发展高比例可再生能源为电力系统带来了新的挑战
 - 受气象条件影响大
 - 发电波动性强
 - 供需存在时空错配
- 亟需发展适应高比例可再生能源建设的高时空分辨率电力系统规划模型为电力转型提供决策支撑

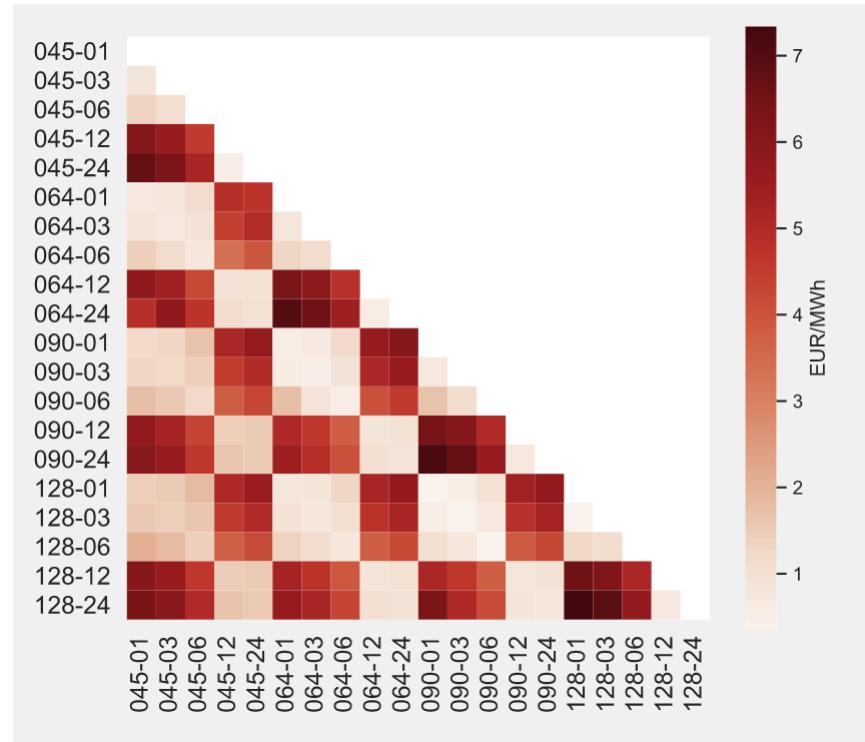


电力系统规划模型与可再生能源并网潜力

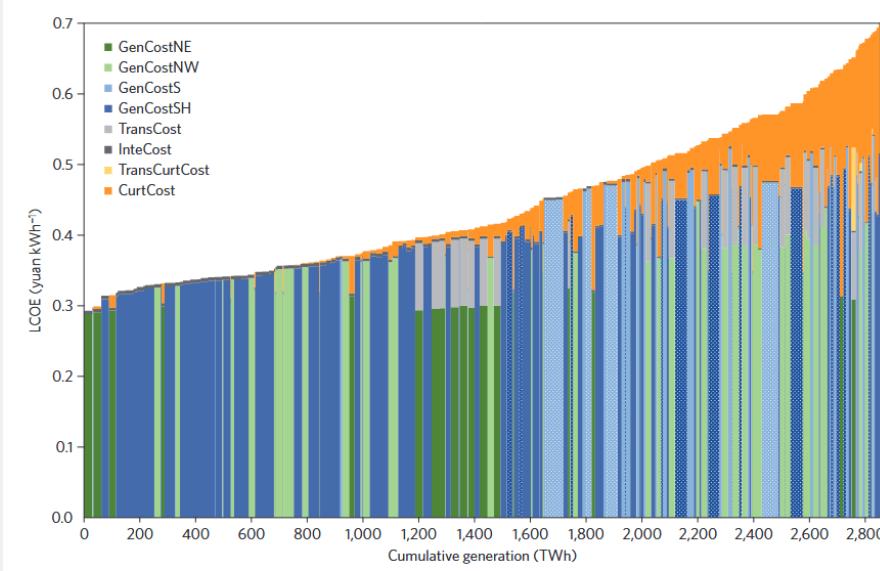
传统电力模型多采用典型小时数（几十~几百）模拟电力系统运行和在可再生资源区层面（几十~几百）进行容量扩张
(Collins et al., 2017)



电力系统扩增模型对时间精度尤其敏感 (Schyska et al., 2021)



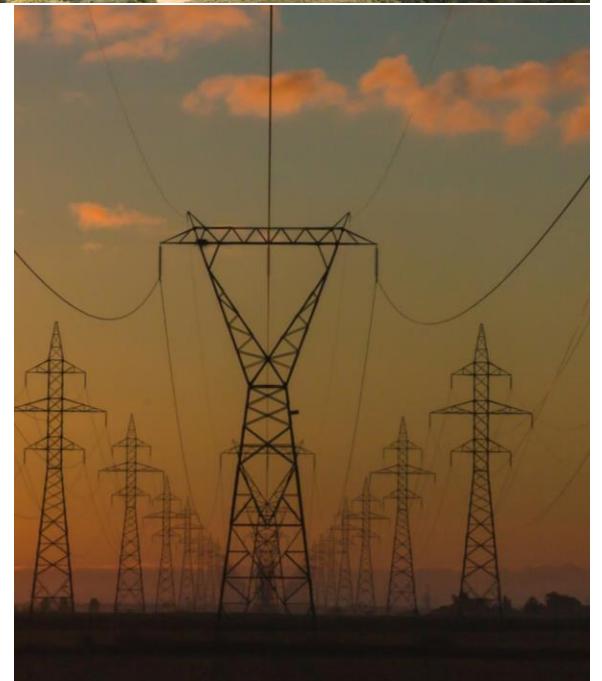
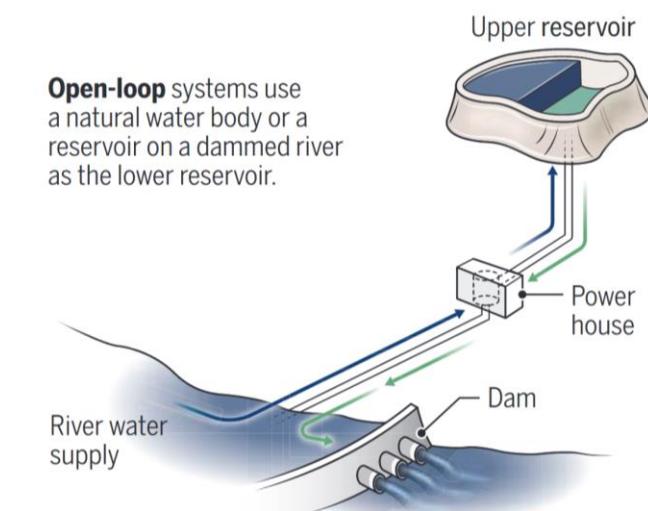
过去对于格点级可再生能源布局的研究采用启发式算法，难以表达电力系统的整体优化
(Davidson et al., 2016)



1. Schyska B U, Kies A, Schlott M, et al. The sensitivity of power system expansion models[J]. Joule, 2021, 5(10): 2606-2624.
2. Collins S, Deane J P, Poncelet K, et al. Integrating short term variations of the power system into integrated energy system models: A methodological review[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2017, 76: 839-856.
3. Davidson M R, Zhang D, Xiong W, et al. Modelling the potential for wind energy integration on China's coal-heavy electricity grid[J]. Nature Energy, 2016, 1(7): 1-7.

研究内容与科学问题

- 本研究中，我们评估了格点尺度的风电和光伏的资源潜力，并开发了高时空分辨率的可再生能源布局与电力系统优化模型，以回答如下科学问题：
- 综合权衡土地利用和生态保护等因素，接近6000GW级的风电光伏能够被部署在哪些地方？
- 如何系统性配置储能和特高压输电线路来调节可再生能源发电的不确定性？
- 净零排放电力系统的电力成本是多少？





清华大学能源环境经济研究所
INSTITUTE of ENERGY, ENVIRONMENT and ECONOMY
TSINGHUA UNIVERSITY

2. 风力和光伏发电的资源评估

风力和光伏发电的资源评估： 评估内容和方法



清华大学能源环境经济研究所
INSTITUTE of ENERGY, ENVIRONMENT and ECONOMY
TSINGHUA UNIVERSITY

格点级最大装机潜力和逐小时发电潜力

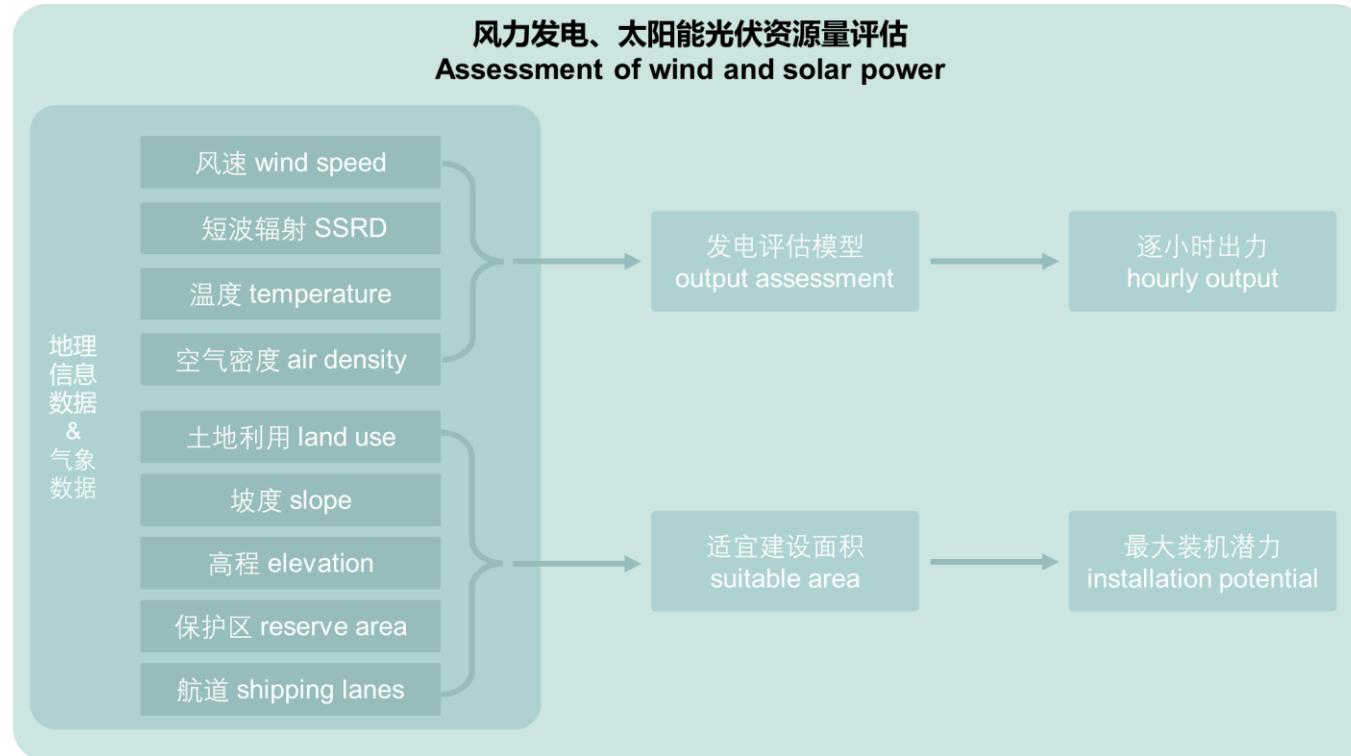


Fig. 格点尺度 ($0.3125^\circ \times 0.25^\circ$) 最大装机潜力和逐小时发电潜力评估流程

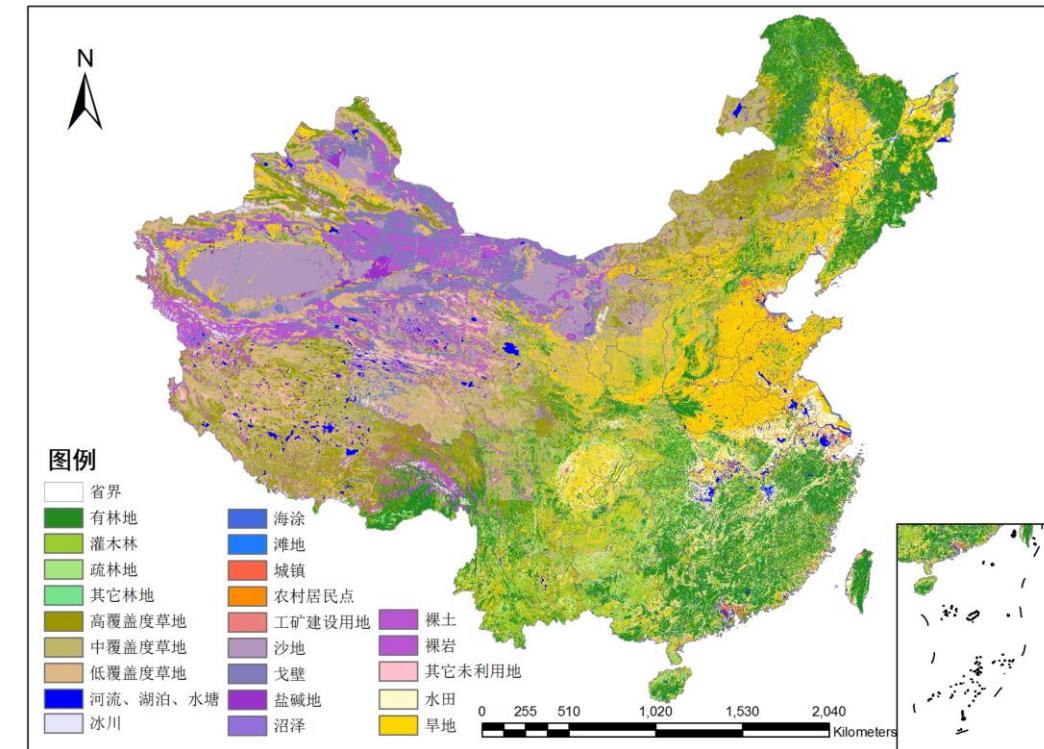


Fig. 高空间精度土地利用数据 (30m)。来源：中科院资源环境与科学数据中心

风力和光伏发电的资源评估： 适宜建设面积评估



清华大学能源环境经济研究所
INSTITUTE of ENERGY, ENVIRONMENT and ECONOMY
TSINGHUA UNIVERSITY

- 基于**技术指标**和**生态环境约束**等要求剔除不满足建设可再生能源的像素块
- 通过梳理政策文件和参考相关文献为不同土地利用类型设计适宜建设系数
- 考虑**乐观**、**基本**和**保守**三种土地利用可获得性情景评估最大适宜建设面积

政策要求和适宜系数设计

- **严格禁止**破坏现有土地类型：
 - 自然保护区和生物多样性保护区（生态和环境）；
 - 永久基本农田（粮食安全）；
 - 内陆水面（防洪防汛）；
 - 高郁闭度森林（生态和环境）；
 - 高覆盖草地（生态和环境）；
- **未利用土地**，如戈壁、沙漠、盐碱地、裸土地等被鼓励用于建设可再生能源

Tab. 不适宜建设技术指标阈值

Natural condition	Onshore wind			Offshore wind			Utility-scale solar		
	Conservative	Base	Open	Conservative	Base	Open	Conservative	Base	Open
Slope (%)	>15	>20	>25	-	-	-	>3	>5	>7
Altitude (m)	>3000	-	-	-	-	-	-	-	-
Distance from shore (km)	-	-	-	< 10	> 80	> 80	> 80	-	-
Water depth (m)	-	-	-	> 40	> 60	> 100	-	-	-

Tab. 不同土地利用类型的适宜建设系数划定

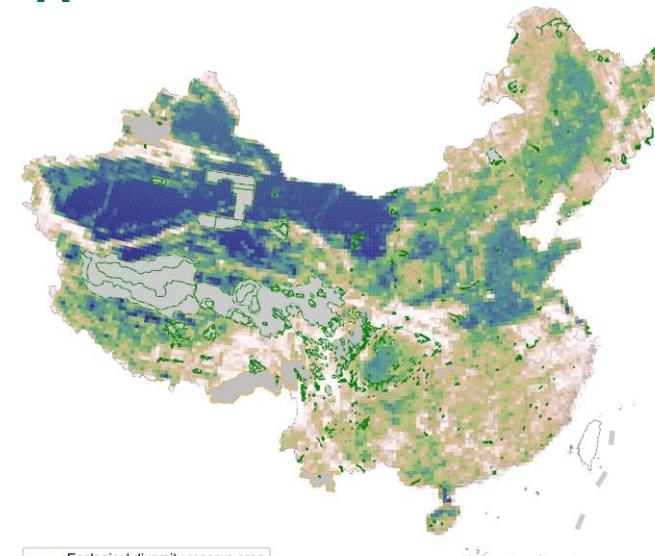
ID	Name	ID	Name	Level 1			Level 2			Onshore wind (%)			Utility-scale solar (%)		
				Conservative	Base	Open	Conservative	Base	Open	Conservative	Base	Open	Conservative	Base	Open
1	Cropland	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	-	11	Paddy/irrigated cropland	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
-	-	12	Dry cropland	60	80	100	0	0	0	0	0	0	5	10	-
2	Forest land	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	-	21	Closed forest land	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
-	-	22	Shrubland	60	80	100	0	0	0	0	0	0	5	10	-
-	-	23	Open forest land	60	80	100	0	0	0	0	0	0	5	10	-
-	-	24	Other forest land	60	80	100	0	0	0	0	0	0	5	10	-
3	Grassland	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	-	31	High coverage grassland	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
-	-	32	Moderate coverage grassland	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
-	-	33	Low coverage grassland	60	80	100	15	0	0	0	0	0	20	25	-
4	Inland water area	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	-	41	Rivers and streams	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
-	-	42	Lakes	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
-	-	43	Reservoirs and ponds	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
-	-	44	Permanent ice and snow	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
-	-	45	Tidal flats	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
-	-	46	River/lake shoals	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	Urban and built-up land	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	-	51	Urban land	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5	10	-
-	-	52	Rural settlements	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5	10	-
-	-	53	Other construction land	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5	10	-
6	Unused land	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	-	61	Sandy land	80	90	100	30	0	0	0	0	0	40	50	-
-	-	62	Gobi land	80	90	100	30	0	0	0	0	0	40	50	-
-	-	63	Saline-alkali land	80	90	100	30	0	0	0	0	0	40	50	-
-	-	64	Wetland	80	90	100	30	0	0	0	0	0	40	50	-
-	-	65	Bare land	80	90	100	30	0	0	0	0	0	40	50	-
-	-	66	Bare rock	80	90	100	30	0	0	0	0	0	40	50	-
-	-	67	Other unused land	80	90	100	30	0	0	0	0	0	40	50	-

风力和光伏发电的资源评估： 风力发电适宜建设面积评估结果

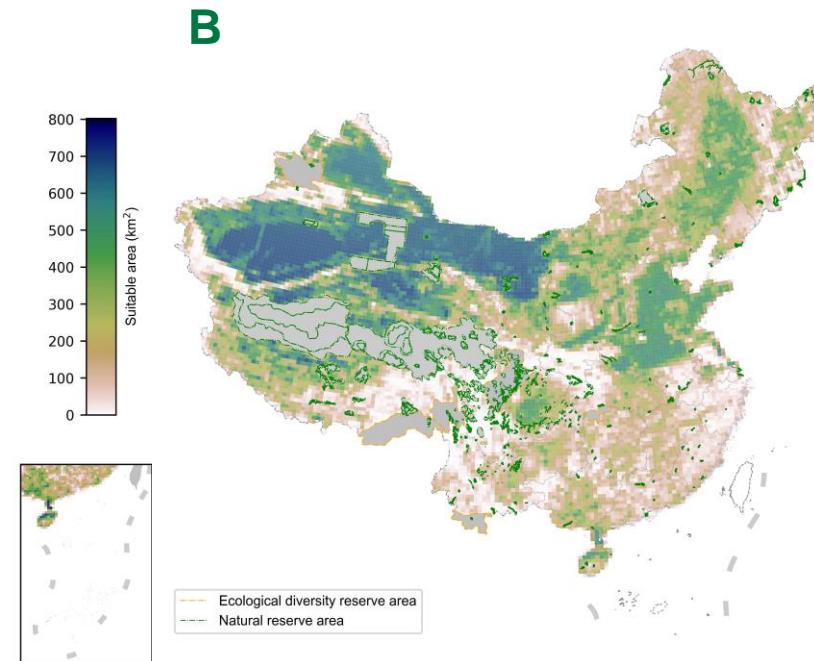


清华大学能源环境经济研究所
INSTITUTE of ENERGY, ENVIRONMENT and ECONOMY
TSINGHUA UNIVERSITY

A



B



C

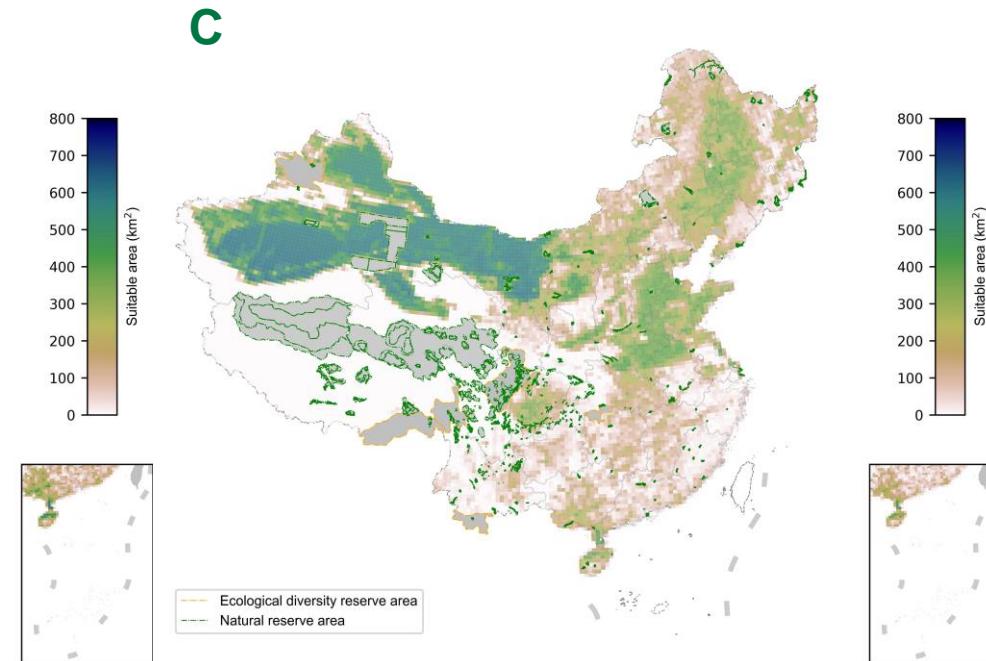


Fig. 风力发电适宜建设面积评估结果 (km^2)。A: 乐观情景; B: 基础情景; C: 保守情景

风力和光伏发电的资源评估： 集中式光伏适宜建设面积评估结果



清华大学能源环境经济研究所
INSTITUTE of ENERGY, ENVIRONMENT and ECONOMY
TSINGHUA UNIVERSITY

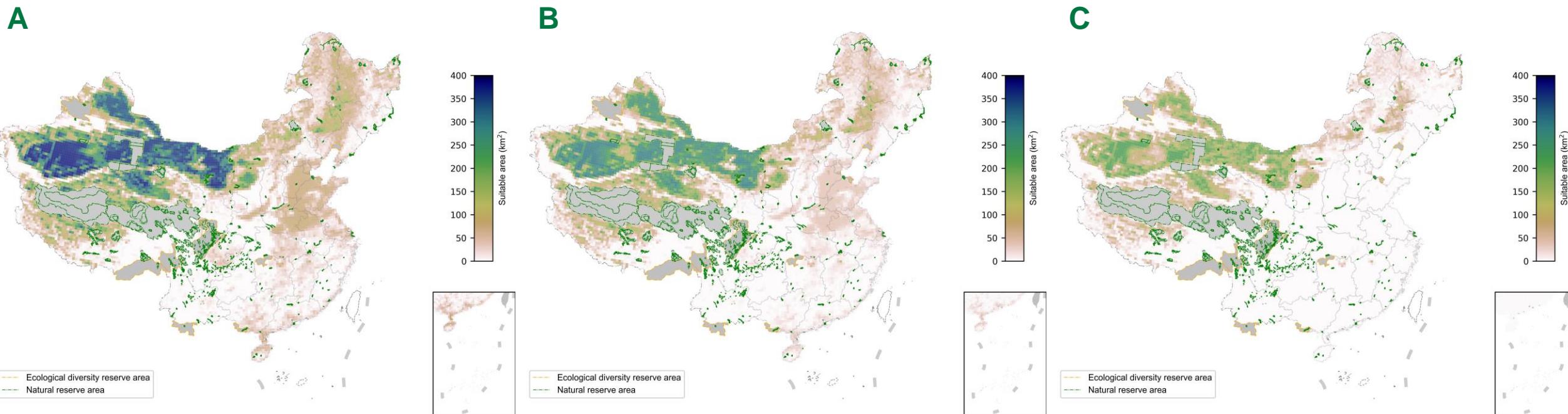


Fig. 集中式光伏发电适宜建设面积评估结果 (km²)。A: 乐观情景; B: 基础情景; C: 保守情景

风力和光伏发电的资源评估： 最大装机潜力评估



清华大学能源环境经济研究所
INSTITUTE of ENERGY, ENVIRONMENT and ECONOMY
TSINGHUA UNIVERSITY

- 可再生能源装机潜力可以表达为适宜建设面积与装机密度的乘积：

$$Cap_g^{pot} = SA_g \times D_g,$$

式中 Cap_g^{pot} 是发电技术 g 每格点的最大装机潜力 (MW) , SA_g 是发电技术 g 在每格点内的适宜建设面积 (km^2) , D_g 是发电技术 g 的装机密度 (MW/km^2) .

风力发电：考虑到叶片安全和减轻尾流效应的影响等，风机之间的横纵距离分别假设为10倍和5倍叶片半径，采用GE 2.5 MW turbine和Vestas 8.0 MW turbine两种风机型号计算得到陆上风电 ($5 \text{ MW}/\text{km}^2$) 和海上风电 ($6 \text{ MW}/\text{km}^2$) 的装机密度

光伏发电：采用固定倾角模型 (Chen et al., 2019) 计算装机密度，考虑到最佳倾角和光阴影影等，装机密度是纬度的函数：纬度越高，密度越小

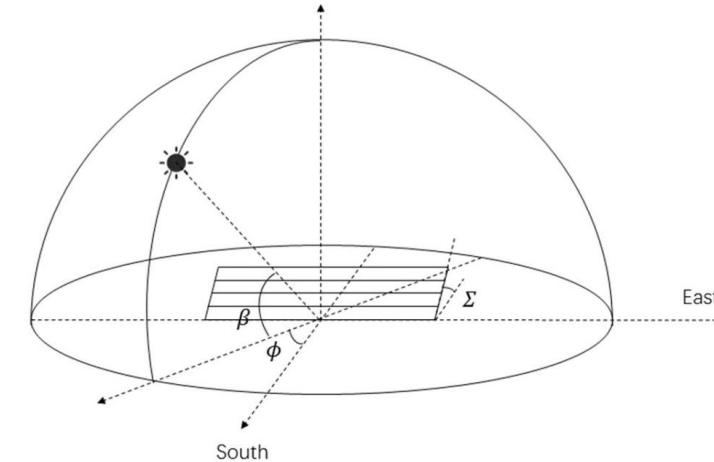


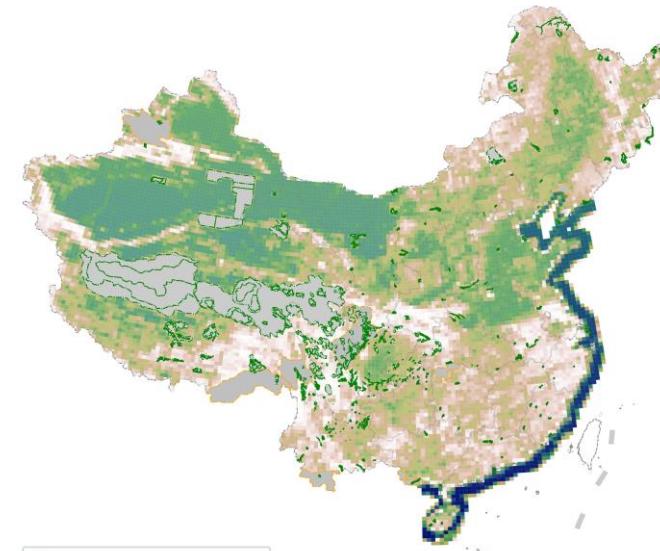
Fig. 固定倾角模型评估光伏发电装机密度示意。
Figure source: Chen et al. 2019.

风力和光伏发电的资源评估： 风力发电的最大装机潜力

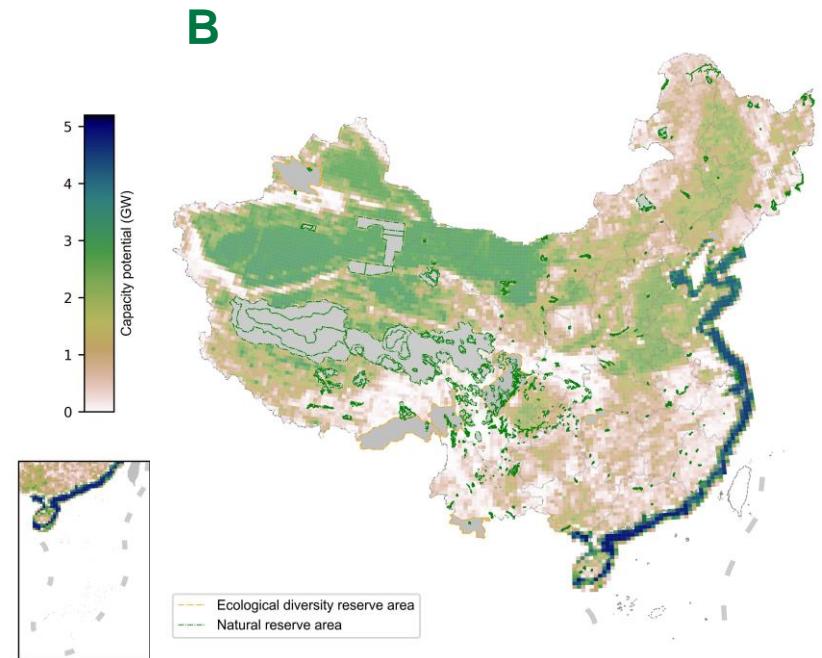


清华大学能源环境经济研究所
INSTITUTE of ENERGY, ENVIRONMENT and ECONOMY
TSINGHUA UNIVERSITY

A



B



C

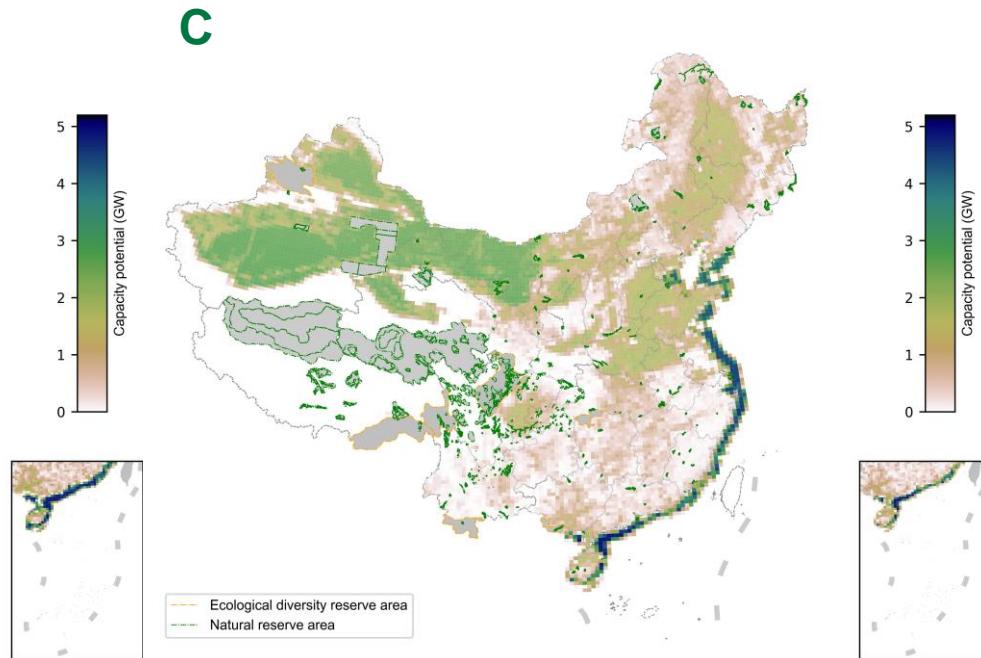


Fig. 风力发电最大装机潜力评估结果 (GW) 。A: 乐观情景; B: 基础情景; C: 保守情景

风力和光伏发电的资源评估： 光伏发电的最大装机潜力



清华大学能源环境经济研究所
INSTITUTE of ENERGY, ENVIRONMENT and ECONOMY
TSINGHUA UNIVERSITY

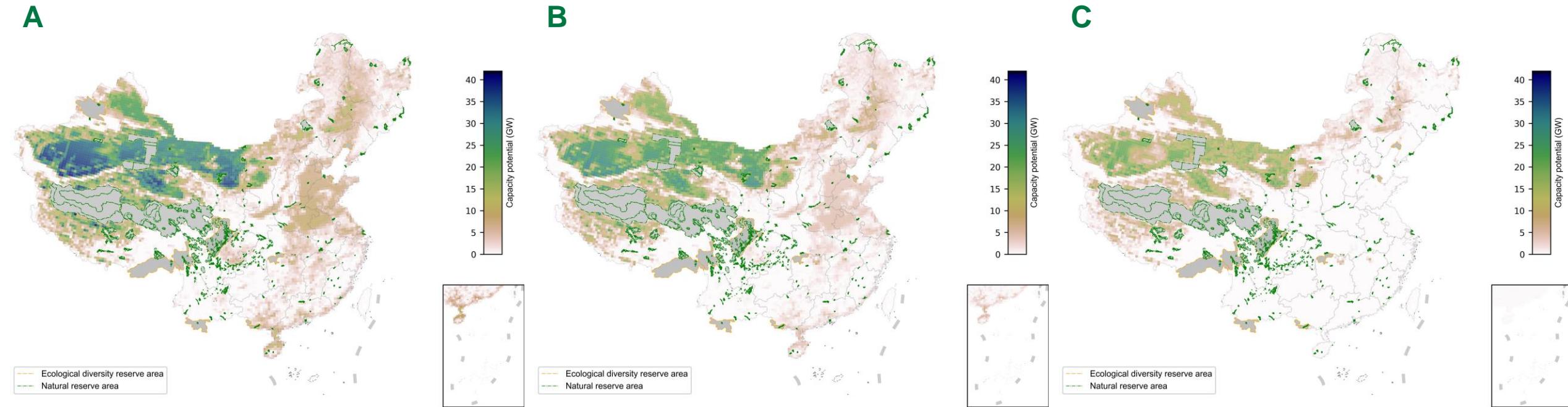


Fig. 光伏发电最大装机潜力评估结果 (GW) 。A: 乐观情景; B: 基础情景; C: 保守情景

风力和光伏发电的资源评估： 逐小时出力曲线评估



- 风力发电：使用GEOS-5数据库中的风速，和GE 2.5 MW（陆上风电）和Vestas 8.0MW（海上风电）的风速-功率曲线计算逐小时容量因子

Parameters	GE 2.5 MW (onshore)	Vestas 8.0 MW (offshore)
Nameplate capacity (MW)	2.5	8.0
Cut-in wind speed (m/s)	3.0	4.0
Rated wind speed (m/s)	13.0	13.0
Cut-out wind speed (m/s)	25.0	25.0
Diameter (m)	100	164
Hub height (m)	100	100

- 光伏发电：使用GEOS5-FP数据库中的太阳辐射、地表气温和地表风速计算逐小时容量影子：

$$\frac{P}{P^0} = \frac{I}{I_{std}} \times [1 + \gamma \times (T_{cell} - T_{cell}^{std})] \times \eta_{ele}.$$

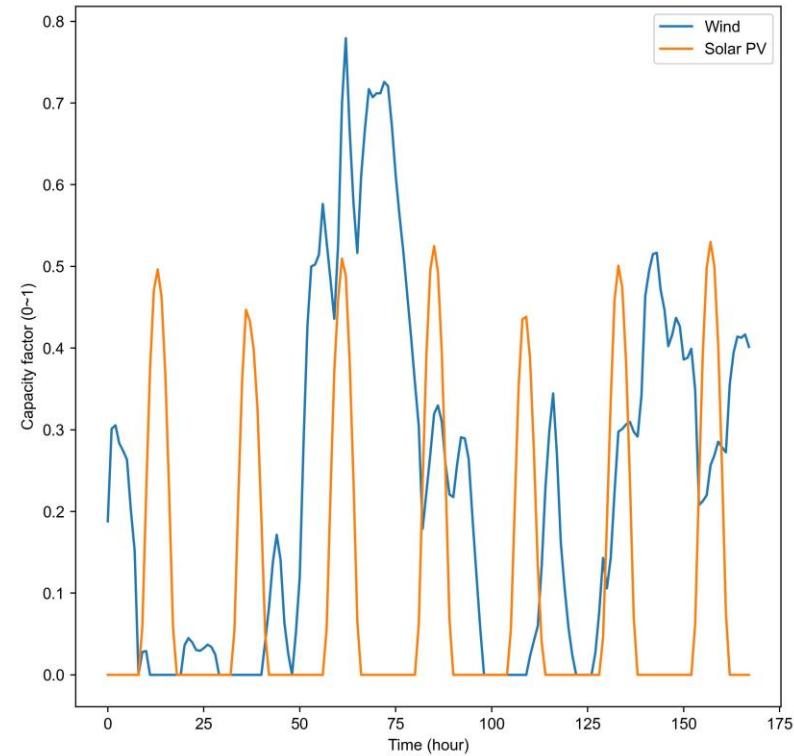


Fig. 典型周逐小时风力和光伏发电容量因子示意

风力和光伏发电的资源评估： 逐小时出力曲线评估



清华大学能源环境经济研究所
INSTITUTE of ENERGY, ENVIRONMENT and ECONOMY
TSINGHUA UNIVERSITY

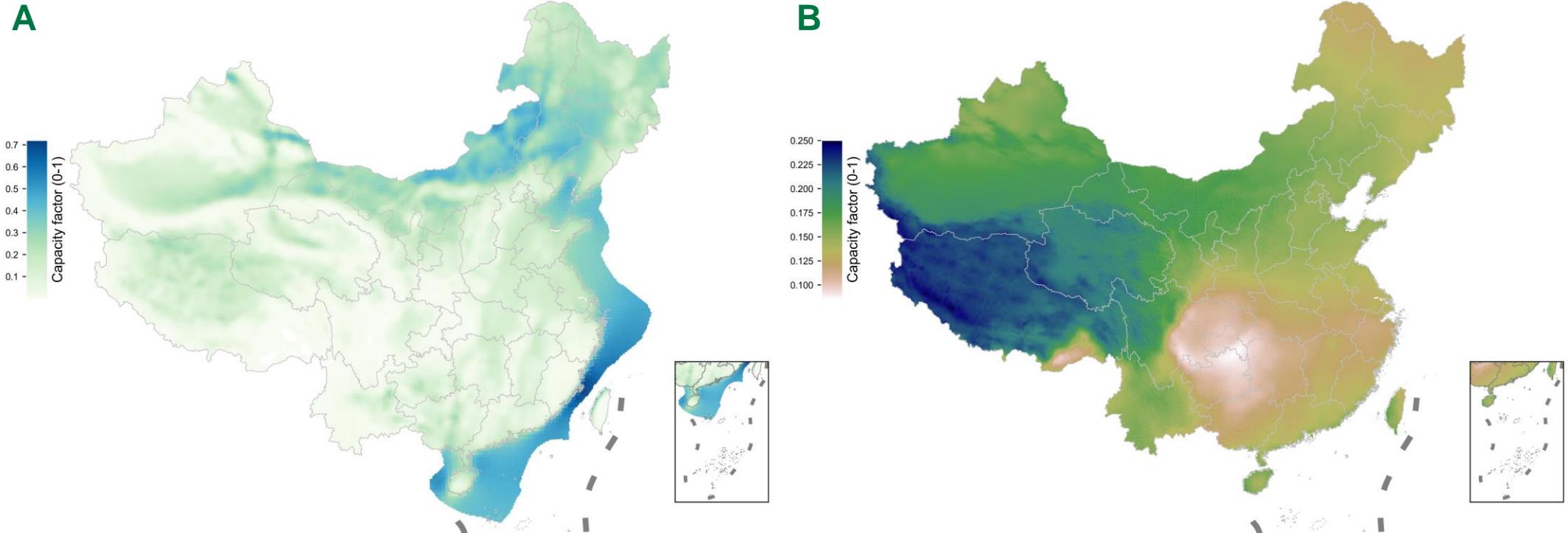


Fig. 风力 (A) 和光伏 (B) 发电的年均容量因子分布



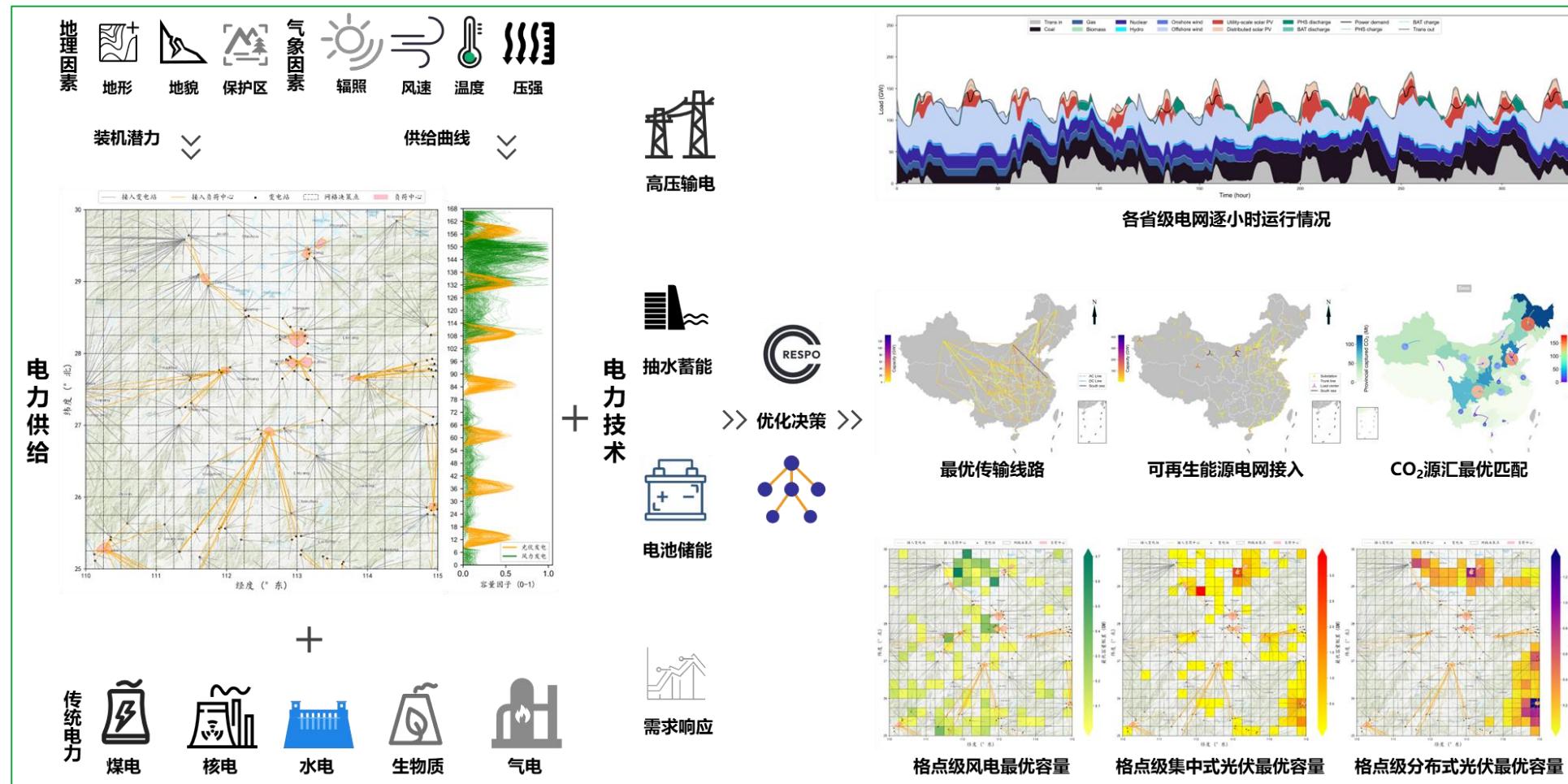
清华大学能源环境经济研究所
INSTITUTE of ENERGY, ENVIRONMENT and ECONOMY
TSINGHUA UNIVERSITY

3. 可再生能源布局与电力系统优化模型

模型结构

□ RESPO 是一个在格点尺度和 8760 逐小时精度协同优化容量扩增和电力系统运行的电力系统规划模型（最高覆盖 2×8760 逐小时）

□ 基础情景下，RESPO 包含有三亿个非零变量和八千万约束条件



可再生能源布局与电力系统优化模型
Renewable Energy Siting and Power-system Optimization Model (RESPO)

关键假设

格点尺度的可再生能源电网接入

- 对于每一个 $0.3125^\circ \times 0.25^\circ$ 格点内部的风电和集中式光伏，RESPO使用两阶段接入算法来表达可再生能源的接入成本
 - 1st: 接入变电站 (spur line)
 - 2nd: 由变电站接入负荷中心 (trunk line)
- 变电站位置假设为每个县级行政区的政府驻地
- 负荷中心假设为1) 十四五规划中各个城市群的地级市政府驻地，2) 特高压输电接入终端地级市，和3) 部分单列地级市 (保证分布均衡，例如西藏和新疆)

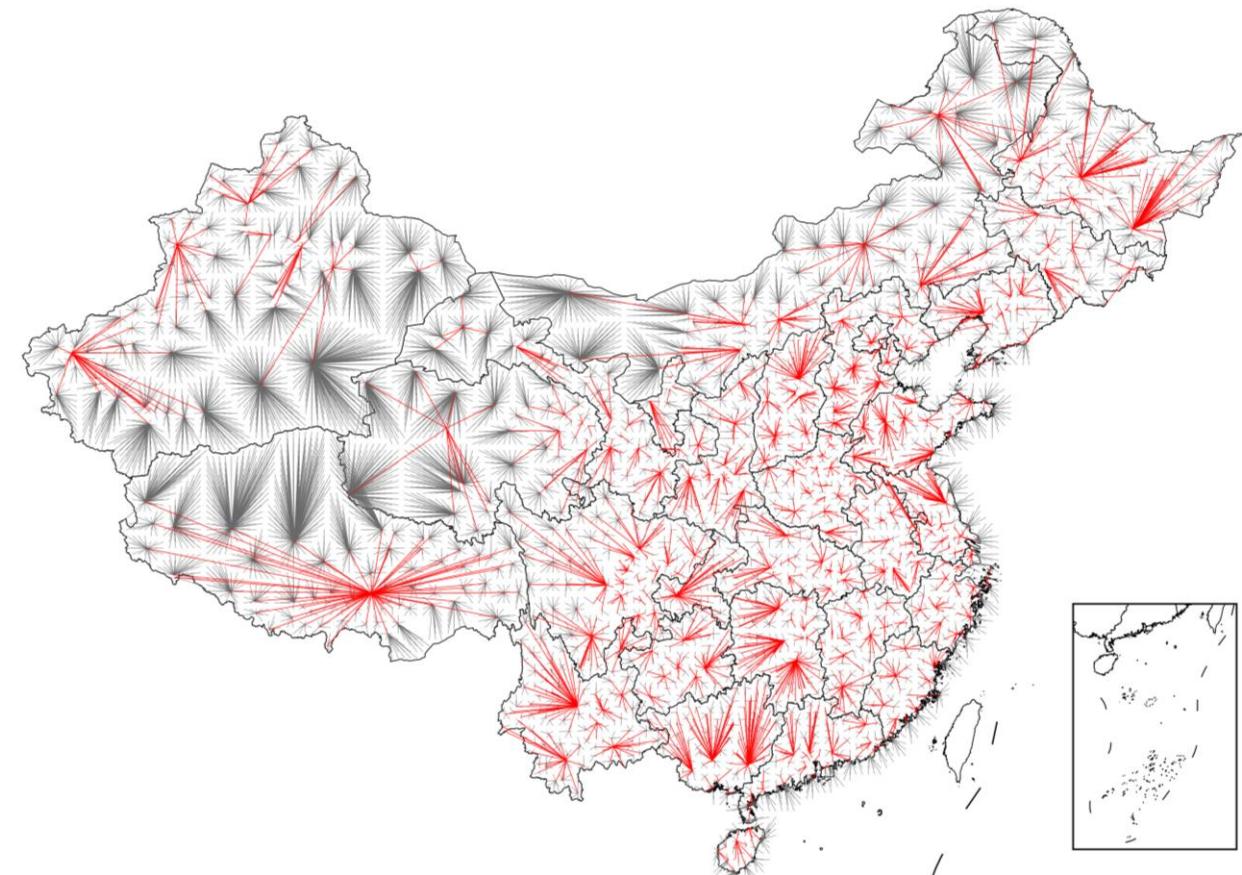
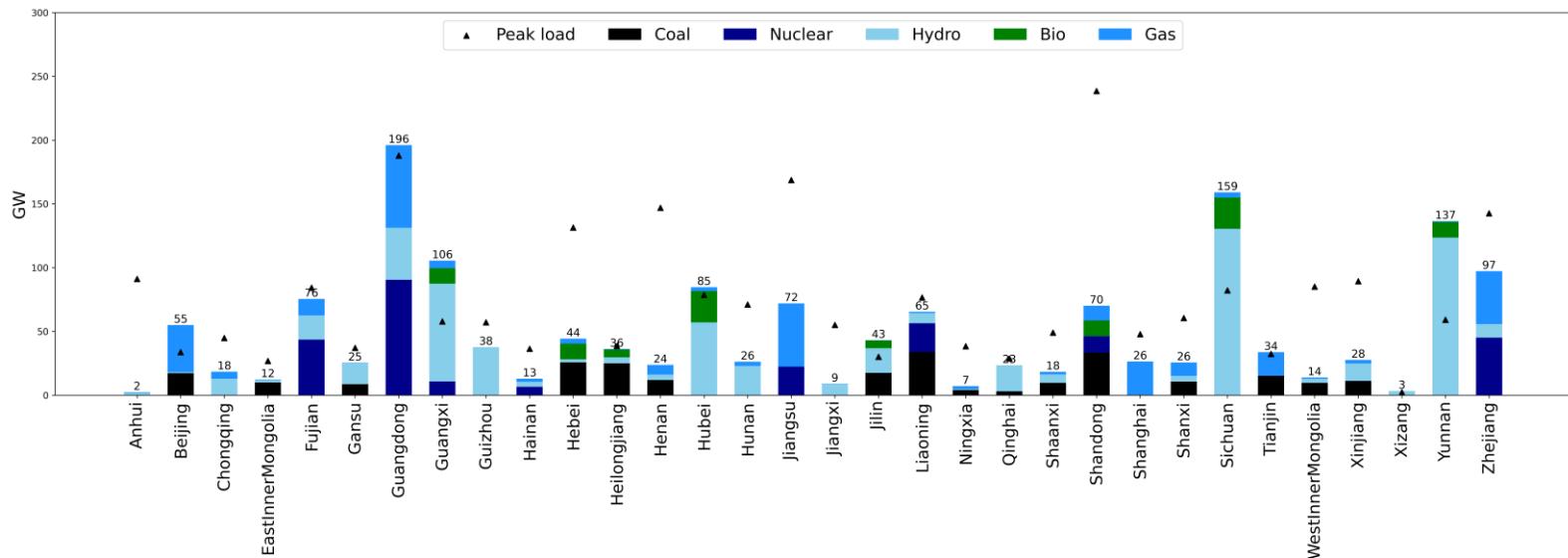
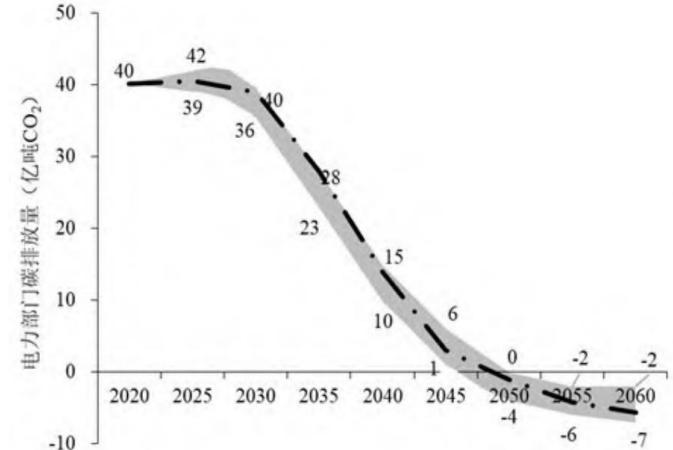
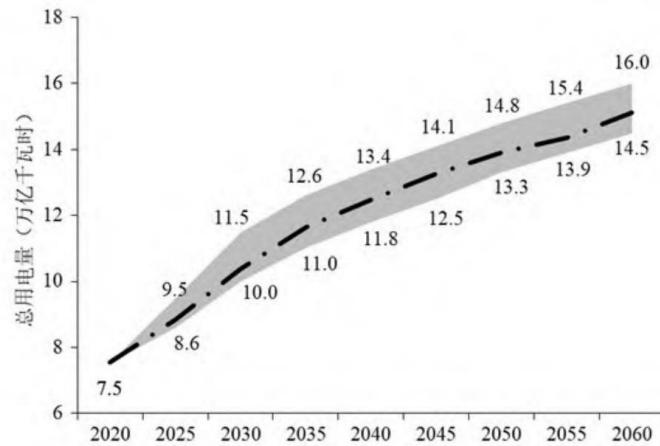


Fig. 可再生能源电网接入建模示意，spur line (灰色) 与trunk line (红色)

关键假设

- 电力需求 15.4 PWh/yr;
- 电力部门年排放上限: -550 Mt/yr;
- 跨省特高压输电: 基础情景中仅允许已有传输线路省份间进行容量加强; 也设计了允许任意两个省份间新建传输线路的比较情景;
- 碳捕集与封存: 假设所有火力发电均配备碳捕集与封存技术;
- 储能系统: 基础情景中考虑抽水蓄能(满充8h) 和锂离子电化学储能(满充4h); 也设计了包括压缩空气储能(满充20h) 和液流电池(满充10h) 作为长时储能进行情景分析



可再生能源布局与电力系统优化模型： 情景设计



清华大学能源环境经济研究所
INSTITUTE of ENERGY, ENVIRONMENT and ECONOMY
TSINGHUA UNIVERSITY

共设计了34个情景，分析不确定性对2060年电力系统结构的影响

□ 可再生能源

- 成本不确定性：相较于基础情景的0.5倍和2倍投资成本
- 空间分辨率比较：“VRE Cell Clustered”对比资源区级优化和格点级优化的结果差异，分析格点尺度优化的必要性
- 土地利用可获得性比较：3×3共计9组情景组合，代表风力和光伏发电在乐观、基础和保守情景下的土地可获得假设

□ 储能

- 成本不确定性：针对电化学储能的相较于基础情景的0.5倍和2倍投资成本
- 技术选择：考虑压缩空气储能和液流电池作为增配长时储能情景

□ 传输线路

- 成本不确定性：相较于基础情景的0.5倍和2倍投资成本
 - 技术选择：无约束的特高压容量扩增
- 电力需求：1.2倍于基础情景（约18.5 PWh/yr）和需求转移
- 传统电力、碳排放和火力发电灵活性等情景
- 优化时间覆盖尺度（8,760*2 小时）

Base	UHV CapEx 2X
Wind CapEx 0.5X	Unconstrained UHV Expansion
Wind CapEx 2X	Resv ratio 2X
Solar CapEx 0.5X	Demand 1.2X
Solar CapEx 2X	Coal CCS 350 GW
Land use: Conservative	Nuclear 150 GW
Land use: Open	Nuclear Flex 0.5
VRE Cell Clustered	Gas Capacity 0.5X
Battery CapEx 2X	Gas Ramp 0.5X
Battery CapEx 0.5X	Load reduction
With CAES	Neg Emis 400Mt
With VRB	Neg Emis 200Mt
With CAES and VRB	Net Zero Emis
UHV CapEx 0.5X	Two-year Period

Tab. 3×3 风力和光伏发电土地利用情景

Wind\Solar	Conservative	Base	Open
Conservative	Wind conservative + solar conservative	Wind conservative + solar base	Wind conservative + solar open
Base case	Wind base + solar conservative	Base case + solar open	Wind base + solar open
Open	Wind open + solar conservative	Wind open + solar base	Wind open + solar open



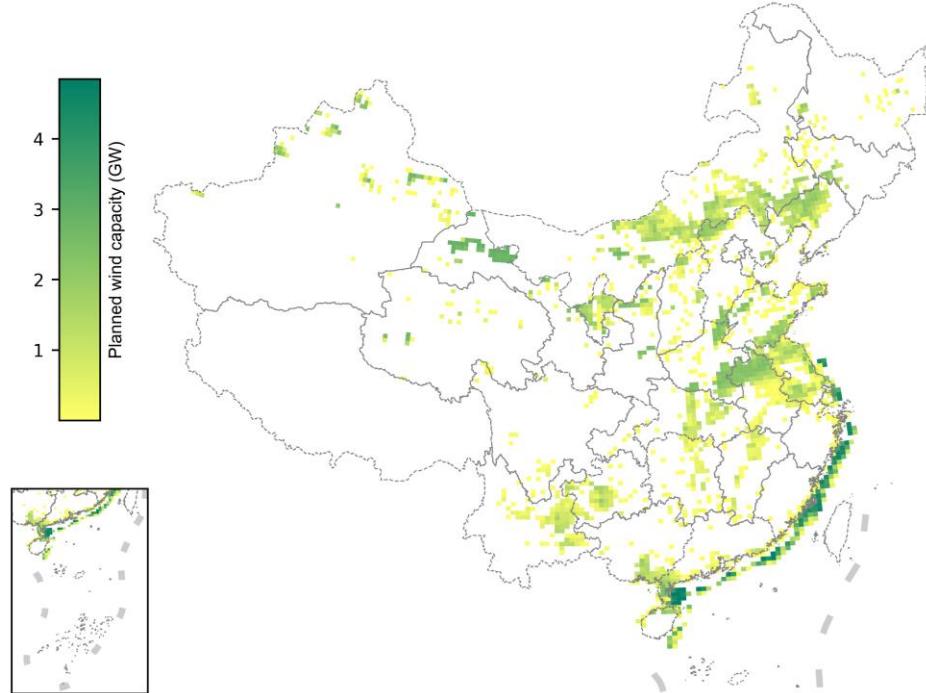
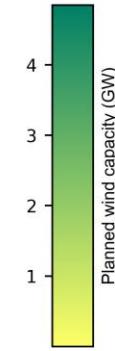
清华大学能源环境经济研究所
INSTITUTE of ENERGY, ENVIRONMENT and ECONOMY
TSINGHUA UNIVERSITY

4. 主要研究发现

2060年格点尺度最优可再生能源装机布局



A



B

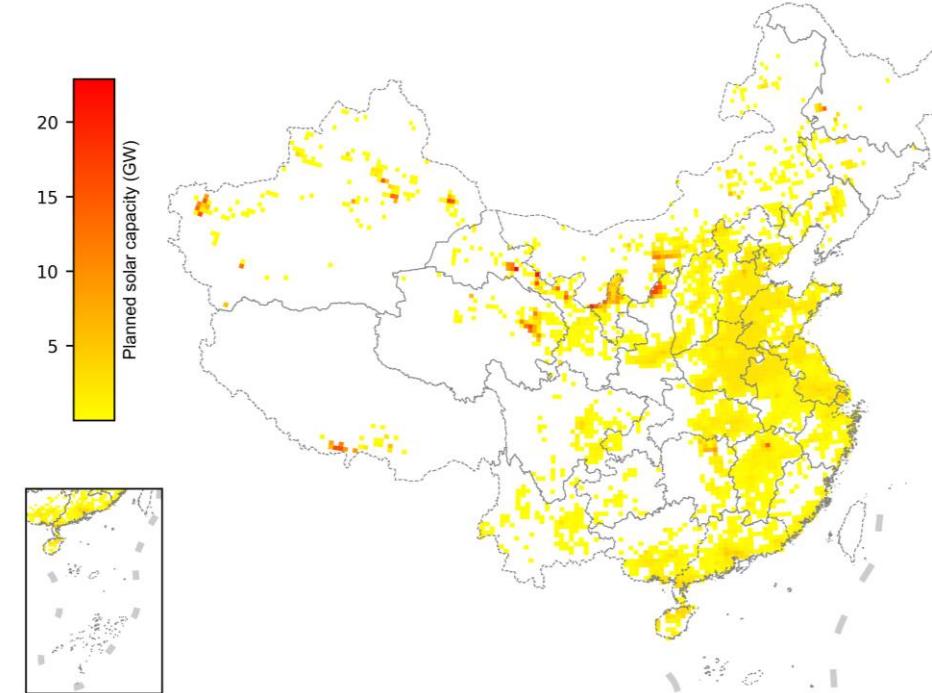
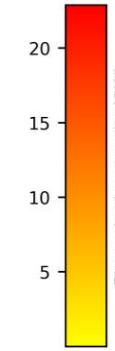
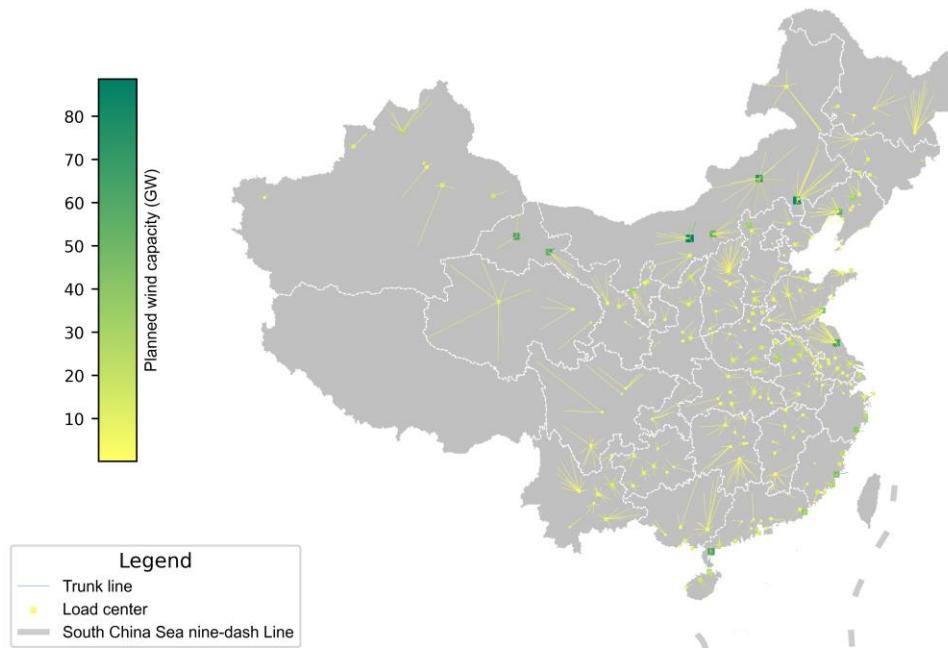


Fig. 基础情景下2060年风力 (A) 和光伏 (B) 发电格点级最优容量配置 (GW)。全国来看, 为支撑碳中和目标, 需要建设约2000GW风力发电 (其中陆上风电1603GW, 海上风电416GW) 和约3900GW的光伏发电 (其中集中式光伏3300GW, 分布式光伏632GW), 大部分装机集中在胡焕庸线以东, 也即集中在负荷中心附近

电网接入距离是影响可再生能源布局的重要因素



A



B

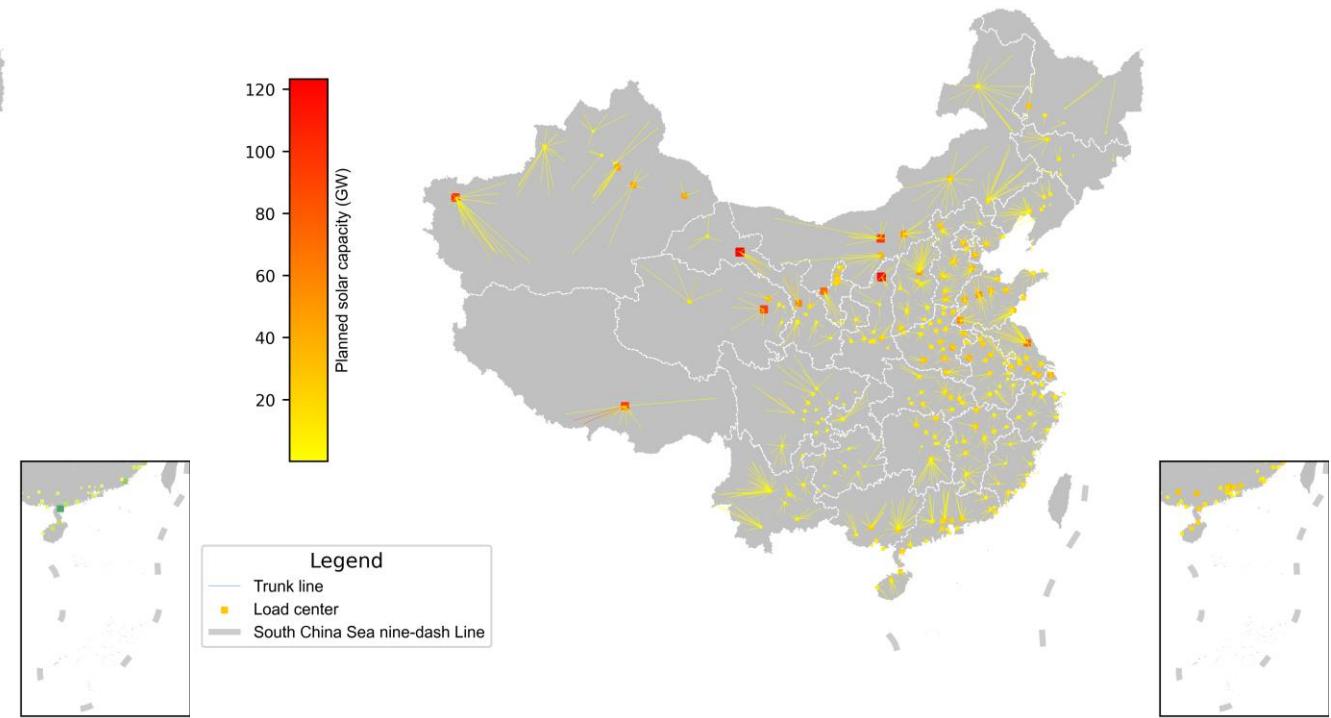


Fig. 风力 (A) 和光伏 (B) 发电的主干网容量增强 (GW)。由于西部资源集中且负荷中心较少，单负荷中心的主干网增强容量显著高于东部

主要研究发现

□ 从全国来看，超过 80% 的光伏和 55% 的风电建设在负荷中心 100km 内

□ 超过 80% 的风力和光伏发电建设在负荷中心的 200km 内

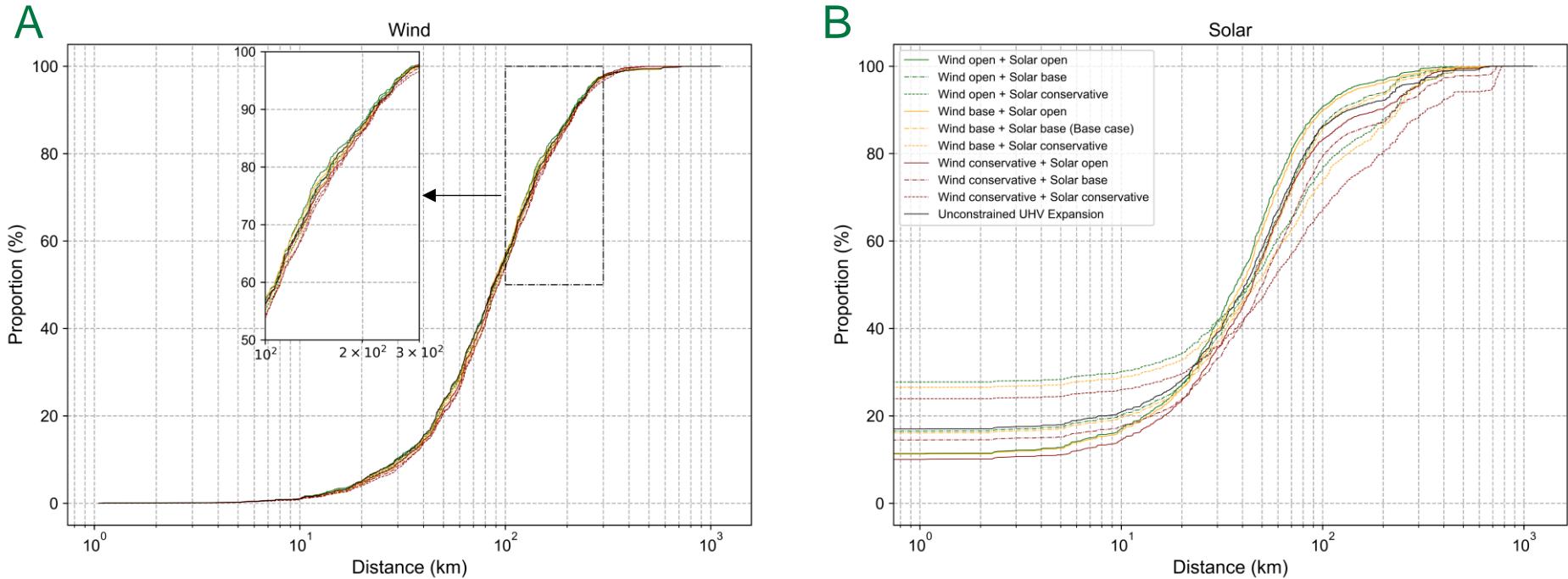


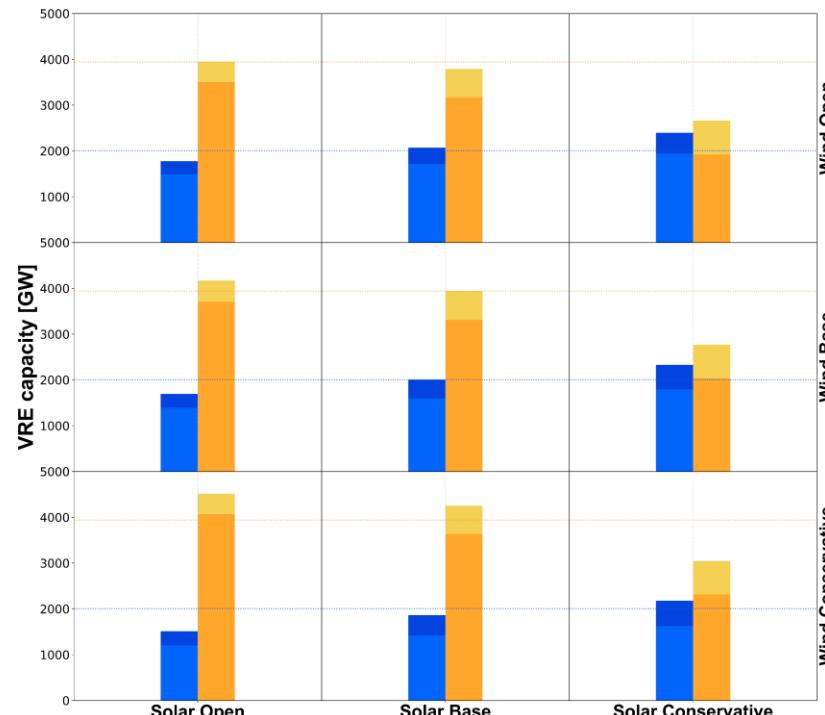
Fig. 风力 (A) 和光伏 (B) 发电接入负荷中心的容量-距离累积加权曲线。分布式光伏考虑到本地消纳特性，接入距离建模为0。“Unconstrained UHV Expansion” 情景中土地利用假设与基础情景一致

主要研究发现： 不同土地利用可获得性对电力系统的影响



土地利用与可再生能源装机

A



B

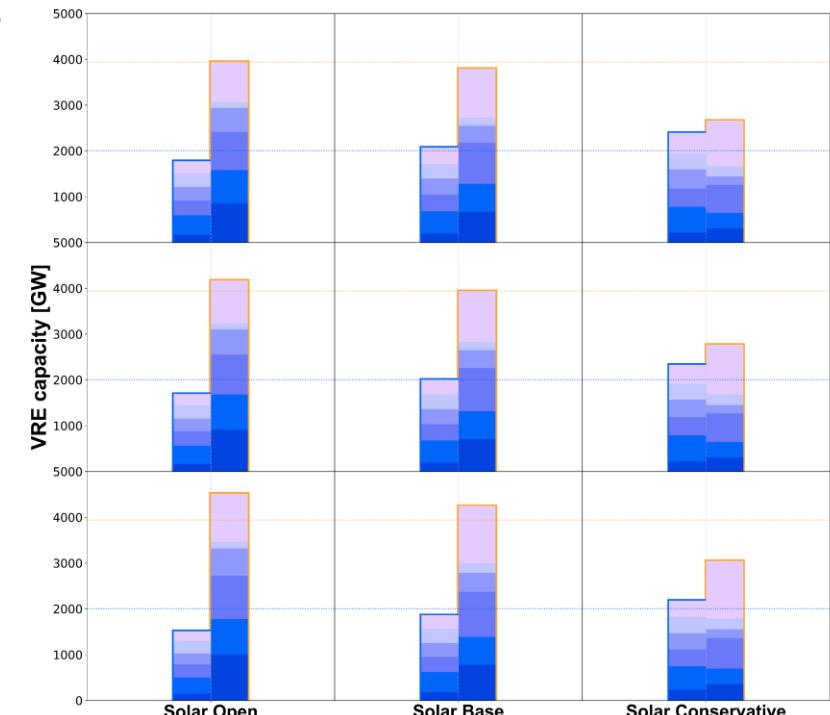


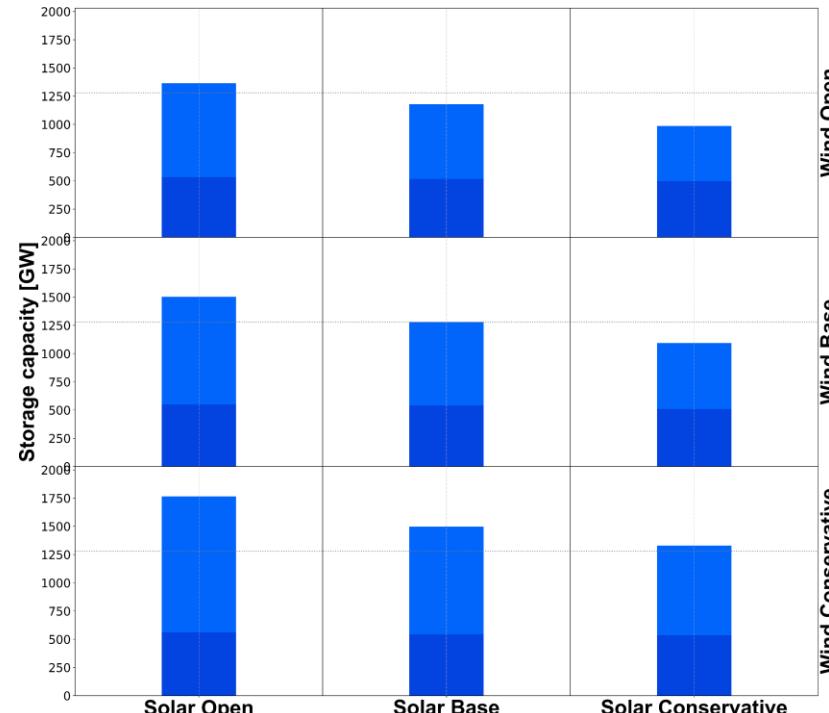
Fig. 3×3组共计9种不同土地利用情景下的可再生能源最优装机容量分布，其中A：技术类型划分；B：电网区域划分。光伏发电的装机容量对土地利用假设敏感性较大，在最极端情景下（Wind conservative + solar conservative），需要配置约740GW分布式光伏，以缓解东部负荷较大地区的能源用地紧张问题

主要研究发现： 不同土地利用可获得性对电力系统的影响



储能与特高压传输

A



B

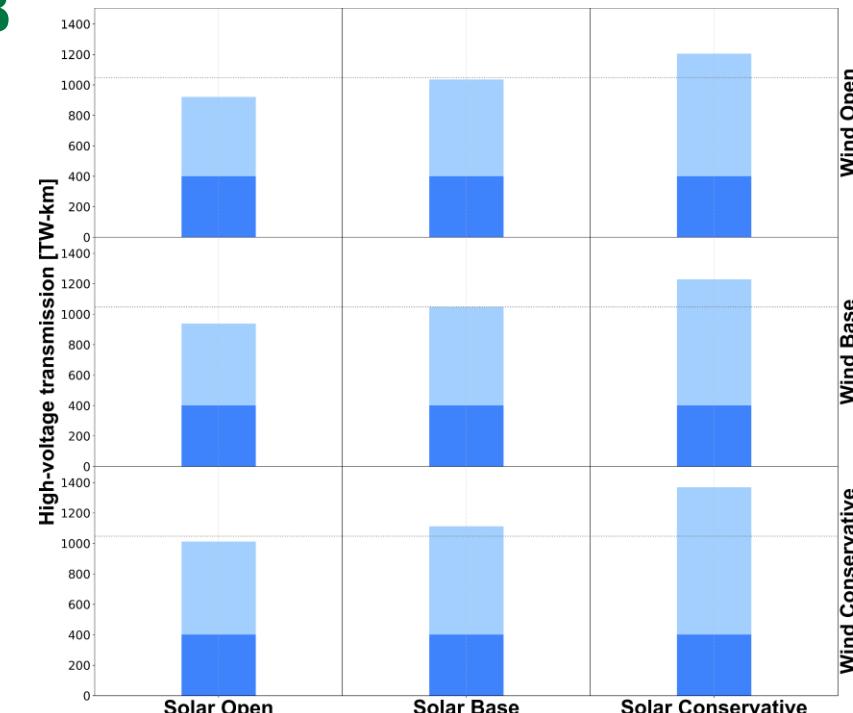


Fig. 3×3组共计9种不同土地利用情景下的储能系统（A）和跨省特高压传输线路（B）最优装机容量分布。当土地利用由乐观到保守过渡时，储能和传输线路呈现相反的最优装机容量变化趋势

主要研究发现： 系统平均成本



情景分析

- 口 受益于可再生能源投资成本的持续下降预期，2060年的低碳电力系统的平均成本仍然能保持在0.35~0.4yuan/kWh。如果所有发电技术成本保持在2020年水平，平均成本则要提高50%

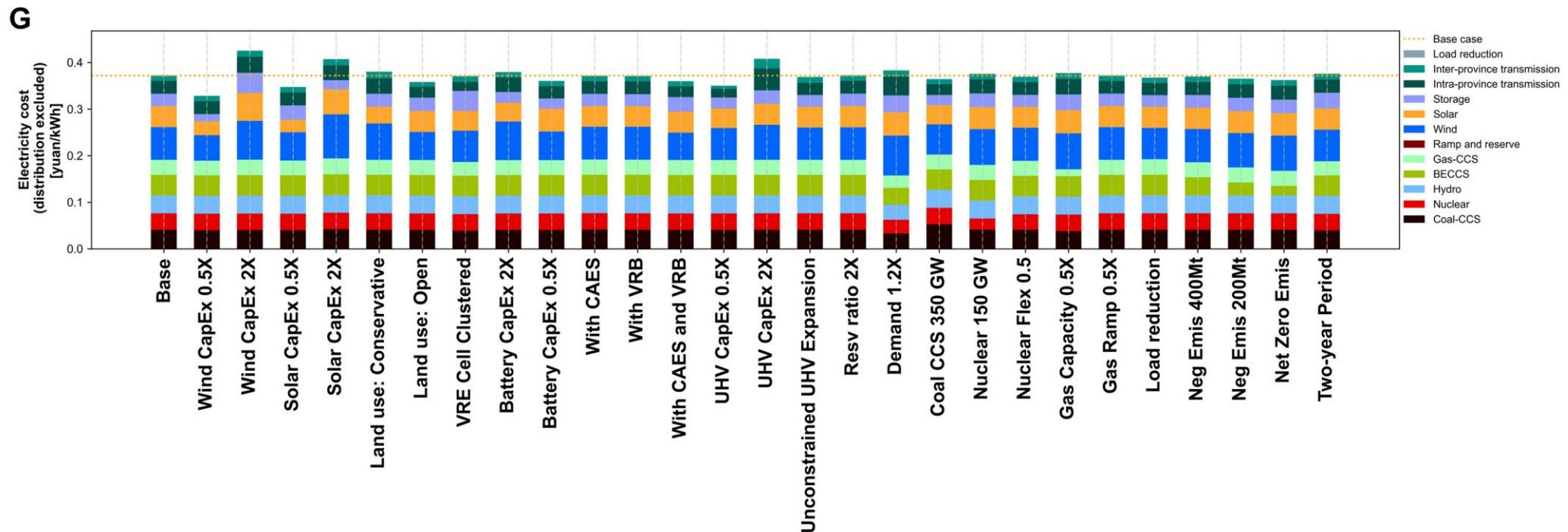


Fig. 2060电力系统平均成本（配电网和管理成本除外）

主要研究发现： 可再生能源装机容量和弃电率



情景分析

- 综合所有情景来看，风力发电的最优装机容量在1000~2500GW间，光伏发电在2500~5000GW之间。对可再生能源装机容量配比影响最大的因素是投资成本
- 全国总体弃风和弃光率在10%到16%之间，储能系统能够有效降低弃风弃光率

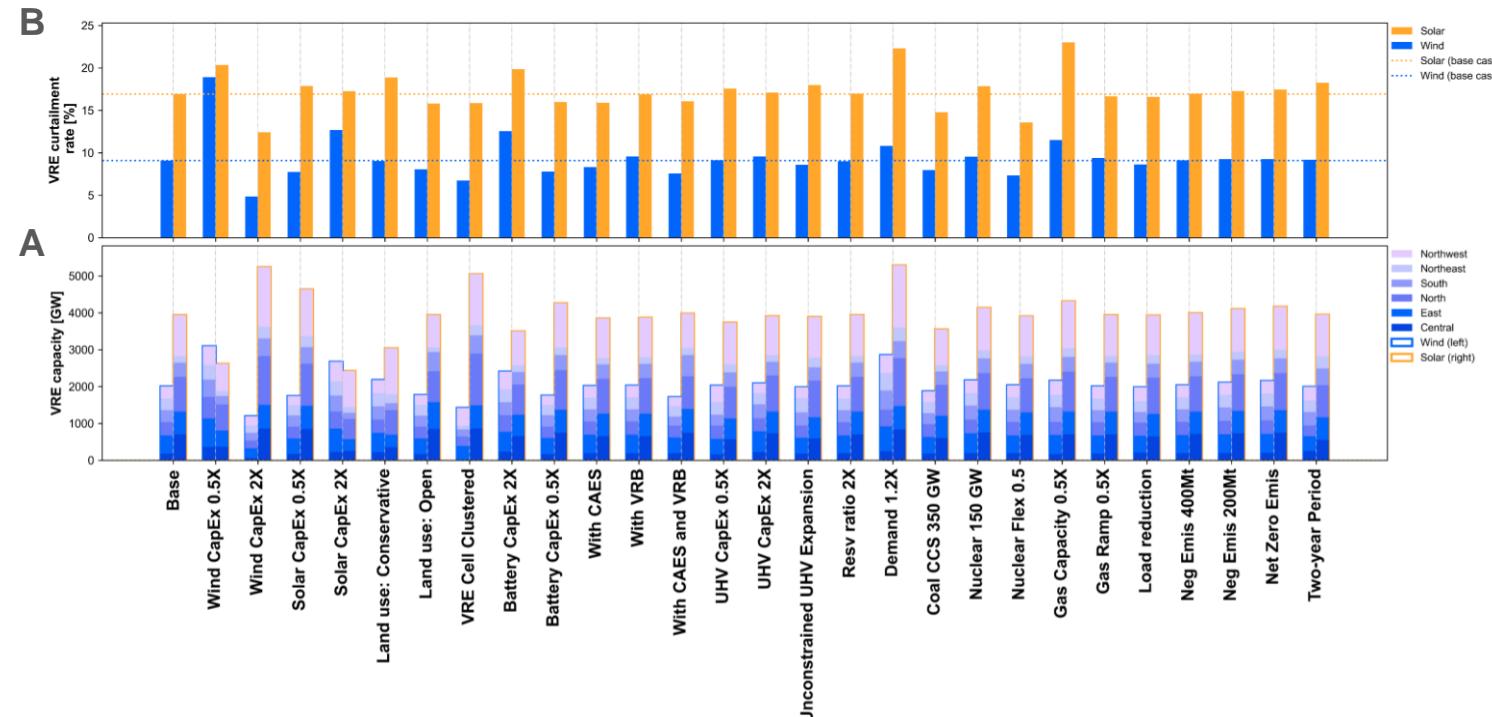


Fig. 各情景下可再生能源最优容量配置 (A) 和全国总体弃风弃光 (B) 情况

主要研究发现： 跨省特高压传输线路

- 口现有的“西电东送”网络将会被加强，例如宁夏—山东（扩增到26GW），和甘肃—河南（扩增到40GW）
- 口随着可再生能源装机的大规模发展，一些资源中心到负荷中心的南北输送通道也十分重要，例如蒙东—山东（扩展到90GW）

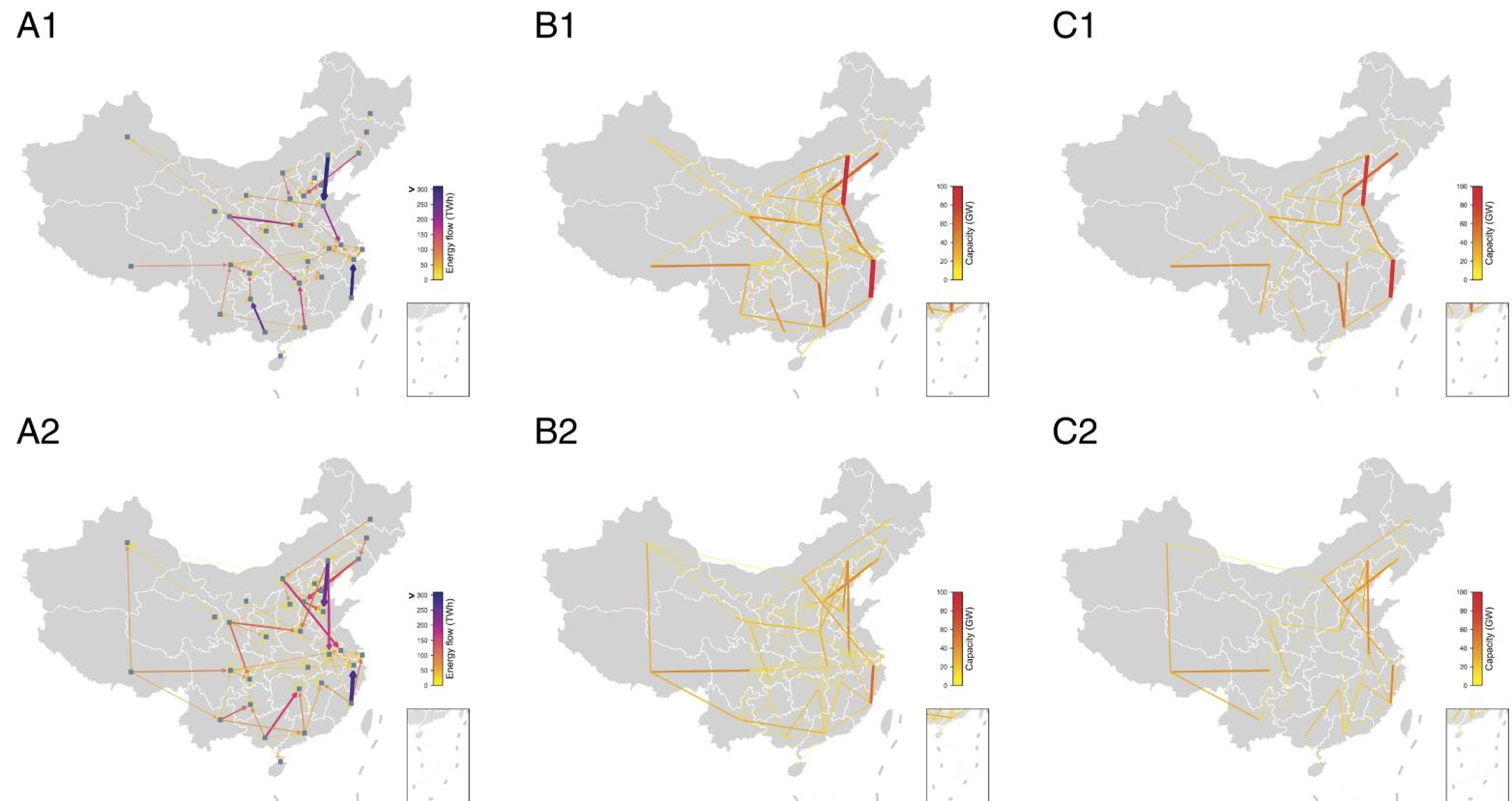


Fig. 4. Results of inter-provincial transmission line in the base case (A1, B1, and C1) and “Unconstrained UHV Expansion” scenario (A2, B2, and C2). (A1 and A2) Inter-provincial transmission flows (TWh). (B1 and B2) Existing plus new transmission capacity (GW). (C1 and C2) Newly added capacity (GW) by the model.

主要研究发现： 跨省特高压传输线路

- 在“Unconstrained UHV Expansion”情景中，任意两个省份之间可以新建传输线路。考虑到高海拔和跨海等因素，西藏和海南仅允许向临近省份直接送电，但仍然允许向其它省份借道的方式送电
- 系统总成本下降了约1.0%，电化学储能装机容量下降了10%
- 风力和光伏发电的最优装机容量分别下降了1.1%和0.7%

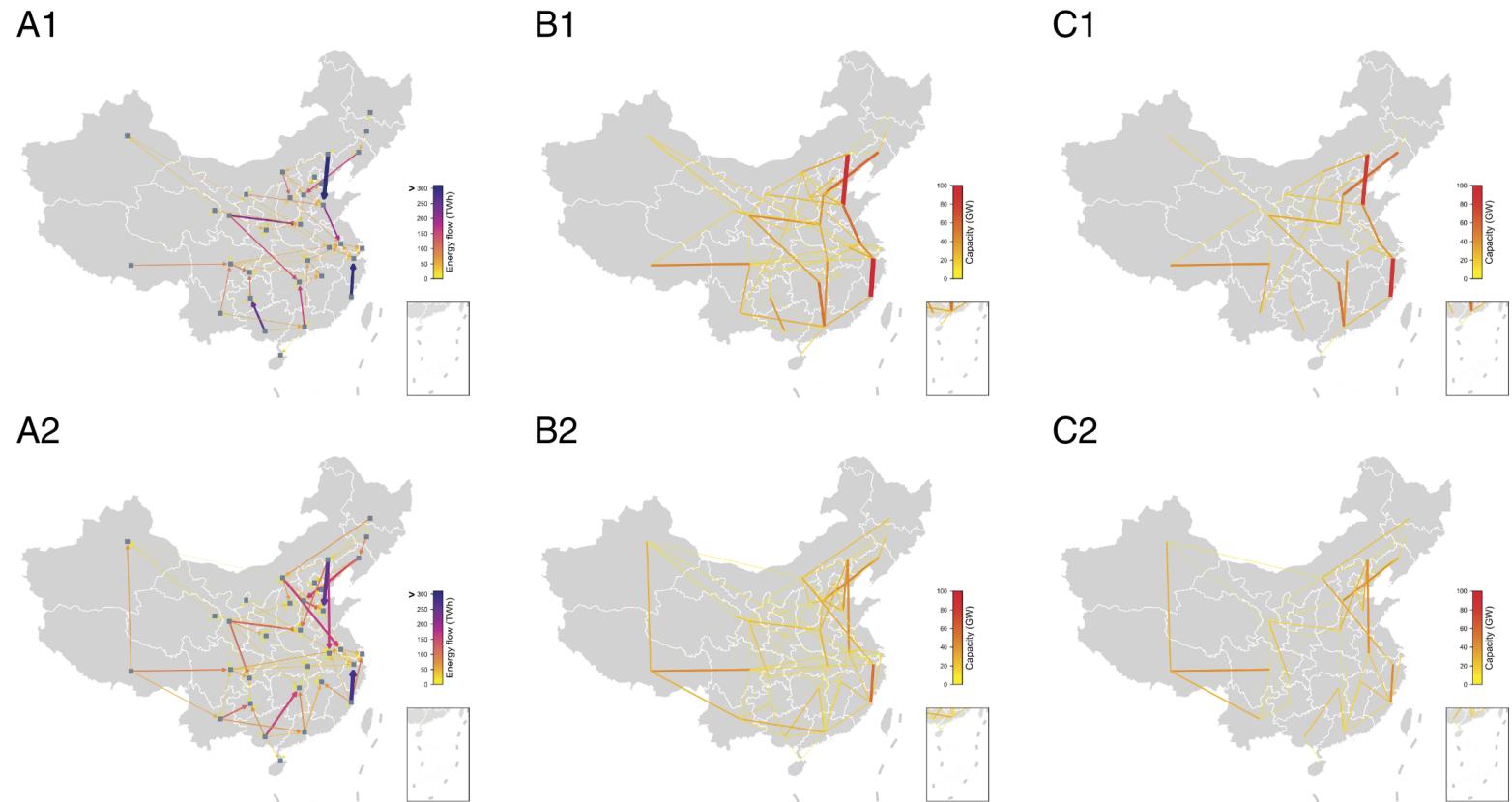


Fig. 4. Results of inter-provincial transmission line in the base case (A1, B1, and C1) and “Unconstrained UHV Expansion” scenario (A2, B2, and C2). (A1 and A2) Inter-provincial transmission flows (TWh). (B1 and B2) Existing plus new transmission capacity (GW). (C1 and C2) Newly added capacity (GW) by the model.

储能系统的最优容量配置和逐小时调度情况



最优容量配置

- 基础情景中，共需要建设538 GW抽水蓄能（4304GWh）和740GW电化学储能（2960GWh），总容量约占风力和光伏发电装机容量的22%

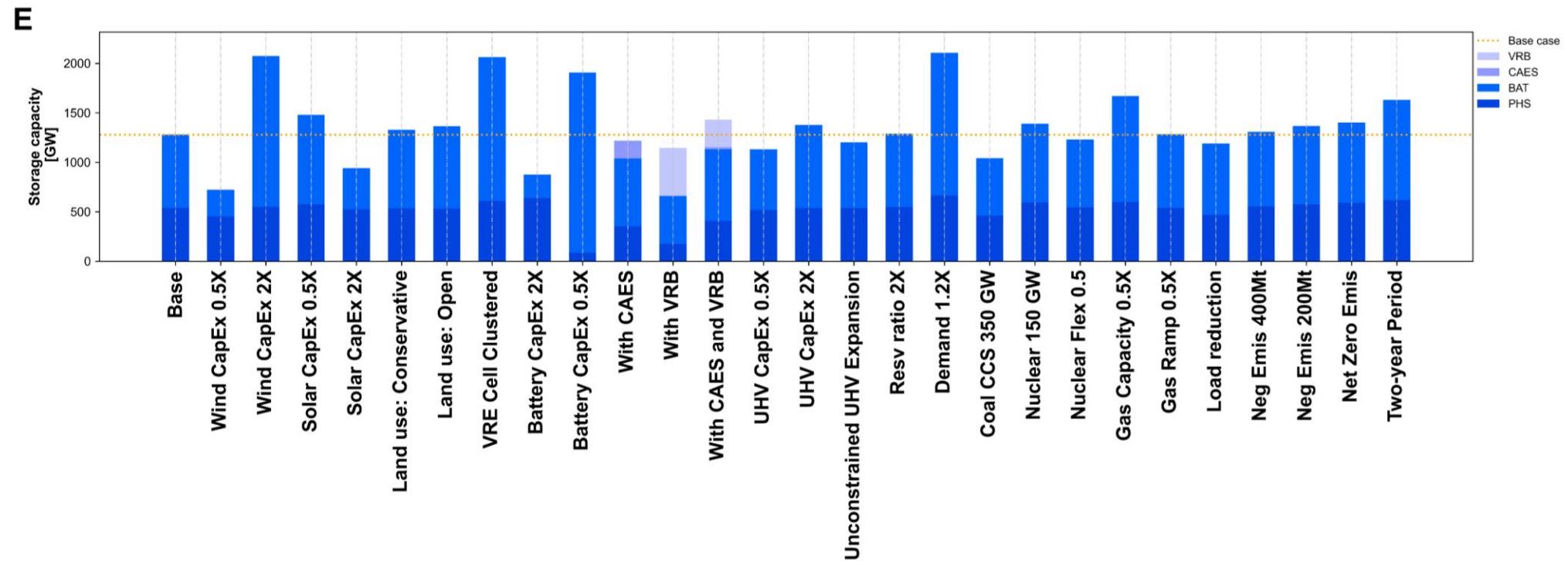


Fig. 2060年储能最优装机容量

主要研究发现： 储能系统的最优容量配置和逐小时调度情况



逐小时充放电调度策略

- 储能在2060年电力系统中发挥两种主要作用：为峰值需求提供容量备用和调节可再生能源发电与需求的时间错配

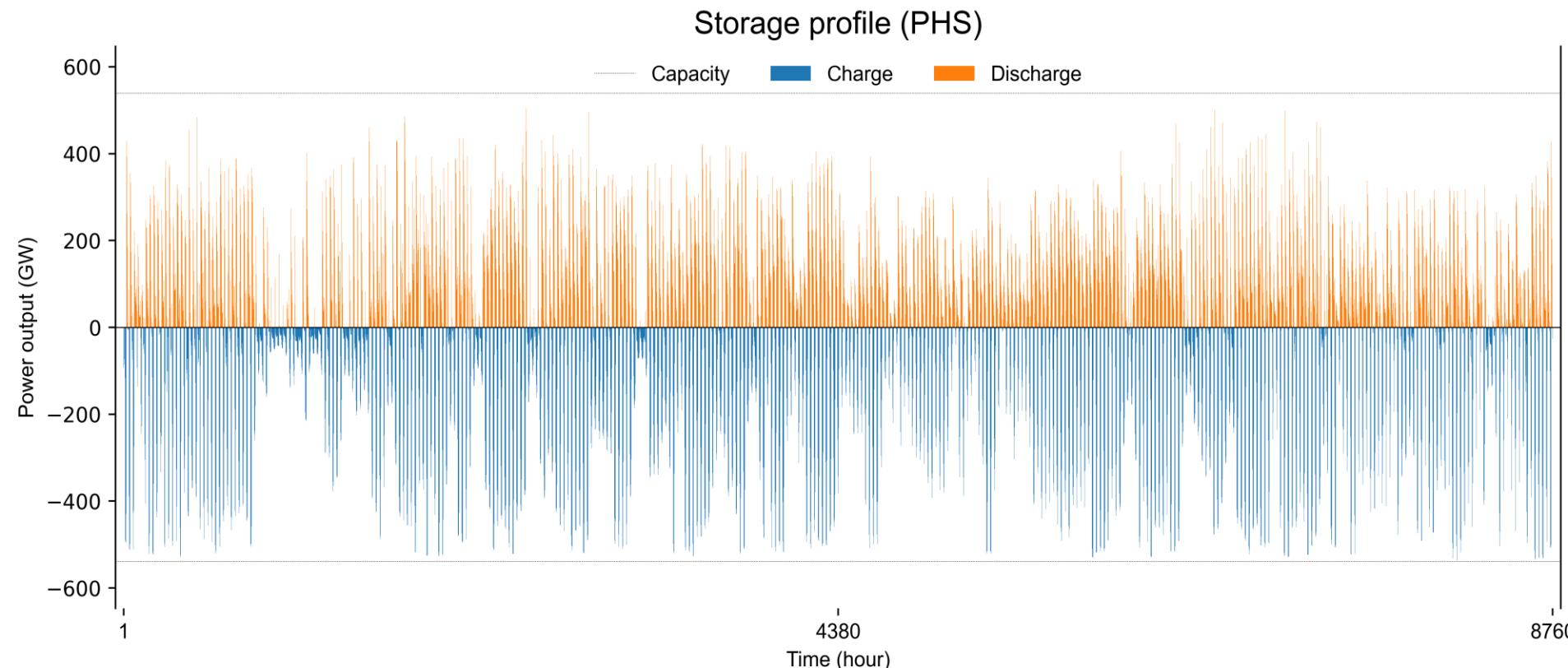


Fig. 全国层面抽水蓄能8760逐小时充电/放电调度情况

主要研究发现： 储能系统的最优容量配置和逐小时调度情况



逐小时充放电调度策略

- 储能在2060年电力系统中发挥两种主要作用：为峰值需求提供容量备用和调节可再生能源发电与需求的时间错配

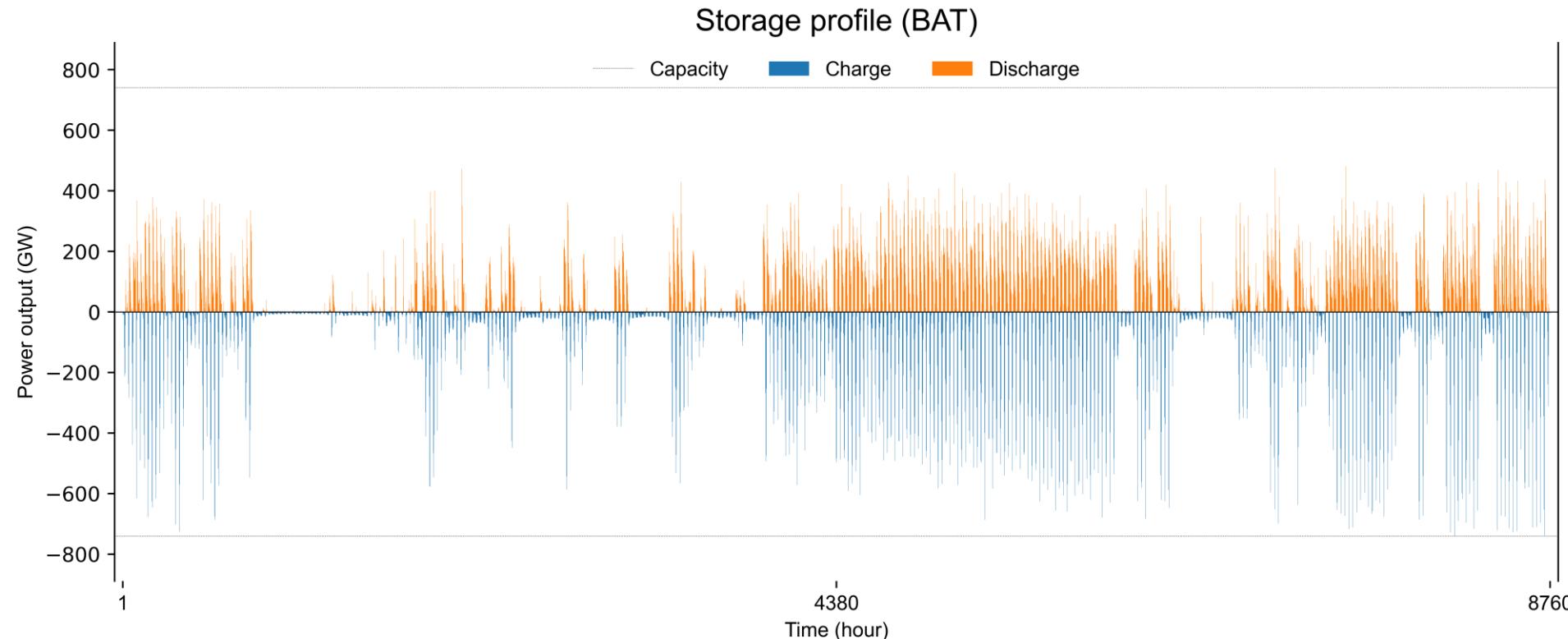


Fig. 全国层面电化学储能8760逐小时充电/放电调度情况



谢谢！