



附图1 理论框架

附录 1：基于区域需求价格弹性的最优碳税测算

参考 Tirkaso 和 Gren（2020），计算各地区征收碳税后的工业市场成本。令地区 i 能源 k 的减少量满足：

$$C_{i,k} = \frac{(P_{i,k} - P_{i,k,basic})(Q_{c_{i,k}} - Q_{c_{i,k,basic}})}{2} \quad (1)$$

其中， $C_{i,k}$ 为工业市场成本， $P_{i,k,basic}$ 为基期能源价格， $Q_{c_{i,k,basic}}$ 为基期能源需求量， $P_{i,k}$ 为报告期能源价格， $Q_{c_{i,k}}$ 为基期（2021年）能源消费量。

为便于计算，使用能源转换因子将不同能源统一转换为标准煤。不失一般性，设需求价格函数为：

$$P_{i,k} = a_{i,k} - b_{i,k} Q_{c_{i,k}} \quad (2)$$

其中， a 和 b 为待估计的参数。

将式（2）代入式（1），有：

$$C_{i,k} = \frac{(Q_{c_{i,k,basic}} - Q_{c_{i,k}})^2}{2b_{i,k}} \quad (3)$$

根据需求价格弹性的定义，可以得到：

$$\varepsilon_{k,i}^R = \frac{\Delta Q_{c_{i,k}} / Q_{c_{i,k,basic}}}{\Delta P_{i,k} / P_{i,k,basic}} \quad (4)$$

将式（2）代入式（4），化简得到参数 $b_{i,k}$ 的表达式：

$$b_{i,k} = \frac{\varepsilon_{k,i}^R Q_{c_{i,k,basic}}}{P_{i,k,basic}} \quad (5)$$

在使用区域价格弹性时，本文的目标函数为所有能源的工业市场成本最小（即，消费者盈余减少总和最小），满足：

$$\text{Min } C = \sum_i \sum_k C_{i,k} \quad (6)$$

碳排放量的约束函数满足：

$$\sum_i \sum_k f_k Q_{c_{i,k}} \leq I \quad (7)$$

其中， I 为碳排放约束量。 f_k 为能源 k 转换为标煤后的碳排放因子。热力和焦炭的排放因子参考《IPCC 国家温室气体清单指南》（2006），分别为 3.224 千克二氧化碳/千克标煤和 3.137

千克二氧化碳/千克标煤；对于电力的排放因子，按照《关于做好2022年企业温室气体排放报告管理相关重点工作的通知》（https://www.mee.gov.cn/zcwj/zcjd/202203/t20220315_971493.shtml）的全国电网排放因子换算，得到电力的排放因子为4.727千克二氧化碳/千克标煤。

利用式（6），可得到每单位碳排放的最低工业市场成本，即减少每单位碳排放所需的减排费用，满足：

$$\frac{\partial C_{i,k}}{\partial I_{i,k}} = \frac{\partial C_{i,k}}{\partial Qc_{i,k}} \times \frac{\partial Qc_{i,k}}{\partial I_{i,k}} = \frac{(Qc_{i,k, basic} - Qc_{i,k})}{b_{i,k} f_k} = \lambda^R \quad (8)$$

其中， E 为实际碳排放总量， λ^R 为工业市场成本对排放量的偏导，表示消费市场中单位碳排放的支付意愿，即待求的最优碳税（基于区域价格需求弹性得到）。

需要说明的是，若根据式（7）分地区测算最优碳税，需要分别估计不同碳达峰情形下各地区的碳排放限制量。由于各地区的经济发展水平差异较大，且现有关于各地区实现“双碳”目标的碳排放路径研究较少，使得在对各地区的碳排放路径做出模拟时，产生的误差较大。因此，本文通过加总全国层面的总排放量作为限制函数，且考虑区域间排放量的合理流动，由此计算全国统一的最优碳税。

附表1 长期需求价格弹性

变量	电力	热力	焦炭
lnp	-1.229	-1.150	-1.947
$lnadd$	-0.967	-0.608	-3.193
$lnproduct$	1.711	1.088	-1.520
$lncop$	-0.014	0.654	3.160

附表2 工业总产值预测模型

地区	模型	表达式
北京、四川、云南、甘肃、新疆	ARIMA(0,1,0)	$\ln add_t = \theta_0 + \ln add_{t-1} + \varepsilon_t$
内蒙古、江苏、海南	ARIMA(0,2,0)	$\Delta^2 \ln add_t = \theta_0 + \Delta^2 \ln add_{t-1} + \varepsilon_t$
河北	ARIMA(1,0,0)	$\ln add_t = \theta_0 + \phi_1 \cdot \ln add_{t-1} + \varepsilon_t$
辽宁、吉林、安徽、江西、湖北、湖南、广西、 重庆、贵州、陕西、青海、宁夏	ARIMA(1,1,0)	$\Delta \ln add_t = \theta_0 + \phi_1 \cdot \Delta \ln add_{t-1} + \varepsilon_t$
广东	ARIMA(1,2,0)	$\Delta^2 \ln add_t = \theta_0 + \phi_1 \cdot \Delta^2 \ln add_{t-1} + \varepsilon_t$
山西	ARIMA(0,1,1)	$\Delta \ln add_t = \theta_0 + \varepsilon_t + \theta_1 \cdot \varepsilon_{t-1}$
天津、黑龙江、上海、浙江、福建、山东、河 南	ARIMA(0,2,1)	$\Delta^2 \ln add_t = \theta_0 + \varepsilon_t + \theta_1 \cdot \varepsilon_{t-1}$

附表3 能源约束下的工业产值预测模型

地区	表达式
天津、河北、辽宁、黑龙江、上海、福建、江西、 云南、陕西、青海、宁夏、新疆	$\ln add = v^1 \ln coke + v^2 \ln heat + v^3 \ln ele + C$
内蒙古、吉林、河南、湖北、四川、甘肃	$\ln add = v^1 d \cdot \ln coke + v^2 \ln heat + v^3 \ln ele + C$
北京、山西、安徽、山东、湖南、广东、海南、重 庆	$\ln add = v^1 \ln coke + v^2 d \cdot \ln heat + v^3 \ln ele + C$
浙江、广西	$\ln add = v^1 \ln coke + v^2 \ln heat + v^3 d \cdot \ln ele + C$
江苏、贵州	$d \cdot \ln add = v^1 \ln coke + v^2 \ln heat + v^3 \ln ele + C$