

## 珠海市可再生能-水资源系统规划

珠海是广东省的一个地级市，也是珠江三角洲的中心城市；该城市位于广东省的西南部，东隔香港，南连澳门，西邻江门、台山市，北接中山市。2017 年末珠海市总人口数达到 176.54 万人，相比 2016 年增长 5.4%。占地总面积 1736.46 平方公里，设有香洲、金湾和斗门三个行政区。珠海是中国首批经济特区之一，2017 年地区生产总值（GDP）为 2564.73 亿元，人均 GDP 达 14.91 万元。珠海市综合能源消费量为 586.11 万吨标准煤，比 2016 年增长 3.1%。空气污染物  $SO_2$ 、 $NO_x$ 、 $PM_{10}$  年平均值分别为  $7 \mu g/m^3$ 、 $32 \mu g/m^3$ 、 $43 \mu g/m^3$ ，分别与上年下降 22.2%、持平、上升 2.4%。随着珠海市经济的快速发展和人口不断增加，珠海市的水资源面临着短缺问题，同时城市对各类资源的需求也越来越多。珠海市电力系统结构以火力发电为主，火力发电不仅消耗煤炭等化石能源，还会排放大量的  $CO_2$  及空气污染物造成环境污染，同时在火力发电的运行过程中，还需要消耗大量的淡水资源用于冷却、脱硫、锅炉补给等过程，这也进一步加剧了珠海市的水资源危机。

因此本研究开发了一个区间混合整数分式规划（IMI-FP）模型用于珠海市可再生能源-水资源系统规划。通过考虑电厂水资源的消耗，引入机会约束规划方法，分析水资源利用约束在不同违约水平下对环境系统规划方案所产生的影响。考虑到可再生能源发电过程中耗水少得多，目标函数是优化可再生能源发电量与系统成本的比值，系在最大化单位成本的可再生能源发电量，以降低系统水耗，同时对水资源可用量设置了不同违约水平。与以往的研究相比，本研究不仅考虑了环境系统规划的经济效益，而且还注重其环境效益，其目标是优化系统效率。

IMI-FP 方法在传统区间混合整数分式规划方法的基础上，考虑到某些右手边参数存在随机特征，并且可以表示为随机分布时，可以引入机会约束方法对其进行处理，因此，模型可以表达为：

目标函数：

$$Max f^{\pm} = \frac{\sum_{j=1}^I c_j^{\pm} x_j^{\pm} + \sum_{j=t+1}^n c_j^{\pm} y_j^{\pm} + \alpha^{\pm}}{\sum_{j=1}^I d_j^{\pm} x_j^{\pm} + \sum_{j=t+1}^n d_j^{\pm} y_j^{\pm} + \beta^{\pm}}$$

约束条件：

$$\sum_{j=1}^t a_{ij}^{\pm} x_j^{\pm} + \sum_{j=t+1}^n a_{ij}^{\pm} y_j^{\pm} \leq b_i^{\pm}, \quad i = 1, 2, \dots, w$$

$$\Pr[\sum_{j=1}^t a_{ij}^{\pm} x_j^{\pm} + \sum_{j=t+1}^n a_{ij}^{\pm} y_j^{\pm} \leq b_i(s)] \geq 1 - p_i, \quad i = w+1, w+2, \dots, m$$

$$x_j^{\pm} \geq 0, \quad j = 1, 2, \dots, t$$

$$y_j^{\pm} \geq 0, \quad j = t+1, \dots, n$$

其中， $b_i(s)$ 是一个随机的右手边参数， $p_i$ 表示显著性水平（ $p_i \in [0,1]$ ），即约束允许违约的风险。根据机会约束方法，当左手边系数是确定值，右手边为随机值的时候（对于所有的 $p_i$ ），约束 $\Pr[A_i X \leq b_i(s)] \geq 1 - p_i$ 可以转换为：

$$A_i X \leq b_i(s)^{p_i}$$

其中，当 $b_i$ 的累积分布函数为 $F_i(b_i)$ ，则 $b_i(s)^{p_i} = F_i^{-1}(p_i)$ 。

通过求解模型，图 1 展示了不同违约水平下珠海市各发电技术的耗水量。可以明显看出，珠海市发电耗水主要来自于火力发电，但随着珠海市发电结构的改变，燃煤发电逐渐减少，对水资源的消耗也得到了有效的控制。当 $p_i=0.01$ 时，燃煤发电耗水从第 1 个规划时期的 $[55.176, 55.201] \times 10^6 \text{ m}^3$ 和第 2 个规划时期的 $[50.291, 50.324] \times 10^6 \text{ m}^3$ 降低至第 3 个规划时期的 $[46.113, 46.156] \times 10^6 \text{ m}^3$ ，燃气发电单位耗水量仅为燃煤发电的 1/3 左右，虽然燃气发电有所增加，但相比于燃煤发电，其耗水量仅从第 1 个时期的 $[5.251, 5.504] \times 10^6 \text{ m}^3$ 增加到第 3 个时期的 $[5.962, 6.249] \times 10^6 \text{ m}^3$ 。可在生能源发电过程耗水非常少，直到第 3 个规划时期，太阳能发电和水力发电耗水量仅仅只有 $[0.032, 0.033] \times 10^6 \text{ m}^3$ 和 $[0.687, 0.930] \times 10^6 \text{ m}^3$ ，风力发电过程更是没有耗水，因此，从节约水资源的角度考虑，可再生能源发电具有巨大的潜力，尤其是风力发电。随着违约水平的提高，水资源可用量随之增多，珠海市政府会放弃昂贵的外购电进而选则低成本的燃煤发电，因此在第三个规划期，当 $p_i=0.05$ 时，燃煤耗水为 $[47.270, 47.313] \times 10^6 \text{ m}^3$ ，当 $p_i=0.1$ 时，燃煤耗水增加到 $[48.072, 48.115] \times 10^6 \text{ m}^3$ 。面对日益增加的电力需求和水资源短缺问题，珠海市应加快发展低耗水的可再生能源。

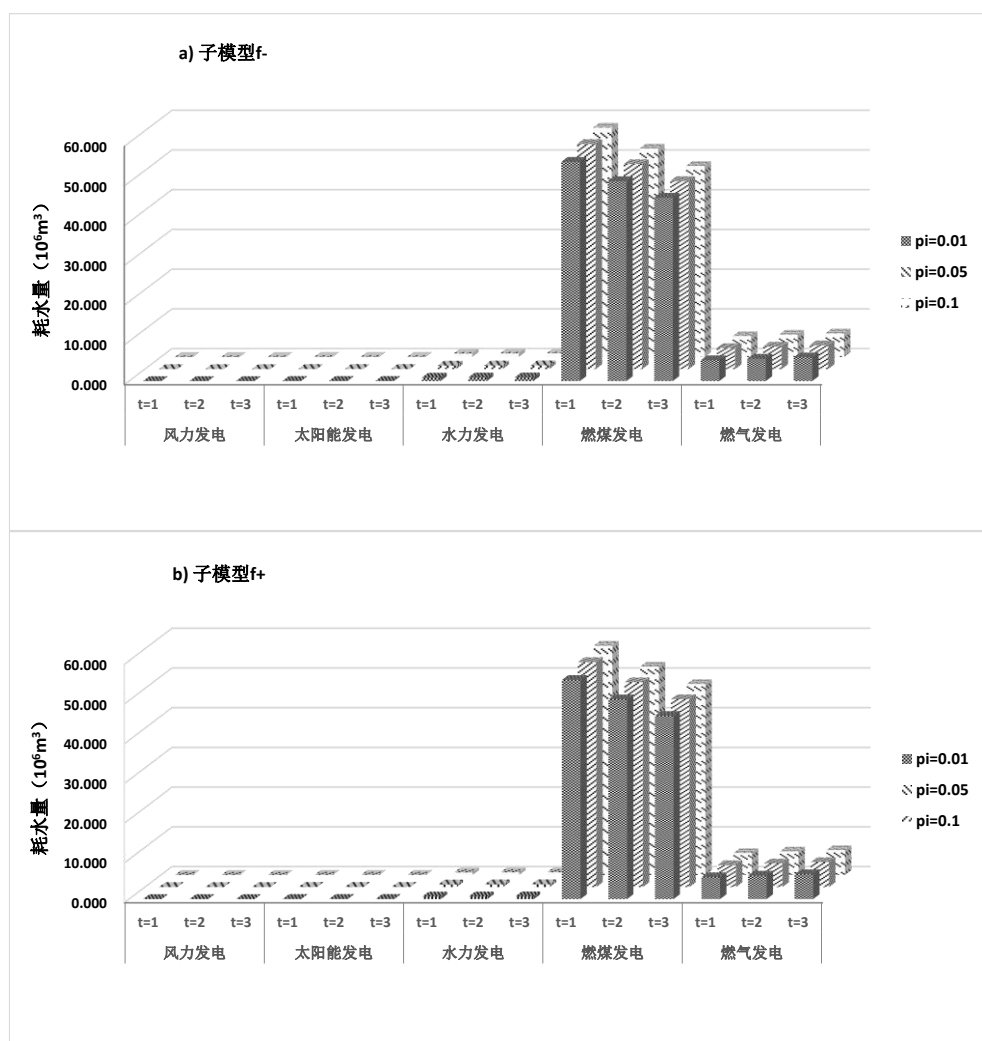


图 1 不同违约水平下的珠海市发电技术耗水量

### 污染物及 $\text{CO}_2$ 排放分析

图 2 和图 3 展示了在不同违约水平下珠海市  $\text{CO}_2$  和污染物的排放情况。随着珠海市政府对  $\text{CO}_2$  和污染物排放的限制以及发电结构的改变，可再生能源发电占比越来越大。当违约水平  $\pi=0.01$  时， $\text{CO}_2$  从第 1 个规划时期的  $[26.31, 26.70] \times 10^6$  吨降低至第 3 个规划时期的  $[24.40, 24.78] \times 10^6$  吨，同样地， $\text{SO}_2$ 、 $\text{NO}_x$  和  $\text{PM}_{10}$  的排放量也将分别从第 1 个规划时期的  $[10.64, 11.13] \times 10^3$  吨、 $[9.98, 10.36] \times 10^3$  吨和  $[2.17, 2.30] \times 10^3$  吨，降低至第 3 个规划时期的  $[8.05, 8.43] \times 10^3$  吨、 $[7.66, 7.95] \times 10^3$  吨和  $[1.64, 1.74] \times 10^3$  吨。然而，随着违约水平的提高，水资源可用量变大，未降低发电成本，燃煤发电量也随之增加，进而导致  $\text{CO}_2$  和污染物的排放量也越来越多。例如，在第三个规划时期，当  $\pi=0.05$  时， $\text{CO}_2$  的排放量增加到  $[24.92, 25.30] \times 10^6$  吨，当  $\pi=0.1$  时，其排放更是增加到了

[25.28,25.66]×10<sup>6</sup> 吨。因此，未来随着珠海市政府增加对发电厂用水总量的限制，可以有效的控制燃煤发电的增加，进而有利于实现 CO<sub>2</sub>和污染物的减排。

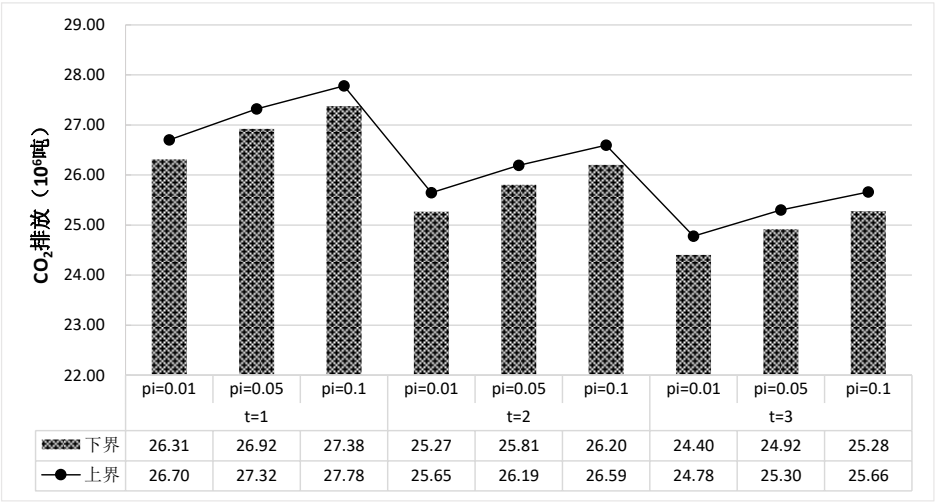


图 2 不同违约水平下的珠海市 CO<sub>2</sub> 排放量

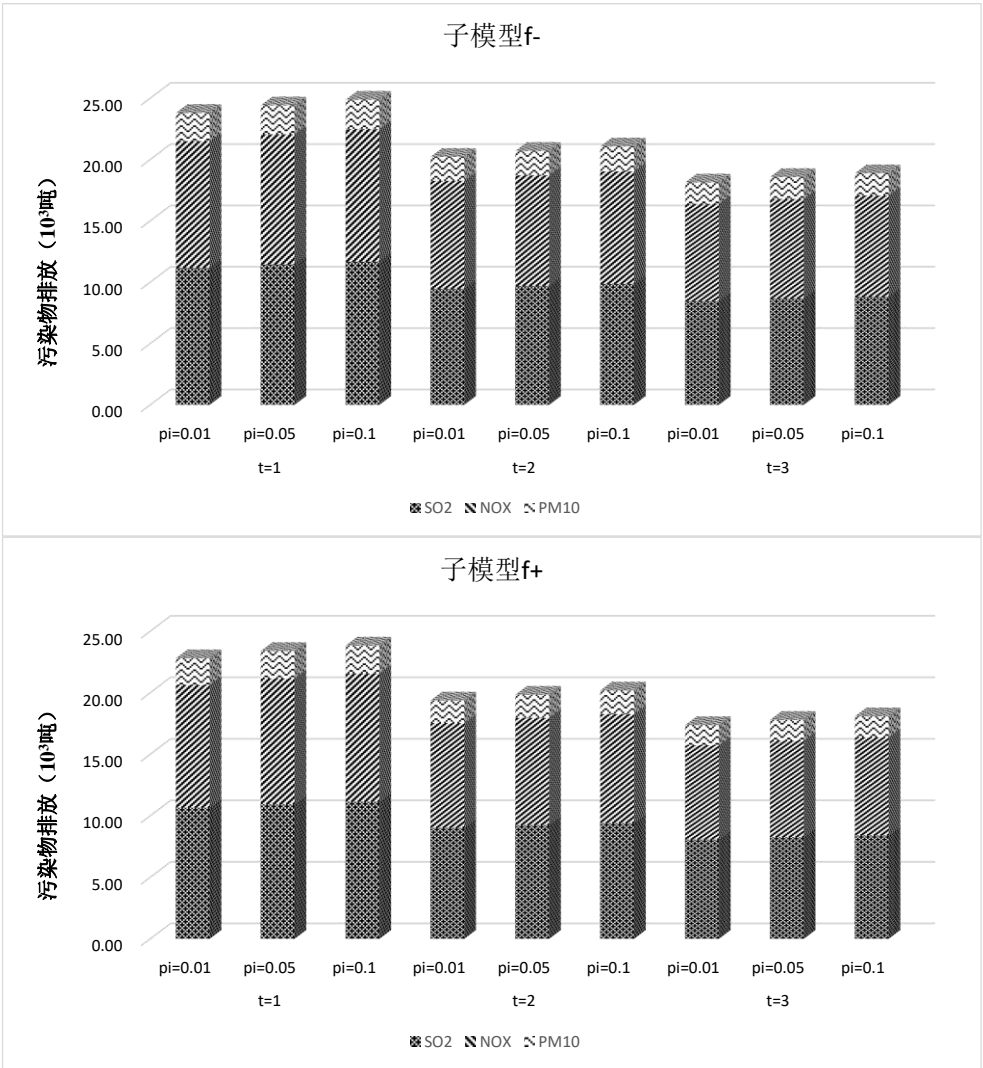


图 3 不同违约水平下的珠海市污染物排放量

## 系统成本和效率分析

图 4 和图 5 分别展示了珠海市不同违约水平下的系统的成本和效率。当违约水平  $\pi=0.01$  时，珠海市电力系统成本和效率分别为  $[165.64, 177.61] \times 10^9$  元、 $[16.71, 20.18]$  GWh/ $10^8$  元，随着违约水平的增加，水资源可用性也变大，在珠海市电力供应结构中，珠海市政府会放弃部分成本较高的外购电，选择低成本燃煤发电方式，所以系统成本也会随之降低，效率进而提高。但同样地，燃煤发电的增加会加剧  $\text{CO}_2$  和污染物的排放，不利于环境的可持续发展。因此，珠海市决策部门应该科学地权衡经济和环境之间的关系，根据实际情况选择合适的资源配置方案。

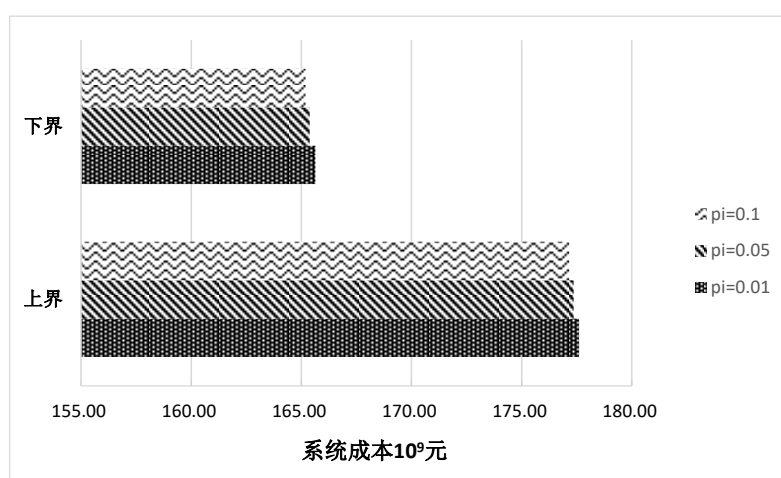


图 4 不同违约水平下系统成本

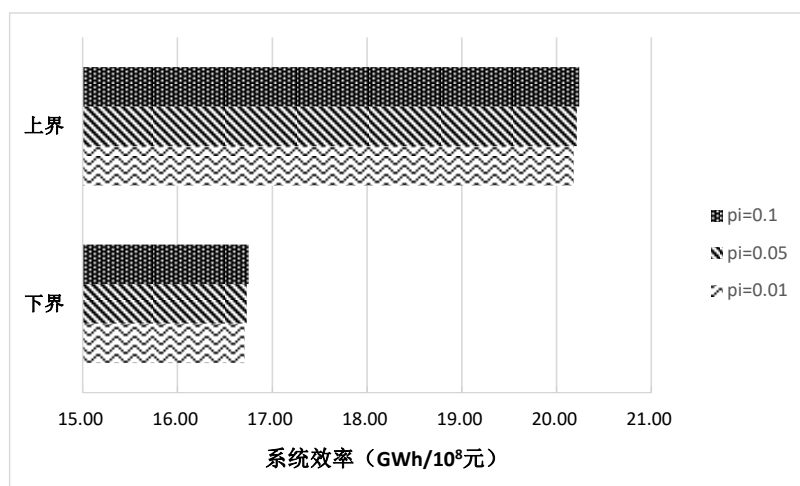


图 5 不同违约水平下的珠海市清洁能源系统效率

本研究开发了区间机会约束分式规划方法用于珠海市的电力系统规划。为了珠海市经济-资源-环境的协调发展，模型系在优化可再生能源发电与系统成本的比值，即最大化单位成本的可再生能源发电。可再生能源的开发利用可以有效地缓解煤炭等

化石能源和水资源短缺危机，同时也可以减少  $\text{CO}_2$  和空气污染物的排放，有利于环境的可持续发展。模型约束主要涉及终端用户对电力的需求、可再生能源资源可用性、装机及扩容选项要求、能源转换技术水平、二氧化碳和空气污染物 ( $\text{SO}_2$ ,  $\text{NO}_x$  和  $\text{PM}_{10}$ ) 的排放限制，同时还加入了水资源约束限制，并用机会约束方法对水资源可用量进行处理，共设置了三个违约水平，即  $\pi=0.01$ ,  $\pi=0.05$  和  $\pi=0.1$ 。

通过 3 个违约水平下的对比分析，系统地对珠海市未来规划期内水资源消耗、 $\text{CO}_2$  与污染物排放、系统成本和系统效率等方面进行了讨论。结果表明珠海可再生能源发电占比逐渐增大，其中风电占比最大，这是由于珠海市海上风能资源丰富，因此未来风电开发潜力最大。随着违约水平  $\pi$  的增加，水资源消耗和燃煤发电量逐渐增大， $\text{CO}_2$  和污染物排放增多，但同时使得系统成本降低、系统效率增高。