

## 深圳市资源环境系统管理模型

深圳市位于中国广东省南部，是我国第一个经济特区(SEZ)。城市经济的高速发展和人口迅猛增长，带来资源需求不断增加，而环境问题日益严重。总体看，深圳市的环境系统面临的主要问题有：(i)由于资源缺乏，大部分城市的资源供应依赖于煤炭、液化天然气(LNG)、核燃料和电力等；(iii)清洁资源在城市电力生产中占有非常有限的份额；(iii)化石燃料的使用将使城市遭受二氧化硫、二氧化氮、PM10 等污染，带来更严重的温室效应。针对深圳的环境系统问题，本研究开发了基于模糊区间可能性混合整数规划方法的资源环境系统规划模型，模型设置了政策情景 1 和宽松情景 2 两种排放情景，为优化城市的资源配置方案、资源消费等相关政策提供了理论支撑，有助于实现城市中期长度的资源环境系统规划。

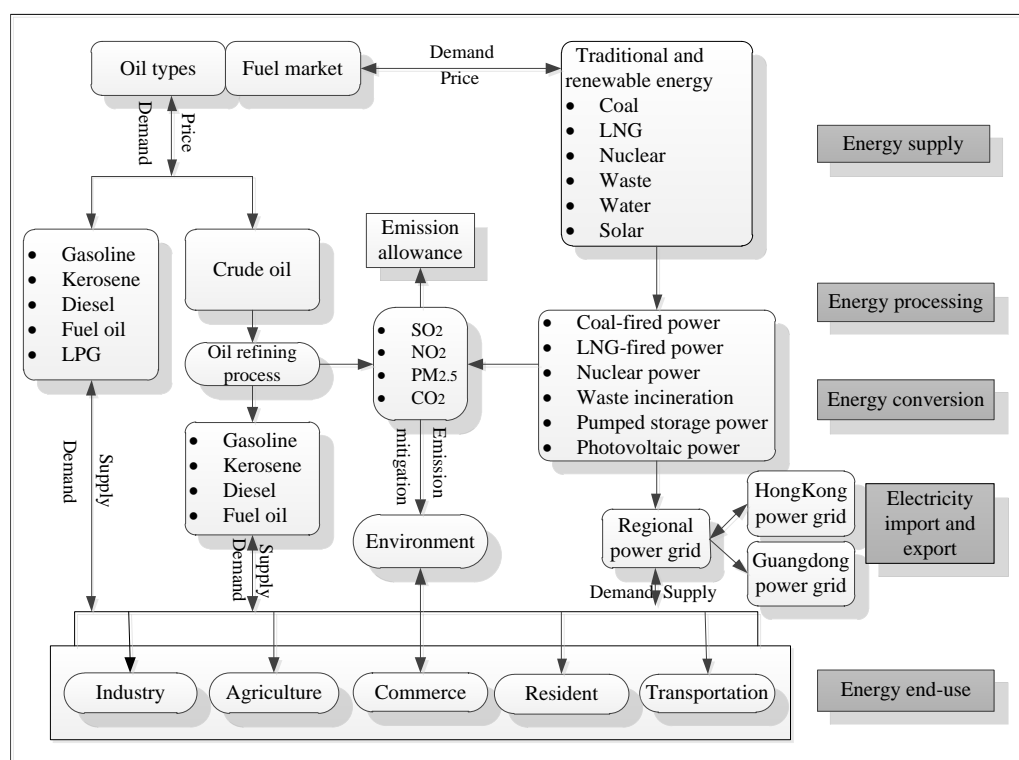


图 1 深圳市资源环境系统框架

在实际决策过程中，目标函数和约束条件中的系数和参数通常具有不确定性，在某些情况下，可以将其表示为具有可能性分布的模糊参数。然而，大量的因素导致了系统的认知不确定性，如信息无法获取、信息不完整性和决策者的主观判断等，为了

处理这些不确定性，模糊可能性规划模型可表示如下：

$$\text{Min } f = \tilde{C}X$$

约束条件：

$$AX \geq \tilde{B}$$

$$X \geq 0$$

在上述模型中， $X$  代表非模糊决策变量的矢量；系数  $B$  和  $C$  是模糊可能性变量，都能够转化为模糊隶属度函数；在约束条件中， $A$ 、 $B$  分别表示约束左手和右手边的系数，而模糊系数  $\tilde{C}$  具有连续隶属函数，则可表示如下：

$$\varphi_{\tilde{C}}(x) = \begin{cases} M_{\tilde{C}}(x), & \text{if } c_1 \leq x \leq c_2 \\ 1, & \text{if } c_2 \leq x \leq c_3 \\ N_{\tilde{C}}(x), & \text{if } c_3 \leq x \leq c_4 \\ 0, & \text{if } x < c_1 \text{ or } x > c_4 \end{cases}$$

$M_{\tilde{C}}(x)$  和  $N_{\tilde{C}}(x)$  分别是连续递增和连续递减函数。当两者都是线性函数时，模糊数  $\tilde{C}$  是梯形，当  $c_2$  等于  $c_3$ ，模糊数则变为一个三角形。引入期望值算子可以将带有模糊系数的不确定目标函数可以转换为确定目标函数，模糊数  $\tilde{C}$  上下界期望值定义为：

$$E(\tilde{C})^- = c_2 - \int_{c_1}^{c_2} M_{\tilde{C}}(x)dx = \int_0^1 M_{\tilde{C}}^{-1}(x)dx$$

$$E(\tilde{C})^+ = c_3 + \int_{c_3}^{c_4} N_{\tilde{C}}(x)dx = \int_0^1 M_{\tilde{C}}^{-1}(x)dx$$

上标“-”和“+”分别代表下界和下界。因此，模糊数  $\tilde{C}$  的期望区间、模糊数的期望值可以定义为：

$$EI(\tilde{C}) = [E(\tilde{C})^-, E(\tilde{C})^+] = \left[ \frac{1}{2}(c_1 + c_2), \frac{1}{2} \cdot (c_3 + c_4) \right]$$

$$EV(\tilde{C}) = \frac{1}{2} [E(\tilde{C})^- + E(\tilde{C})^+] = \frac{1}{4} \cdot (c_1 + c_2 + c_3 + c_4)$$

$$\text{Min } EV(\tilde{C})X$$

因此，当向量是具有确定性目标的线性规划模型的最优解时，它就是该模型的一个可接受的最优解。

同样，可以用四个确定的数字  $(b_1, b_2, b_3, b_4)$  来表示梯形模糊数  $\tilde{B}$ ，其隶属函数定义成：

$$\varphi_B(x) = \begin{cases} (x-b_1)/(b_2-b_1), & \text{if } b_1 \leq x \leq b_2 \\ 1, & \text{if } b_2 \leq x \leq b_3 \\ (x-b_4)/(b_3-b_4), & \text{if } b_3 \leq x \leq b_4 \\ 0, & \text{if } x < b_1 \text{ or } x > b_4 \end{cases}$$

$$nes\{AX \geq \underline{B}\} \geq \alpha, i=1,2, \dots, m$$

上述必然性约束由方程转化而来， $nes(AX \geq \underline{B})$ 表示的是  $AX$  不小于  $\underline{B}$  必然性程度，这一概念常用于解决约束条件下左手的模糊系数。即在实际情况下，决策者更倾向于较高的确定性或需求程度来满足约束条件，这也意味着此时的系统满意度也能达到最优。 $\alpha$  是一个预先确定的确定性值，代表必然性水平，而决策者能接受的确定性程度不应该低于 0.5。因此，必然性程度不小于  $\alpha$  水平时，矢量  $X$  为可行。在此基础上，能够表示  $\underline{B} \leq w$  的必然性测度如下所示：

$$nes(\underline{B} \leq w) = 1 - \sup\{\varphi_B(g) \mid g > w\}, i=1,2, \dots, m$$

在上面的式子中， $w$  为实数； $\varphi_B$  是模糊数  $\underline{B}$  的隶属函数， $nes(\underline{B} \leq w)$  表示  $\underline{B}$  小于等于  $w$  的必然性程度，显然其大小  $[0, 1]$  变化，相应地，我们可以明确地得到  $\underline{B} \leq w$  必然性测度定义：

$$nes\{\underline{B} \leq w\} = \begin{cases} 1, & \text{if } b_4 \leq w \\ (w-b_3)/(b_4-b_3), & \text{if } b_3 \leq w \leq b_4 \\ 0, & \text{if } b_3 \geq w \end{cases}$$

基于上面的公式，模糊约束能够转化为以下去模糊约束：

$$AX \geq (1-\alpha) \cdot b_3 + \alpha \cdot b_4, i=1,2, \dots, m$$

该方法可以有效地解决约束条件或目标函数中的模糊系数，但在同一系统中，不能很好地反映出其他模糊或不确定的信息。特别是资源、需求、环境、成本、技术等输入数据或能源专家估计的参数通常以区间形式表达，并随着上下界波动，上下界由研究人员或决策者由主观估计得到，表示成模糊隶属函数，带来了系统的双重不确定性。需要将区间参数规划整合到模糊可能性规划的框架中，这样可以使不确定信息传递至优化过程<sup>[100]</sup>。模糊区间可能性混合整数规划(FIPMP)模型可以转换为两个子模型，下界子模型形式如下：

$$\text{Min } f^- = \sum_{j=1} EV(\underline{c}_j)x_j^- + \sum_{j=1+k} EV(\underline{c}_j)x_j^+$$

约束条件：

$$\sum_{j=1} |a_{ij}^+|^+ \text{Sign}(a_{ij}^+) x_j^- + \sum_{j=1} |a_{ij}^+|^+ \text{Sign}(a_{ij}^+) x_j^+ \geq (1-\alpha) b_{i3}^- + \alpha b_{i4}^-, i=1,2,\dots,m$$

$$x_j^- \geq 0, j=1,2,\dots,k$$

$$x_j^+ \geq 0, j=k+1,k+2,\dots,n$$

求得模型的下界子模型  $f^-$  的结果后，可以构建出上界子模型  $f^+$ ：

$$\text{Min } f^+ = \sum_{j=1} EV(\zeta_j^+) x_j^+ + \sum_{j=k+1} EV(\zeta_j^-) x_j^-$$

约束条件：

$$\sum_{j=1} |a_{ij}^+|^+ \text{Sign}(a_{ij}^+) x_j^+ + \sum_{j=k+1} |a_{ij}^+|^+ \text{Sign}(a_{ij}^+) x_j^- \geq (1-\alpha) \cdot b_{i3}^+ + \alpha \cdot b_{i4}^-, i=1,2,\dots,m$$

$$x_j^+ \geq x_{j \text{ opt}}^-, j=1,2,\dots,k$$

$$x_{j \text{ opt}}^+ \geq x_j^- \geq 0, j=k+1,k+2,\dots,n$$

在上述模型中， $a_{ij}^+$  是区间参数， $x_j^+$  是变量； $\zeta_j^+ = [(c_{j1}^-, c_{j2}^-, c_{j3}^-, c_{j4}^-), (c_{j1}^+, c_{j2}^+, c_{j3}^+, c_{j4}^+)]$  和  $b_i^+ = [(b_{i1}^-, b_{i2}^-, b_{i3}^-, b_{i4}^-), (b_{i1}^+, b_{i2}^+, b_{i3}^+, b_{i4}^+)]$  表示具有独立上界和下界的模糊边界区间数；当  $j=1,2,\dots,k$ ， $\zeta_j^+$  和  $a_{ij}^+$  代表正系数， $j=k+1,k+2,\dots,n$  时， $\zeta_j^-$  和  $a_{ij}^+$  代表负系数；通过求解这两种子模型，我们可以得到模糊区间可能性规划模型的最终区间解为： $f_{j \text{ opt}}^+ = [f_{j \text{ opt}}^-, f_{j \text{ opt}}^+]$  和  $x_{j \text{ opt}}^+ = [x_{j \text{ opt}}^-, x_{j \text{ opt}}^+]$ 。

本研究整合了模糊区间可能性规划与混合整数规划方法，运用到多重不确定因素下深圳市能源系统规划研究。针对目标函数和约束中的能源价格和能源需求等参数，通过引入必然性测度、期望值算子和区间数等处理表现为确定性区间数和模糊边界的区间数的不确定性。有别于传统模糊数学规划方法，避免了中间模型，计算效率更高。模型运行得出系列优化结果，包括能源供应，电力生产，设备扩容，大气污染减排等，模型设置了政策情景 1 和宽松情景 2 两种排放情景，为优化城市的资源能源的配置方案、制定能源供应和能源消费等相关政策提供了理论支撑，有助于实现城市中期长度的能源系统规划。

本研究建立了一个典型的能源系统规划模型，模型考虑到以下几个方面（1）能源供应：包括原油、汽油、煤油、柴油、燃料油、液化石油气（LPG）、煤、液化天然气

(LNG)、核燃料和电力；(2) 能源加工：炼油 (3) 能源转换：考虑了 6 种技术和 23 个发电厂，燃煤发电、天然气发电、核电、垃圾焚烧发电、抽水蓄能发电和光伏发电；

(4) 电力出口：香港、广东电网；(5) 能源终端使用：工业、农业、商业、居民、交通部门；(6) 环境管理：三种因化石燃料发电产生的空气污染物，SO<sub>2</sub>、NO<sub>2</sub>、PM10 和一种温室气体 CO<sub>2</sub> (a) 能源购买成本：包括原油购买成本、燃料成本和进口电力成本；(b) 能源加工和转换的运行和维护费用，包括固定和可变的运行与维护费用；(c) 能源加工和转换的设备扩容费用，包括固定和可变的扩容费用；(d) 能源加工与转换产生的大气污染物的减排费用；(e) 能源加工和转换的空气污染物排放成本；(f) 向相邻电网输出电力费用。目的在于构建一个基于模糊可能性混合整数规划 (FIPMP)，成本更小的能源系统，共分为 3 个规划时期 (2017 – 2025 年)，模型建立如下：

目标函数：

$$\text{Min } f^{\pm} = (a) + (b) + (c) + (d) + (e) - (f)$$

$$(a) = \sum_{s=1}^5 \sum_{k=1}^3 OPM_{sk}^{\pm} \cdot OG_{sk}^{\pm} + \sum_{k=1}^3 COM_k^{\pm} \cdot CG_k^{\pm} + \sum_{i=1}^3 \sum_{k=1}^3 FGM_{ik}^{\pm} \cdot FG_{ik}^{\pm} + \sum_{m=1}^5 \sum_{k=1}^3 ICE_{mk}^{\pm} \cdot IM_{mk}^{\pm}$$

$$(b) = \sum_{k=1}^3 (FCC_k^{\pm} \cdot ORR_k^{\pm} + VCC_k^{\pm} \cdot SC_k^{\pm}) + \sum_{j=1}^6 \sum_{k=1}^3 \sum_{n=1}^{23} (FCE_{jk}^{\pm} \cdot RCE_{jkn}^{\pm} + VCE_{jk}^{\pm} \cdot AFD_{jkn}^{\pm})$$

$$(c) = \sum_{k=1}^3 (FOK_k^{\pm} \cdot TOE_k^{\pm} + VOK_k^{\pm} \cdot CER_k^{\pm}) + \sum_{j=1}^6 \sum_{k=1}^3 \sum_{n=1}^{23} (FEK_{jk}^{\pm} \cdot TEE_{jkn}^{\pm} + VEK_{jk}^{\pm} \cdot CEE_{jkn}^{\pm})$$

$$(d) = \sum_{k=1}^3 SC_k^{\pm} \cdot (MOS_k^{\pm} + MON_k^{\pm} + MOP_k^{\pm}) + \sum_{j=1}^6 \sum_{k=1}^3 \sum_{n=1}^{23} AFD_{jkn}^{\pm} \cdot (MES_{jk}^{\pm} + MEN_{jk}^{\pm} + MEP_{jk}^{\pm})$$

$$(e) = \sum_{k=1}^3 SC_k^{\pm} \cdot \left[ \begin{array}{l} EOS_k^{\pm} \cdot (1 - GOS_k) COS_k^{\pm} \\ + EON_k^{\pm} \cdot (1 - GON_k) CON_k^{\pm} \\ + EOP_k^{\pm} \cdot (1 - GOP_k) COP_k^{\pm} \end{array} \right] + \sum_{j=1}^6 \sum_{k=1}^3 \sum_{n=1}^{22} AFD_{jkn}^{\pm} \cdot \left[ \begin{array}{l} PES_{jk}^{\pm} \cdot (1 - GES_{jk}) \cdot CES_{jk}^{\pm} \\ + PEN_{jk}^{\pm} \cdot (1 - GEN_{jk}) \cdot CEN_{jk}^{\pm} \\ + PEP_{jk}^{\pm} \cdot (1 - GEP_{jk}) \cdot CEP_{jk}^{\pm} \end{array} \right]$$

$$(f) = \sum_{i=1}^2 \sum_{k=1}^3 EXE_{ik}^{\pm} \cdot EM_{ik}^{\pm}$$

约束条件：

(1) 能源资源可获取度

$$OG_{sk}^{\pm} \leq AVO_{sk}^{\pm}, \forall s, k$$

$$CG_k^{\pm} \leq AVC_k^{\pm}, \forall k$$

$$\sum_{n=1}^{23} AFD_{jkn}^{\pm} \cdot ET_{jkn}^{\pm} \leq AVR_{jk}^{\pm}, \forall j, k$$

(2) 能源供需平衡约束

$$CG_k^{\pm} \geq CDQ_k^{\pm}, \forall k$$

$$OG_{sk}^{\pm} + PT_f \cdot SC_k^{\pm} \geq \sum_{m=1}^5 PDU_{\sim skm}^{\pm}, \forall k, s = f = 1, 2, 3, 4$$

$$OG_{sk}^{\pm} \geq \sum_{m=1}^5 PDU_{\sim skm}^{\pm}, \forall k, s = 5$$

$$FG_{ik}^{\pm} \geq DFE_{\sim ik}^{\pm}, \forall k, i$$

(3) 电力供需平衡

$$\sum_{j=1}^6 \sum_{n=1}^{23} AFD_{jkn}^{\pm} - \sum_{l=1}^2 EM_{lk}^{\pm} + \sum_{m=1}^5 IM_{mk}^{\pm} \geq \sum_{m=1}^5 (1 + LDR_k) \cdot DGE_{\sim mk}^{\pm}, \forall k$$

(4) 炼油过程生产容量约束

$$ORR_k^{\pm} + CER_k^{\pm} - ORL_k^{\pm} \geq SC_k^{\pm}, \forall k$$

(5) 炼油过程容量变化约束

$$ORR_k^{\pm} + CER_k^{\pm} - ORL_k^{\pm} = ORR_{k+1}^{\pm}, \forall k$$

(6) 发电厂容量变化约束

$$RCE_{jkn}^{\pm} + CEE_{jkn}^{\pm} - CLE_{jkn}^{\pm} = RCE_{j(k+1)n}^{\pm}, \forall j, k, n$$

(7) 电厂发电约束

$$(RCE_{jkn}^{\pm} + CEE_{jkn}^{\pm} - CLE_{jkn}^{\pm}) \cdot OTE_{jkn}^{\pm} \cdot (1 - SUE_{jkn}^{\pm}) \geq AFD_{jkn}^{\pm}, \forall j, k, n = 1, \dots, 23$$

(8) 大气污染物控制约束

$$SC_k^{\pm} \cdot HOS_k^{\pm} \cdot (1 - GOS_k) + \sum_{j=1}^6 \sum_{n=1}^{23} AFD_{jkn}^{\pm} \cdot HES_{jkn}^{\pm} \times (1 - GES_{jkn}) \leq EL\tilde{S}_k^{\pm}, \forall k$$

$$SC_k^{\pm} \cdot HON_k^{\pm} \cdot (1 - GON_k) + \sum_{j=1}^6 \sum_{n=1}^{23} AFD_{jkn}^{\pm} \cdot HEN_{jkn}^{\pm} \times (1 - GEN_{jkn}) \leq ELN_{\sim k}^{\pm}, \forall k$$

$$SC_k^{\pm} \cdot HOP_k^{\pm} \cdot (1 - GOP_k) + \sum_{j=1}^6 \sum_{n=1}^{23} AFD_{jkn}^{\pm} \cdot HEP_{jkn}^{\pm} \times (1 - GEP_{jkn}) \leq EL\tilde{P}_k^{\pm}, \forall k$$

(9) 二氧化碳控制约束

$$\sum_{s=f=1}^4 (OG_{sk}^{\pm} + PT_f \cdot SC_k^{\pm}) \cdot CCO_{sk}^{\pm} + OG_{5k}^{\pm} \cdot CCO_{5k}^{\pm} \\ + ORP_k^{\pm} \cdot HOC_k^{\pm} + \sum_{j=1}^6 \sum_{n=1}^{23} (AFD_{jkn}^{\pm} \cdot HEC_{jkn}^{\pm}) \leq ELC_k^{\pm}, \forall k$$

(10) 能源加工和转换扩容约束

$$TOE_k^{\pm} = \begin{cases} = 1, & \text{if capacity expansion is undertaken} \\ = 0, & \text{if otherwise} \end{cases}, \forall k$$

$$0 \leq CER_k^{\pm} \leq ULO_k^{\pm} \cdot TOE_k^{\pm}, \forall k$$

$$TEE_{jkn}^{\pm} = \begin{cases} = 1, & \text{if capacity expansion is undertaken} \\ = 0, & \text{if otherwise} \end{cases}, \forall j, k, n$$

$$0 \leq CEE_{jkn}^{\pm} \leq ULE_{jkn}^{\pm} \cdot TEE_{jkn}^{\pm}, \forall j, k, n$$

(11) 技术约束

$$OG_{sk}^{\pm}, CG_k^{\pm}, IM_{km}^{\pm}, EM_{kl}^{\pm}, SC_k^{\pm}, AFD_{jkn}^{\pm} \geq 0, \forall s, j, k, l, m, n$$

$f^{\pm}$  表示预期的系统成本规划周期 (¥ 106)。

本研究将模糊可能性规划与区间规划相结合，综合两种方法的优点，建立了深圳市资源环境系统管理模型，可以得到一系列的解决方案。其结果（如决策变量和目标函数值）包含区间或模糊信息。不同的确定性程度下可以得到不同的方案。

### 大气污染控制

石油精炼和传统的火力发电技术，如燃煤发电，是空气污染的主要来源。PM<sub>10</sub>、SO<sub>2</sub>和NO<sub>2</sub>是这些过程产生的主要污染物类型，它们是公认的对人体健康和大气环境有害的因素。政府已经制定了相关的法规来限制能源加工和转换排放的空气污染物。例如，先后颁布了《深圳主要污染物排放总量控制计划》、《深圳主要污染物排放总量减排实施计划》和《深圳粉尘污染防治措施》等以控制污染物排放总量。在这些政策规章中，对不同的空气污染物的减排目标进行了严格规范。在图2中，在情景1下，3种空气污染物将呈现出稳定的下降趋势，这将归因于煤炭消耗量的减少、液化天然气的清洁度以及排放政策的实施。不考虑温室气体减排，二氧化碳的排放量在规划时间内将增加，从 [116.3, 129.2]×10<sup>6</sup>吨到时期2的 [130.73, 145.03]×10<sup>6</sup>吨，再到时期3的 [146.82, 160.53]×10<sup>6</sup>吨。这主要归因于石油提炼过程、燃煤发电和能源终端使用带来的碳排放和污染物的产生。因此，应着力提高能源转化效率来减少能源消耗，通过研发

并运用先进的一些环保技术，在低碳模式下满足城市的能源需求。在情景 2 下，对大气污染物和 CO<sub>2</sub> 的排放限制比较宽松，系统成本相应下降，但是环境负担随之加重。

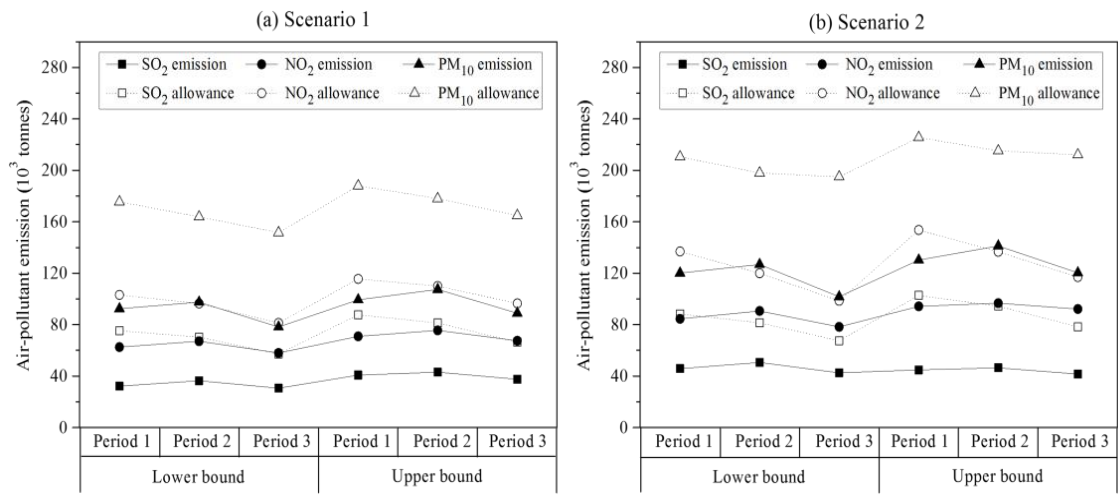


图 2 两种情景模式下的大气污染物减排方案

### 不确定性分析

表 1 两种情景下不同  $\alpha$  水平的原油购买方案，图 3 和图 4 分别显示了在两种情景模式下，多个  $\alpha$  水平的原油购买量、进口电力情况和系统成本情况。决策者在满足资源及电力的供需水平约束（供应不小于需求）的必然性水平、电力进出口、设备扩容、系统成本和大气污染物的控制等方面，面临着满足优化解决方案的权衡与取舍。公式 16d-16h 的  $\alpha$  水平代表了需求侧的系数。随着能源利用、设备容量和空气污染物排放标准的限制，能源供应将面临更高的挑战 and 风险。 $\alpha = 0.8$ ，表示能源供应大于需求的确定性水平以及电力供应大于需求的水平都不低于 0.8。其中电力供应包含了电力进口和电力出口情况，由此可知， $\alpha$  水平在一定程度上反应了确定性程度和决策者的对违约风险的态度。

由于对污染物排放量和碳排放的限值降低了标准，情景 2 模式下，原油购买量高于情景 1，而进口的电量低于情景 1 模式，情景 2 下的系统成本高于情景 1 的成本。很显然一点是，当必然性程度越高时，供需平衡约束的违约风险就越低。此外，原油和电力的外购量越大，排放的污染物总量越大，系统的总成本也越高，对原油和进口电力的高度依赖性将使得能源系统面临更高的供给需求违约风险。为了满足终端用户的



能源需求，并且从根源上减少大气污染物排放量，最有效的方法是实施基于液化天然气的石油替代战略，提高全市清洁能源的使用比例，并且在进一步安全发展核能的基础上，因地制宜地开发使用可再生能源。此外，深入分析供需平衡的系统违约风险、电力供应安全 and 经济目标之间的矛盾，将有助于得到能源系统的更优方案。

表 1 两种情景下不同  $\alpha$  水平的原油购买方案

$\alpha$ 水平	情景	时期 1	时期 2	时期 3
0.6	1	[511.32, 519.75]	[513.35, 520.21]	[514.77, 521.75]
	2	[515.25, 523.46]	[517.42, 524.37]	[517.59, 524.78]
0.7	1	[514.29, 522.76]	[516.73, 523.72]	[517.90, 525.04]
	2	[518.57, 527.42]	[520.38, 527.63]	[521.33, 529.81]
0.8	1	[517.38, 525.69]	[520.00, 527.37]	[521.04, 528.40]
	2	[522.00, 530.12]	[524.35, 531.60]	[525.04, 532.38]
0.9	1	[520.36, 528.71]	[523.27, 531.04]	[524.26, 531.66]
	2	[525.63, 533.90]	[528.52, 537.13]	[528.27, 535.92]
1	1	[523.34, 531.73]	[526.65, 534.62]	[527.39, 534.98]
	2	[529.28, 537.26]	[532.19, 540.16]	[533.61, 540.00]

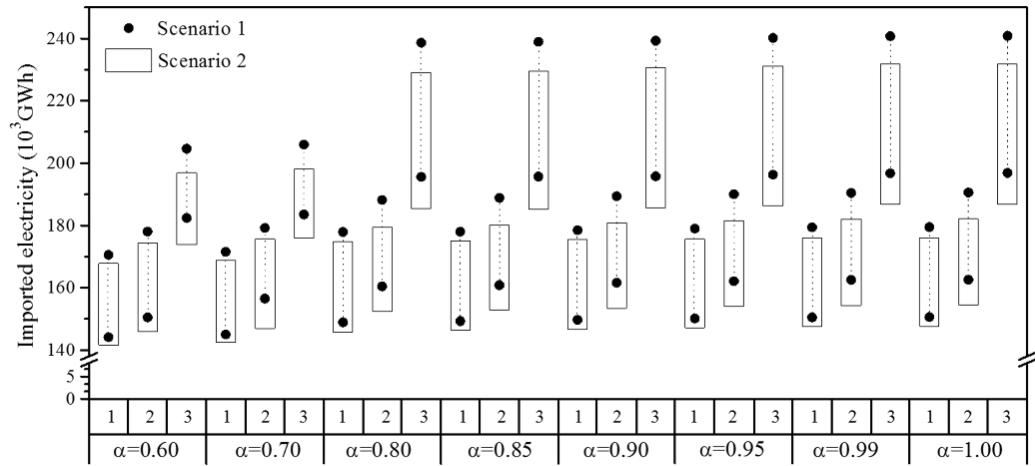
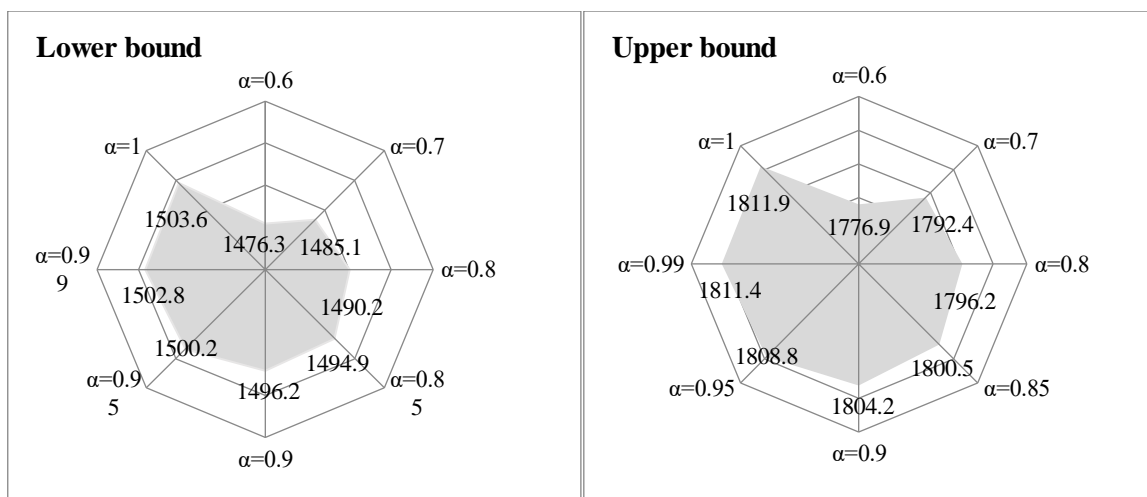


图 3 两种情景不同  $\alpha$  水平下的进口电量

情景 1:



情景 2:

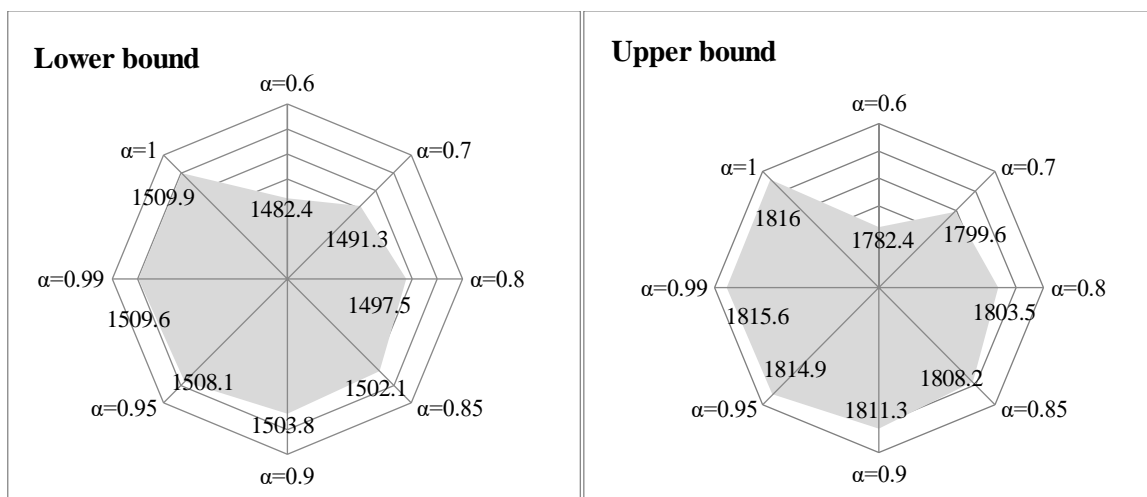


图 4 两种情景不同  $\alpha$  水平下的系统成本

### 清洁能源扩容方案

当由于装机容量不足使得发电量过低时，电厂将进行设备扩容，以满足当地终端用户的用电需求。图 5 展示了规划期间的优化扩展方案，情景 1 模式下，3 个液化天然气发电厂和 4 个垃圾焚烧厂将在时期 1 扩容。在时期 2，液化天然气发电厂中，宝昌电厂和钰湖电厂将分别扩容至  $[0.75, 0.95]$  GW 和  $[1.05, 1.35]$  GW。对于垃圾焚烧发电厂，只有龙岗发电厂有扩容计划。在时期 3，南山和福华德电厂也将扩容，两者的总装机容量将达到  $[2.25, 2.53]$  GW。在情景 2 下，和情景 1 不同的地方主要有，南山液化天然气电厂和深圳市政环卫处理厂将在时期 2 有扩容计划，而盐田垃圾焚烧发电厂不再扩

容。总结来说，设备扩容将受到一些因素的限制，比如燃料的可获取度、土地资源、经济可行性和环境影响等。此外，由于政府近年来实施煤炭消费控制政策，燃煤电厂将逐渐减少扩容。

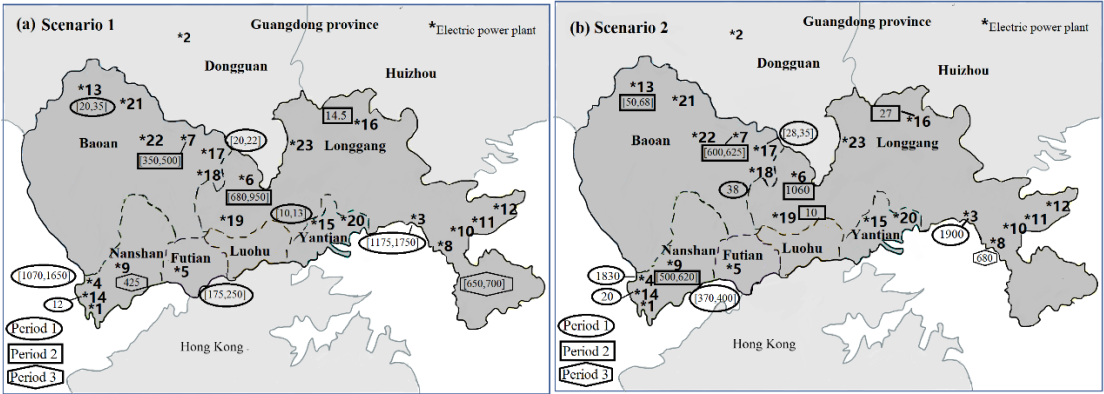


图 5 两种情景下的扩容方案