

## 广佛肇经济圈风险调控规划

广佛肇经济圈由广州市、佛山市和肇庆市三个山水相连的城市组成，由“广佛同城化”催生的“广佛肇”一体化经济圈开创了广东经济发展的新实践，该经济圈总占地面积约为 26232.1 平方公里，人口总数约为 2400 万人（2018 年末）。经过“十三五”时期的建设和发展，广佛肇经济圈产业发展转型升级取得显著成效，形成综合经济实力强大、空间布局合理、能源协调互补、基础设施联网、产业联动发展、社会事业发达、公共服务均等、城乡环境优美、人民生活幸福的优质生活圈。但在其加快实现一体化的过程中，经济发展与自然形成的地理环境之间仍然产生了诸多问题，例如：三地在资源、环境等方面存在较大差异，广州、佛山的经济发展程度高于肇庆，但各项自然资源都显得日渐匮乏，肇庆的自然资源丰富，但经济发展程度却落后于广佛两地。具体而言，（i）社会经济方面：2019 年，广州的 GDP 总量是佛山的 2 倍、肇庆的 10 倍；就三地的产业结构来看，广州主要是以第三产业为主，佛山的第二产业发达，肇庆在这三年中的产业结构变化较大。在珠三角一体化的大背景下，广佛以各自独特的产业优势带动肇庆快速发展。（ii）生态环境方面：广佛肇三市共同面临的环境问题主要包括水环境污染（三市跨界河流水污染）、大气污染（三市跨界大气污染、区域大气污染）和区域生态安全的维护等。广州市能源消费中化石能源比重偏高，资源丰富的可再生能源比偏低；本地能源主要生产二次能源，能源消耗以柴油和火电为主。佛山市主要以一次能源为主，可再生能源利用量偏低。两市温室气体排放量大，大气污染严重，但节能减排方面的法规、政策和制度不够健全、严密，制约了管理工作到位；一些重点行业节能减排技术的研发和推广力度不够，影响节能减排人物的落实。

通过将混合整数线性规划方法、区间规划方法、随机机会约束规划方法和分数规划整合到一个能源系统框架中，可以处理表现为区间数、概率分布的不确定性，提高结果的可信度。分式规划可以在保证实现最小化系统总成本的经济需求的同时，最大化环境收益。将其首次应用到广佛肇都市圈的不确定性资源-环境规划中，可以反映研究区域内现有环境系统的缺陷及未来可实现的资源配置的可能性，实现经济效益的同时最大化环境利益，并为系统中的不确定性的解决方式提供了一种新的方法。

广佛肇都市圈资源能源规划的双目标机会约束分式规划（CDFP）模型应用方法如下：

$$\text{Max } h_{(x_1^*, x_2^*, \dots, x_n^*, \gamma)}^{\pm} = \sum_{j=1}^p c_j^{\pm} x_j^{*\pm} + \sum_{j=p+1}^n c_j^{\pm} y_j^{*\pm} + \alpha^{\pm} \cdot \gamma$$

约束为：

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

$$\sum_{j=1}^p d_j^{\pm} x_j^{*\pm} + \sum_{j=p+1}^n d_j^{\pm} y_j^{*\pm} + \beta^{\pm} \cdot \gamma = 1,$$

$$x_j^{*\pm} \geq 0, \quad j=1, 2, \dots, p \quad (p < n)$$

$$y_j^{*\pm} = y_j^{\pm} \cdot \gamma, \quad j=p+1, p+2, \dots, n$$

$$y_j \geq 0 \text{ and } y_j = \text{integer variable}, \quad j=p+1, p+2, \dots, n$$

$$\gamma \geq 0$$

其中  $t \in T$ ,  $b_i(t)$  是在约束  $i$  上定义的概率空间  $T$  右侧随机参数,  $p_i$  (介于 0 和 1 之间) 是约束  $i$  的给定概率水平 (即约束违反水平的容许风险)。

根据机会约束规划 (CCP) 模型, 如果左侧系数  $[a_{ij}]$  是确定性的并且右侧系数  $[b_i(t)]$  是随机的 (对于所有  $p_i$  值), 则可以将约束  $\Pr[\sum_{j=1}^n a_{ij} x_j \leq b_i(t)] \geq 1 - p_i$  转换为:

$$\sum_{j=1}^n a_{ij} x_j \leq b_i(t)^{p_i}$$

其中  $b_i(t)^{p_i} = F_i^{-1}(p_i)$ , 给出  $b_i$  [i.e.  $F_i(b_i)$ ] 的累积分布函数及约束  $i$  违反水平的可能性 ( $p_i$ )。

通过结合 CCP 模型和区间线性规划 (ILP) 模型, 将 CDFP 模型转换为确定性版本, 可以通过以下方式使用 CCP 模型来解决不确定性: (i) 对约束  $i$  确定一定水平的概率  $p_i$  ( $p_i \in [0,1]$ );

(ii) 确保约束应至少满足  $1-p_i$  的概率水平。具体来说, CDFP 模型的解决过程可以总结如下:

步骤 1: 构建初始 CDFP 模型。

步骤 2: 将 CDFP 模型转换为双目标机会约束分式规划区域能源模型 (CDFP-REM) 模型。

步骤 3: 给出各种系数和参数的上限和下限, 为模型确定  $Max h^+$ 、 $Max h^-$ 、 $Max l^+$  及  $Max l^-$ 。

步骤 4: 获得  $x_j^*$  ( $j=1, 2, \dots, p$ )、 $y_j$  ( $j=p+1, p+2, \dots, n$ ) 和  $\gamma$  的解。

步骤 5: 计算  $x_j : x_j = x_j^* / \gamma$  ( $\forall j$ ) 的解。

步骤 6: 对约束  $i$  定义一个可接受的约束违约风险水平 ( $p_i$ ), 通过将随机约束转换为确定性约束, 得到确定性模型。

步骤 7: 将不同  $p$  级别的能源、电力需求值引入上述确定性子模型中。

步骤 8: 求解每个 CDFP-REM 子模型, 获得全局最优解。

步骤 9: 在广州、佛山、肇庆重复步骤 3 到 8, 即可得到所有结果。

步骤 10: 分析结果并为决策者提供最佳案例。

在广佛肇经济圈的资源能源系统规划中, 目标函数主要考虑的是各种成本 (例如污染物排放成本以及生态林经济补偿成本等), 约束主要考虑污染物排放约束、森林面积约束、扩容约束、物料约束以及能源可用性约束等。通过对以上模型求解, 本部分从生态用地面积、资源能

源供应、清洁电力供应和清洁电力扩容结果等四个方面对广佛肇地区优化管理结果进行总结，并得到最适合多区域生态安全保护的风险管理模型。

①生态用地面积

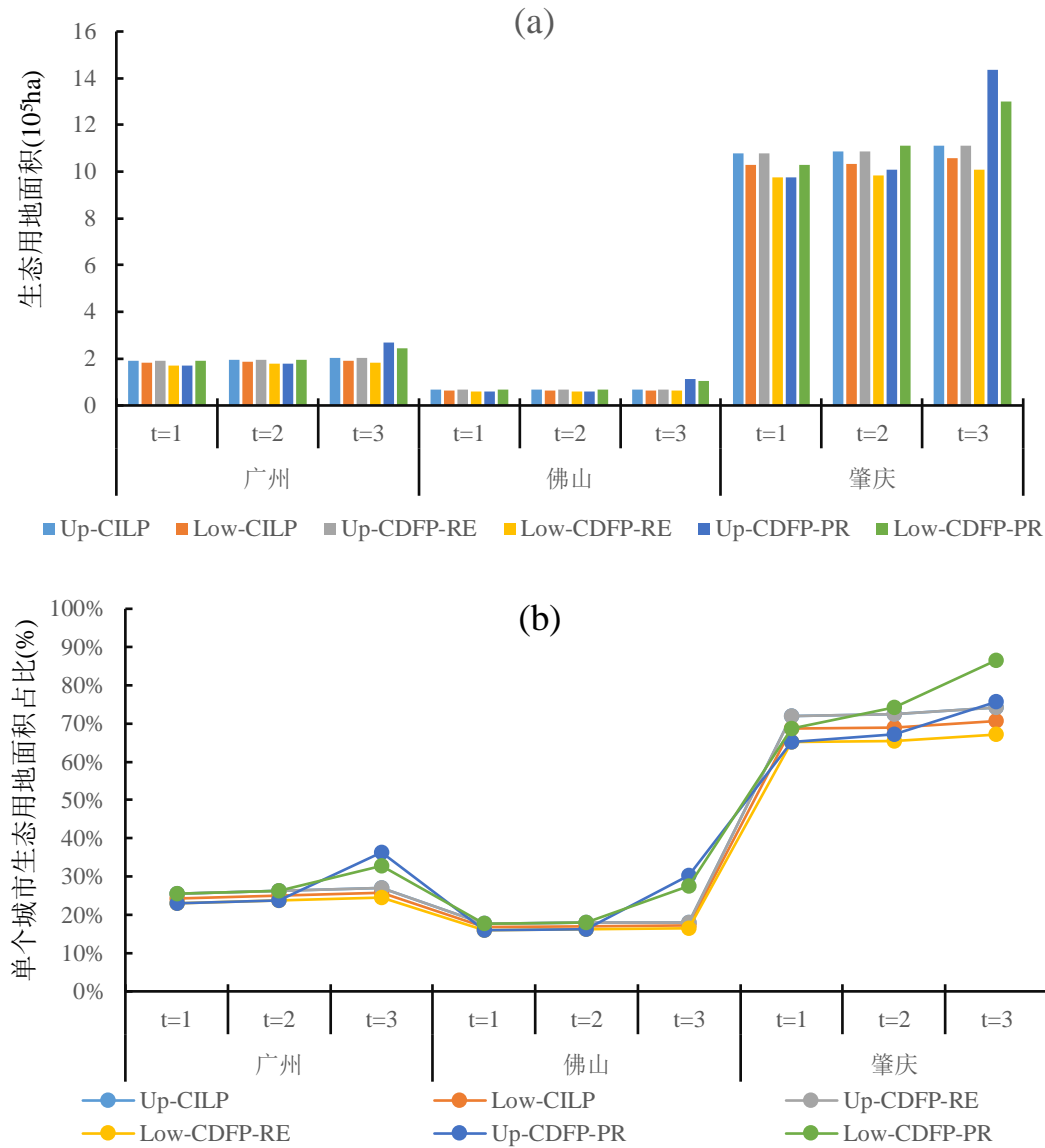


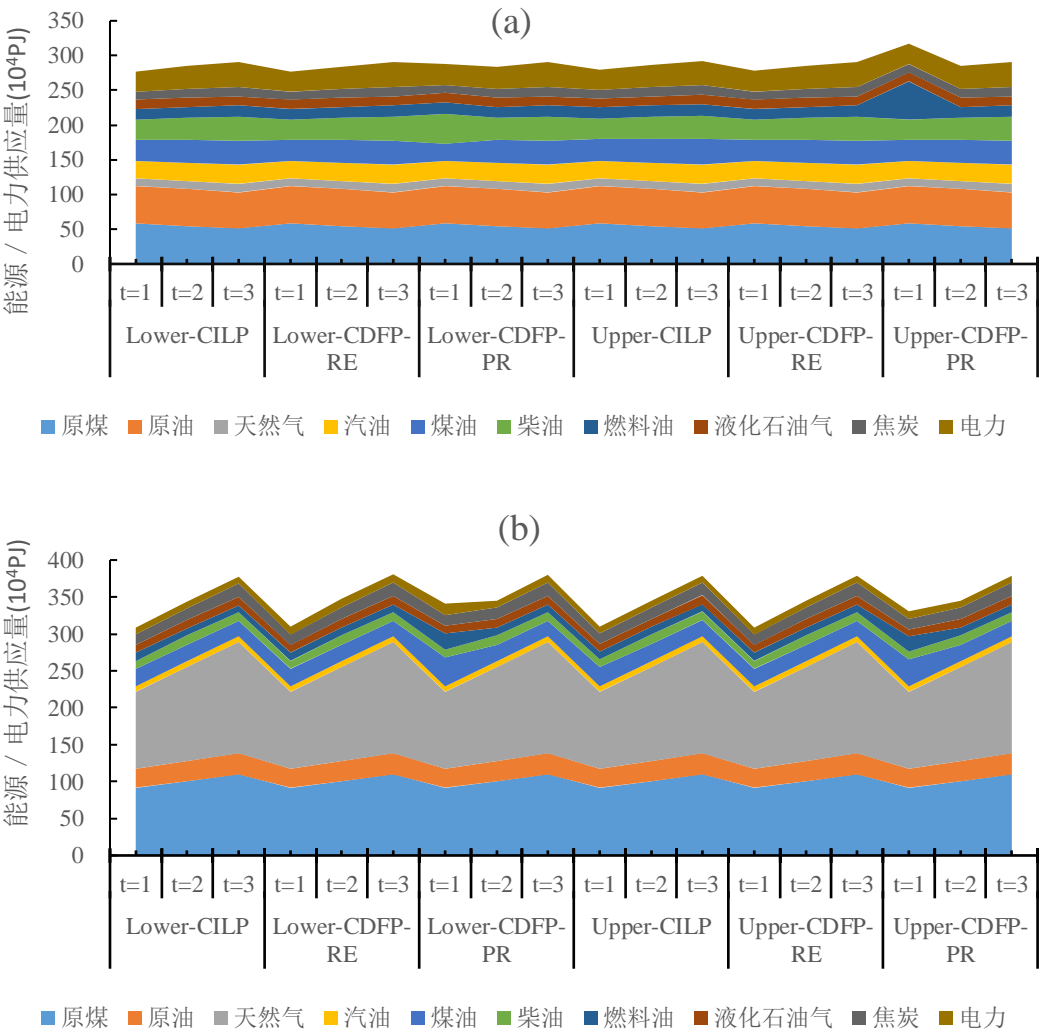
图 1 三个城市的生态用地面积 (a) 及单个城市生态用地面积占总面积比例 (b)

图 1 显示了三个城市的生态用地面积以及每个城市的生态用地面积占总面积的比例。可以发现，生态用地面积的总体呈现增加的趋势，这是由“十三五”规划中提出的改善生态环境的要求所致。为实现 CDFP-PR（目标函数为最大化单位系统成本大气污染物减排量）模型的目标，系统将显著减少  $\text{CO}_2$  排放量，并最大化  $\text{CO}_2$  汇入本地的能力。因此，CDFP-PR 模型在广州、佛山和肇庆的生态用地面积将增加到  $[2.44, 2.70]$ ,  $[1.04, 1.15]$ ,  $[12.99, 14.35] \times 10^5$  公顷。  $\text{SO}_2$ ,

NO<sub>x</sub>, PM 和 CO<sub>2</sub> 的生态土地平均吸收率分别为 0.02、0.09、0.13 和 7.82 吨/公顷。此外, 生态土地利用区还可以带来  $0.08 \times 10^3$  元/公顷的利润, 为生态价值做出贡献。

就生态用地面积占城市总面积比例而言, 肇庆市占比增长最为明显, 将从第一时期的 [65.16, 68.58] % 增加到第三时期的 [75.69, 86.58] %, 而广州、佛山的占比增长量仅分别为 [23.12, 25.55] % 增至 [32.80, 36.26] % 和 [15.99, 17.67] % 增至 [27.42, 30.36] %。原因在于肇庆市的土地面积最大, 但常住人口最少, 经济发展相对较慢, 有许多未利用的土地可供生态土地使用。这些生态土地利用面积可以帮助有效减少工业产生的污染。另外, 其城市发展越来越慢, 工业化相对落后, 排放的污染物被生态土地所吸收, 生态净化能力已超过其需求。因此, 有必要对能源相关活动进行统一规划, 这将有助于将污染物适当地将排放信用额密集的广州和佛山转移到污染较轻的肇庆, 可以充分利用肇庆市生态土地的净化能力, 实现整个区域经济与环境的协调发展。

②资源能源供应



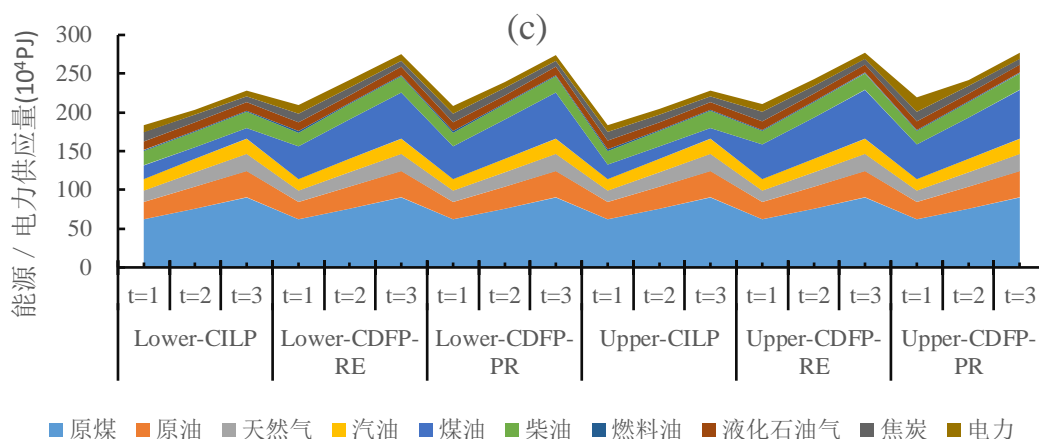


图 2 规划区域 (a) 广州、(b) 佛山、(c) 肇庆的资源能源供应方案

资源能源供应输出如图 2 所示。该地区三个城市的能源供应仍主要由一次能源（例如原煤和原油）主导，但城市之间的能源供应多种多样。广州的原煤供应量将从第一时期的 $[5.79, 5.88] \times 10^5$  降至第三时期的 $[5.05, 5.13] \times 10^5$  PJ。这是由于为了减少燃煤发电造成的城市污染，许多大型燃煤电厂被关闭或更换。作为国际大都市，广州的电力需求量很大，将从 $[2.85, 2.89] \times 10^5$  增加到 $[3.46, 3.47] \times 10^5$  GWh。作为工业化城市，佛山比其他两个城市使用更多的煤炭和天然气。作为一个相对欠发达的城市开发区，肇庆的能源需求量低于广州和佛山，但仍呈逐年上升的趋势。从图 2 还可看出，CDFP 模型给出的两种方案的供应量均大于普通线性规划模型（CILP）给出的两种方案的供应量。三种模型之间的能源供应差异是由它们在可再生能源和常规发电技术上的差异造成的，即发电，传输和供应量的差异。

图 2 表明三个城市的能源供应存在很大差异。广州对原油和电力三个时期的需求量远高于其他两个城市。这主要是因为广州是经济发展最快的城市，对原油产品的需求大，需要大量生产的精炼石油产品来满足其需求。此外，作为国际大都市，大规模生产和生活活动依赖电力，因此广州的电力供应远远超过其他两个城市。在佛山，原煤和天然气需求量很大，而有限的本地低产量将降低其使用量，这将大大增加佛山能源供应的不稳定性。作为一个相对较慢的城市，肇庆的能源需求较低，其自然储备的原油、汽油、煤油可供出口。由于整个研究区域的能源需求各不相同，因此有必要对这种不平衡区域进行统一规划。这三个城市生产的能源可以根据需求和供应的差异进行均匀分配，从而可以最大程度地利用能源并提高供应的可靠性，避免浪费过多的电力和能源，促进长期可持续发展。

### ③清洁电力供应

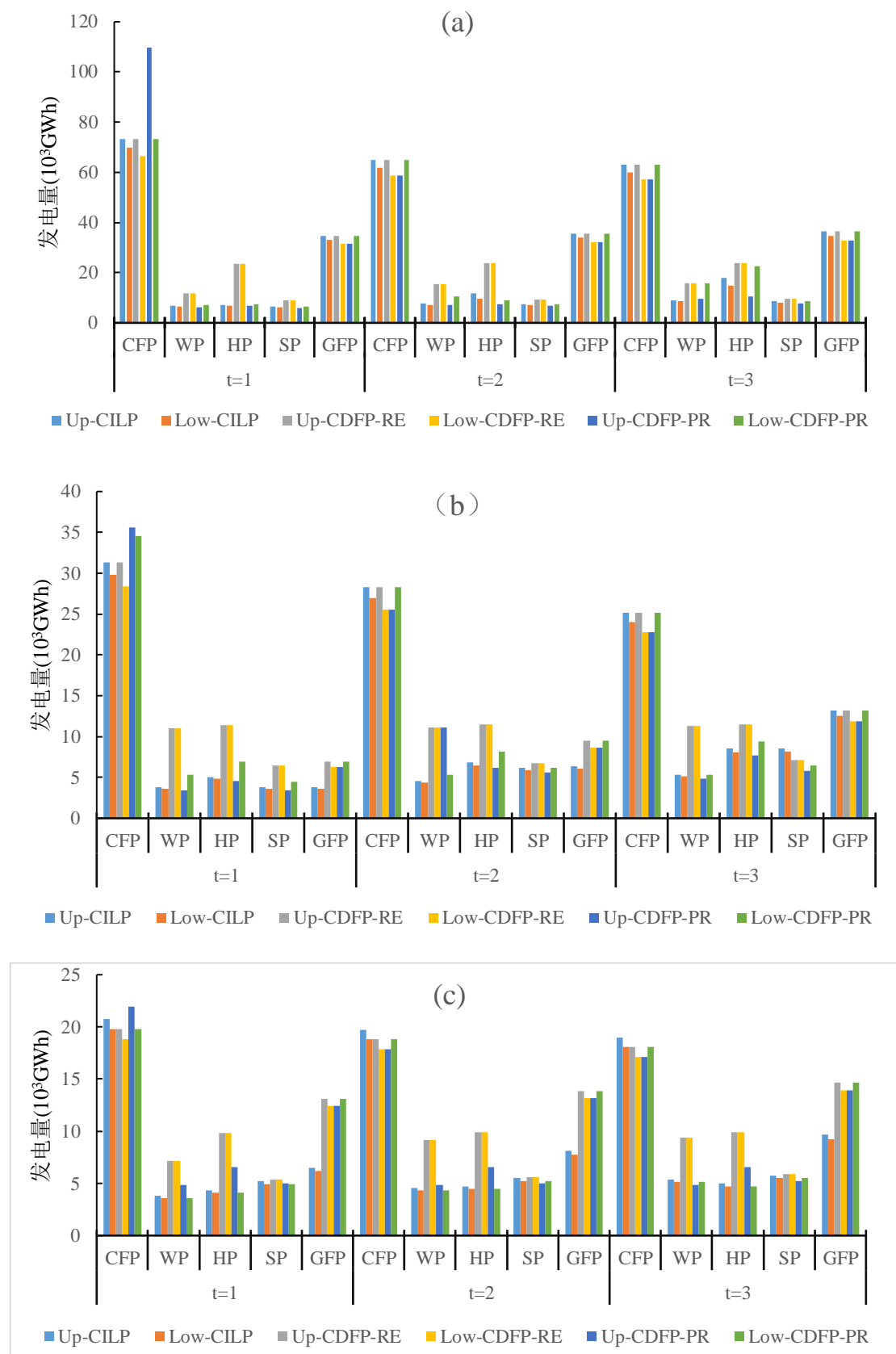


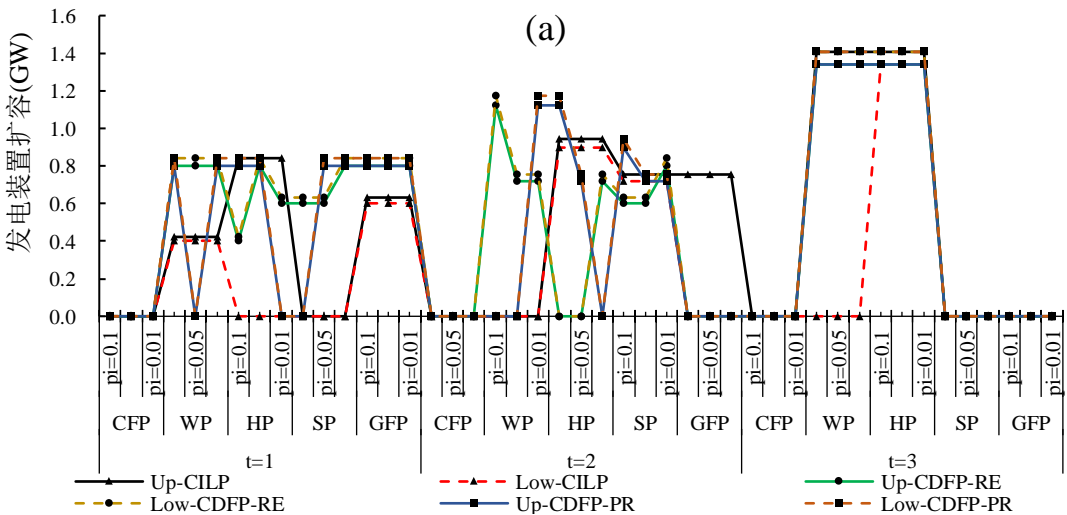
图 3 规划区域 (a) 广州、(b) 佛山、(c) 肇庆的电力供应结果

图 3 显示了三个城市的发电结果，CFP 代表燃煤发电，WP 代表风力发电，HP 代表水力发电，SP 代表太阳能发电，GFP 代表燃气发电。总体趋势显示，燃煤发电将逐渐减少，风能、水力和其他清洁能源发电所占比例不断增加，这是减少煤炭消耗以控制广佛肇地区乃至整个珠江三角洲地区严重酸雨问题的结果。

在可再生能源发电方面，通过与 CILP 模型进行比较可以证明 CDFP 模型的优势。三个城市的可再生能源发电量都将增加，但 CDFP 模型中获得的可再生能源发电量要高于 CILP 模型中的发电量。以佛山的太阳能发电为例，CILP 模型中的太阳能发电量将从 $[3.63, 3.81] \times 10^3$  GWh 增加到 $[8.13, 8.53] \times 10^3$  GWh。CDFP-RE（目标函数为最大化单位系统成本可再生能源发电量）模型显示的太阳能发电量比 CILP 模型中的高得多，将从 $[5.99, 6.44] \times 10^3$  GWh 增加到 $[7.00, 7.12] \times 10^3$  GWh。佛山大量增加的太阳能发电量符合当地鼓励发展太阳能发电的政策。为了迅速提高分布式太阳能发电应用规模，地方政府制定了奖励和补贴太阳能发电投资的政策，这成为其发展的强大动力。在广佛肇地区清洁能源蓬勃发展的背景下，CDFP 模型的结果更符合当前的需求。

从图 3 还可以看出，这三个城市的可再生能源发电比例差异很大，在规划期末，广州为 33.12%，佛山为 43.77%，肇庆为 43.56%。佛山和肇庆可再生能源发电比重更大。尽管可再生能源为电力需求提供动力，但可再生能源受季节和天气影响大，这极大地增加了电力供应的不稳定性。因此，有必要对其进行区域规划。例如，在冬季、傍晚等高峰时段，可再生能源的发电受到限制。佛山市和肇庆市可能会出现电力短缺和供应不足的情况，可以从以传统技术发电为主的广州转移电力。在白天，可再生能源发电量较高时，佛山和肇庆可以为广州提供电力需求。因此，实现区域统一规划，避免负荷不满足，对于实现稳定的、成本小的供电非常有必要，对于均衡供电具有重要意义。

#### ④清洁电力扩容结果



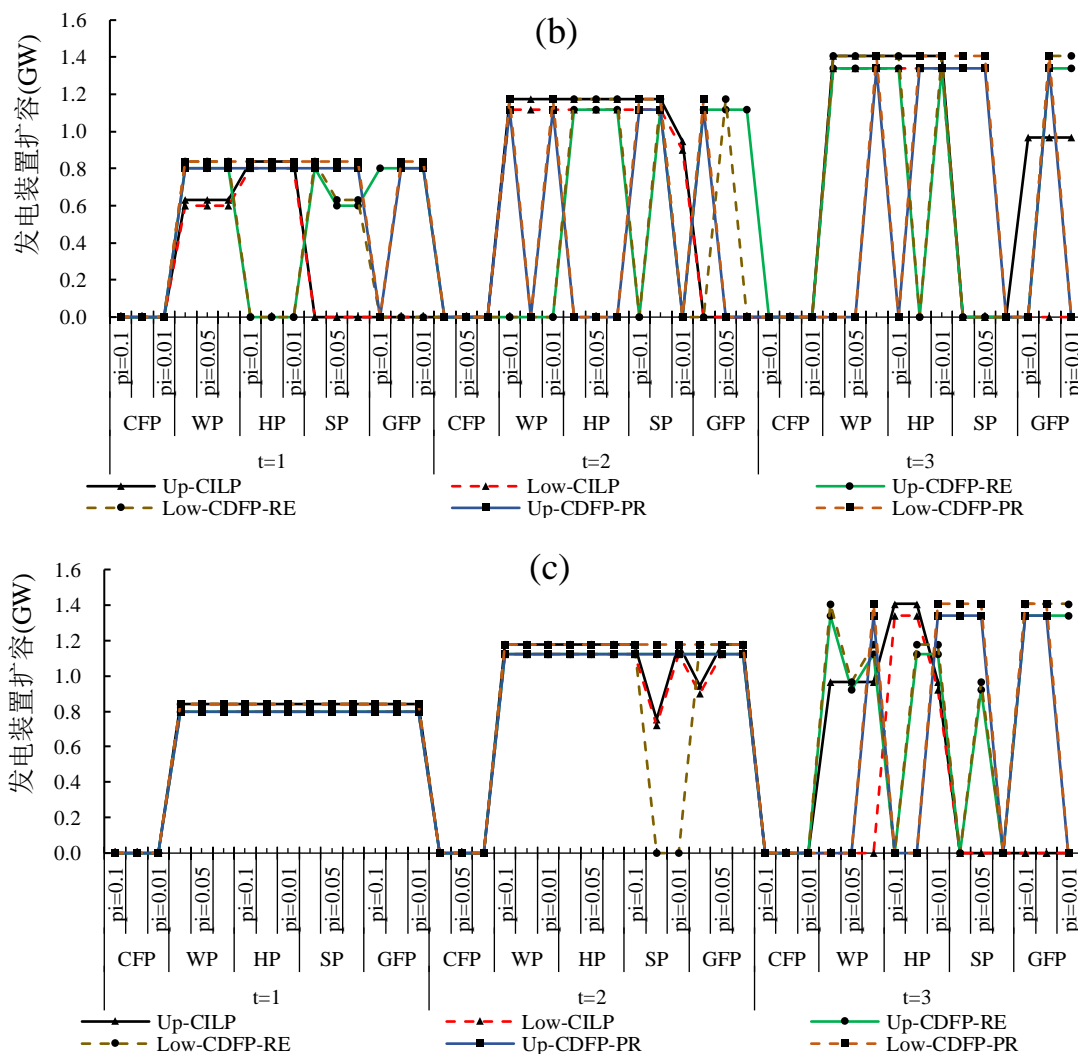


图 4 规划区域 (a) 广州、(b) 佛山、(c) 肇庆的发电装置扩容结果

图 4 显示了发电装置扩容结果。装机容量将直接影响发电量。目前低碳减排政策严格控制煤炭的使用。因此，燃煤发电装置扩容结果为 0。可再生能源的装机容量将在一定程度上扩大，并呈逐年增加的趋势。与 CILP 模型相比，CDFP 模型显示出更高的可再生能源发电装置扩容结果。该结果与当前促进新能源发展及能源改革的趋势相吻合。此外，广佛肇地区风能和太阳能资源丰富，扩大装机容量有利于提高清洁能源的使用量，从而减少其他主要能源的使用量，有助于环境保护。Error! Reference source not found.显示了不同发电类型、不同城市的扩容趋势。广佛肇地区减少燃煤发电比例和大力发展清洁能源，积极响应低碳减排政策。以肇庆第一时期为例，该市地域辽阔，风能、水能等自然资源丰富，因此，大力扩大清洁能源（风电、水力和太阳能发电）的装机容量，表明肇庆不断减少一次能源的比例、扩大清洁能源的使用及积极改善能源和发电结构的决心，这对环境保护和节约能源有积极作用。



综上，对于多城市广佛肇而言，CDFP-RE 模型更符合当前可持续发展和能源体系改革的需求。虽然短期成本较大，但长期收益大，这是一种有效且协调的长期发展计划模型，可帮助实现清洁生产、经济发展和环境保护的协调发展。