

## 广深莞经济圈风险调控规划

广深莞经济圈涉及广州、深圳和东莞三个城市，位于广东省东南部，如图 1 所示。全区行政面积 10389.71 平方公里，总人口 2985 万人。2019 年，该地区 GDP 增至 60038.2 亿元。在过去的几十年里，该地区见证了城市化的快速发展。由于资源极度匮乏，该地区的能源供应在很大程度上依赖于从其他地区进口。三市虽然都是以发展第三产业为主，但区域间的发展却极不均衡。广州处于珠江三角洲的核心位置，人口众多，2019 年达到 1530.6 万人，经济总量大，发展速度快，随着经济的快速发展，所消耗的能源量也将继续增长。2019 年，深圳 GDP 全省最高，为 26927.1 亿元。东莞市的发展远远落后于深圳市和广州市。另外，基于前文对另外两个经济圈（广佛肇和深惠莞）的生态特征识别，可以得出水环境污染和大气污染是困扰广深莞经济圈主要生态问题。

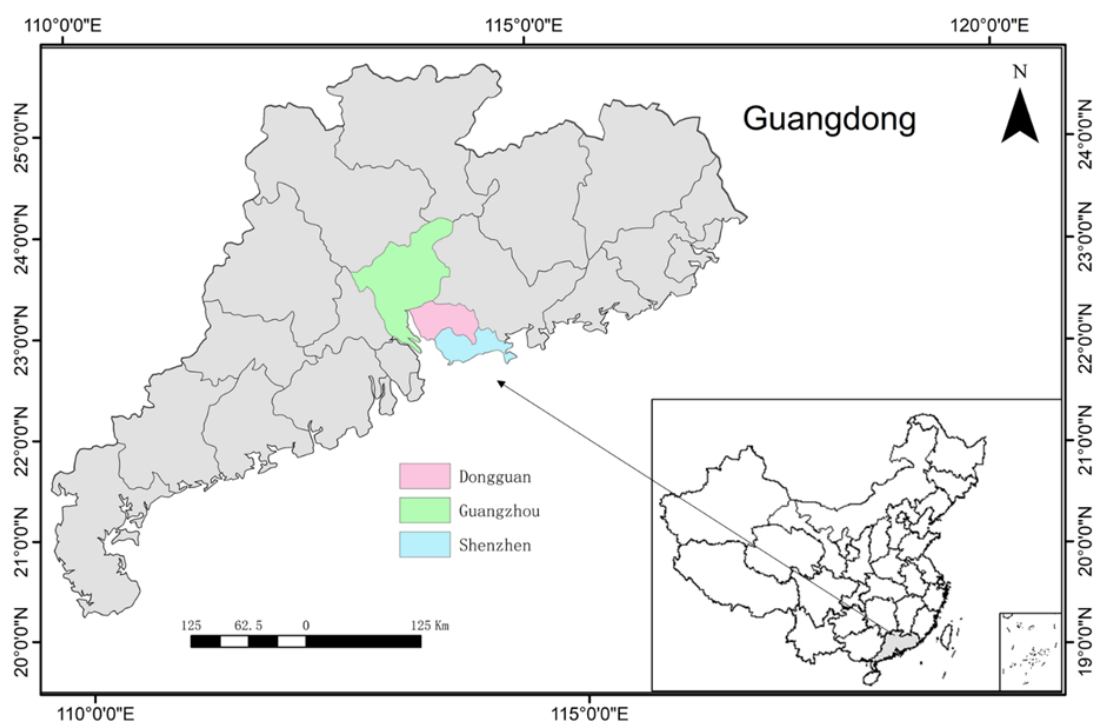


图 1 广深莞经济圈

针对广深莞多城市资源能源利用现状，开发了多区域碳联动水能耦合模型，考虑了区域尺度下的能-水耦合系统，开发相邻区域的碳排放合作模式，用于管理多区域合作下的区域能源系统优化配置。

通过区间规划(ILP)是可有效处理该系统数据不确定性。区间规划模型可定义如下：

$$\text{Min} / \text{Max} f^{\pm} = \sum_{j=1}^k c_j^{\pm} \cdot x_j^{\pm} + \sum_{j=k+1}^n c_j^{\mp} \cdot x_j^{\pm}$$

约束条件：

$$\sum_{j=1}^n a_{ij}^{\pm} \cdot x_j^{\pm} \leq b_i^{\pm}$$

$$x_j^{\pm} \geq 0$$

其中，对  $c_j^{\pm}$ ，当  $j$  小于等于  $k$  时， $c_j^{\pm}$  为正；当  $c_j^{\pm}$  大于  $k$  时， $c_j^{\pm}$  为负。可通过两步法将原模型拆解为两个子模型，按照一定步骤分别求解，子模型一如下：

$$\text{Min} / \text{Max} f^{+} = \sum_{j=1}^k c_j^{+} \cdot x_j^{+} + \sum_{j=k+1}^n c_j^{+} \cdot x_j^{-}$$

对应约束：

$$\sum_{j=1}^k |a_{ij}|^{-} \cdot \text{Sign}[a_{ij}^{\pm}] \cdot x_j^{+} / |b_i|^{+} + \sum_{j=k+1}^n |a_{ij}|^{+} \cdot \text{Sign}[a_{ij}^{\pm}] \cdot x_j^{-} / |b_i|^{+} \leq \text{Sign}(b_i^{\pm}), \forall i$$

子模型二如下：

$$\text{Min} / \text{Max} f^{-} = \sum_{j=1}^k c_j^{-} \cdot x_j^{-} + \sum_{j=k+1}^n c_j^{-} \cdot x_j^{+}$$

对应约束：

$$\sum_{j=1}^k |a_{ij}|^{-} \cdot \text{Sign}[a_{ij}^{\pm}] \cdot x_j^{-} / |b_i|^{+} + \sum_{j=k+1}^n |a_{ij}|^{+} \cdot \text{Sign}[a_{ij}^{\pm}] \cdot x_j^{+} / |b_i|^{-} \leq \text{Sign}(b_i^{\pm}), \forall i$$

通过机会约束规划方法有效地反映该模型中不确定条件下系统的水资源量违约风险。实际上，该方法并不要求所做规划方案完全满足所有的约束条件。但是，相关规划方案使约束条件成立的概率必须大于等于给定的足够小的置信水平。一般的随机线性规划问题形式如下：

目标函数：

$$\max C(t)X$$

约束条件：

$$A(t)X \leq B(t)$$

$$x_j \geq 0, x_j \in X, j = 1, 2, \dots, n$$

其中  $X$  是决策变量向量，而  $A(t)$ 、 $B(t)$  和  $C(t)$  是定义在概率空间  $\pi(t \in T)$  上包含若干随机变量的集合。要解该模型，可以先将其等价转化成一个确定性的模型，这可以通过引入机会约束规划方法来实现。机会约束规划为其第  $f$  个约束设置了一定的概率水平  $P_i \in [0, 1]$ ，且要求规划方案使该约束条件成立的概率必须大于等于  $1 - p$ ，即该模型的可行解要满足以下约束条件：

$$\Pr[\{t | A_i(t)X \leq b_i(t)\}] \geq 1 - p, A_i(t) \in A(t), i = 1, 2, \dots, m$$

显然，该公式是非线性的，且约束集仅仅在特定的概率分布函数（如正态分布）和一定的概率水平  $P$ ，下是凸集，如(i)  $a_{ij}$  是确定的而且是随机的（对所有  $p_i$  来说）；(ii)  $a_{ij}$  和  $b_i$  是离散型随机变量，且  $p_i \geq \max_{r=1,2,\dots,R} (1 - q_r)$ ，其中  $q_r$  是  $r$  的观测值出现的概率；(iii)  $a_{ij}$  和  $b_i$  服从高斯分布，且  $p_i \geq 0.5$ 。在模型中，当  $a_{ij}$  是确定的而  $b_i$  是随机变量时，公式可以线性化：

$$A_i(t) \leq b_i(t)^{(P_i)}, \forall i$$

其中  $b_i(t)^{(P_i)} = F_i^{-1}(P_i)$ ，该公式不仅给出了  $b_i$  的累计概率分布函数，而且给出了违反  $f$  约束的概率。公式仅仅适用于当  $A$  是确定值的情形。如果  $A$  和  $B$  都具有不确定性，那么约束集将变得异常复杂。

在此基础上开发了混合整数线性规划模型不仅能解决产能扩张的问题，还可以解决合作减排问题，最有效的方法能够找出满足发电需求的最低成本而不超过整个研究区域的总二氧化碳排放上限。对于这三个城市的  $CO_2$  排放，如果排放是非合作的，则  $CO_2$  排放约束需要分别满足每个允许的  $CO_2$  排放。而对于全职合作的情况下，考虑到整个地区的二氧化碳排放，排放限制只需要满足这三个城市的二氧化碳排放量的总和在整个容许下二氧化碳排放产生更多的电力限制二氧化碳排放，减少一些发达地区的减排压力。

非合作场景的约束描述如下：

$$\sum_{k \in K} em_{ik} x_{ik} \leq \bar{e}_i \quad \forall j \in J$$

而在二氧化碳联动下：

$$\sum_{k \in K} em_{ik} x_{ik} \leq \bar{e}_i + y_i M1 \quad \forall i \in J$$

$$y_i \sum_{i \in I} \sum_{k \in K} em_{ik} x_{ik} \leq \sum_{j \in J} \bar{e}_j \quad \forall j \in J$$

其中 $x_{ik}$ 为决策变量，表示各区域 $i$ 中各技术 $k$ 的发电量; $em_{ik}$ 是每个区域 $i$ 中每种技术 $k$ 的排放系数的向量; $\bar{e}_i$ 排放二氧化碳的目标区域的矢量; $M1$ 是一个非常大的参数; $y_i$ 是0-1整数变量，对于属于合作伙伴关系的个体子系统为1，否则为0。

通过对以上模型求解，本部分针对两种情景（不同水资源风险下有/无协同CO<sub>2</sub>排放策略）从碳排放量、电力进出口量、清洁能源发电结构和系统成本四个方面对广深莞风险管理结果进行总结，为多区域合作减排更好地促进生态目标的实现提供政策建议。

### ①碳排放量

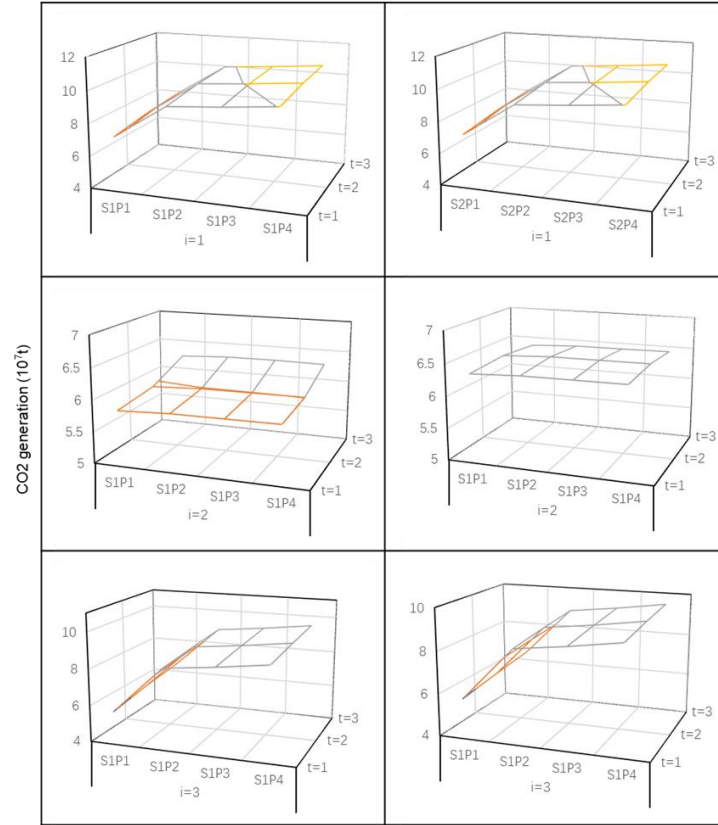


图 2 有无碳联动下二氧化碳产量

图 2 显示有无碳联动下二氧化碳产量变化，对于广州东莞地区，碳排放贸易带来的二氧化碳联动没有为原碳排放量带来变化。而对于深圳地区经过碳排放贸易后二氧

化碳联动带来的直接影响是碳排放量增大。结合图 3 发现，有碳联动时深圳将更依赖本地产电，排放二氧化碳而减少电力进口，更加符合十三五规划减少电力进口的要求。

②电力进口量

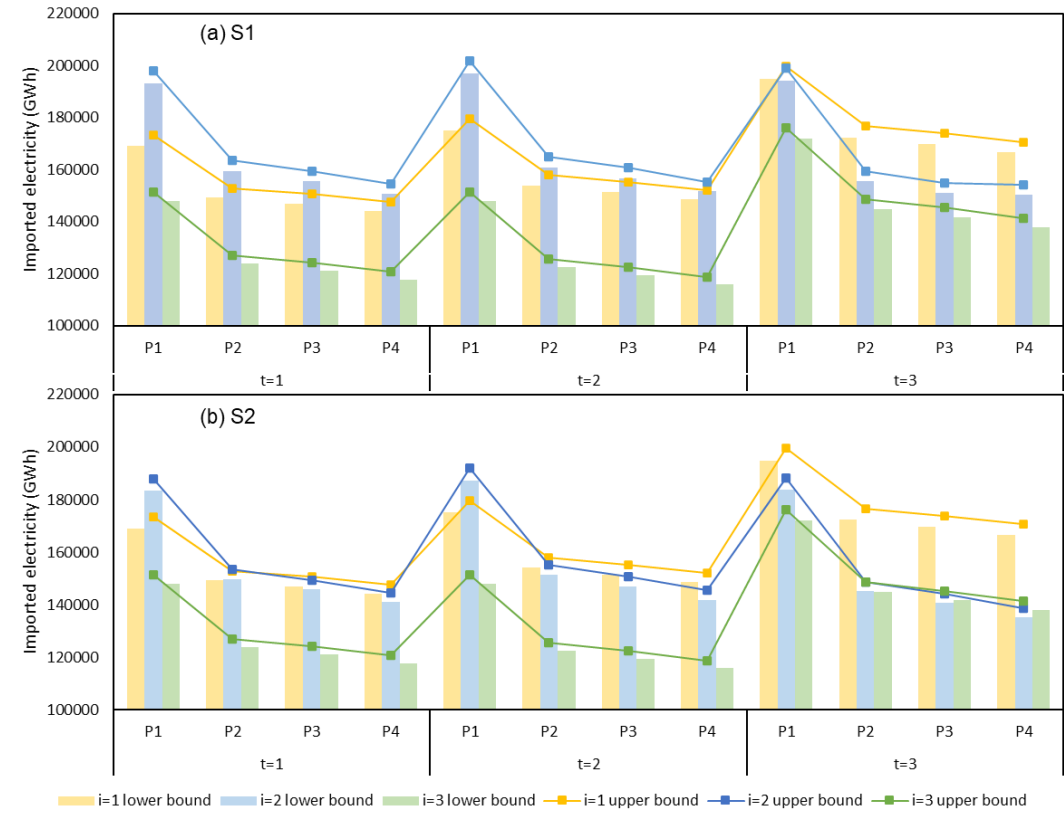


图 3 有无碳联动下进口电量

图 3 显示广州，深圳，东莞三个地区进口电量在有无碳联动下进口电量。由图可得随着违约条件变大，可用水资源量增多，进口电量减小。总体而言，随着时间变化进口电量增大。在这三个城市中，只有深圳市在碳联动情景下表现出不同，有碳联动时深圳进口电量明显小于无碳联动时的情况。

③清洁能源发电结构

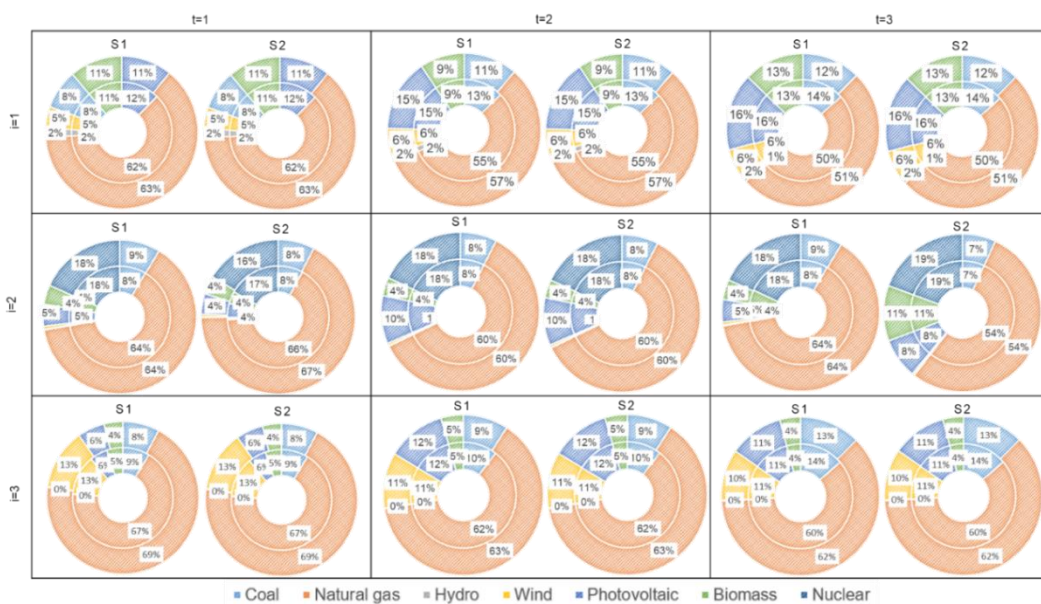


图 4 有无碳联动下产电模式

图 4 显示有无碳联动下三个地区的产电模式。由图可得三个城市均天然气发电占比最高，而在深圳地区相较于广州和东莞的特点是核电发电也较高。针对有无碳联动的情景，深圳有碳联动时第一时期天然气占比较高，清洁能源占比较低，而第三时期天然气占比较低，生物质发电占比显著增高。

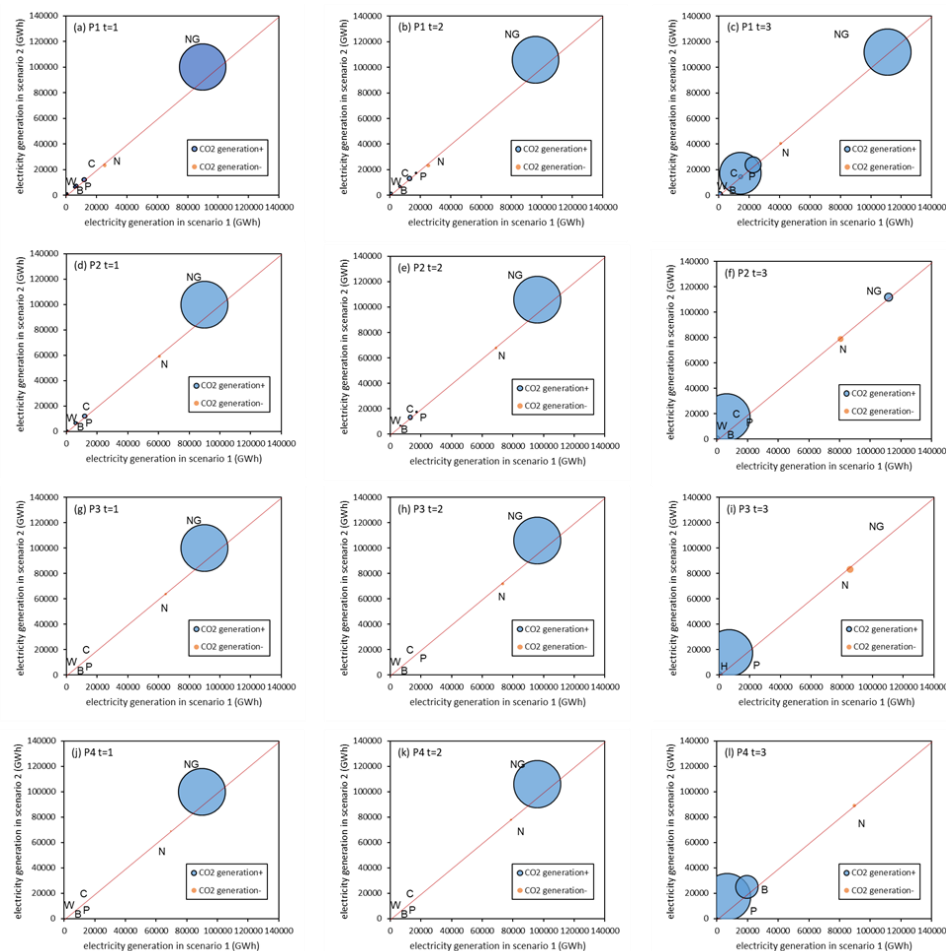


图 5 有无碳联动下二氧化碳产量气泡图

图 5 显示深圳地区有无碳排放下不同发电技术的电力生产量，其中气泡大小代表两种不同情景下排放二氧化碳差值（蓝色为正，橘色为负），可以看出随着时间和违约条件变化碳排放量变化主要体现在从天然气发电转变成清洁能源发电，产电量总体增高，核电差值为橘色即为负说明核电发电在碳联动下发电量减少，其余发电形式碳联动下发电量增加。

#### ④系统成本

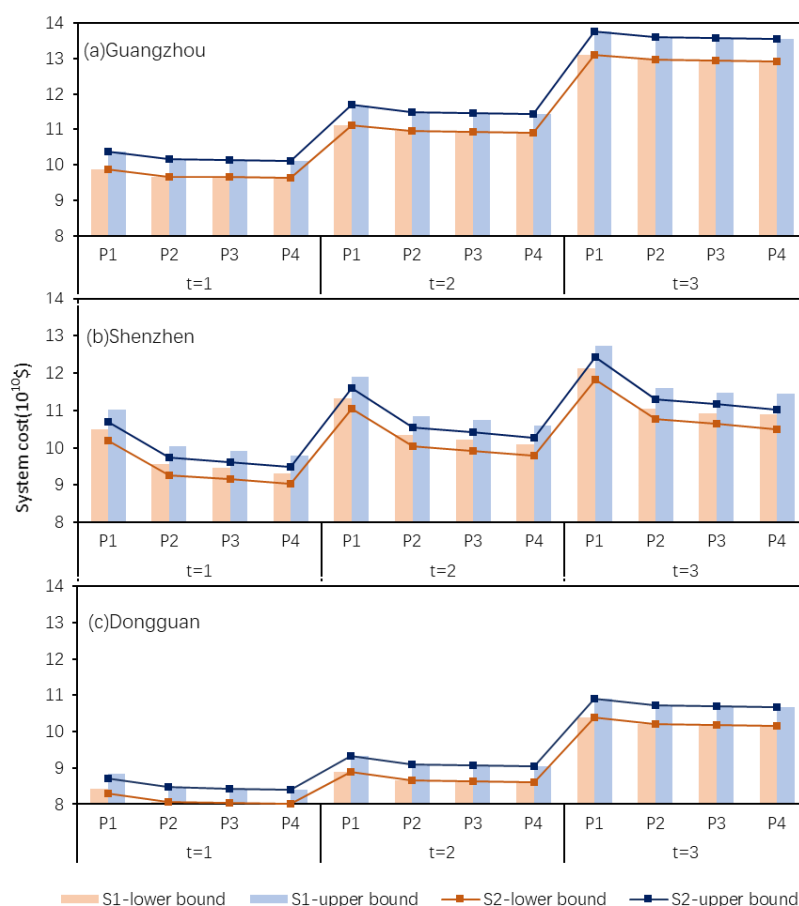


图 6 有无碳联动下不同时期不同水资源违约条件的系统成本

图 6 给出了有无碳联动下不同时期不同水资源违约条件的系统成本，可以看出随着水资源违约条件的增加，水资源量越丰富，本地发电更多，进口电越少，成本越低。随着时间增加发电成本变高。比较三个地区的系统成本可以看出广州和东莞有无二氧化碳联动下成本相同但是深圳地区有二氧化碳联动下，成本较低，是由于二氧化碳联动带来的本地发电增大，以至于减少对电力进口的依赖导致的。

综上，对于多城市广深莞而言，在不同的政策情景和系统风险下，本课题开发的模型可以有效地促进区域  $\text{CO}_2$  协同减排，为区域能源环境政策的制定和生态安全的管理提供科学依据，并为其他大城市群的发展规划提供借鉴意义。