

深惠莞都市圈风险调控规划

珠三角深惠莞经济圈包含深圳、惠州、东莞三个城市，是珠三角地区最具经济活力的区域，也是构成粤港澳大湾区的核心城市群。三个城市历史上曾同属惠阳地区，山水相连，历史同源，人文相通。改革开放四十多年来，三市经济建设取得了巨大成就，2019年，三市GDP总量达40588亿元，占广东全省GDP总量的38.1%，仅落后广佛肇经济圈。三城市位于珠三角东岸地区，紧邻港澳，属于典型的以制造业出口为导向的外向型经济体，开放性经济发达，外贸出口总量占全省约65%，占全国约20%，占全球约1.5%，是全国经济发展最快的地区之一。深圳市作为深惠莞区域的核心城市，拥有超过其他两个城市经济体量之和的经济规模，在该区域内经济发展和能源分配上都占据着主导地位。东莞市是深惠莞地区的制造业大市，是全球最大的制造业基地之一，其制造业实力雄厚，产业体系齐全，制造业总产值占规模以上工业总产值的90%以上。惠州是资源大市，有占珠三角四分之一的土地面积及丰富的水资源、石化资源等。尽管深惠莞已跻身全国较为发达的经济圈，但区域间的发展却极不均衡，具体而言：（i）社会经济方面：深圳市的GDP远大于东莞市和惠州市GDP之和，2019年，东莞市GDP仅为深圳市的35.2%，惠州市GDP仅为深圳市的15.5%，惠州市的发展远远落后于深圳市。（ii）生态环境方面：近年来，由于深惠莞一体化战略带来的不断加速的工业化和城市化进程，导致大气污染物排放量剧增、臭氧浓度高、酸雨频率高、海水赤潮等现象频频发生，第二产业制造出大量烟尘、硫氧化物、卤化物等。第三产业的发展使汽车尾气等交通运输类污染物排放明显加重。另外，由于快速的城市化进程，城市人口的急剧饱和、用电量的迅猛增长以及能源供需格局的不断恶化，能源供应带来的温室气体排放量大。例如，东莞是能源消耗大市，且多以煤炭等传统能源为能耗品，这些都将制约深惠莞区域向更高层次发展。

对于深惠莞的资源能源系统，很多参数会以多种不确定形式存在，这些会让系统管理变得更加复杂。例如，区域内由于经济、政策等因素的变动，导致资源需求量的不确定性。 CO_2 以及大气污染物的排放也具有不确定性的属性。为此，本课题针对深惠莞都市圈开发了风险调控规划模型，以处理研究区域内现有资源能源系统的不确定性，为系统的风险管理提供切实有效的方法途径。

上文提到的不确定性可以用双区间和机约束规划方法来处理，为了更好地综合解决这些问题，可以将两种方法耦合成双区间约束规划（DICCP）：

目标函数：

$$\text{Min}[f^{\pm}]^{\pm} = [C^{\pm}]^{\pm} [X^{\pm}]^{\pm}$$

约束：

$$\begin{aligned} [A_i^{\pm}]^{\pm} [X^{\pm}]^{\pm} &\leq [B(t)^{(p)}]^{\pm}, i=1,2,\dots,m \\ [x_j^{\pm}]^{\pm} &\geq 0, [x_j^{\pm}]^{\pm} \in [X^{\pm}]^{\pm}, j=1,2,\dots,n \\ [B(t)^{(p)}]^{\pm} &= \{ [b_i(t)]^{\pm} | i=1,2,\dots,m \} \\ [A^{\pm}]^{\pm} &\in \{ [R^{\pm}]^{\pm} \}^{m \times n}, [X^{\pm}]^{\pm} \in \{ [R^{\pm}]^{\pm} \}^{n \times 1} \end{aligned}$$

通过交互式算法求解模型，将模型目标函数分成上下界两个子模型，同时两个子模型可以分成上限子模型和下限子模型。其中上界上限子模型表示如下：

目标函数：

$$\text{Min}[f^+]^+ = [C^+]^+ [X^+]^+$$

约束：

$$\begin{aligned} [A_i^-]^- [X^+]^+ &\leq [B(t)^{(p)}]^+, i=1,2,\dots,m \\ [x_j^+]^+ &\geq 0, [x_j^+]^+ \in [X^+]^+, j=1,2,\dots,n \\ [B(t)^{(p)}]^+ &= \{ [b_i(t)]^+ | i=1,2,\dots,m \} \\ [A^-]^- &\in \{ [R^-]^- \}^{m \times n}, [X^+]^+ \in \{ [R^+]^+ \}^{n \times 1} \end{aligned}$$

上界下限子模型表示如下：

目标函数：

$$\text{Min}[f^+]^- = [C^+]^- [X^+]^-$$

约束：

$$\begin{aligned} [A_i^-]^- [X^+]^- &\leq [B(t)^{(p)}]^+, i=1,2,\dots,m \\ [x_j^+]^- &\geq 0, [x_j^+]^- \in [X^+]^-, j=1,2,\dots,n \\ [B(t)^{(p)}]^+ &= \{ [b_i(t)]^+ | i=1,2,\dots,m \} \end{aligned}$$

$$[A^-]^+ \in \{[R^-]^+\}^{m \times n}, [X^+] \in \{[R^+]\}^{n \times 1}$$

下界上限子模型表示如下：

目标函数：

$$\text{Min}[f^-]^+ = [C^-]^+[X^-]^+$$

约束：

$$[A_i^+][X^-]^+ \leq [B(t)^{(p)}], i=1,2,\dots,m$$

$$[x_j^-]^+ \geq 0, [x_j^-]^+ \in [X^-]^+, j=1,2,\dots,n$$

$$[B(t)^{(p)}] = \{[b_i(t)] | i=1,2,\dots,m\}$$

$$[A^+] \in \{[R^+]\}^{m \times n}, [X^-]^+ \in \{[R^-]^+\}^{n \times 1}$$

下界下限子模型表示如下：

目标函数：

$$\text{Min}[f^-] = [C^-][X^-]$$

约束：

$$[A_i^+][X^-] \leq [B(t)^{(p)}], i=1,2,\dots,m$$

$$[x_j^-] \geq 0, [x_j^-] \in [X^-], j=1,2,\dots,n$$

$$[B(t)^{(p)}] = \{[b_i(t)] | i=1,2,\dots,m\}$$

$$[A^+] \in \{[R^+]\}^{m \times n}, [X^-] \in \{[R^-]\}^{n \times 1}$$

双区间机会约束规划方法（DICCP）可以分为以下几个步骤求解：

将双区间规划方法（DILP）与机会约束规划方法（CCP）耦合成双区间机会约束规划方法，并建立相对应的规划模型。

- (1) 将建立的规划模型，根据交互式算法，分解成上下界两个子模型。
- (2) 分别把上下界子模型拆成：上界上限子模型、上界下限子模型、下界上限子模型、下界下限子模型，并将其一一求解。
- (3) 求得四个子模型相对应的区域碳排放量、大气污染物排放量、能源电力系统成本、不同发电技术发电量及外购电量等。

通过对以上模型求解，本部分从碳排放、大气污染物排放、清洁能源发电结构和系统成本四个方面对风险管理结果进行总结，为深惠莞区域生态质量提升提供相关建议。依据规划目标设置了两个情景，情景 1 为不实行碳排放配额制度同时基于不确定性机会约束方法下探究不同违约概率 p_i 下的情况，情景 2 指在深惠莞全域实行碳排放配额制度。

①碳排放结果

图 1 和图 2 分别显示了情景 1 中违约概率为 0.01、0.05 和 0.1 时以及情景 2 深惠莞区域 CO₂ 排放量的 7 种情况。对比三个规划期，深惠莞区域总 CO₂ 排放量均呈现不同幅度的下降。通过情景 1 可以发现，违约概率越高 CO₂ 排放量也越高，而对比情景 2，引入碳排放交易额度方案可以大大减少二氧化碳排放量，其三个规划期内碳排放量分别为 $[18583.23, 19833.67] \times 10^4$ 吨、 $[18291.63, 19511.66] \times 10^4$ 吨、 $[17746.35, 18429.51] \times 10^4$ 吨。因为在情景 1 中随着违约概率值上升，燃煤发电量和燃气发电量进一步提升，从而导致整个区域 CO₂ 排放量提升，而情景 2 中碳排放交易配额的影响下，燃煤发电和燃气发电占比越小，系统总成本越少，因而减少了化石能源发电的使用量。对比各个城市，东莞市的 CO₂ 排放量在各个时期各种情景下都是最多的，这是由于东莞市清洁能源发电占比较少，尤其深圳市和惠州市大力推广使用的核电，在东莞市发电量为 0。三个城市的 CO₂ 排放量在规划期内都呈现不同幅度下降，但其中东莞市在第三个规划期内 CO₂ 排放量有所反弹，其主要原因是其燃气发电占比越来越重，抵消了燃煤发电占比的缩减，同时随着城市用电量的不断增加从而使得 CO₂ 排放量也在第三个规划期有所反弹。

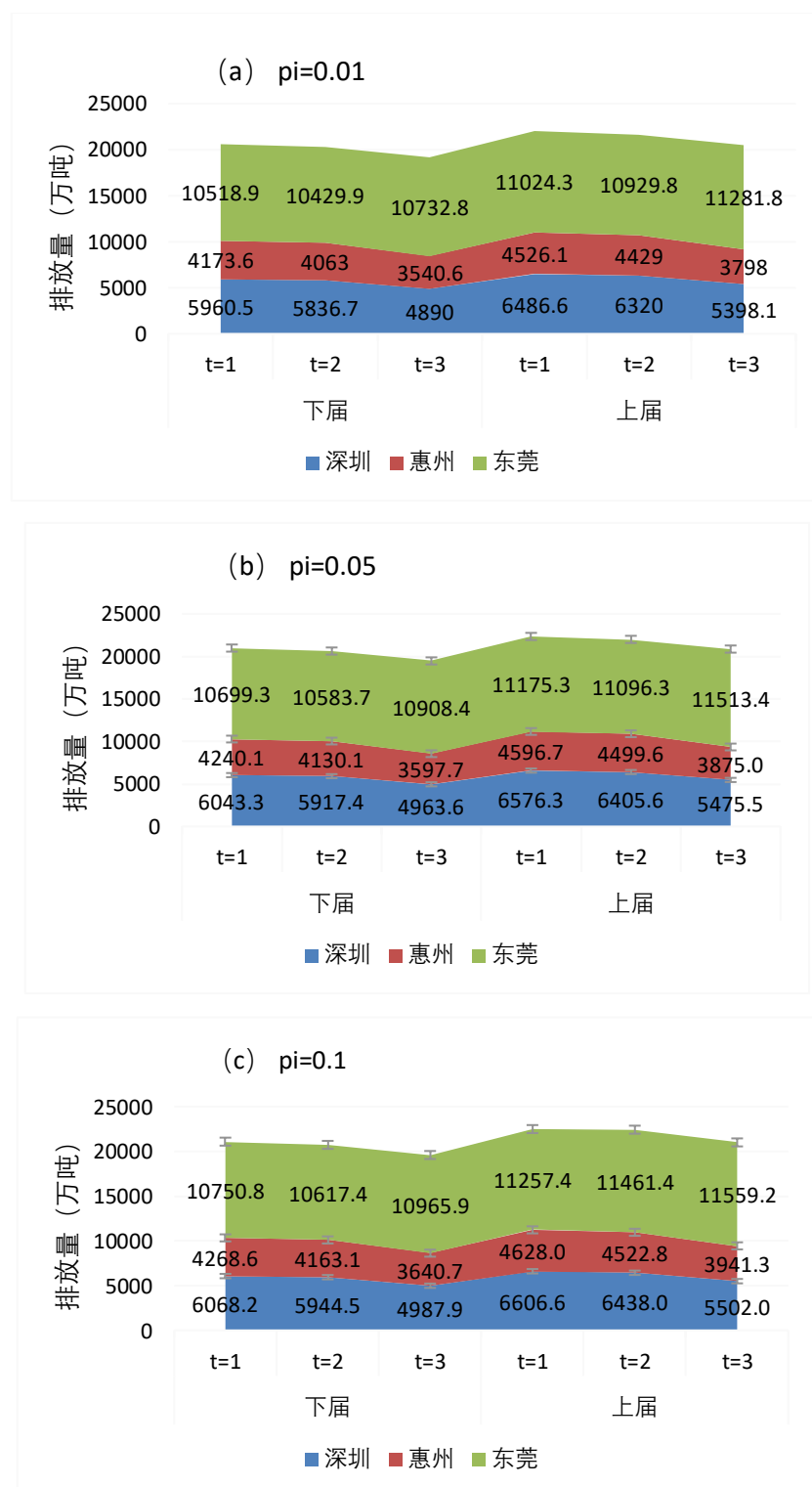


图 1 情景 1 不同 ρ_i 水平下深惠莞地区碳排放量

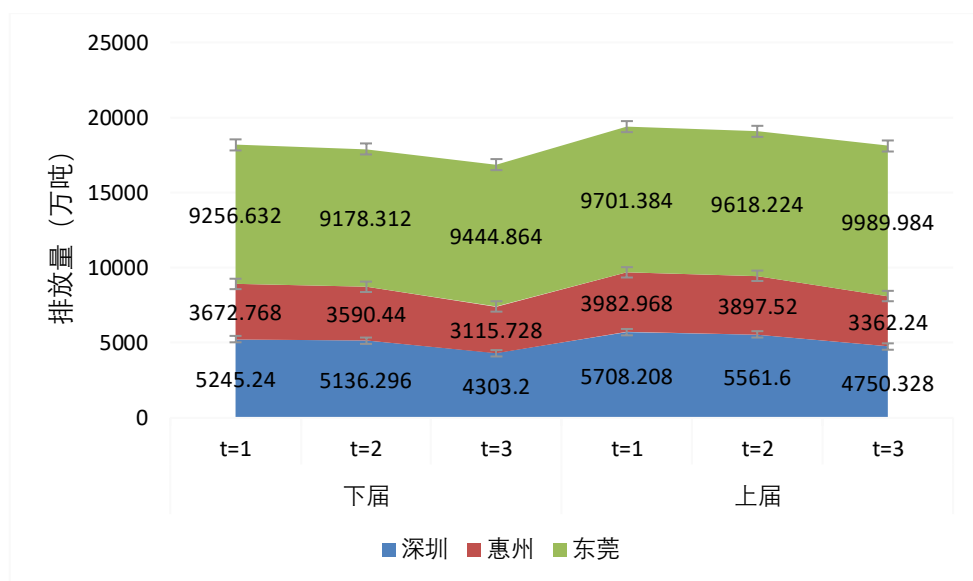


图 2 情景 2 深惠莞地区碳排放量

②大气污染物排放结果

图 3 和图 4 分别是深惠莞区域在情景 1 中 CO_2 不同违约概率下大气污染物排放情况以及情景 2 时大气污染物排放情况。虽然整个区域污染物排放量在三个规划期内逐步降低，但污染物排放总量依然维持高位，其中东莞市大气污染物排放量最高，区域内大气污染物排放量占比也是最高。这主要因为东莞市电力来源主要是燃煤发电，在发电的过程中排放了大量的 SO_2 、 NO_x 、 PM_{10} 。而对于深圳市和惠州市电力来源更加多元化，其清洁能源发电占比更高，尤其是深圳市虽然用电量高于东莞市和惠州市但整体大气污染物排放量均少于其他两市。对比发现，随着违约概率值的增大，大气污染物排放总量也随之增加，这主要因为当违约概率提升时，可以排放的 CO_2 变多，从而引发燃煤发电量和燃气发电量增加，进一步影响 SO_2 、 NO_x 、 PM_{10} 排放量提升。情景 2 中引入碳排放交易额度制度主要目的是控制 CO_2 排放量，但在抑制碳排放的同时间接影响其他大气污染物排放，因而综合来看碳排放交易额度制度不仅可以促进节能减排，同时有效地推动大气污染物的减排。

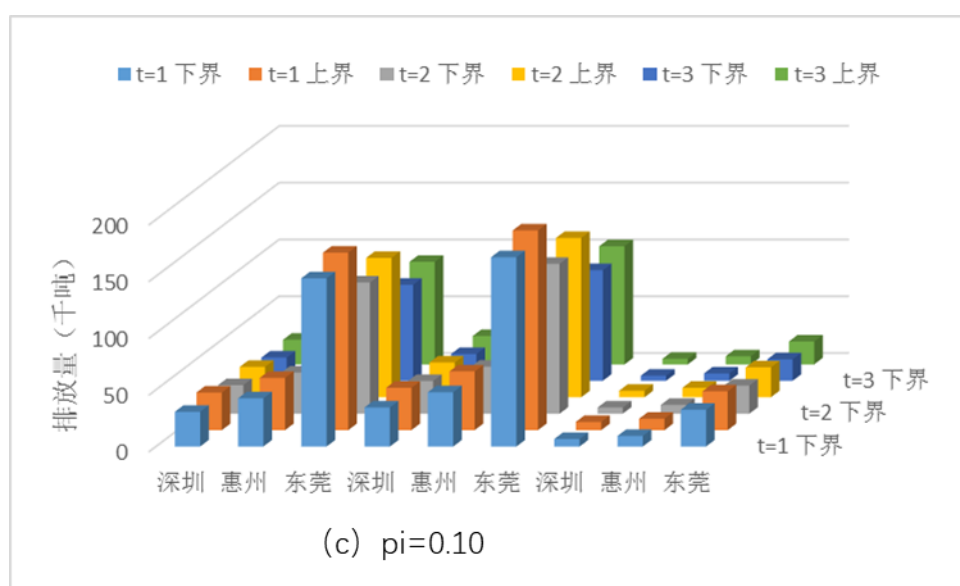
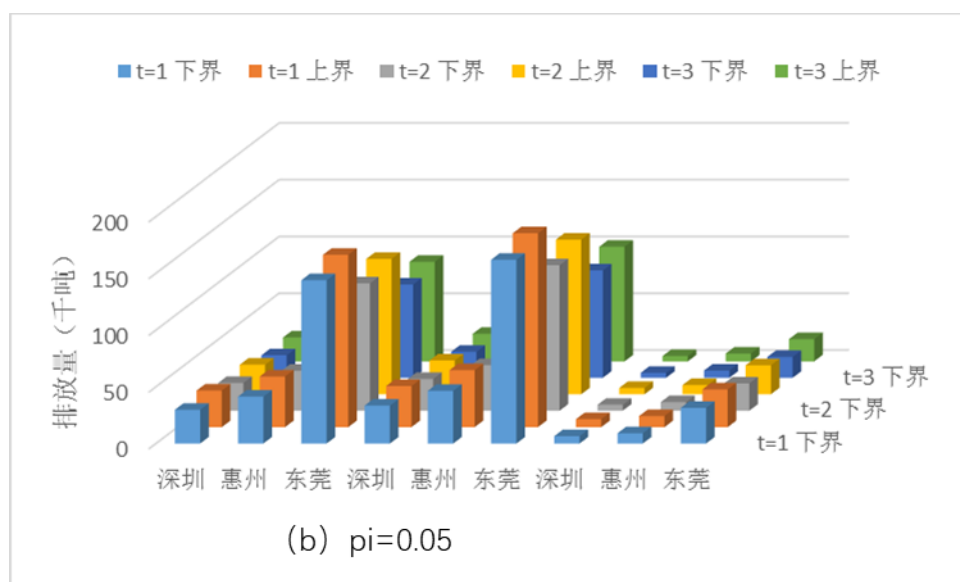
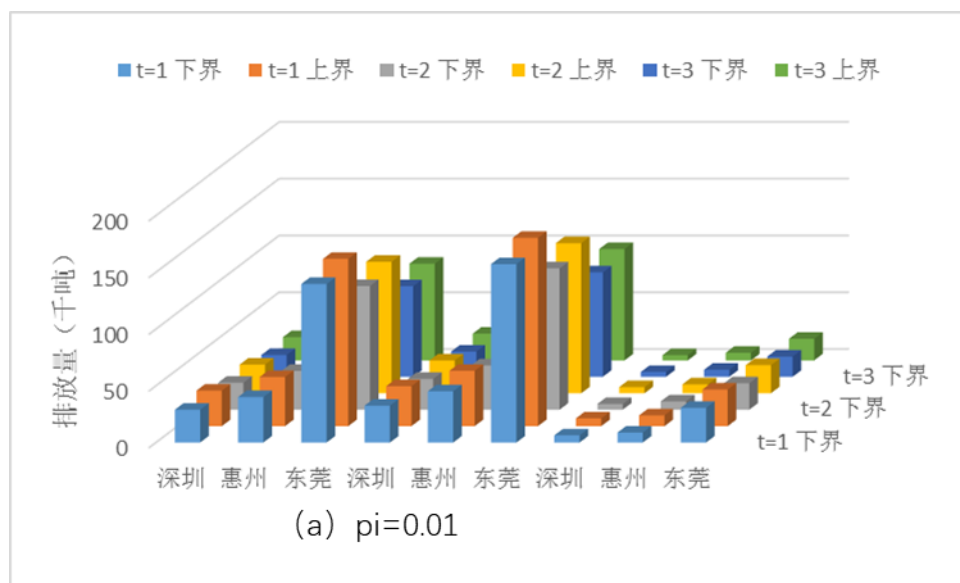


图 3 情景 1 不同 ρ_i 水平下深惠莞地区大气污染物排放量

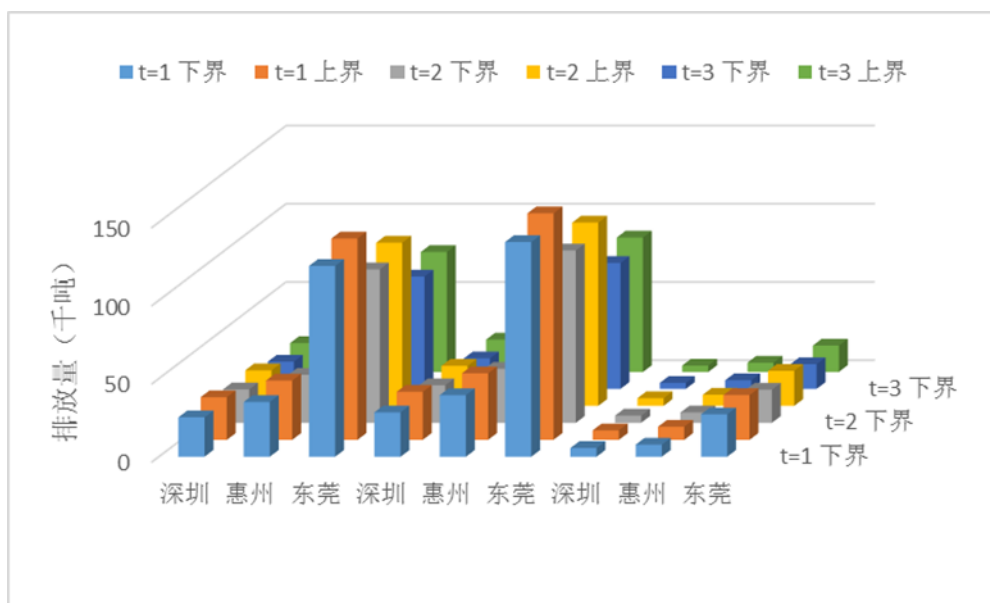


图 4 情景 2 深惠莞地区大气污染物排放量

③清洁能源发电结构

图 5 是情景 1 中 CO_2 违约概率为 0.01、0.05 和 0.1 三种情况下对应的深惠莞区域发电技术发电量，违约概率值越高，区域内各市的燃煤发电和燃气发电占比越高，清洁能源发电与可再生能源发电占比越低。这是因为 p_i 值越高，所对应的 CO_2 单位排放量限制也越高，为使系统成本最小化，往往会提高发电成本低的发电技术（例如燃煤发电、燃气发电）的发电效率，而可再生能源发电例如光伏发电、风力发电等由于库容成本和维护成本高导致其发电量占比降低。为了降低单位二氧化碳排放，深惠莞区域外来大力推动节能减排和可再生能源使用，以此减少对传统能源与发电技术的依赖。

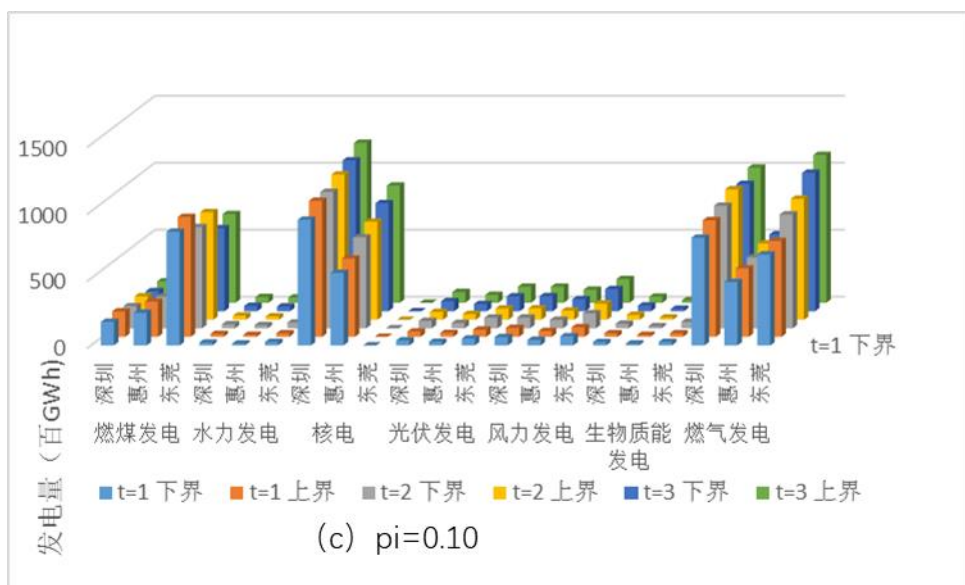
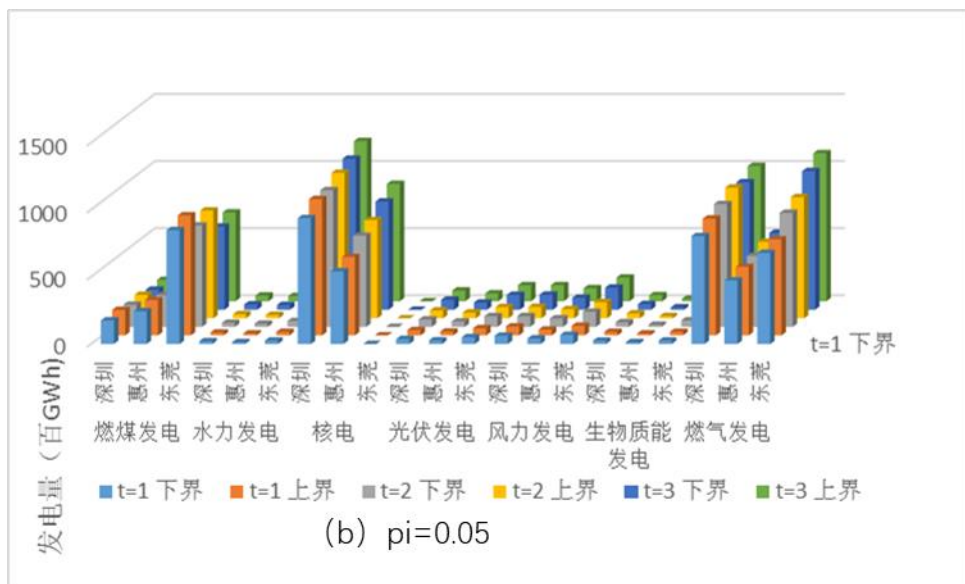
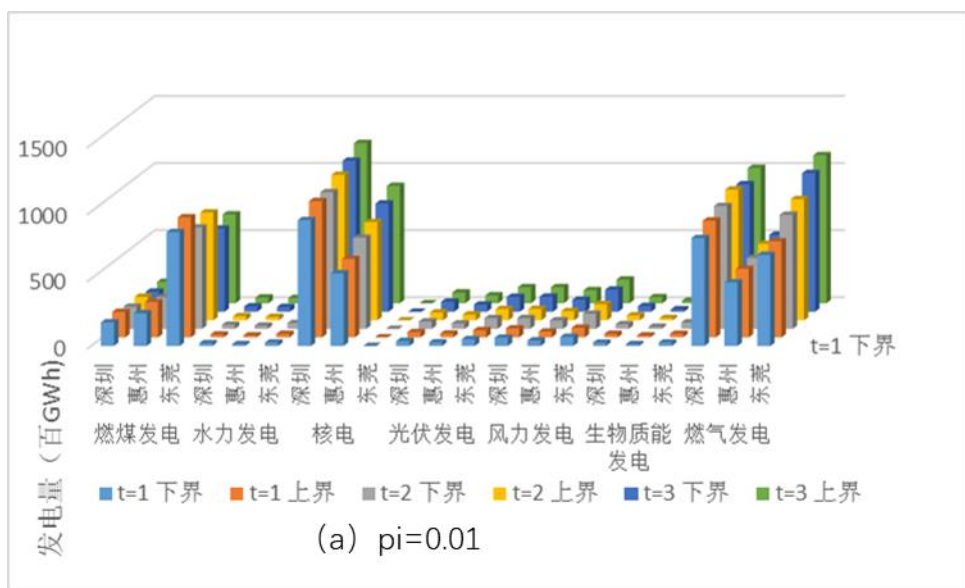


图 5 情景 1 不同 π 水平下深惠莞地区发电结构

图 6 展示了情景 2 下深惠莞区域发电技术发电量。与情景 1 相比，由于引进碳排放交易配额制度，有效地降低了传统化石能源发电的发电量，同时可再生能源发电具有零排放特点（其中生物质能发电常规认为零碳排放），因而占比进一步提升。例如，情景 2 中深惠莞区域在第一阶段燃煤发电量为 $[1120.2, 1195.23] \times 10^2$ GWh，同时光伏发电量达到 $[125.66, 132.93] \times 10^2$ GWh，其中化石能源发电及燃煤发电和燃气发电占总发电量 58.78%，对比情景 1 中当 p_i 为 0.01 时化石能源发电占比为 63.07%，当 p_i 为 0.05 时化石能源发电占比为 65.53%，当 p_i 为 0.1 时化石能源发电占比为 66.39%。这说明了引进碳交易配额制度的确能够有效的促进可再生能源发电的使用，同时抑制传统化石能源发电的使用量，帮助深惠莞区域在能源使用上转型升级，助力建设生态环境友好型的能源消费格局。

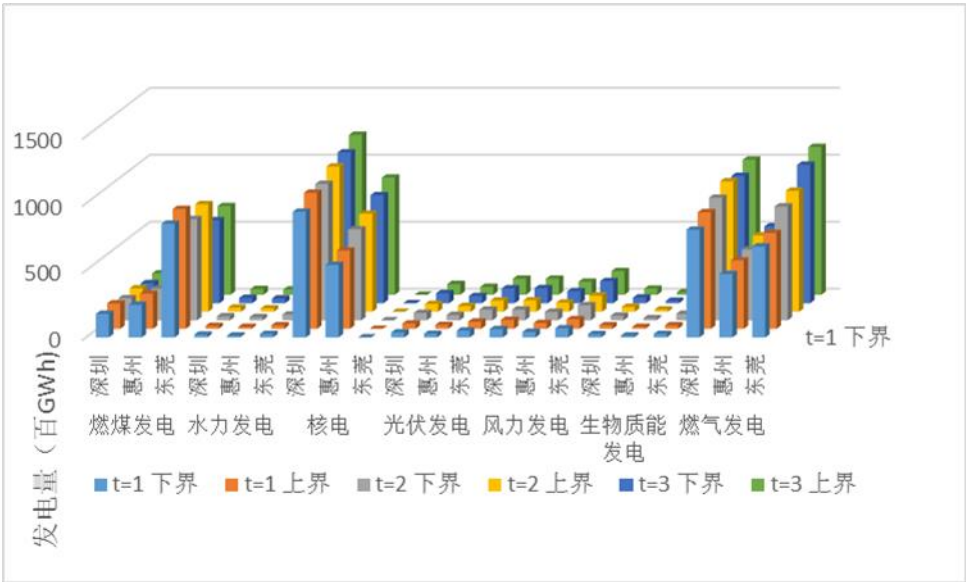


图 6 情景 2 深惠莞地区发电结构

④系统成本

图 7 是深惠莞区域在不同方案和情景下的系统总成本柱状图，在情景 1 中，随着 p_i 值的增加，系统总成本随之降低，这主要得益于低成本的火力发电随着违约概率提升使用效率也同步提升，减少了高成本的可再生能源发电和清洁能源发电的使用效率，同时也减少了对外购电量的依赖。情景 2 中，系统总成本相较于情景 1 大幅提升，其

主要由于两方面原因所导致：（i）最主要是由于引入碳排放交易额度制度，使得区域内化石能源发电单位电量碳排放浓度超过分配额度时，就需要在碳排放权交易所进行购买额度，其购买成本就已经达到 $[4814, 5689] \times 10^9$ 元。（ii）其次是因为碳排放交易额度制度有效地抑制了传统化石能源发电的使用，增加了发电成本更加昂贵的清洁能源发电技术的使用，加大了外购电量的成本投入，并最终提升了系统总成本。在情景2 中需要考虑配额强度减少会给结果对比带来相应误差，如果配额减少，则其中二氧化碳以及大气污染物排放会增多，燃煤发电量和燃气发电量会加大，系统总成本会减少。

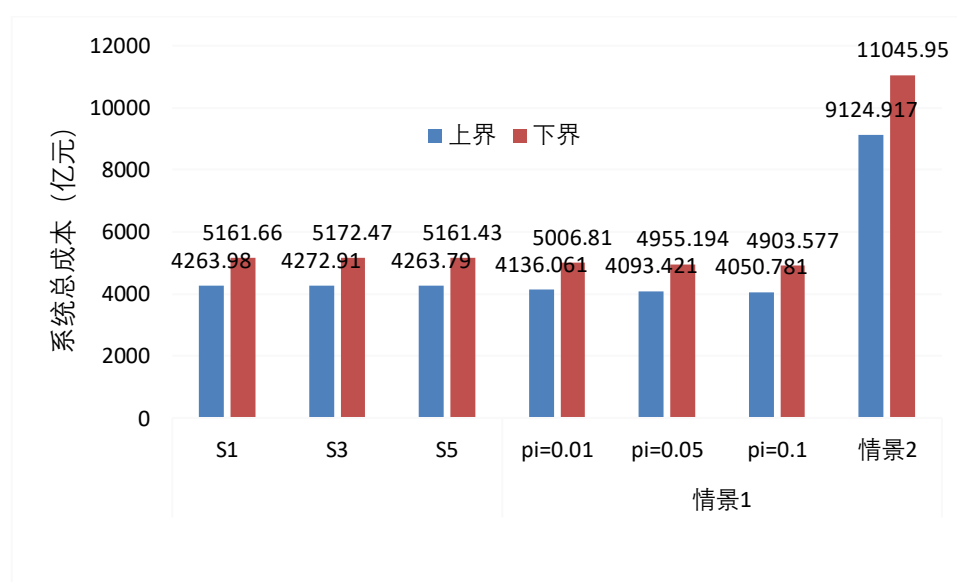


图 7 深惠莞地区不同情景系统总成本

综上，综合深惠莞区域环境-经济-社会等多方面因素，引入碳排放交易配额制度可以有效地降低 CO₂和大气污染物排放量，是在保证能源电力供应基础上实现节能减排的有效措施，这一举措也更有助于多区域生态安全目标的实现。