北京大学
PEKING UNIVERSITY

为双碳“沪”航

环境综合实习一小组报告
第五组

小组成员：燕书欣、马啸天、房晨、刘安齐、胡金龙、林鸿斌

2021年7月16日

双碳目标

上海市碳排放基本情况

能源部门对于总碳排放量贡献最大
工业同样贡献了较高的碳排放

上海的**能源部门碳排放占比低于全国**

交通部门产生的碳排放尤为显著

上海市减碳亮点

垃圾焚烧&垃圾分类：从上海到全国

新能源汽车：超大城市的减排必由之路

碳排放交易：上海引领全国

超大城市的碳减排

精细化

技术化

市场化

碳中和的道路上，上海绝非独行：从上海到中国

中国在为上海做什么

上海能为中国做什么

PART 01
研究背景与目标

研究背景与目标

研究背景

中国将提高国家自主贡献力度，采取更加有力的政策和措施，二氧化碳排放力争于**2030年前达到峰值**，努力争取**2060年前实现碳中和**。

——**2020年9月22日，第七十五届联合国大会**

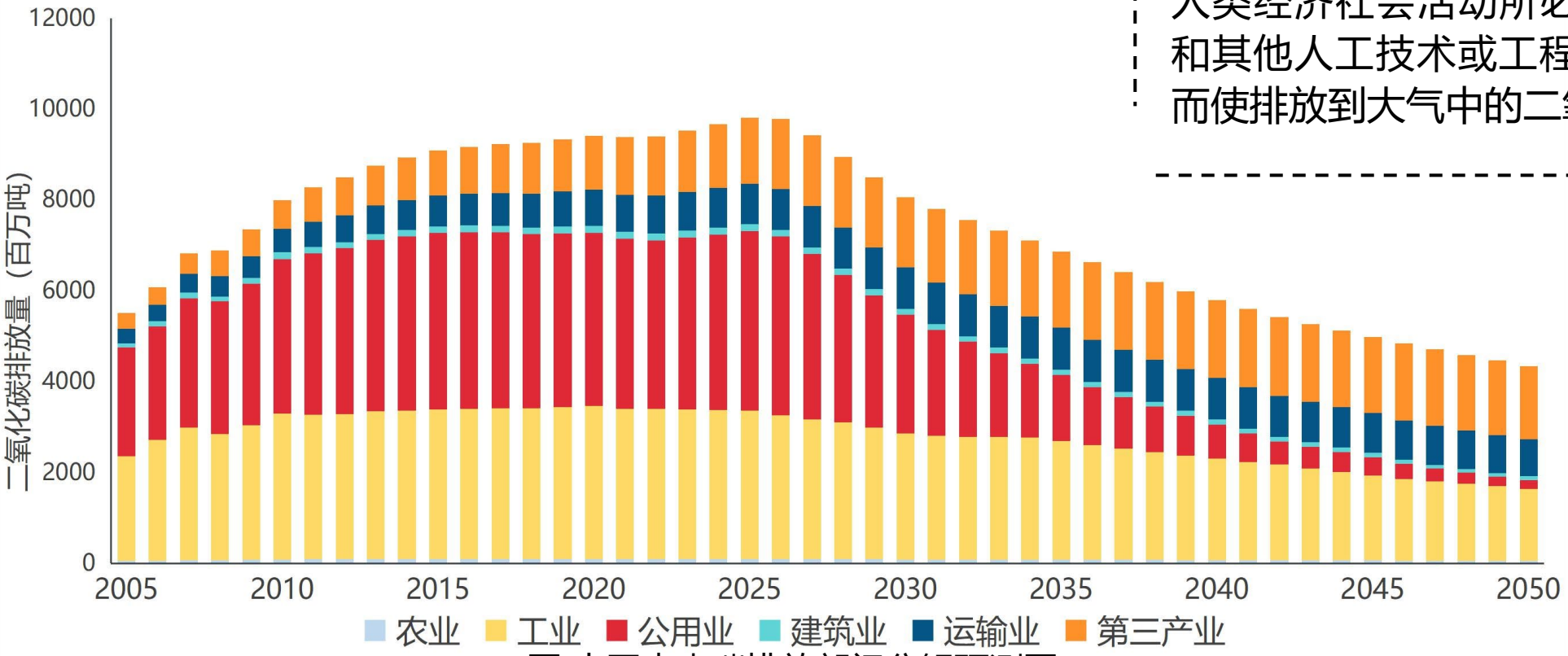


图 中国未来碳排放部门分解预测图

两个阶段性目标

碳达峰（Peak Carbon Dioxide Emissions）

二氧化碳的年排放量达到峰值后不再增长，趋势转为稳步下降。

碳中和（Carbon Neutral）

人类经济社会活动所必需的碳排放通过森林碳汇和其他人工技术或工程手段加以补集利用或封存，而使排放到大气中的二氧化碳净增量为零。

研究目标

本次报告着眼于上海市的碳排放情况，试图通过一些**数据和计算**，展现上海市的**碳排放现状和碳减排特色**；并探讨上海市在中国碳中和道路上的特殊地位。

PART 02
上海市碳排放情况

二氧化碳排放数据的计算

北京大学 PEKING UNIVERSITY

计算二氧化碳排放量的方法采用IPCC/OECD推荐的方法：

公式1

$$Emission = AD * EF$$

AD（Activity Data）：人类活动相关数据，主要为各部门各类能源用量数据

EF（Emission Factors）：单位用量产生的CO_2排放

公式2

$$EF_{ij} = NCV_i * EF_i * O_{ij}$$

NCV（Net Caloric Value）：i 种能源的净热值

EF: i 种能源单位热值二氧化碳排量

O: 能源的氧化效率

表 采用的折标准煤系数和排放因子数据

能源名称	折标准煤系数	平均低位发热量		燃料CO_2排放因子 ($kgCO_2/TJ$)
		数值	单位	
煤炭	0.7143	20908	MJ/t	87300
天然气	1.215	38931	MJ/km^3	54300
原油	1.4286	41816	MJ/t	71100

低位发热量

=**高位发热量**（1kg燃料完全燃烧放出的全部热量）-烟气中水蒸汽**汽化潜热**

[1] 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories,1.1 introductions.
[2] 数据来源：《中国能源统计年鉴》， 附录四：各种能源折标准煤参考系数.

上海市碳排放计算结果

基本信息

年二氧化碳排放**约两亿吨**，约占全国碳排放的**2.2%**

能源部门的贡献超过总排放**三分之一**

交通业和工业的碳排放量大致相当，但交通业整体上**呈现上升趋势**，工业则**略有下降**

2018年 **能源部门：6700万余吨**
交通业：4992万吨
工业：4672万吨

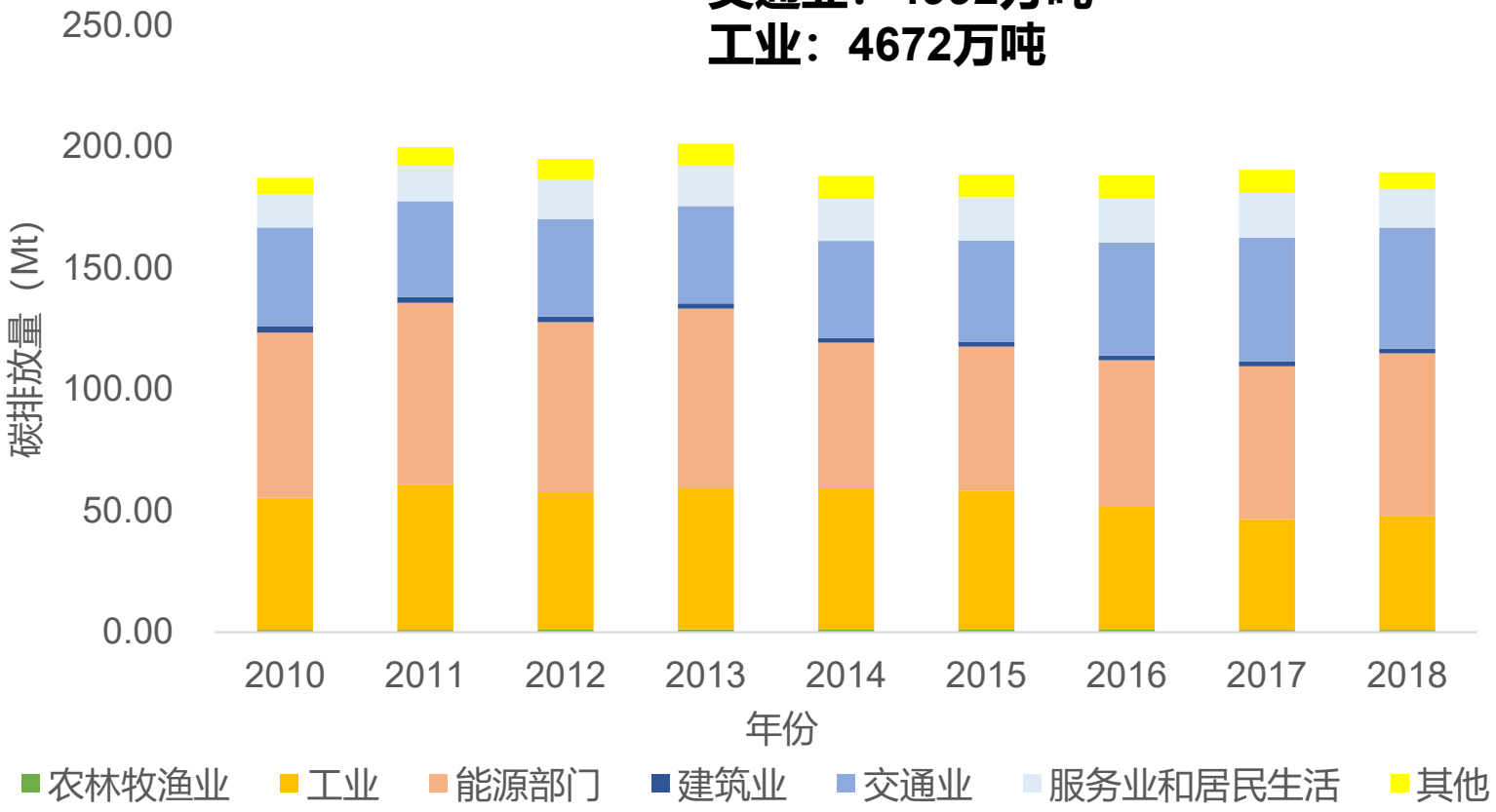


图 上海市2010-2018年分部门碳排放量

三条结论

能源部门

对总碳排放量贡献最大（三分之一左右）

上海的能源部门占比低于全国（40%以上）

交通业

碳排放却**尤为显著**，呈现**后来居上趋势**

作为超大城市，上海车辆密集，交通业的贡献不容忽视

工业

仍然是**上海的支柱**

发展程度和阶段都**领先于全国一般水平，但**服务业并未在上海独占鳌头。

2013年，“看似”达峰

2018年以来，“真正”达峰 ？

PART 03
上海市的减碳亮点

2.1 垃圾处置与分类

2.2 新能源的发展与使用

2.3 碳交易市场的先行者

2.1 垃圾处置——卫生填埋

北京大学 PEKING UNIVERSITY

卫生填埋产生的二氧化碳

$$E_{CH_4} = \left(\frac{16}{12}\right) * W * \boldsymbol{DOC} * DOC_f * (MCF * F)$$

$$E_{CO_2} = \left(\frac{44}{12}\right) * W * DOC * DOC_f * (1 - MCF * F)$$

$$E_{卫生填埋} = E_{CH_4} * \boldsymbol{GWP_{CH_4}} + E_{CO_2}$$

GWP： Global Warming Potential 100年**温升潜势**

基于充分混合的温室气体辐射特性的一个指数，用于衡量相对于二氧化碳的，在所选定时间内进行积分的，当前大气中某个给定的充分混合的温室气体单位质量的辐射强迫。

- W为生活垃圾质量
- DOC为可降解有机碳，根据生活垃圾中各组分的可降解碳含量来计算 **(IPCC推荐的东亚地区缺省值为14%)**
- DOC_f为实际分解的可降解有机碳比例 **(IPCC推荐值为50%)**
- MCF为甲烷氧化因子 **(厌氧填埋场为100%)**
- F为填埋气中CH_4体积比例 **(IPCC推荐值为50%)**
- GWP_{CH_4} =21

$$DOC_{垃圾} = \sum DOC_i * (1 - 含水量_i) * \Phi_i$$ **= 12.28%**

表 1 上海市各种垃圾成分含水量和含量占比实测值及DOC

	DOC	含水量	含量
厨余	38.00%	63.70%	61.10%
纸	44.00%	48.70%	12.07%
橡塑	47.00%	55.00%	16.57%
木竹类	50.00%	53.50%	2.57%
纺织物	30.00%	60.80%	4.52%
其他	0.00%	——	3.17%

[1]赵磊, 陈德珍, 刘光宇, 栾健, & Thomas H.Christensen. (2010). 垃圾热化学转化利用过程中碳排放的两种计算方法. 环境科学学报, 30(8), 1634-1641.
[2]董晓丹, & 张玉林. (2016). 上海市生活垃圾理化特性调查分析. 环境卫生工程(6).
[3]李欢, 金宜英, & 李洋洋. (2011). 生活垃圾处理的碳排放和减排策略. 中国环境科学(02), 259-264.

好氧堆肥产生的二氧化碳

$$E_{CO_2} = \left(\frac{44}{12}\right) * W * DOC * DOC_f$$

垃圾堆肥完全腐熟后，认为有机碳完全分解，而堆肥过程中有三分之二的碳转换为CO_2，其余用于细胞合成。

垃圾焚烧产生的二氧化碳

$$E_{CO_2} = \left(\frac{44}{12}\right) * W * CF * OF$$

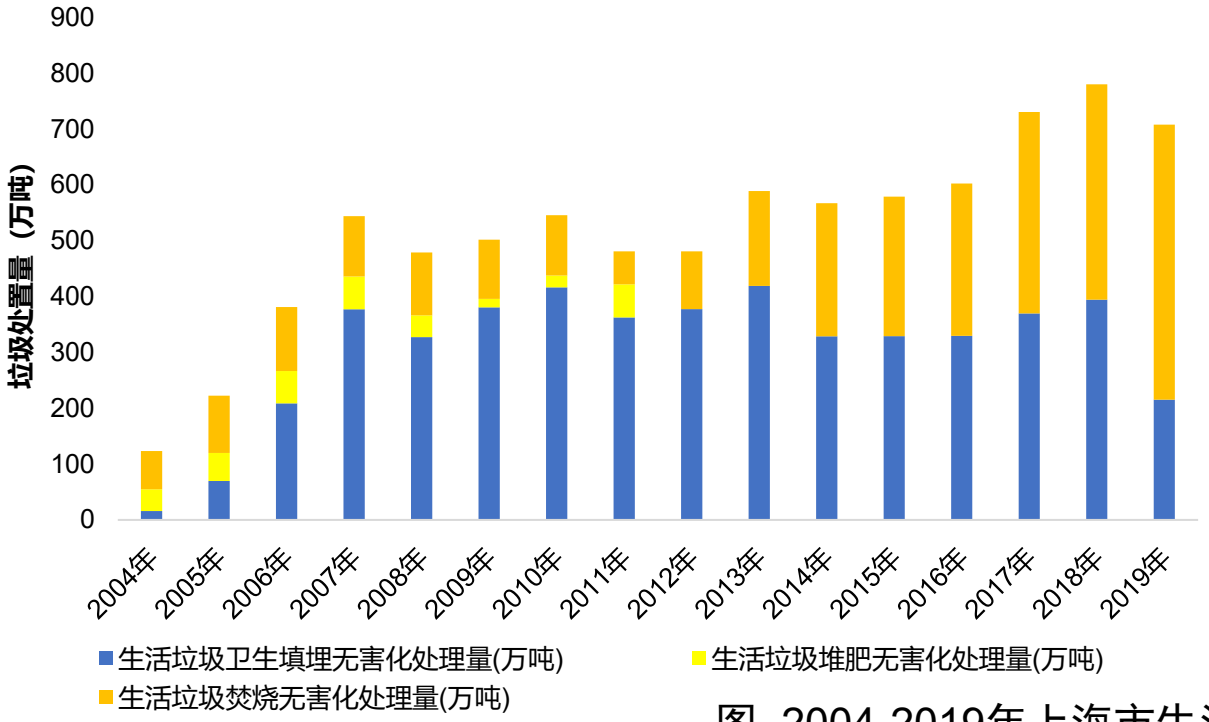
$$E_{垃圾焚烧} = E_{CO_2} - \boldsymbol{E_R}$$

- CF为生活垃圾可燃碳含量，相对于DOC，主要增加橡塑类碳含量
- OF为氧化因子，由于上海市垃圾焚烧技术水平较高，这里取值90%
- 垃圾焚烧可以发电，从而**替代一定量的煤炭发电，带来减碳效应**

表 三种垃圾处置方式带来的碳排放系数计算值

	卫生填埋（不回收甲烷）	好氧堆肥	垃圾焚烧
Ec（甲烷）	0.041	——	——
Ec（二氧化碳）	0.113	0.300	0.521
Er（二氧化碳）	——	——	0.206
E	**0.972**	**0.300**	**0.315**

2.1 垃圾处置的碳排放情况



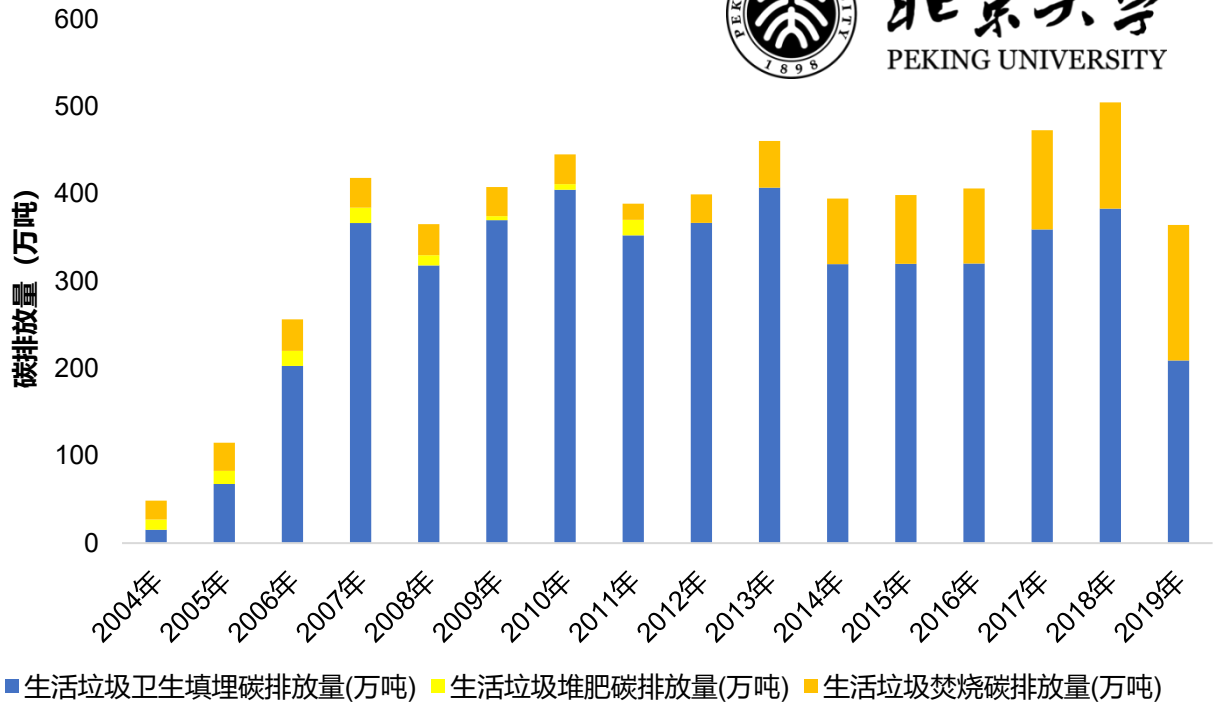


图 2004-2019年上海市生活垃圾不同处置方式处理量及碳排放量

2004-2007年
卫生填埋量快速增长，并在之后的十年内保持300万以上的年处置量，但并没有再呈现出明显的增长趋势

2012年之后，上海垃圾焚烧迎来了迅速发展

2019年
年垃圾焚烧量492.6万吨，成为最主要生活垃圾无害化处理方式，7月1日《上海市生活垃圾管理条例》开始实施，也有利于垃圾焚烧的开展。

2018年
上海市394.3万吨生活垃圾通过卫生填埋的方式进行处置，贡献了300余万吨碳排放

随着垃圾焚烧迅速发展，贡献的碳排放量也逐渐增加

2019年，492.6万吨生活垃圾被焚烧处置，直接产生碳排放256.7万吨，抵消煤炭发电产生的碳排放约100万吨，净碳排放155万吨

2.1 垃圾分类前后的碳排放情况

表 2019年上半年和下半年垃圾焚烧排放因子计算

	上半年	干垃圾	湿垃圾	DOC
厨余	53.31%	16%	99.5%	38%
橡塑	22.06%	41.57%	0%	44%
纸类	12.17%	29.70%	0%	47%
含水量	59%	39%	79%	
占比	100%	60%	40%	
CF	0.36	0.38	0.38	
	0.15	0.23	0.08	
		0.17		
Ec	0.48	0.57		
Er	0.21	0.38		
E	**0.28**	**0.19**		

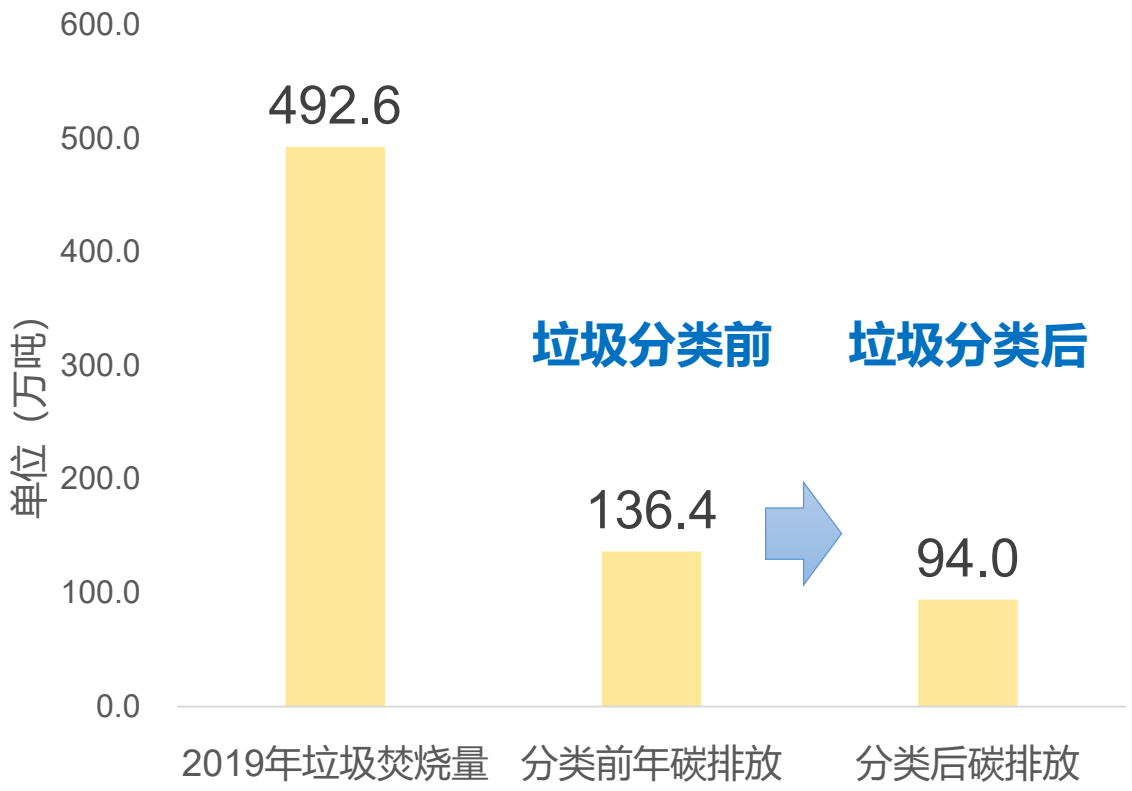


表 垃圾分类前后垃圾焚烧发电的减碳效应计算

	垃圾发电量 (kW*h/t)	煤炭发电量 (kW*h/t)	煤炭排放因子 ($kgCO_2/TJ$)	平均低位发热量 (MJ/t)	垃圾焚烧发电的减碳效应
垃圾分类前	300	2659.96	87300	20908	**0.21**
垃圾分类后	**550**				**0.38**

2.2 新能源汽车的减碳效果

北京大学 PEKING UNIVERSITY

计算两类汽车百公里产生二氧化碳的差异

$$k = \frac{44\rho C_F}{12}$$

k：燃料碳排放系数kg/kg
ρ：燃料密度
C_F：燃料中碳质量百分比

传统燃油汽车计算（直接法）

$$E = qk$$

q：百公里燃料消耗量，kg
E：百公里二氧化碳产生量，kg/100km

新能源汽车计算（间接法）

$$e = \frac{q_E TCk}{1000(1-\eta_1)(1-\eta_2)}$$

q_E：百公里电能消耗量，kWh/100km
η_1：充电电力损失率，取6%
电力传输损失，取6.47%
T：火力发电产量占比
C：每千瓦时供电煤耗量g/kWh
e：百公里燃料消耗量，kg/100km

以城市交通中占据主要地位的出租车为例

E=21.3 kg/100km
e =17.6 kg/100km
减碳率达17.5%

结合**《2020年上海市国民经济和社会发展统计公报》**的有关数据进行计算可得

$$\Delta E = \frac{365 V_G S\eta(E-e)}{100}$$

V_G：营运车辆保有量，取3.7万辆
η：年平均工作率，%，取97%
S：日均行驶里程，取440km

计算结果约为：

$$\boldsymbol{\Delta E = 2.13 \times 10^5 t}$$

彭美春,廖清睿,曾隆隆 & 王嘉浩.(2020).道路营运新能源汽车减碳测算.广东工业大学学报(02),39-44.

2.2 新能源汽车的政策驱动

可以看出

上海在深入落实国家提出的总体发展规划的前提下努力实现加速发展并设定了具体的实现目标

北京大学 PEKING UNIVERSITY

	国务院办公厅 2020-11-02 《新能源汽车产业发展规划（2021—2035年）》	上海市人民政府办公厅 2021-02-25 《上海市加快新能源汽车产业发展实施计划（2021—2025年）》
产业规模	新能源汽车新车销售量达到汽车新车销售总量的**20%左右**	①本地新能源汽车年产量超过**120万辆** ②新能源汽车产值超过**3500亿元** ③个人新增购置车辆中，**纯电动汽车**占比**超过50%**
技术创新	强化整车集成技术创新 提升产业基础能力	①动力电池与管理系统、燃料电池、驱动电机与电力电子等关键零部件研发制造**达到国际领先水平** ②车规级芯片、车用操作系统、新兴电子电气架构等网联化与智能化核心技术**取得重大进展，形成完整供应链**
车辆应用	纯电动汽车成为新销售车辆的**主流** 公共领域用车**全面电动化**	①公共汽车、巡游出租车、党政机关公务车辆、中心城区载货汽车、邮政用车**全面使用新能源汽车** ②重型载货车辆、工程车辆**燃料电池汽车**应用总量**超过1万辆**

2.3 碳排放交易市场——市场结构

北京大学 PEKING UNIVERSITY

1：市场建立

登记管理（全国碳排放权注册登记系统）

负责全国碳排放权交易的统一结算
管理交易结算资金，防范结算风险
对全国碳排放权的**持有、变更、清缴和注销**等
实施集中统一登记

交易平台（全国碳排放权交易系统）

①开立实名交易账户
②取得交易编码
③在注册登记机构和结算银行开立登记账户和资金账户

2：市场运行

交易主体：重点排放单位

交易产品：初期交易产品为**配额现货**
条件成熟后增加**国家核证自愿减排量**及**其他交易产品**

配额分配：配额按相应标准和方法进行分配

配额清缴
重点排放单位需**提交与其当年实际碳排放量相等的配额**，以完成其减排义务
富余配额可向市场出售，**不足**部分需通过市场购买

3：市场支撑

监管（碳市场分级监管）

各相关部门对第三方核查机构、交易机构等实施监管
数据核查、配额分配、重点排放单位履约等工作

核查（碳排放相关数据）

核查机构，依据核查有关规定和技术规范，受委托开展碳排放相关数据核查，并出具独立核查报告，确保核查报告真实、可信

参考《2019-2020年全国碳排放权交易配额总量设定与分配实施方案（发电行业）》、《全国碳排放权交易市场建设方案（发电行业）》、《碳排放权登记管理规则（试行）》、《碳排放权交易管理规则（试行）》、《碳排放权结算管理规则（试行）》等文件整合而成

2.3 碳排放交易市场——市场结构

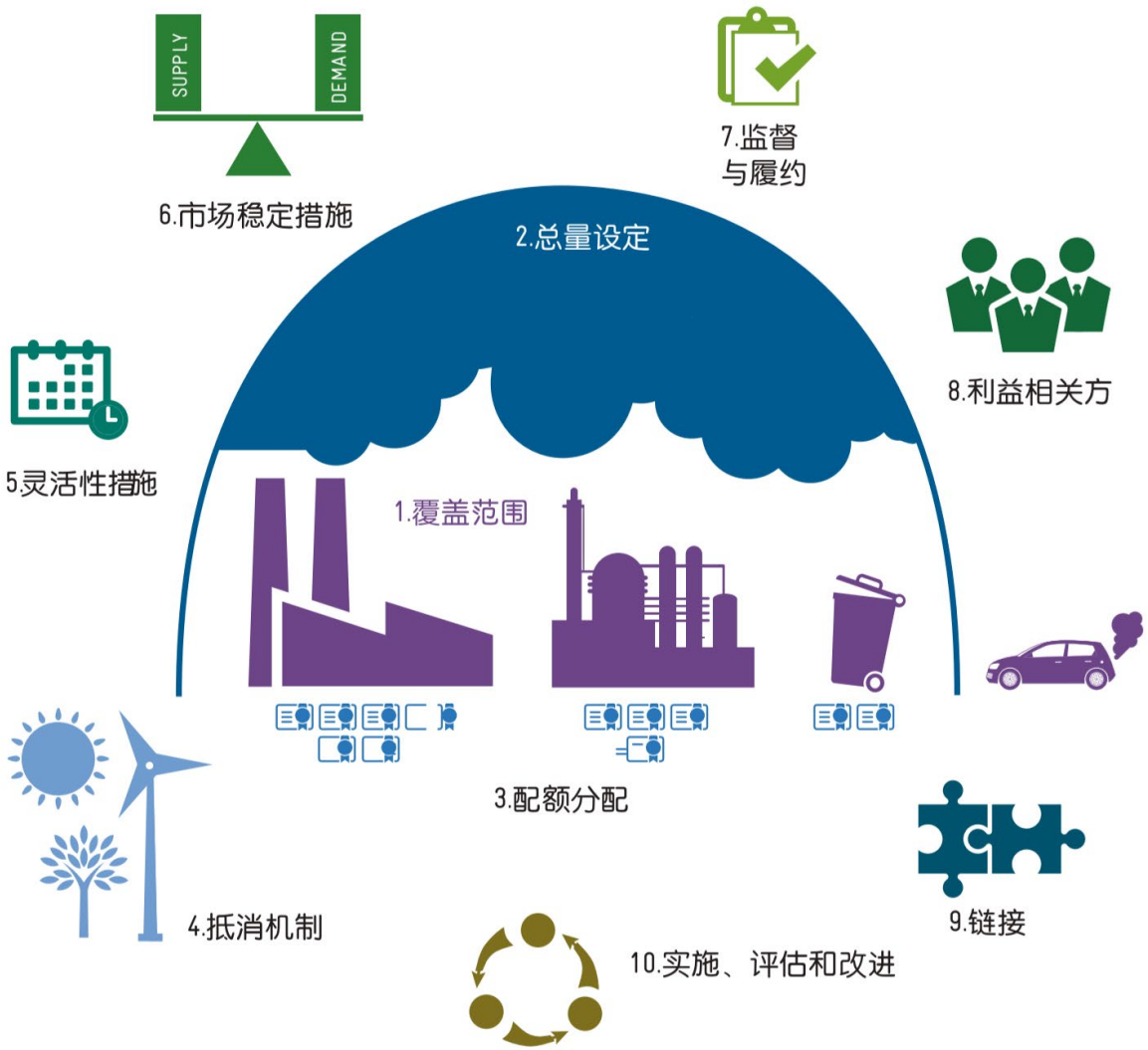


图 碳市场体系设计的十个步骤

图片摘自《碳排放交易实践手册：碳市场的设计与实施》

2.3 碳排放交易市场——交易原理

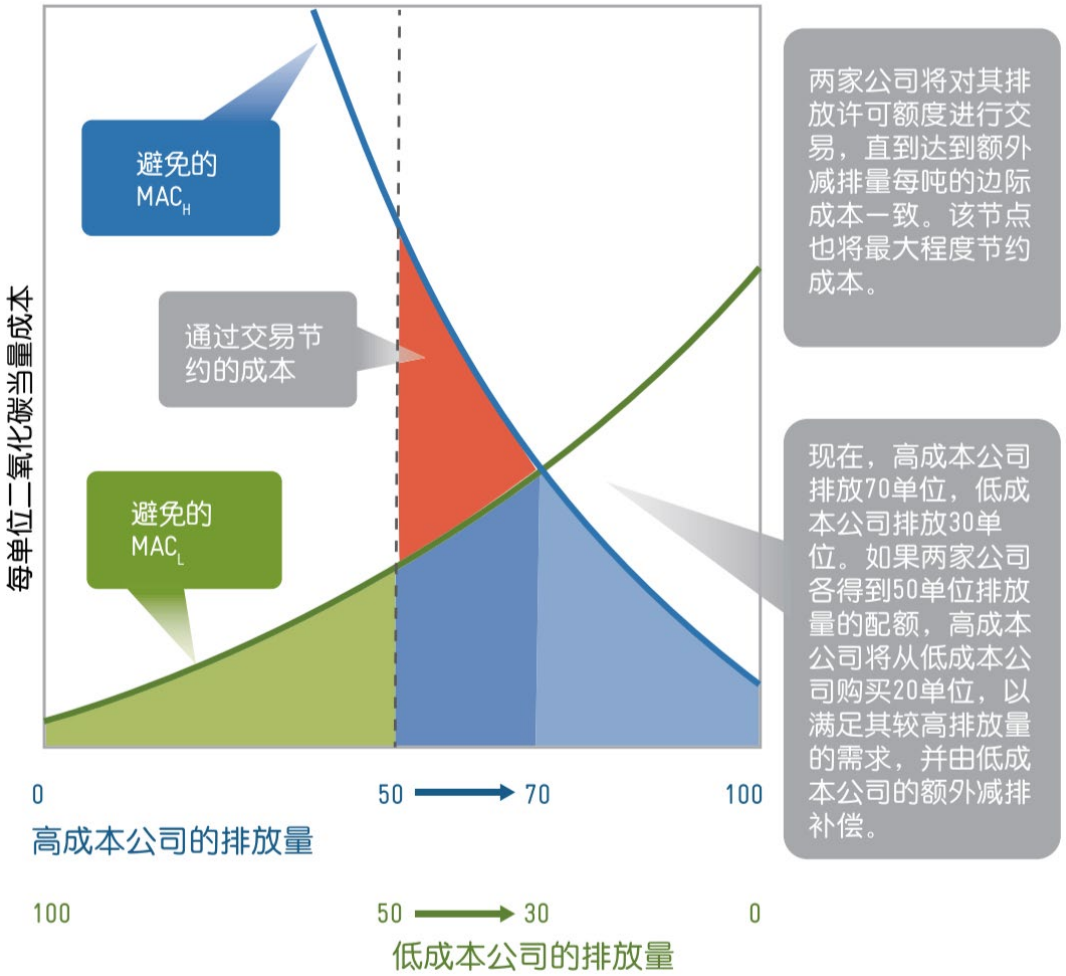


图 边际减排成本曲线（MAC）与市场均衡

科斯定理：交易成本为零时，市场均衡的最终结果都是有效率的，都能实现资源配置的帕累托最优。

总量控制与交易机制（Cap and Trade）

政府设定、分配碳排放配额，对企业碳排放进行约束

若排放量超出配额时则需要通过市场购买配额，也可通过建立或支持低碳项目获得核证减排量，以抵消部分配额

一个例子：两家公司进行市场交易

目标　将两家的总排放量限制在**100单位**

高成本公司没有太多可选减排方案（股本结构、现代化改造阶段等有关）

低成本公司则有数个低成本但尚未采用的减排方案

设定一个统一的标准：政府要求两家公司将排放量限制在同样数量（**50单位**）

提供交易机制：高成本公司购买配额，低成本公司出售配额，达到市场均衡（**高减排30单位，低减排70单位**）

两家公司的减排总成本降低了

图片摘自《碳排放交易实践手册：碳市场的设计与实施》

2.3 碳排放交易市场——发展历史

北京大学 PEKING UNIVERSITY

十年探索

2011年10月

“十二五“规划纲要提出“逐步建立碳排放交易市场”
我国在北京、天津、**上海**、重庆、湖北、广东及深圳
两省五市开展了**碳排放权交易地方试点**

2013年6月

地方试点先后启动交易工作

2021年6月

试点市场覆盖钢铁、电力、水泥等**20多个行业**
近**3000家重点排放企业**，累计覆盖**4.8亿吨碳排放量**，
累计**成交金额突破114亿元**

在未来，全国碳市场覆盖排放量超过40亿吨，我国将成为全球覆盖温室气体排放量规模最大的碳市场

全国碳排放权交易机构成立前
由上海环境能源交易所股份有限公司承担全国**碳排放权交易系统账户开立和运行维护**等具体工作

全国碳排放权交易市场**交易中心**落户**上海**

上海环境能源交易所
SHANGHAI ENVIRONMENT AND ENERGY EXCHANGE

输入关键字...

首　页 | 新闻中心 | 碳排放交易 | 低碳服务 | 合作交流 | 关于我们

关于全国碳排放权交易开市的公告

发布时间：2021-07-15

沪环境交[2021] 40号

根据国家总体安排，全国碳排放权交易于2021年7月16日（星期五）开市。请各交易主体据此安排好有关工作。

特此公告。

上海环境能源交易所股份有限公司

2021年7月15日

7月16日（今天）全国碳排放交易开市

https://www.cneeex.com/c/2021-07-15/491234.shtml

PART 04
总结与展望

双碳目标

上海市碳排放基本情况

能源部门对于总碳排放量贡献最大
工业同样贡献了较高的碳排放

上海的**能源部门碳排放占比低于全国**

交通部门产生的碳排放尤为显著

上海市减碳亮点

垃圾焚烧&垃圾分类：从上海到全国

新能源汽车：超大城市的减排必由之路

碳排放交易：上海引领全国

超大城市的碳减排

精细化

技术化

市场化

碳中和的道路上，上海绝非独行：从上海到中国

中国在为上海做什么

上海能为中国做什么

中国在为上海做什么

上海消耗着大量外电

北京大学 PEKING UNIVERSITY

煤炭发电量（kW*h/t)	煤炭排放因子 ($kgCO_2/TJ$)	平均低位发热量（MJ/t)	平均能源加工转换效率（发电）（2019)
2659.96	87300	20908	45.8%

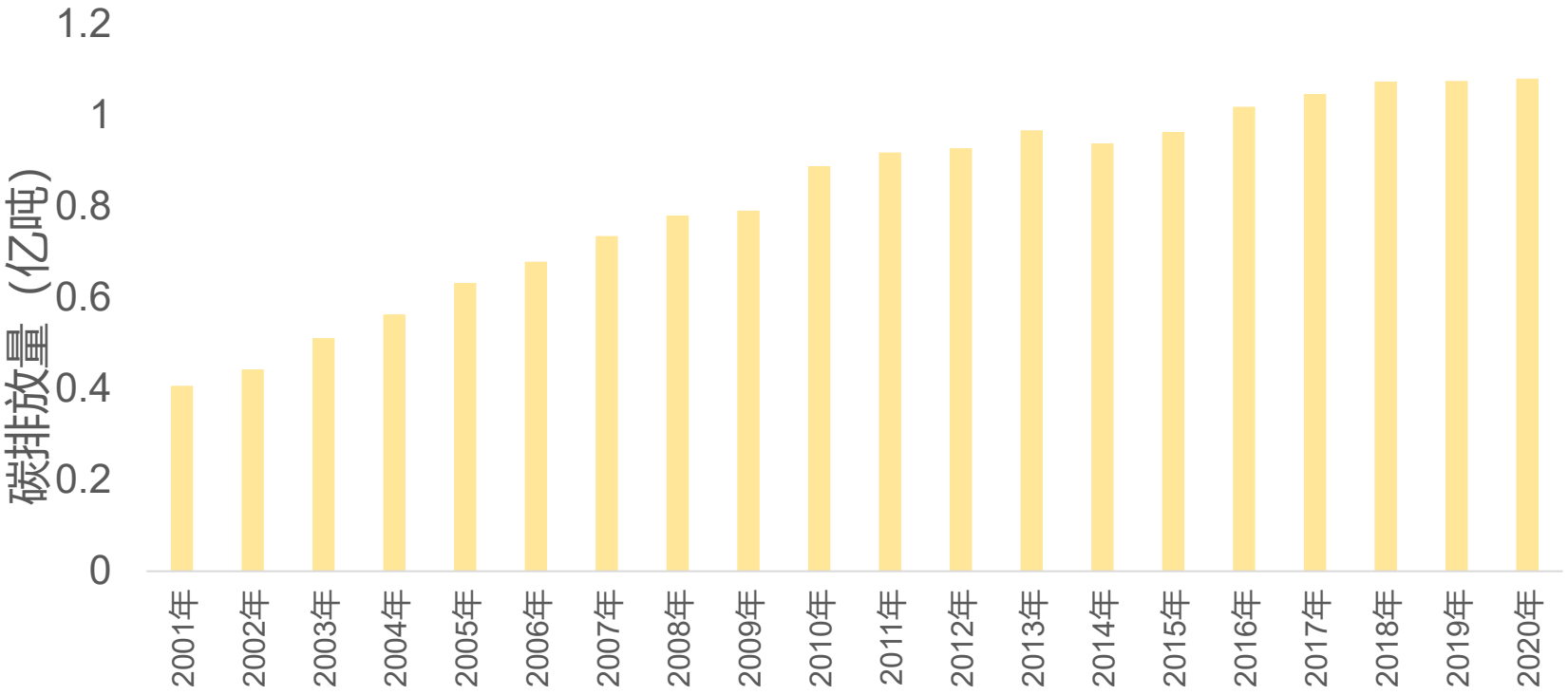


图 5 2001-2020年上海市电力消费带来的总碳排放量估算

使用中国平均能源加工转换效率估算

上海市用电背后的碳排放在**一亿吨以上**，且**仍在缓慢增加**

上海市目前约60%电力消费为市外来电

相当于**中国其他地区正在为上海市承担着6000万吨的巨额碳排放**

参见：《中国能源统计年鉴》

上海电力：外来电撑起半壁江山 - 储能项目建设与运维 - 中国储能网 (escn.com.cn)

上海：能源消费结构发生大变化 市外来电比例大幅增加 - 北极星售电网 (bjx.com.cn)

上海能为中国做什么

垃圾焚烧与分类的领先地位

全国每年约排放**90-100亿吨**二氧化碳

垃圾处置产生的碳排放高达**1.5亿吨**，为重要碳排放来源。

而上海市2019年垃圾焚烧占比已经达到**66%**，领先全国的**51%**。

在**垃圾分类领域**，上海也走在全国最前列，未来垃圾分类在全国的普遍施行同样可以带来巨大的减碳潜力。

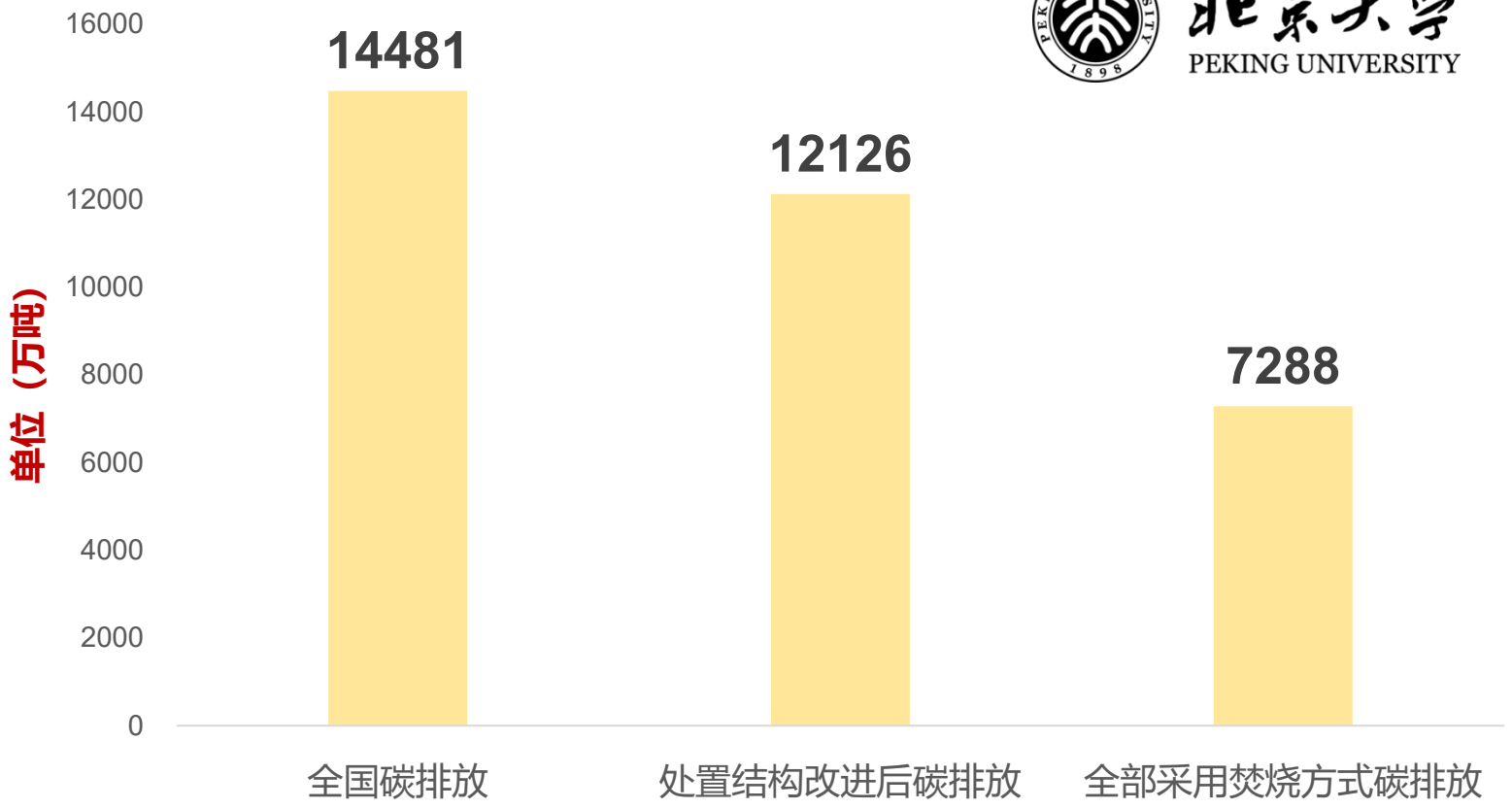


表 不同处置结构下中国垃圾处置年碳排放

全国垃圾焚烧占比	上海2019年垃圾焚烧占比	全国碳排放（万吨）	处置结构改进后的全国碳排放（万吨）	全部采用焚烧方式碳排放（万吨）
51%	66%	14480.71	12125.65	7288.34

双碳目标

上海市碳排放基本情况

交通部门产生的碳排放尤为显著

上海的**能源部门**碳排放占比略低于全国

实现**地区**碳达峰

上海在为减碳做什么

精细化减碳：（**垃圾焚烧&垃圾分类**）更低碳的发展，更先进的理念

技术化减碳：（**新能源汽车**）超大城市的减排必由之路

中国在为上海做什么

上海不断增加的“市外来电”

上海能为中国做什么

上海方案：上海市在某些方面的**发展路径和技术方案**能够为全国发展提供借鉴

上海领航：（**碳排放交易**）上海市场化引领全国

需要站在全国，甚至全球视野下理解上海碳达峰以及上海为碳中和做出的努力

中国实力为上海发展保驾，上海智慧为中国碳中和“沪”航

Thanks！

环境综合实习一小组报告
第五组

小组成员：燕书欣、马啸天、房晨、刘安齐、胡金龙、林鸿斌

2021年7月16日