



低碳电力技术基础——第04讲

电网侧碳排放的分析方法

——教材 第3章、第8.1节

康重庆

清华大学电机系

cqkang@tsinghua.edu.cn





- **电力传输环节的碳排放概述**
- **我国资源、负荷分布特征**
- **输电损耗及其低碳效益分析（输煤输电比较）**
 - 原理分析
 - 实证分析
- **六氟化硫排放分析**
- **电力系统碳排放流分析**



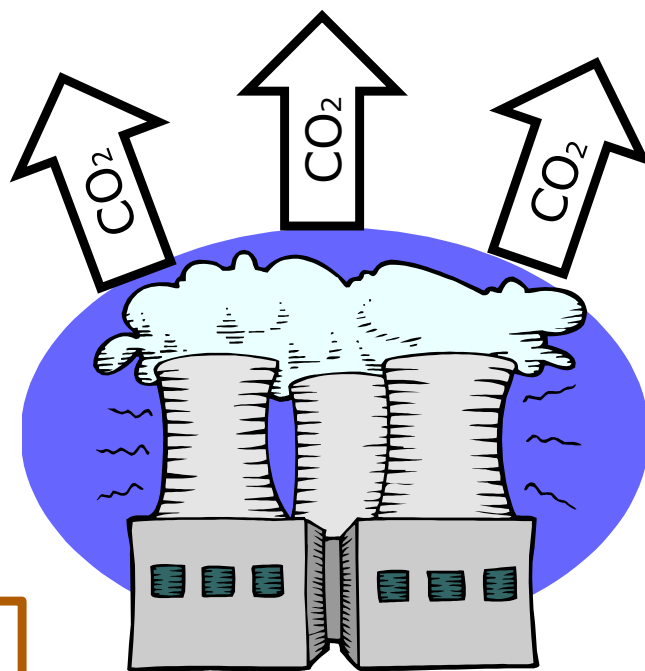


电力传输环节碳排放分析

回顾



- 人为碳排放的主要来源为化石燃料的过度使用。
- 在电力行业，大部分的排放直接来源于火力发电厂的电力生产。
- “看起来”，**输电环节不直接产生碳排放？**



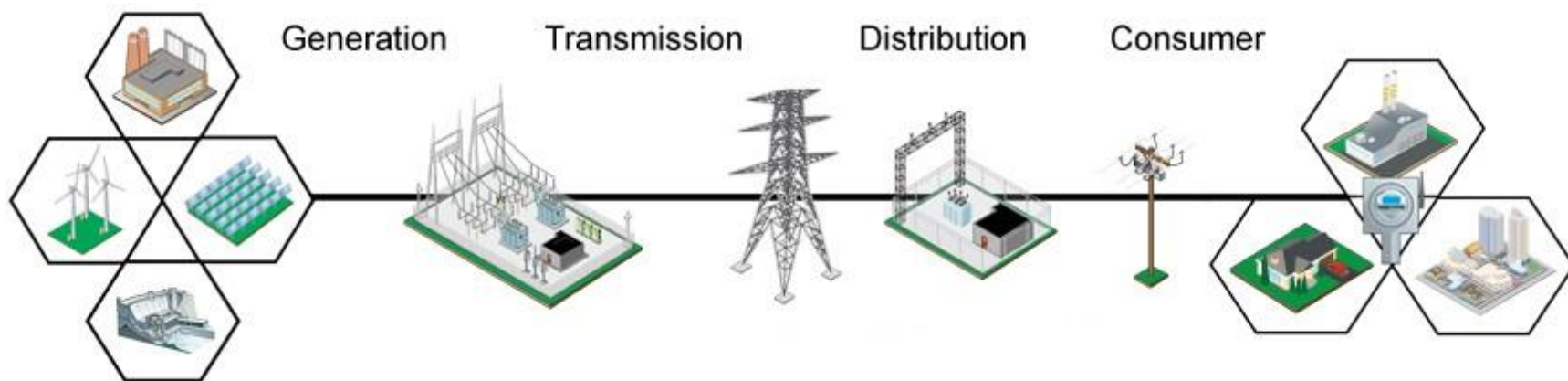
输电环节与电力行业的低碳发展有何联系？



电力传输环节的碳排放概述



- 电力传输环节基本不直接产生碳排放（狭义，仅单独指CO₂），但作为电力传输的载体，电网在运行过程中具有独特的碳排放特性。



电力传输环节的碳排放概述



- 输电技术

- ✓ 交流输电
- ✓ 直流输电
- ✓ 超导输电

- 电网层级

- ✓ 输电网
- ✓ 配电网

- 损耗

- ✓ 输电损耗
- ✓ 配电损耗

- 广义的损耗

- ✓ 一次能源运输损耗

- 六氟化硫问题

电力传输环节的碳排放概述



● 线损

- 电力网电能损耗，是电力企业的一项重要综合性技术经济指标。它反映了一个电力网的规划设计、生产技术和运行管理水平，长期以来受到各级电力企业的重视。
- 线损电量是指供电企业在整个供电生产过程中发生的送变电设备的生产消耗和不明损失，简称“线损”。它是从发电厂送出电能计量点（不包括厂用电）至用户电度表止所发生的电能消耗和损失，具体分为空载损失、负载损失和其它损失三部分。



电力传输环节的碳排放概述



- 线损

- (1) **固定损耗（空载损耗）**：一般不随负荷变化而变化，只要电气设备上带有电压，就要消耗电能，包括：1) 输电变压器和配电变压器的铁损；2) 电晕损失；3) 调相机、调压器、电抗器、消弧线圈等设备的铁损及绝缘子的损失；4) 用户电度表电压线圈损失及电度表附件的损耗。
- (2) **可变损耗（负载损耗）**：随负荷变动而变化，它与电流的平方成正比，包括：1) 输电、配电线路的线路损失；2) 输电、配电变压器的绕组损失；3) 调相机、调压器、电抗器、消弧线圈等设备的损失；4) 接户线的损失；5) 电度表的电能损失。
- (3) **其它损失**：空、负载损失以外的损失，包括：1) 漏电、窃电及电度表误差损失；2) 变电所的直流充电、控制及保护，信号、通风冷却等设备消耗的电量。

电力传输环节的碳排放概述



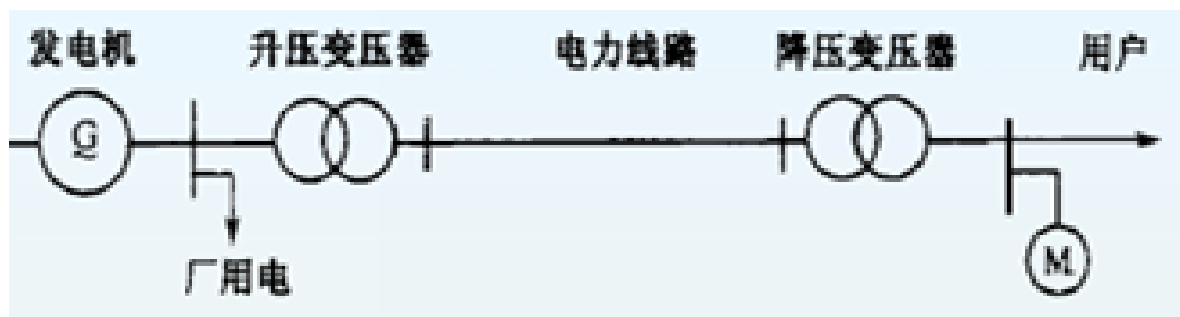
- 线损率

- **统计线损率**：是各网、省、地市供电部门对所管辖（或调度）范围内的电网各供、售电量表统计得出的线损率。
- **理论线损率**：是各网、省、地区供电局（电力网）对其所属输、变、配电设备根据设备参数、负荷特性计算得出的线损率。

电力传输环节碳排放分析



- 电力传输损耗对应的排放分析——原理
 - 元件层面——简单系统：



$$E_{SL} = e \cdot \int I_L^2 \cdot R_L \cdot dt$$
$$= \Delta G \cdot e$$

- I_L : 线路电流
- e : 机组供电碳排放强度
- R_L : 线路电阻
- ΔG : 电网中的损耗电量

电力传输环节碳排放分析



- 电力传输损耗对应的排放分析——原理
 - 系统层面——复杂系统

$$E_{\text{SL}} = \sum_{i \in U} \Delta G_i \cdot e_i$$

- ΔG_i : 机组 i 发电在电网中的损耗
- e_i : 机组 i 的供电碳排放强度
- U : 系统机组集合
- E_{SL} : 系统与网损对应的碳排放量



电力传输环节碳排放分析

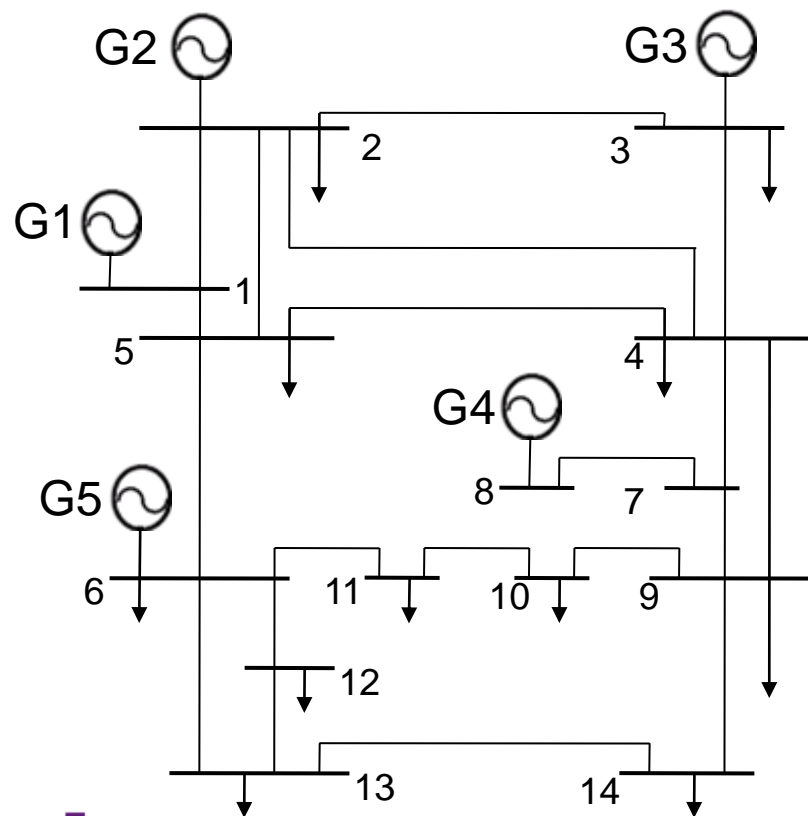


● 电力传输损耗对应的排放分析——原理

○ 复杂系统

- 难以确定每台机组的 e_i 所对应的每条线路的 ΔG_i

常规方法难以
精确计算



清华大学
Tsinghua University

EITab
Energy Intelligence Laboratory
清华大学电机系·智慧能源课题组



电力传输环节碳排放分析



• 电力传输损耗对应的排放分析——原理

◦ 系统层面——适当简化统计

$$E_{\text{SL}} = \sum_{i \in U} \Delta G_i \cdot e_i \approx \left(\sum_{i \in U} \Delta G_i \right) \cdot \left(\sum_{j \in U_T} \theta_j \cdot e_j \right)$$

系统总损耗电量

系统平均供电碳排放强度

- U_T : 系统火电机组合 (主要含燃煤、燃油、燃气三类)
- e_j : 第 j 类火电的供电碳排放强度
- θ_j : 第 j 类火电供电量占系统总供电量之比

电网损耗对应的碳排放 =
系统总损耗电量 × 系统平均供电碳排放强度



我国2023年全社会用电量9.22万亿千瓦时，假设平均线损率为6%，则电力损耗造成的碳排放量近似为？

- ☒ A 3.1 亿吨
- ☐ B 4.7 亿吨
- ☐ C 0.47 亿吨

提交



我国资源、负荷分布特征

中国资源与负荷分布



- 负荷中心：东部



负荷中心



清华大学
Tsinghua University

EITab
Energy Intelligence Laboratory
清华大学电机系·智慧能源课题组

煤：由北向南

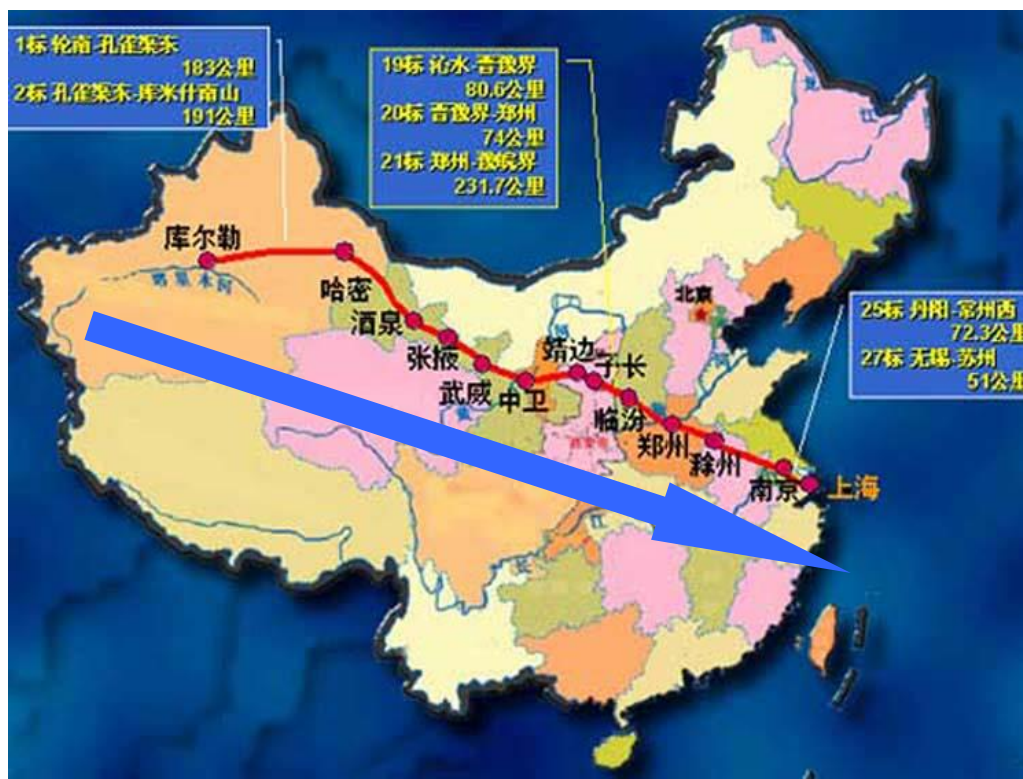


全国不同地区煤炭储量示意图

煤炭资源 地理分布

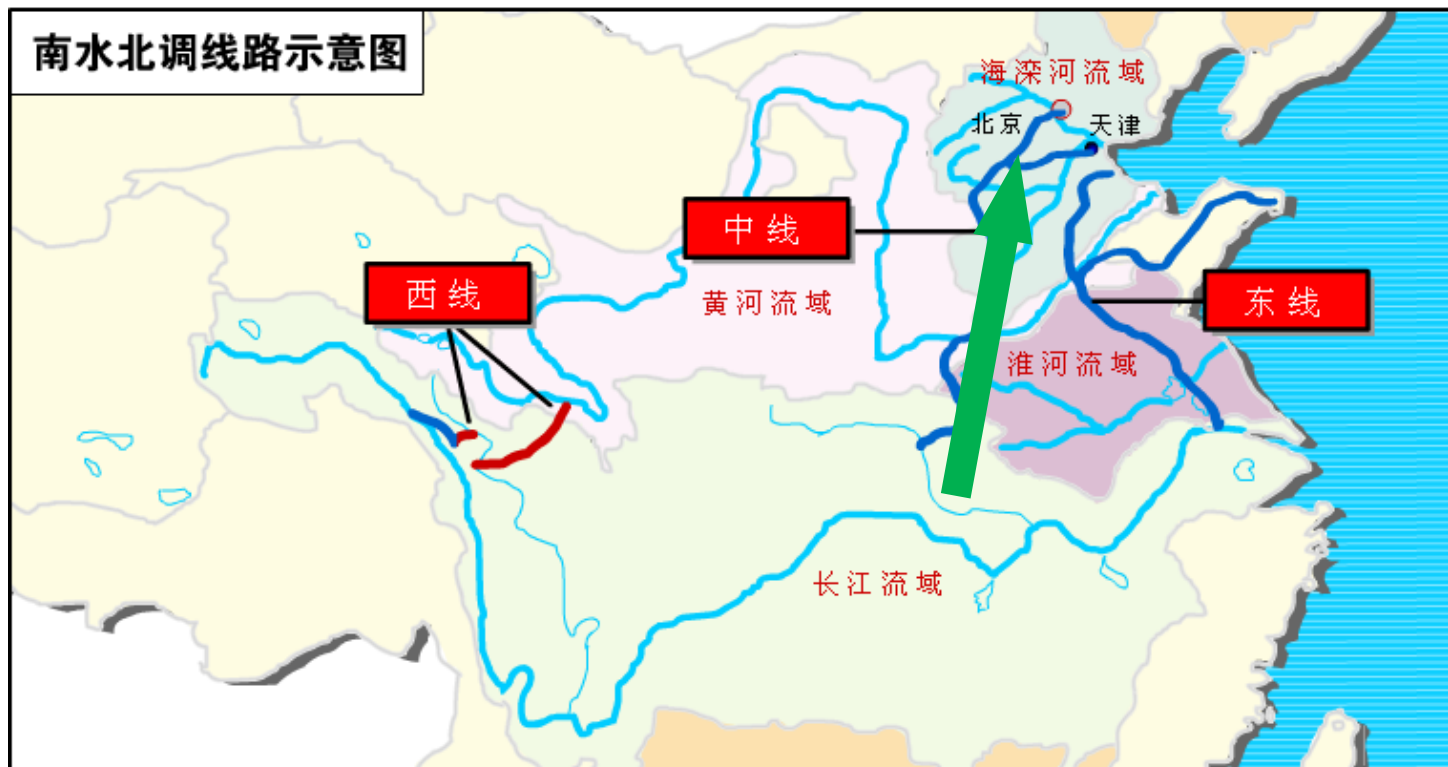
- 三“西”地区：山西、陕西、蒙西

气：由西向东



• 西气东输

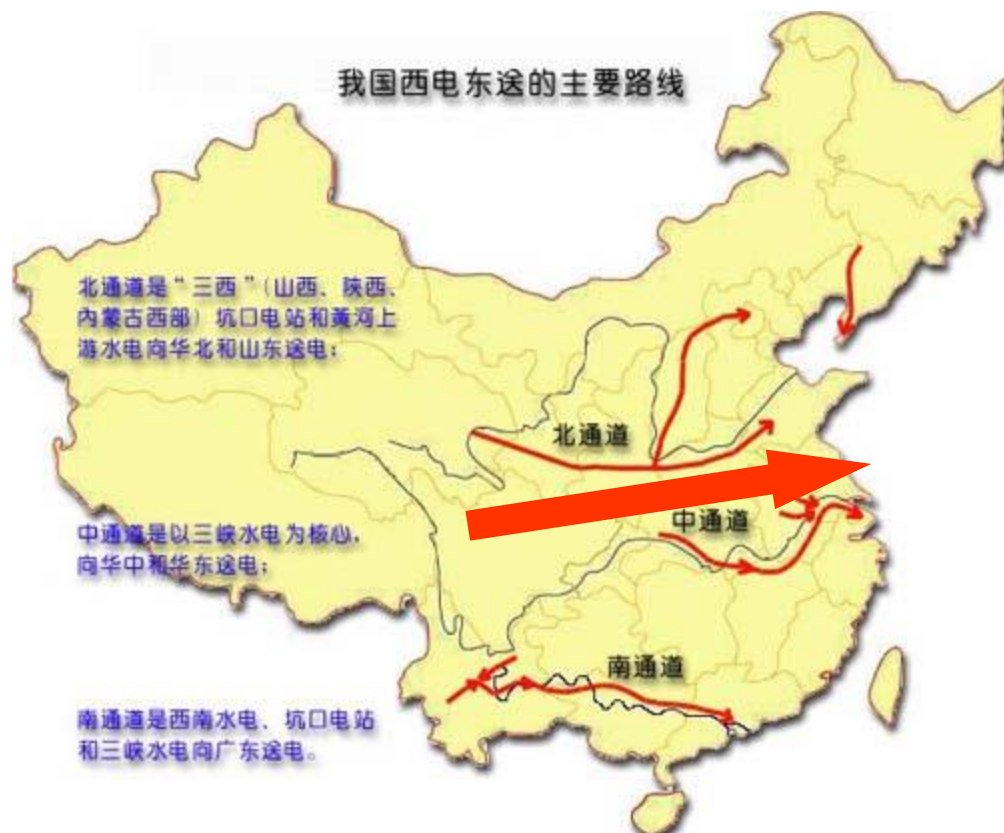
水：南水北调



- 南水北调工程：分东、中、西三条调水线路。建成后与长江、淮河、黄河、海河相互联接，将构成我国水资源“四横三纵、南北调配、东西互济”的总体格局。



电：西电东送



- “西电东送”将形成北、中、南三路送电格局。北线由内蒙古、陕西等省（区）向华北电网输电；中线由四川等省向华中、华东电网输电；南线由云南、贵州、广西等省（区）向华南输电。



逆向分布!

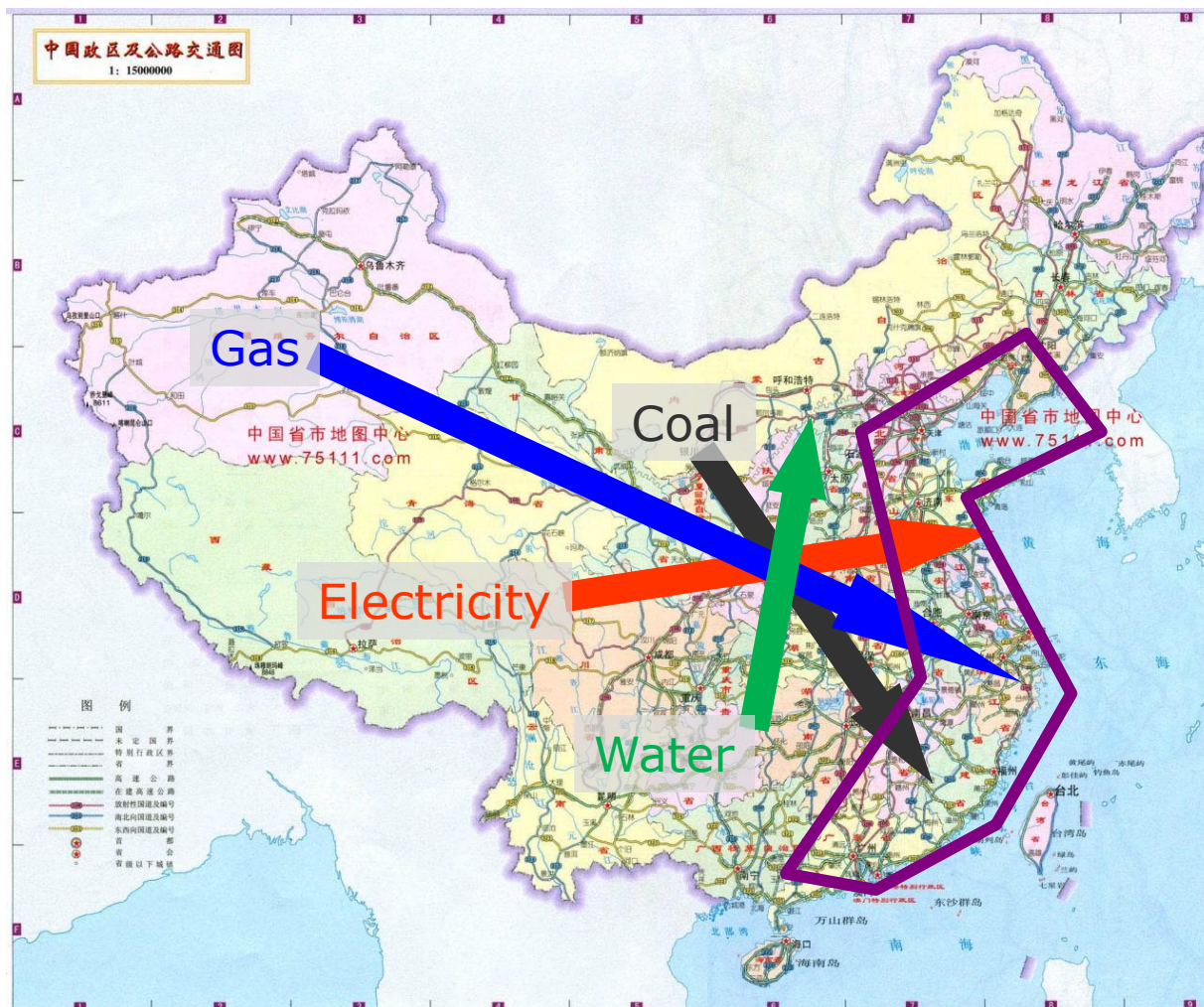


北煤南运

西气东输

南水北调

西电东送



清华大学
Tsinghua University

Energy Intelligence Laboratory
清华大学电机系·智慧能源课题组

电力传输环节碳排放分析



- 电网输电的低碳效益——原理分析
 - 我国能源结构以煤炭为主，决定了我国以输煤/气和输电作为能源输送的主要途径
 - 输煤：在负荷中心规划火电厂，将煤炭从煤炭基地通过火车、轮船等交通手段运送至负荷中心用于电力生产和供应。
 - 输气：类似。
 - 输电：在煤炭基地规划火电厂，将煤炭在本地进行发电，采用大规模的电力传输技术为远方的负荷中心送电。

电力传输环节碳排放分析



- 电网输电的低碳效益——原理分析
 - 我国的能源分布体现出显著的地域分布，能源的大规模输送是必然趋势
 - 各类能源输送方式均存在损耗
 - 车辆运输煤炭——遗撒、氧化
 - 管道输送天然气——甲烷泄露
 - 电网输送电能——网络损耗

直接碳排放

电力传输环节碳排放分析



- 电网输电的低碳效益——原理分析
 - 输煤还是输电？这是一个综合能源战略规划问题，涉及到经济性、可靠性等多方面因素，多年来众多学者从不同角度对此问题进行了研究和讨论。



电能传输的低碳优势



- 长距离传输的损耗较低
- 大型可再生能源的唯一传输媒介
- 减少间歇性电源的“弃电”行为
- 相对于运煤：
 - 传输过程无污染，无炭遗撒
 - 缓解铁路运力瓶颈

•



清华大学
Tsinghua University

EITab
Energy Intelligence Laboratory
清华大学电机系·智慧能源课题组





输电损耗及其低碳效益分析 (输煤输电比较)

电力传输环节碳排放分析



• 电网输电的低碳效益——原理分析

	优点	缺点
输电	可协助清洁能源的消纳 输送方式灵活	远距离输送损耗大 线路建设成本高
输煤	运送能耗低 运送成本低	沿线煤炭遗撒污染 铁路运力约束

- 从低碳减排的角度出发，二者孰优孰劣？

电力传输环节碳排放分析



- 电网输电的低碳效益——原理分析
 - 输电过程碳排放分析



电力传输环节碳排放分析



• 电网输电的低碳效益——原理分析

◦ 输电过程建模

• 输电损耗对应的排放量

$$E_{T_loss} = p \cdot \frac{\delta_L}{1 - \delta_L} \cdot G_0 \cdot e_T$$

◦ p : 送端火电发电量占比 (%)

◦ G_0 : 受端电量需求 (kWh)

◦ e_T : 送端火电碳排放强度 (kgCO₂/kWh)

• 输电损耗

$$\delta_L = 1 - \prod_{k=1}^n (1 - \lambda_k L_k)$$

◦ λ_k : 单位长度线路网损率 (%/km)

◦ L_k : 线路长度 (km)

电力传输环节碳排放分析



- 电网输电的低碳效益——原理分析

- 输电过程建模

- 受端电力需求造成的碳排放

$$E_{T_Con} = G_0 \cdot p \cdot e_T$$

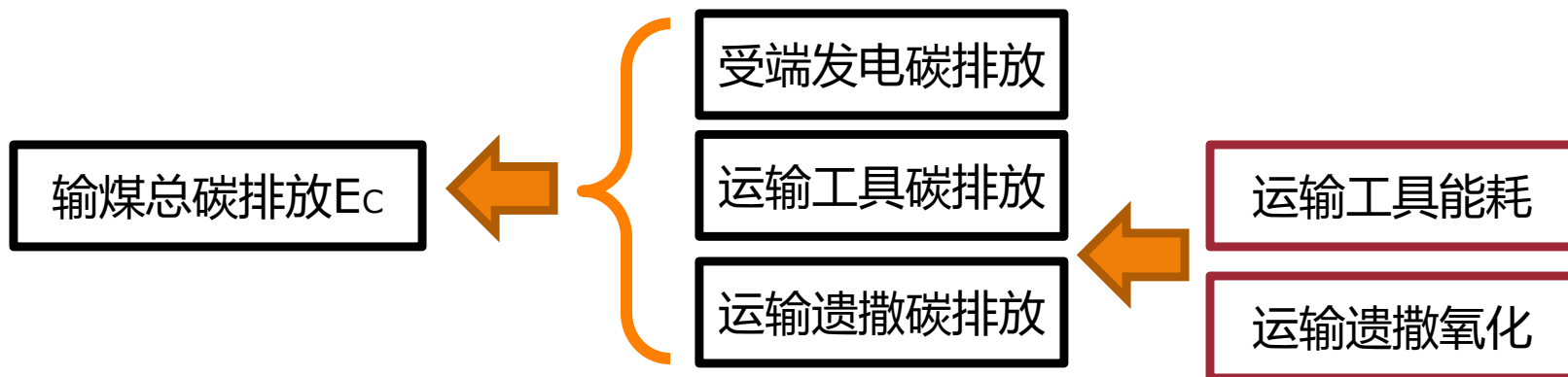
- 输电过程碳排放总量（实际上是整个发输过程）

$$E_T = E_{T_Loss} + E_{T_Con} = G_0 \cdot \frac{p}{1 - \delta_L} \cdot e_T$$

电力传输环节碳排放分析



- 电网输电的低碳效益——原理分析
 - 输煤过程碳排放分析



电力传输环节碳排放分析



● 电网输电的低碳效益——原理分析

○ 输煤过程建模（负荷中心电力需求不变）

• 运输遗撒率

$$\alpha_D = 1 - \prod_{i \in I_N} (1 - \mu_i L_i)$$

- μ_i : 交通工具 i 单位距离运输遗撒率 (%/km)
- L_i : 交通工具 i 的运输长度 (km)
- I_N : 所有参与运输交通工具的集合

• 运输遗撒碳排放

$$E_L = G_0 c_C \cdot \frac{\alpha_D}{1 - \alpha_D} \cdot f_0 \cdot K$$

$$= G_0 \cdot \frac{\alpha_D}{1 - \alpha_D} \cdot e_C \cdot K$$

- K : 运输遗撒煤炭氧化率 (%)
- G_0 : 受端电力需求 (kWh)
- e_C : 受端火电碳排放强度 (kgCO₂/kWh)
- f_0 : 单位标准煤完全燃烧所产生的碳排放量
- c_C : 受端平均标准煤耗

电力传输环节碳排放分析



- 电网输电的低碳效益——原理分析
 - 输煤过程建模（负荷中心电力需求不变）
 - 若负荷中心处电力需求为 G_0 ;
 - 电厂供电标准煤耗为 c_C ;
 - 输送煤炭折合标煤系数为 a ;
 - 则煤炭中心需向负荷中心运输的煤炭质量为:

$$M_0 = \frac{G_0 c_C a}{1 - \alpha_D}$$

电力传输环节碳排放分析



- 电网输电的低碳效益——原理分析
 - 输煤过程建模（负荷中心电力需求不变）
 - 交通工具 i 运输煤炭的质量（考虑上一运输环节的遗撒损耗）

$$M_i = M_0 \cdot \prod_{d \in I'_N} (1 - \mu_d L_d) = \frac{G_0 c_C a}{1 - \alpha_D} \prod_{d \in I'_N} (1 - \mu_d L_d)$$

- a : 运输煤炭与标煤的折算系数
- I'_N : 在交通工具 i 之前参与运输的交通工具的集合

电力传输环节碳排放分析



• 电网输电的低碳效益——原理分析

◦ 输煤过程建模（负荷中心电力需求不变）

• 交通运输能耗对应碳排放

$$E_t = \sum_{i \in I_N} M_i \cdot L_i \cdot \left(\sum_{j \in J_N} s_{ij} \cdot EF_{Mj} \cdot r_{ij} \right)$$

所运输的煤炭

运输工具所消耗
的燃料能耗

- s_{ij} : 交通工具 i 的单位运输燃料消耗
- r_{ij} : 交通工具 i 中使用燃料 j 的运输距离占比
- J_N : 各类燃料的集合
- EF_{Mj} : 燃料 j 的质量碳排放系数

交通工具单位运输燃料消耗定义为将单位质量货物运输单位里程的燃料消耗，单位一般为“吨油/万（吨·公里）”或“kWh/万（吨·公里）”



电力传输环节碳排放分析



- 电网输电的低碳效益——原理分析
 - 输煤过程建模（负荷中心电力需求不变）

- 受端发电碳排放

$$E_G = G_0 e_C$$

- 输煤过程总碳排放

$$\begin{aligned} E_C &= E_t + E_L + E_G \\ &= G_0 \cdot \frac{\alpha_D}{1 - \alpha_D} \cdot e_C \cdot K + \sum_{i \in I_N} M_i \cdot L_i \cdot \left(\sum_{j \in J_N} s_{ij} \cdot EF_{Mj} \cdot r_{ij} \right) + G_0 e_C \end{aligned}$$

电力传输环节碳排放分析



- 电网输电的低碳效益——实证分析
 - 结合北煤南运和西电东送的实际情况，以“三西”地区（山西、陕西和内蒙古西部）煤炭基地作为本案例的煤炭输出中心，华中作为电力输出中心，华东作为负荷中心。

电力传输环节碳排放分析



- 电网输电的低碳效益——实证分析
 - 我国“三西”地区向华东沿海输煤——基础数据

- 交通工具数据

运输途径	单位运输里程碳排放量 (kgCO ₂ /万t·km)	运输遗撒率/(%/百km)
铁路	82.73	0.214
船舶	167.90	0.2
公路	1409.03	0.26

- 输煤距离数据

- 铁路800km、水路1400km、公路100km

电力传输环节碳排放分析



- 电网输电的低碳效益——实证分析
 - 我国“三西”地区向华东沿海输煤——基础数据
 - 燃料数据
 - 煤炭：5000kcal/kg、1.834kgCO₂/kg、折标煤系数0.7143、自然氧化比K为5%
 - 柴油：2.71kgCO₂/L
 - 汽油：2.26kgCO₂/L
 - 电力数据
 - 2018年全国平均电力碳排放强度为592gCO₂/kWh

电力传输环节碳排放分析



- 电网输电的低碳效益——实证分析
 - 我国华中地区向华东沿海输电——基础数据
 - 输电线路数据
 - 1000kV交流线路，每百公里线损0.277%，长度640km
 - 500kV交流线路，每百公里损耗0.7%，总长度460km
 - 电力供需数据
 - 受端电力需求500亿kWh/年
 - 送端与受端发电煤耗均为310gce/kWh

电力传输环节碳排放分析



• 电网输电的低碳效益——实证分析

• 其它数据

- 令 $\beta = E_T/E_G$, 定义为运输能耗排放比例, 根据调研有 $\beta \in [2.05\%, 2.88\%]$, 取中间值 2.45%
- 考虑不同线路的级联, 有 $\delta_L \in [2.5\%, 8.8\%]$, 取中间值 5.7%
- 考虑葛洲坝与三峡的水电资源, 有 $p \in [60\%, 80\%]$, 取中间值 70%

电力传输环节碳排放分析



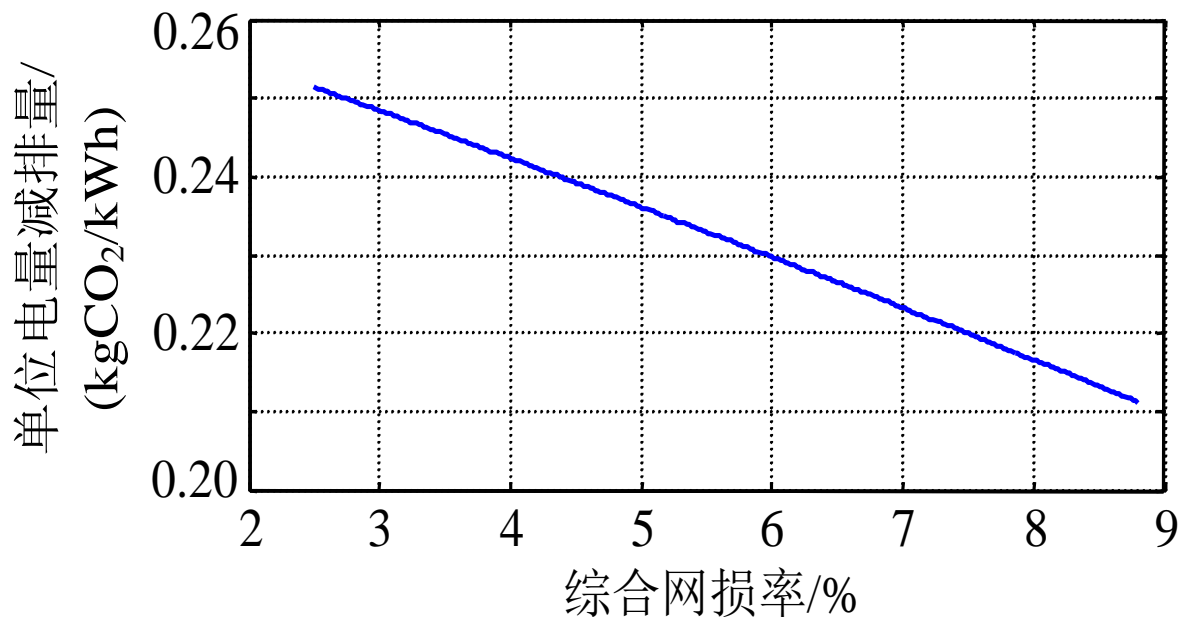
- 电网输电的低碳效益——实证分析
 - 分析结果
 - 当年能源供应总碳排放，输电比输煤节约1180万吨CO₂。
 - 受端单位用电碳排放强度下降0.23kgCO₂/kWh，下降约29%。

电力传输环节碳排放分析



● 电网输电的低碳效益——实证分析

○ 灵敏度分析



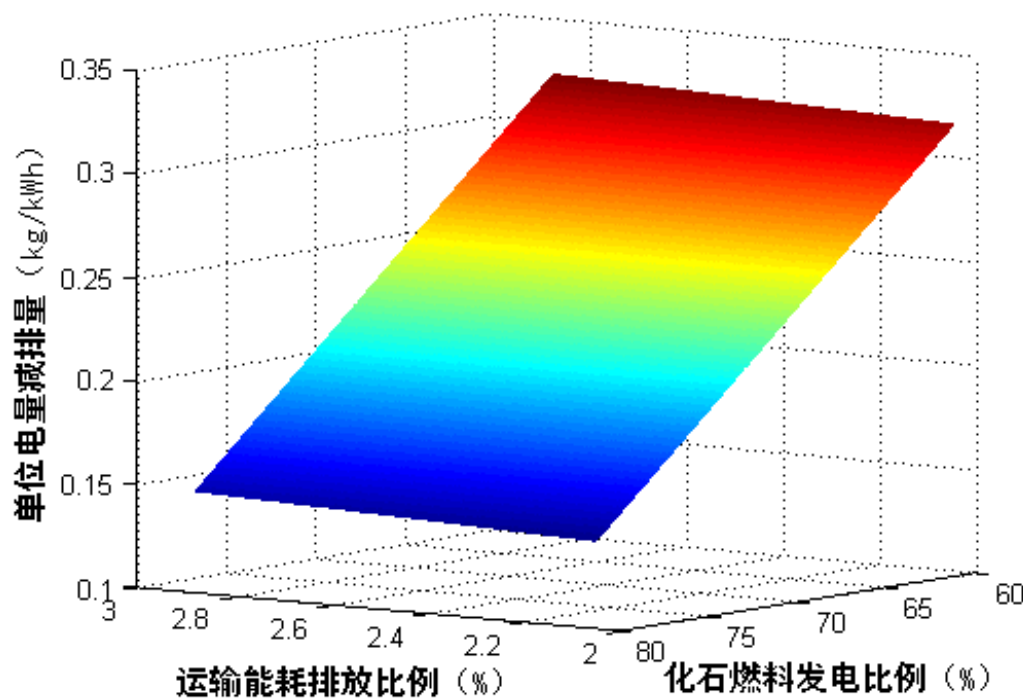
不同输电网损率场景下的单位电量碳减排量

电力传输环节碳排放分析



● 电网输电的低碳效益——实证分析

○ 灵敏度分析



不同运输能耗碳排放率和化石燃料发电比例下的单位电量碳减排量



清华大学
Tsinghua University

EITab
Energy Intelligence Laboratory
清华大学电机系·智慧能源课题组



电力传输环节碳排放分析



- 电网输电的低碳效益——实证分析
 - 输煤输电比较——小结
 - 输电相比输煤的低碳优势主要集中在低碳电能的传输。
 - 随着大规模、高效率输电技术的研发和应用，输电的低碳优势将进一步扩大。



对于某单向送受端互联电网，假定送电结构不变，设X为所计算出的输送到受端电网的折合碳排放强度，Y为电网送端火电碳排放强度，请问X与Y之间的大小关系？

- ☐ A X一定大于Y
- ☐ B X一定不大于Y
- ☐ C 取决于受端的电量需求
- ☒ D 取决于送端火电发电量占比
- ☒ E 取决于输电线路损耗

提交



六氟化硫排放分析

电力传输环节碳排放分析



• 六氟化硫排放分析

◦ 六氟化硫概述 (SF₆)

- 分子量: 146.06
- 密度: 6.139 g/L (20°C)
- GWP: 同质量CO₂的**23900**倍
- 在空气中降解所需时间: 3400 年

GWP: 全球暖化潜势 (Global warming potential, 简称GWP), 亦作全球升温潜能值, 是衡量温室气体对全球暖化的影响。是将特定气体和相同质量二氧化碳比较之下, 造成全球暖化的相对能力。二氧化碳的全球暖化潜势定义为1。全球暖化潜势是温室效应的影响因子之一。

Gas name	Pre-industrial concentration (ppmv *)	Concentration in 1998 (ppmv)	Atmospheric lifetime (years)	Main human activity source	GWP **
Water vapour	1 to 3	1 to 3	a few days	-	-
Carbon dioxide (CO ₂)	280	365	variable	Fossil fuels, cement production, land use change	1
Methane (CH ₄)	0,7	1,75	12	Fossil fuels, rice paddies waste dumps, livestock	21
Nitrous oxide (N ₂ O)	0,27	0,31	114	Fertilizers, combustion industrial processes	310
HFC 23 (CHF ₃)	0	0,000014	250	Electronics, refrigerants	12 000
HFC 134 a (CF ₃ CH ₂ F)	0	0,0000075	13,8	Refrigerants	1 300
HFC 152 a (CH ₃ CHF ₂)	0	0,0000005	1,4	Industrial processes	120
Perfluoromethane (CF ₄)	0,0004	0,00008	>50 000	Aluminium production	5 700
Perfluoroethane (C ₂ F ₆)	0	0,000003	10 000	Aluminium production	11 900
Sulphur hexafluoride (SF ₆)	0	0,0000042	3 200	Dielectric fluid	22 200

* ppmv = parts per million by volume, ** GWP = Global warming potential (for 100 year time horizon).



电力传输环节碳排放分析



- 六氟化硫排放分析

- 讨论

- 电力系统中的 SF_6 的排放来源为何？
- 电力系统中每年向大气中产生的 SF_6 排放体量如何？
- 与发电环节的 CO_2 排放相比如何？

电力传输环节碳排放分析



● 六氟化硫排放分析——原理分析

○ 电力系统六氟化硫排放的来源

- 自然泄露（设备密封质量下降）
- 设备开罐检修
- 设备退役或报废

造成排放的本质原因是老化

电力传输环节碳排放分析



• 六氟化硫排放分析——原理分析

◦ 电力系统六氟化硫排放的排放量统计

$$E_{STi} = E_{Si} \cdot \sum_j e_{ij}$$

- E_{STi} : 设备 i 的SF₆排放总量
- E_{Si} : 设备 i 的SF₆总含量
- e_{ij} : 设备 i 中的SF₆经由第 j 种途径的泄露比率

• 对设备检修与报废环节, 有

$$e_{ij} = (1 - r_C) \cdot d_{ij}$$

- r_C : 设备 i 在检修与报废过程中的SF₆回收率
- d_{ij} : 设备 i 被检修或报废的数量占总量的比重

电力传输环节碳排放分析



- 六氟化硫排放分析——原理分析
 - 电网设备SF₆排放与发电环节碳排放的相对大小

$$X_i = E_{STi} \times GWP_S / E_G$$

- X_i : 系统SF₆排放与电力生产排放的CO₂当量比值
- GWP_S : SF₆的温室效应系数
- E_G : 电力生产排放的CO₂

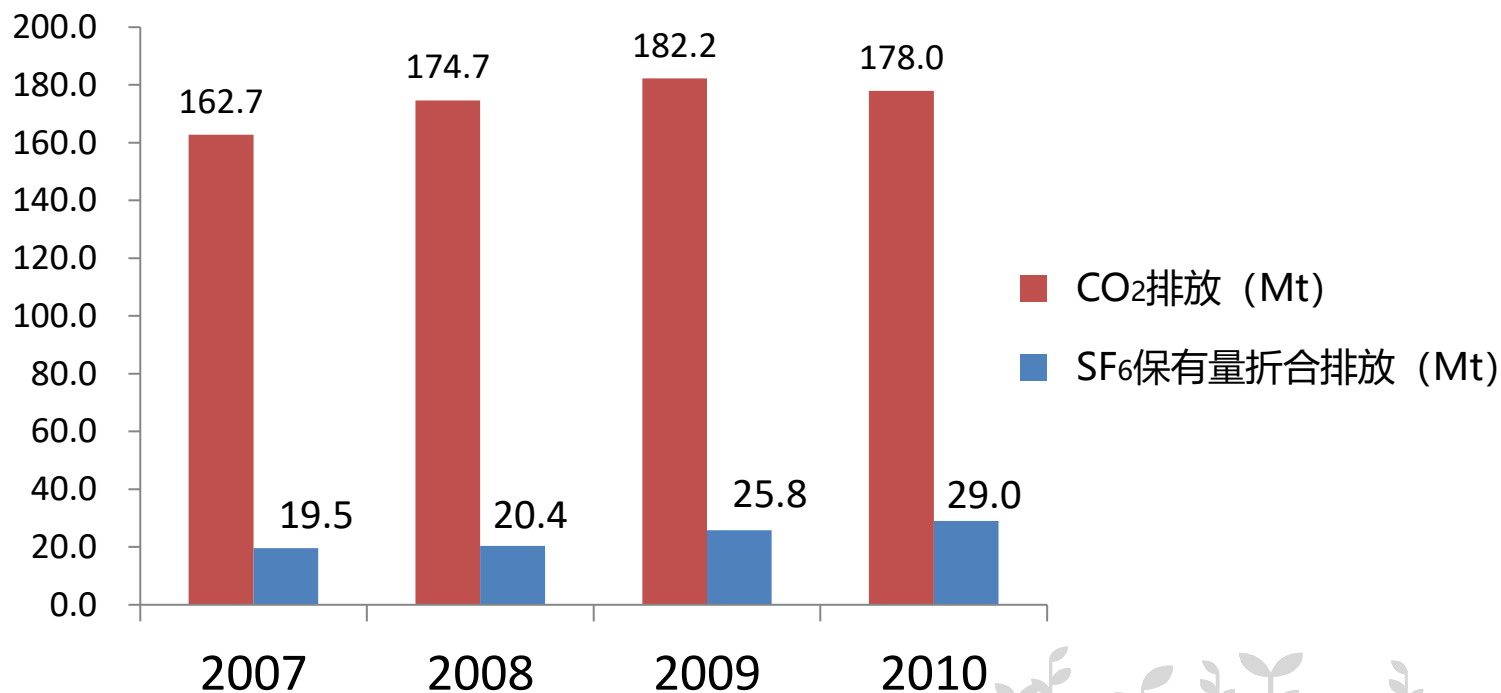
电力传输环节碳排放分析



• 六氟化硫排放分析——实证分析

◦ 以广东电网实际为例

2007-2010年全网SF₆**保有量**（折合CO₂当量）与当年发电碳排放之比



电力传输环节碳排放分析



• 六氟化硫排放分析——实证分析

◦ 泄露比率假定：

设备电压等级	自然泄漏率 (%)	SF ₆ 气体使用量占比 (%)	设备维护泄漏率 (%)	设备退役泄漏率 (%)
500kV	0.05	3.6	0.1	0.015
220kV	0.07	26.1	0.15	0.025
110kV	0.09	70.3	0.2	0.035

检修、报废假定回收率

$$r_C = 95\%$$

电力传输环节碳排放分析



- 六氟化硫排放分析——实证分析

- 排放总量计算：

时间	rc=95%		rc=0%	
	SF ₆ 排放 (t)	等效 CO ₂ 当量(kt)	SF ₆ 排放 (t)	等效 CO ₂ 当量(kt)
2007	2.44	58.29	35.83	856.40
2008	2.54	60.78	37.37	893.09
2009	3.22	76.90	47.27	1129.84
2010	3.62	86.45	53.15	1270.26



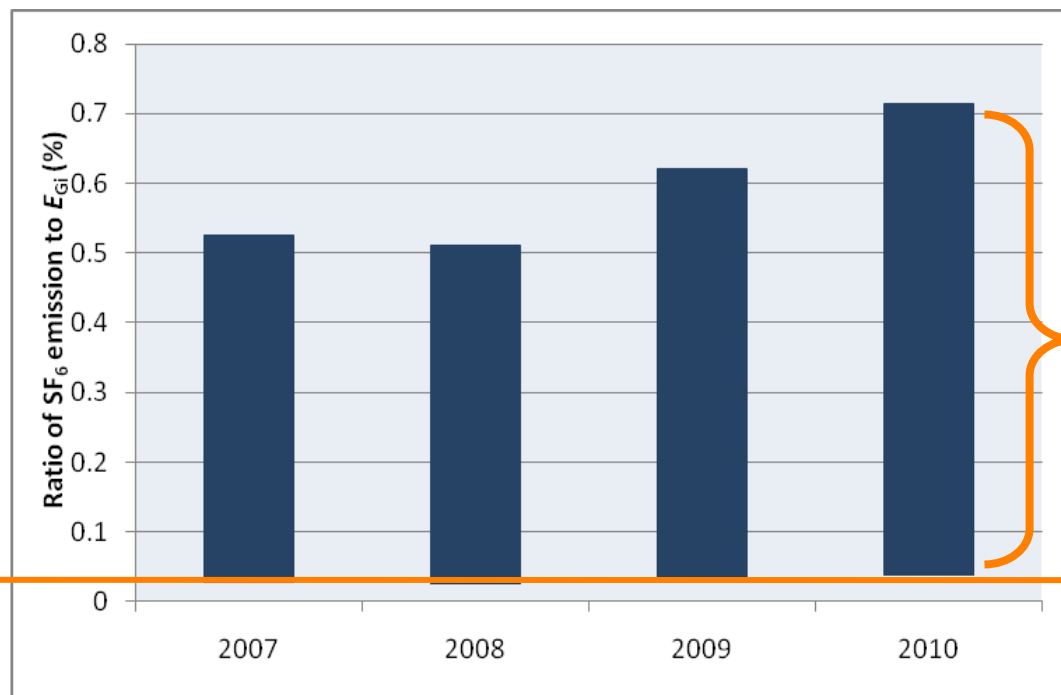
电力传输环节碳排放分析



• 六氟化硫排放分析——实证分析

◦ 排放体量比较：

$r_C = 0 \sim 95\%$ 时, X_i 的变化区间



SF₆最小可能排放量
小于电力生产CO₂排放量的
0.05%

SF₆最大可能排放量有上升趋势，
小于电力生产CO₂排放量的1%



清华大学
Tsinghua University

电力传输环节碳排放分析



• 六氟化硫排放分析——监测

◦ SF₆断路器气压/密度检测传感技术：

- 检测六氟化硫设备中的气体工作压强，一般工作压强为0.6Mpa（约六个大气压）
- 当气压值下降0.2Mpa或更高时，必须进行检修以保证设备安全运行
- 不同电压等级设备稍有区别，可参考相关设备使用和制造标准

$$\Delta P \cdot V = \Delta n \cdot R \cdot T$$



电力传输环节碳排放分析



● 政策进展

- 2023年10月5日，欧盟理事会与欧洲议会宣布双方已经就含氟气体法规的协商达成临时协议，临时协议将被提交给成员国家在理事会的代表以及议会的环境委员会审批，并于批准后生效。
- 新的法规将进一步减少含氟气体的排放，其中对高压开关禁止使用含氟气体有如下描述：
- 第5条，禁止以下用含氟温室气体的新建和扩建电气开关设备投入使用：
 - 从2026年1月1日起用含氟气体作为绝缘或开断介质的24kV及以下中压一次及二次配电开关设备；
 - 从2030年1月1日起用含氟气体作为绝缘或开断介质的24kV以上52kV及以下的中压一次及二次配电开关设备；
 - 从2028年1月1日起用GWP为1或更高的含氟气体作为绝缘或开断介质的52kV以上145kV及以下，开断电流50kA及以下的高压开关设备；
 - 从2032年1月1日起用GWP为1或更高的含氟气体作为绝缘或开断介质的145kV以上或开断电流50kA以上的高压开关设备。
- 此外，还给出了允许使用不满足第5条要求的开关设备的特例及相应要求。





电力系统碳排放流分析



碳排放流 = 碳排放 + 流

- 什么是碳排放？
 - 人类生产生活过程产生并排放到大气中的温室气体。
- 什么是流？
 - 流者，水也；流者，动也。

水流

气流

电流

现金流

信息流

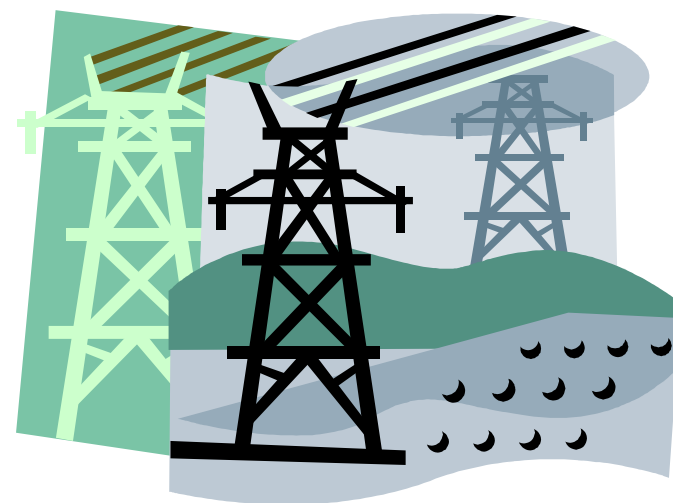
.....



碳排放流概念的提出与内涵



- 什么是**碳排放流**?
 - 一种网络流。
 - 用于描述人类社会中能源或物质传输行为下的碳排放引致与转移效应的基础性工具。



碳排放流概念的提出与内涵



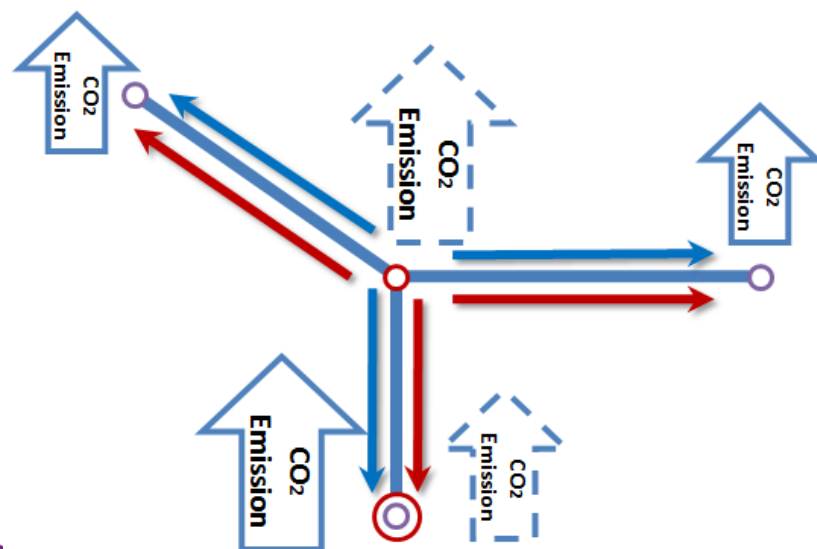
- 碳排放流——网络流
 - 人类创造的大部分系统都具有网络特性，与人类生产、生活相关的活动有许多可以用网络流模型进行描述。
- 人类社会碳排放的特点——转移效应、需求引致
 - 货物/商品在人类社会网络中的运输行为是必然的。
 - 本质上，生产行为的排放是由消费需求引致造成；事实上，大部分商品对应的碳排放集中的生产过程中，在消费过程中不产生排放。



碳排放流概念的提出与内涵



- 碳排放流——转移效应和需求引致的描述工具
 - 在转移和引致效应下，在人类社会网络中各种网流的流动下存在着碳排放的转移与流动。
 - 基于碳排放流，可使人类社会碳排放的需求引致和排放转移的效果得到体现。



碳排放流概念的提出与内涵



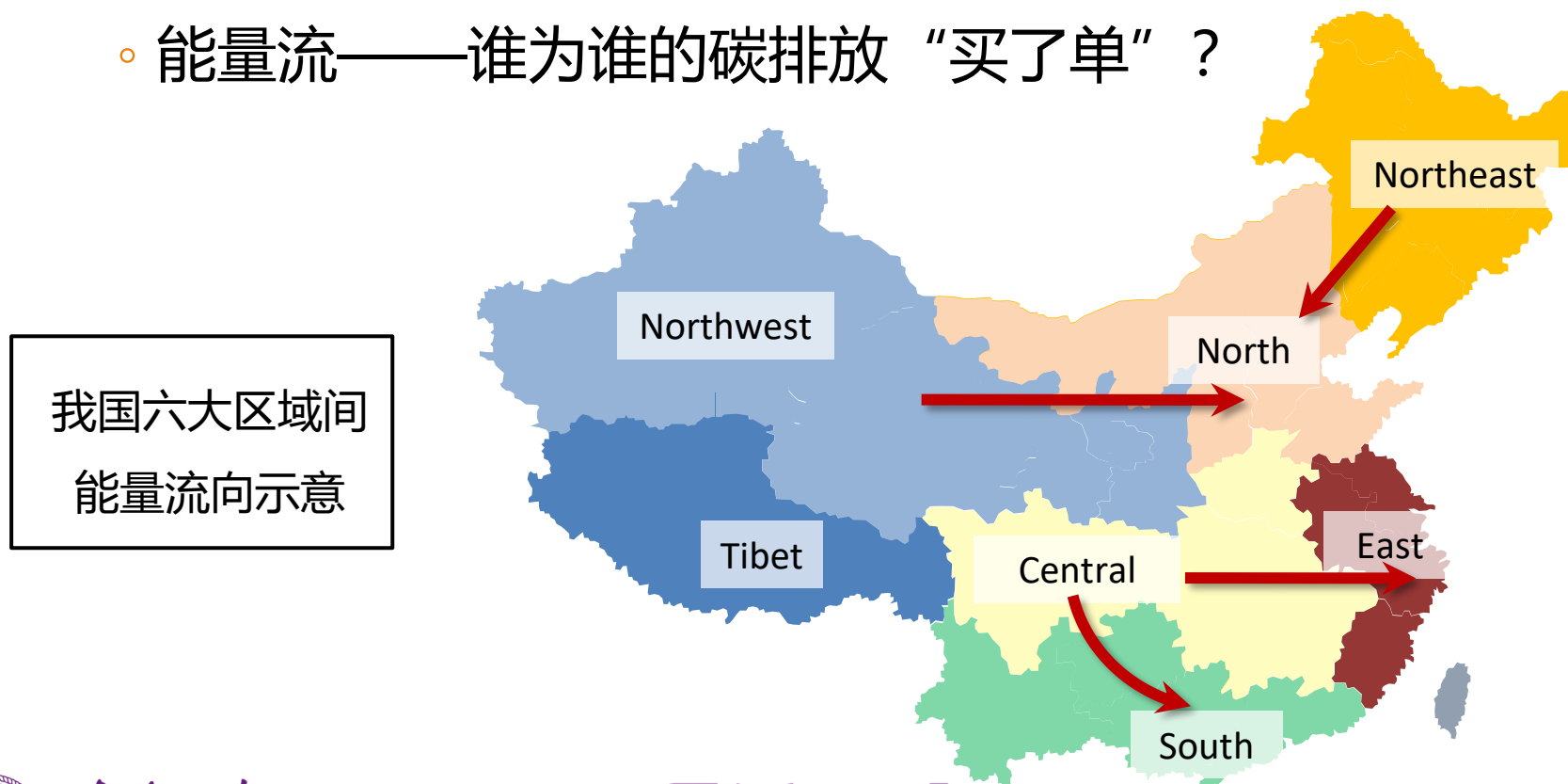
- 碳排放流通常与一种实体的网络流结合分析
 - 商贸物流——商品“碳标签”重新认定排放量
 - 激励消费者购买低碳、低能耗产品
 - 研究国与国之间通过进出口“转移”的碳排放量

欧洲的OECD国家1990-2016年本地的碳排放量实现了12%的下降，但是通过进口需求造成的发展中国家的碳排放的增加远高于其自身的碳排放下降值。

碳排放流概念的提出与内涵



- 碳排放流通常与一种实体的网络流结合分析
 - 能量流——谁为谁的碳排放“买了单”？

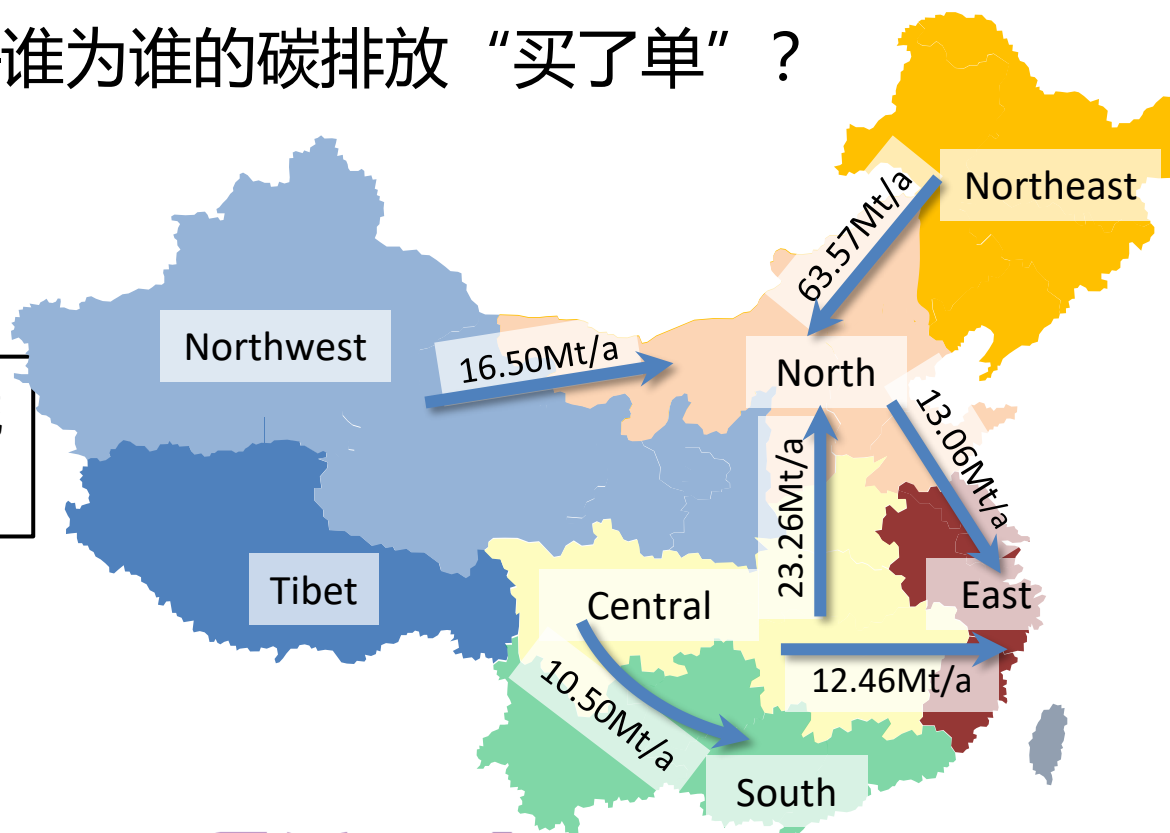


碳排放流概念的提出与内涵



- 碳排放流通常与一种实体的网络流结合分析
 - 能量流——谁为谁的碳排放“买了单”？

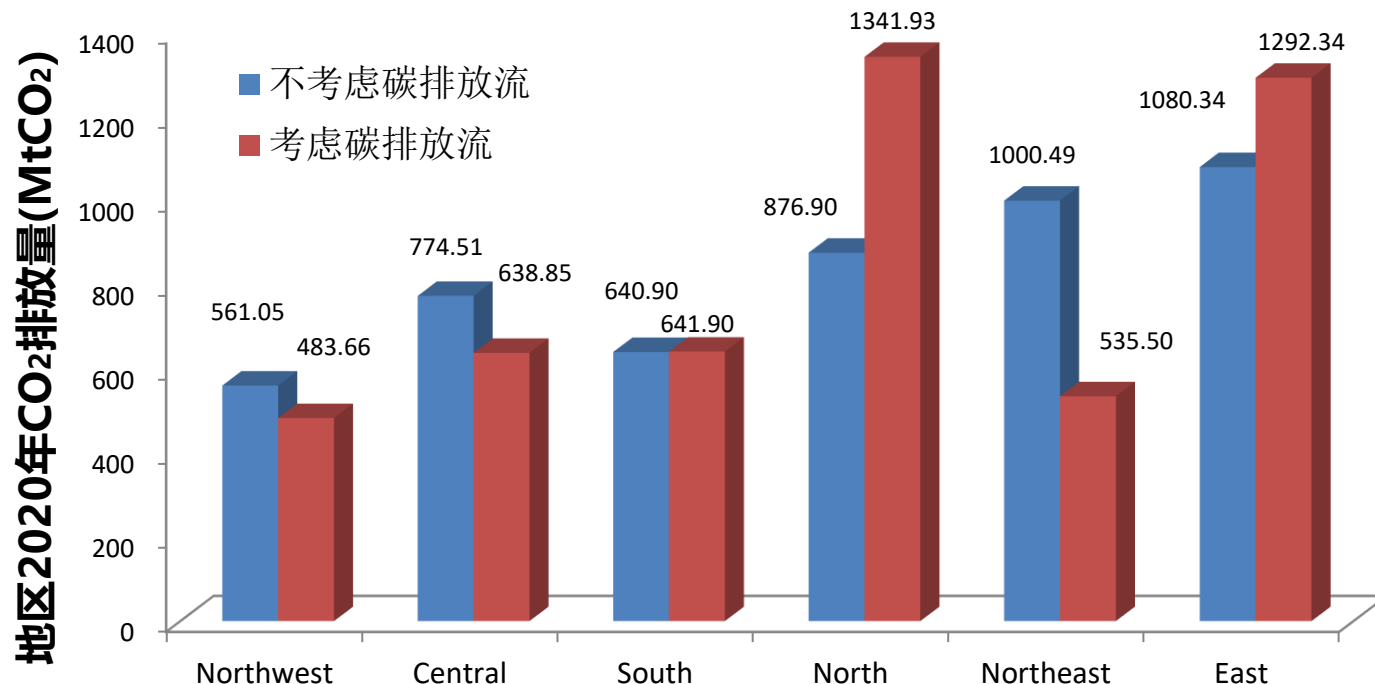
我国六大区域间碳排放流量（仅考虑电能）示意



碳排放流概念的提出与内涵



- 碳排放流通常与一种实体的网络流结合分析
 - 能量流——谁为谁的碳排放“买了单”？



清华大学
Tsinghua University

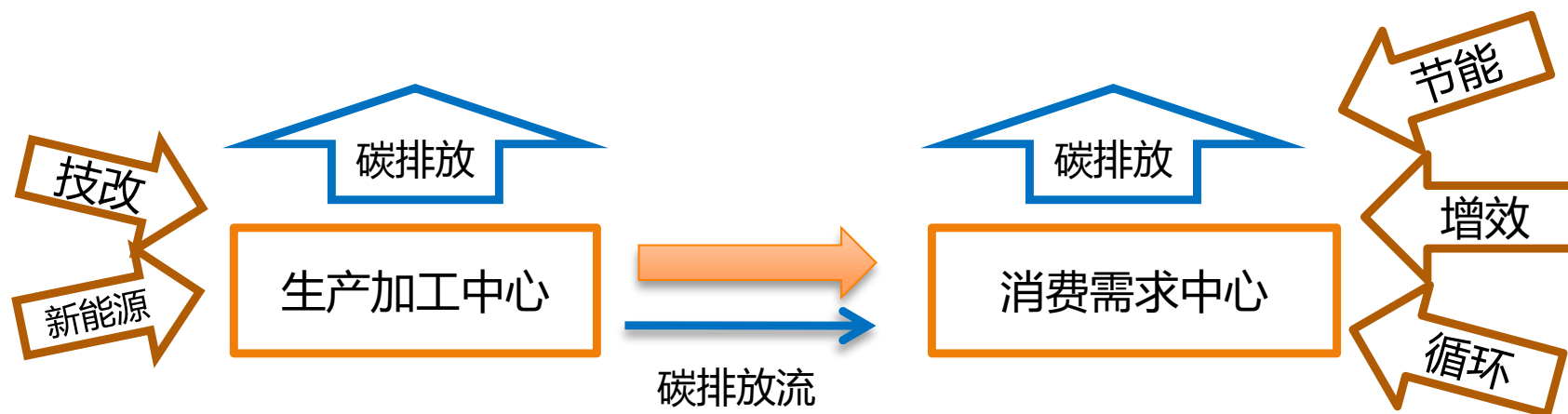
EITab
Energy Intelligence Laboratory
清华大学电机系·智慧能源课题组



碳排放流概念的提出与内涵



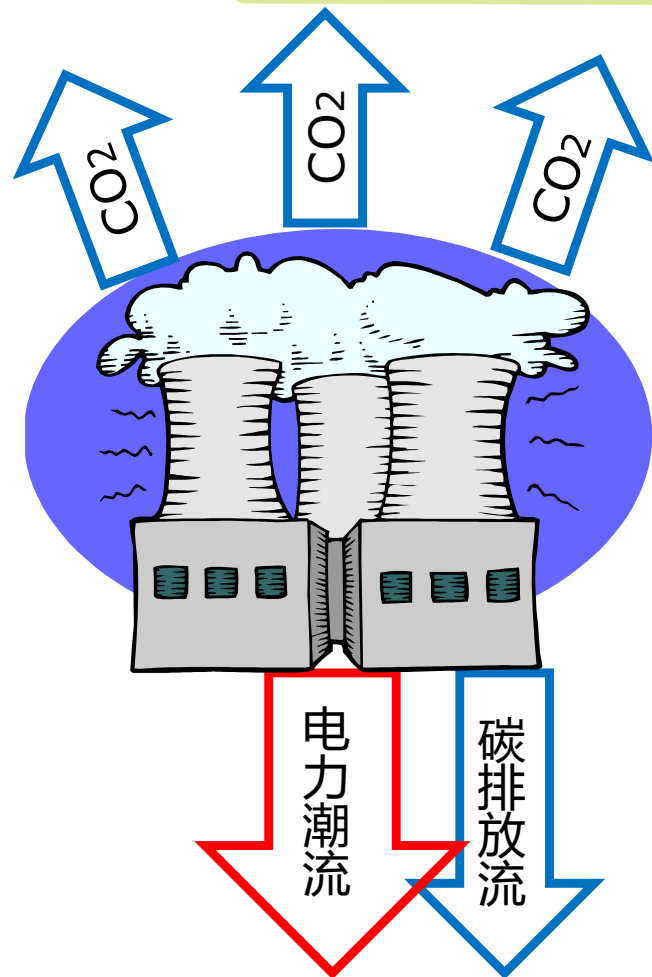
- 碳排放流——提出的意义
 - 有助于从更为合理的角度去认识人类社会的碳排放产生
 - 有助于从更为形象的角度去理解人类社会碳排放的特点
 - 有助于从更有针对性的角度提出低碳发展的目标与战略



电力系统中碳排放流的理念



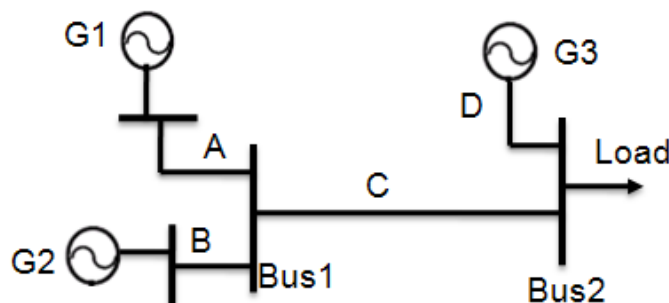
- 电力系统碳排放流的概念
 - 将发电厂排向大气中的碳排放与从电厂注入电网的潮流相结合。
 - 假定碳排放并非直接从电厂排入大气，而是以网络流的形式随潮流流入电网，直至用电终端。
 - 电网中流动的碳排放，即是电力系统碳排放流。



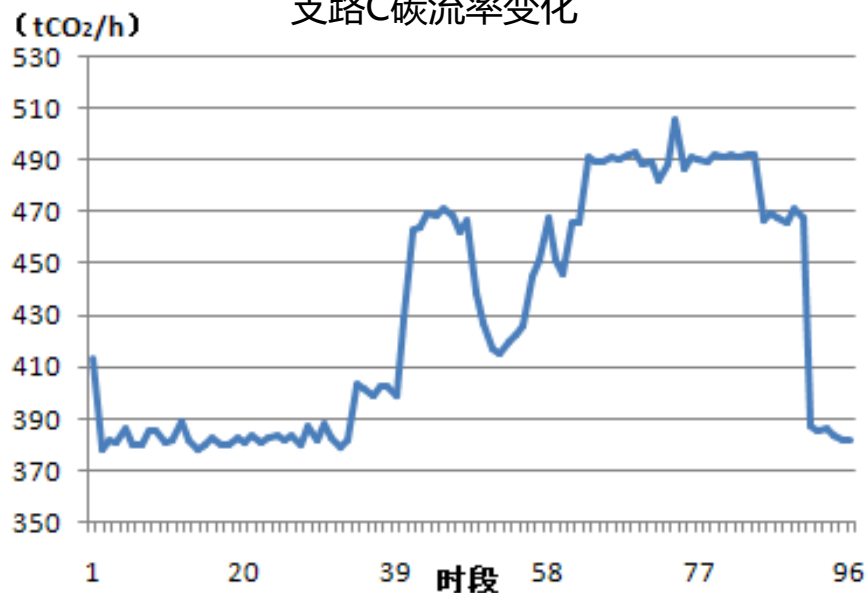
电力系统碳排放流示例



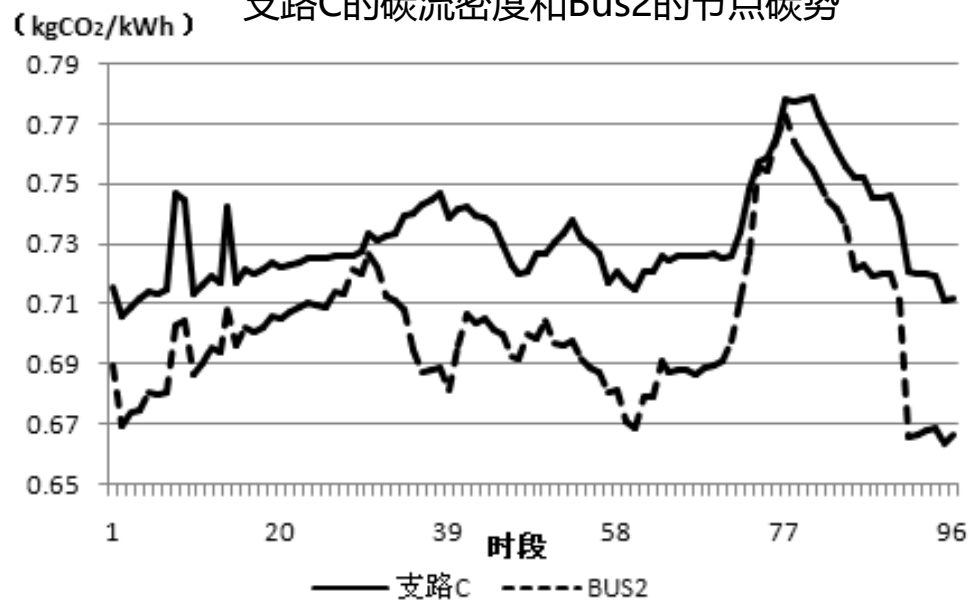
- 示例系统
 - 全天变化



支路C碳流率变化



支路C的碳流密度和Bus2的节点碳势



电力系统碳排放流应用-碳表



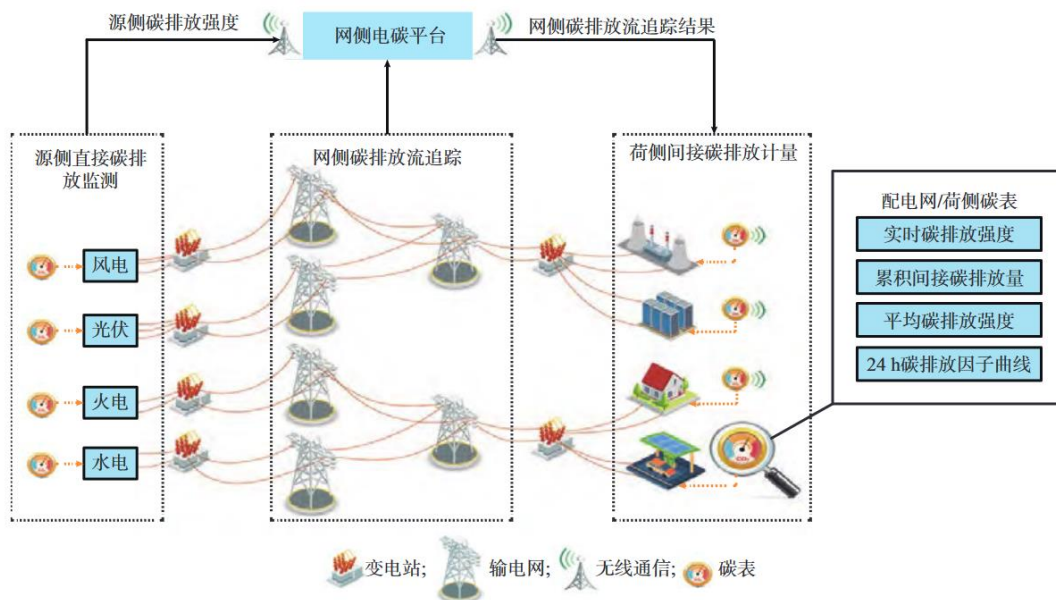
- **碳表**是用于实时测量和记录电力系统碳排放流基本指标的表计
 - **源侧碳表**：通过发电厂烟气传感器实时测量（或通过实时发电燃料消耗及燃料排放因子计算）发电厂碳排放量，并将数据上传至网侧电碳平台；
 - **网侧碳表**：安装在输配变电站及跨省跨区电网计量关口，与网侧电碳平台或其他碳表通信，实时计算线路碳流率和碳流密度、网损碳流率和间接碳排放量；
 - **荷侧碳表**：可直接集成在智能电表集中，采集用户用电功率和电气位置信息，根据网侧碳表信息，通过与网侧电碳平台以及其他碳表之间通信得到用电间接碳排放、碳排放因子信息，并记录用户累积碳排放。



电力系统碳排放流应用-碳计量系统



- 基于碳排放流分析理论，可以构建电力系统**全环节碳计量系统**。
- 该系统主要由分散设置在全网各处的**碳表**，网侧**电碳平台**，以及连接各碳表的**通信链路**组成，通过网络化量测与集中式/分布式计算实现电力系统全环节碳排放的计量和记录。



思考



- 对于课程中介绍的输煤与输电间的碳排放比对，你认为还有哪些环节可以进一步深入分析？
- 根据课程中介绍的网损对应的碳排放计算方法，你能提出改进的分析方法吗？
- 自行调查数据，大致估算一下，我国电网侧碳排放总量与发电侧碳排放总量的比例？
- 感兴趣的同学，可阅读碳排放流相关资料。