
基于 Copula 分析的能源-生态联动关系复杂性的定量分析技术

能源-环境联动关系是体现珠三角城市群复合生态系统复杂性的重要部分。一方面，能源资源和环境产物分别是城市生态系统输入与输出行为的重要表征，充足的能源供应是构建城市生态系统的重要保障，而能源加工与转换带来的一系列环境问题又会制约城市生态系统的可持续发展，这种相互矛盾的发展关系增加了城市生态系统的复杂性。另一方面，城市群多目标的协同发展和内部的多层次互动关系，以及生态系统参数的不确定性也增加了多层式城市群复合生态系统的复杂性。针对城市群复合生态系统的复杂特征，有必要开发出一种涵盖数据收集、参数互动、多目标协同及多层级交互等多个角度的技术方法，以定量分析城市群复合生态系统的复杂特征。

珠江三角洲城市群地处广东省中南部，由广佛肇经济圈、深莞惠经济圈和珠中江经济圈组成。2018 年珠三角地区行政面积和人口数量分别达到 54952 平方公里和 6301 万。自 1978 年改革开放以来，珠三角地区经济发展突飞猛进，以 0.4% 的陆域面积贡献了全国经济总量的 9%。经济的快速发展加剧了能源和水资源的消耗。其中，广佛肇、深莞惠和珠中江经济圈在 2012 年至 2019 年间的电力消费增量分别达到了 556.56×10^3 GWh， 703.91×10^3 GWh 和 274.56×10^3 GWh，相应的发电耗水增量分别为 138×10^6 m³， 45×10^6 m³ 和 167×10^6 m³。另外，火电在珠三角地区发电调度中仍然占据主导地位，其在三大经济圈的比重分别达到了 74.07%，57.82% 和 73.85%。化石燃料在大量燃烧过程中带来的一系列资源环境问题，严重制约了珠三角地区的可持续发展，使得经济发展和环境保护之间的矛盾日益凸显。珠三角环境保护一体化规划明确指出，三大经济圈应加强联动合作，建立跨界水污染和区域大气污染联防联控机制。珠三角地区能源结构调整与环境污染治理的联动以及三大经济圈间的多层次互动关系进一步增加了珠三角城市群复合生态系统的复杂性。

因此，为定量揭示珠三角城市群复合生态系统中能源-环境联动关系的复杂性，本研究基于协同博弈论与生命周期理论，采用偏好序列组织法、消去与选择转换法、逼近理想解排序法，同时将 Copula 函数引入两阶段联合概率分析模

型，开发了不确定性 Coupla 随机分析技术，从而有效地解决耦合模型约束中随机变量间的非线性互动性。其一般表达式为：

目标函数：

$$\text{Maximize: } f^{\pm} = \sum_{j=1}^n c_j^{\pm} x_j^{\pm} - \sum_{j=1}^n d_j^{\pm} \left(\sum_{i=1}^m p_i y_{ij}^{\pm} \right) - \sum_{t=1}^T e_t^{\pm} z_t$$

约束条件：

$$\sum_{j=1}^n a_{rj}^{\pm} x_j^{\pm} \leq b_r^{\pm}, \quad r=1,2,\dots,R$$

$$\sum_{j=1}^n \left(a_{kj}^{\pm} x_j^{\pm} + a'_{kij} y_{ij}^{\pm} \right) \geq \omega_{ki}^{\pm}, \quad i=1,2,\dots,m; \quad k=1,2,\dots,K$$

$$C \left(\sum_{j=1}^n \left(a_{sj}^{\pm} x_j^{\pm} + a'_{sij} y_{ij}^{\pm} \right) \leq b_s(t), \quad s=1,2,\dots,S' \right) \geq 1-P, \quad i=1,2,\dots,m$$

$$z_t = 0 \quad \text{or} \quad 1, \quad t=1,2,\dots,T$$

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

$$y_{ij}^{\pm} \geq 0, \quad j=1,2,\dots,n; \quad i=1,2,\dots,m$$

其中，联合概率约束 $C \left(\sum_{j=1}^n \left(a_{sj}^{\pm} x_j^{\pm} + a'_{sij} y_{ij}^{\pm} \right) \leq b_s(t), \quad s=1,2,\dots,S' \right) \geq 1-P$ 可基

于 Copula 函数转化为以下线性形式

$$\sum_{j=1}^n \left(a_{sj}^{\pm} x_j^{\pm} + a'_{sij} y_{ij}^{\pm} \right) \leq b_s(t)^{(p_s^0)}, \quad s=1,2,\dots,S' \quad i=1,2,\dots,m$$

$$C \left(F_s(b_1(t)) \cdot F_s(b_s(t)) \dots F_s(b_{S'}(t)) \right) \geq 1-P$$

式中， $b_s(t)$ 的累计分布函数可以表示为 $F_s(b_s(t))$ ，对应的设计违反约束的概率为 p_s^0 ，满足 $F_s(b_s(t)) = 1 - p_s^0$ 。这种方法也是将联合概率约束转化为一组线性约束，但是要求 Copula 函数构造的联合概率分布在每个线性约束的违反概率条件下（即 $F_s(b_s(t)) = 1 - p_s^0$ ($s=1,2,\dots,S'$) 满足给定的联合概率。

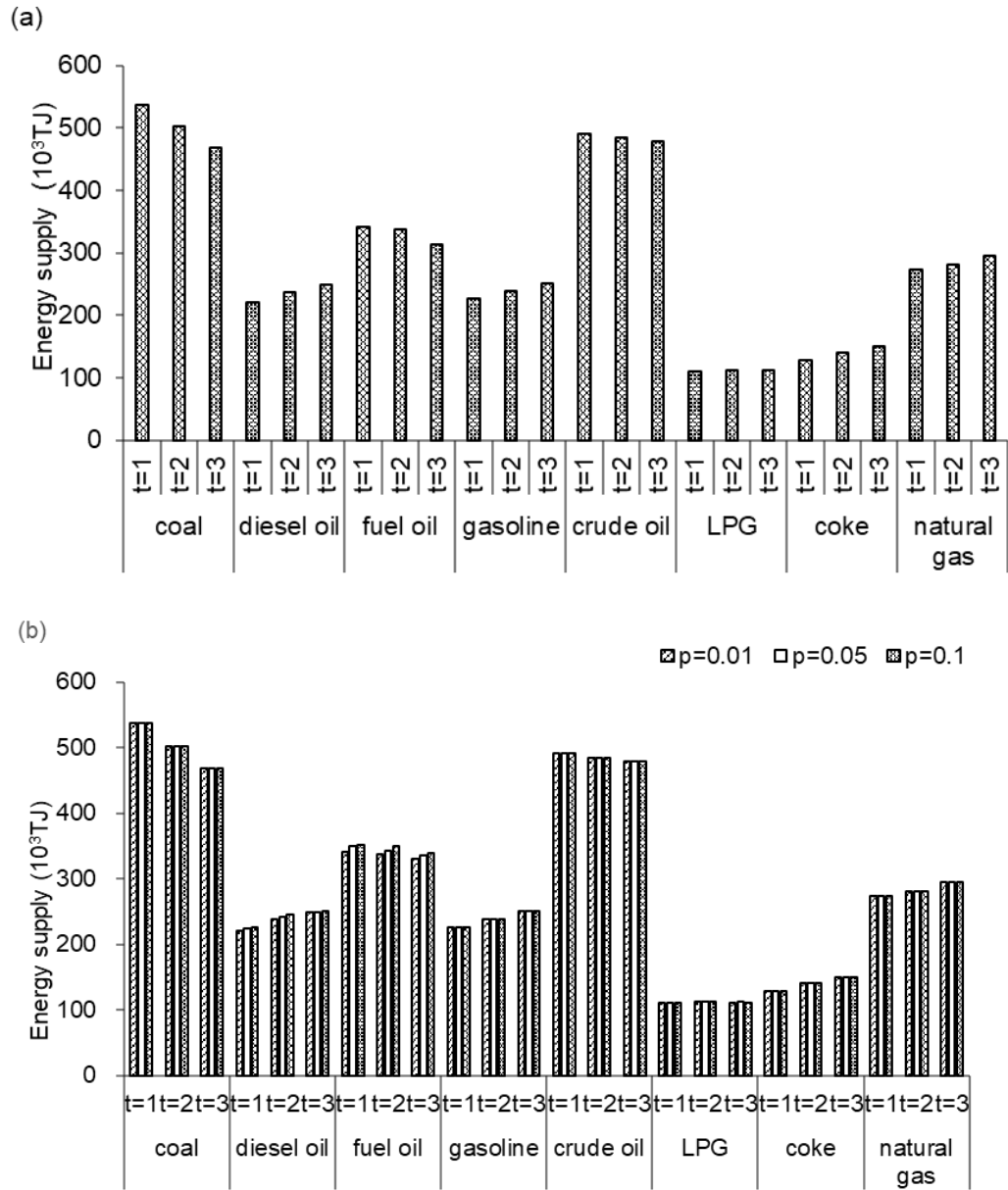


图 1 能源供应的解决方案 (a) 在不同的规划期间, (b) 在不同的 p 水平下

以广州为代表的单城市模型中, 图 1 给出了不同时期下的能源供应解决方案, 其中包括 8 种能源类型 (煤炭、柴油、燃料油、原油、液化石油气、焦炭和天然气) 的能源供应结果。研究表明, 除了煤炭和原油之外, 其他能源的供应都随着时间的推移而增加, 例如, 煤炭供应将从第一时期的 $536.59 \times 10^3 \text{ TJ}$ 减少为第三时期的 $469.03 \times 10^3 \text{ TJ}$, 这有可能是由于煤炭高污染排放的特点和污染物减排的要求相矛盾引起的。相反, 天然气的供应将从 $273.35 \times 10^3 \text{ TJ}$ 增加到 $294.59 \times 10^3 \text{ TJ}$, 这意味着天然气将成为未来的主要能源供应之一, 这样的增长可能是与

广州市政府提倡新能源汽车的使用以及广州市“十三五”规划对提高清洁能源消费比重的要求有关。

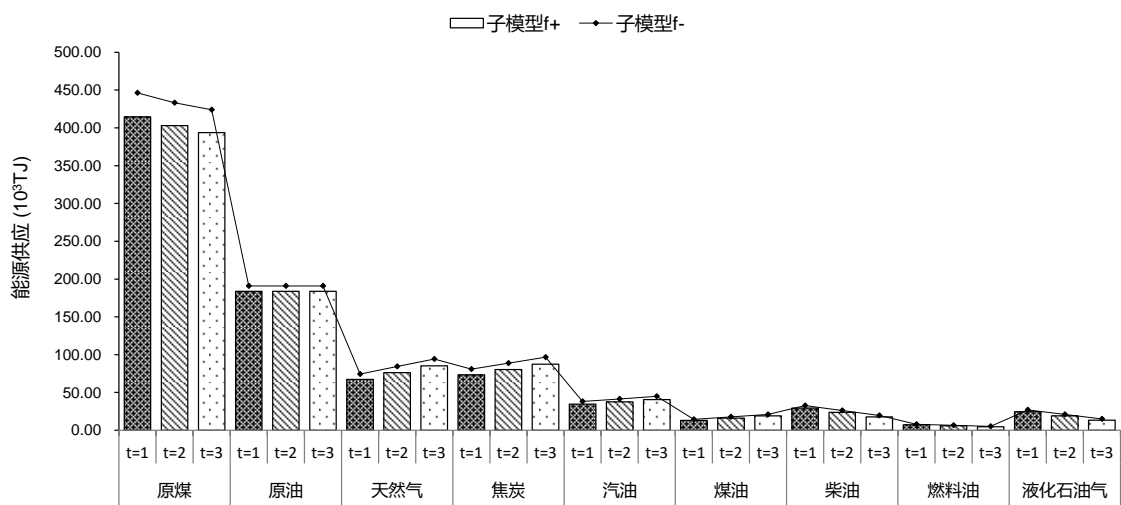


图 2 情景 1 下的珠海市能源供应规划

同时，本课题针对珠海开展了多情景下的资源管理研究。图 2 展示了情景 1（双目标模型）下珠海市在三个时期的最优能源供应规划方案。根据图中结果可知，珠海市的能源供应仍将以原煤为主，其供应量约占能源总供应量的 48%。然而，原煤消耗受到当地政府对污染物及 CO₂ 排放要求的限制以及可再生能源政策的影响，原煤供应将从第 1 个规划期的 $[414.35, 446.31] \times 10^3$ TJ 降至第 3 个规划期的 $[393.73, 424.04] \times 10^3$ TJ。相反地，由于天然气发电量逐年增加，天然气供应也将从第 1 个规划期的 $[67.25, 74.33] \times 10^3$ TJ 逐渐增加到第 3 个规划期的 $[85.36, 94.35] \times 10^3$ TJ，与原煤相比，天然气的开发利用有利于珠海市的环境保护及可持续发展。原油的供应主要是来自于炼油厂的需求，由于经过第 1 个规划期扩容后，珠海炼油厂已经能够满足当地各成品油的需求，因此第 2 个规划期和第 3 个规划期的原油需求相对稳定，保持在 $[183.92, 191.03] \times 10^3$ TJ。与此同时，焦炭，汽油和煤油的供应将逐渐增加以满足当地的终端需求。此外，由于珠海市正在积极推动新能源汽车的发展，计划用电力和其他能源替代非可再生能源，使得交通运输行业对能源需求的结构产生了变化，进一步导致柴油、燃料油和液化石油气的供应将有所下降，但是工业生产行业仍对其有一定的需求。总之，主要能源（煤炭和天然气）的规划结果符合珠海市未来规划对原煤利用限制负增长以及天然气有效开发利用的要求。

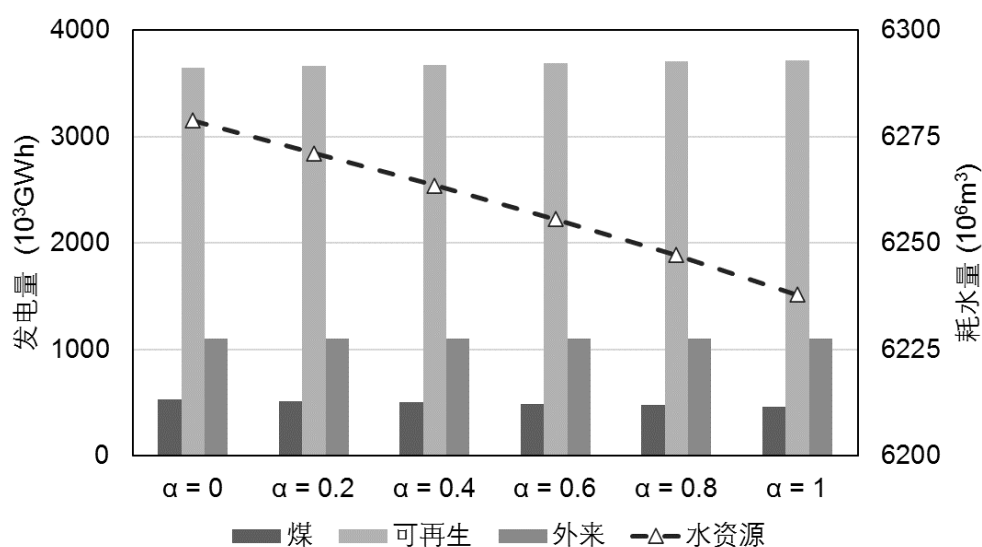


图 3 情景 2 下的珠海市能源供应规划

图 3 展示了情景 2（单目标模型）下的珠海市的能源供应方案，结果与情景 1 模式的能源供应方案趋势相似。但是，由于情景 2 侧重经济效益，模型的规划目标不同。考虑到燃煤发电成本较低，燃煤发电在情景 2 下的需求更多，三个时期的原煤供应量分别为 $[426.51, 463.71] \times 10^3$ TJ， $[415.31, 451.27] \times 10^3$ TJ， $[406.22, 442.56] \times 10^3$ TJ，要高于情景 1 模式中原煤供应量： $[414.35, 446.31] \times 10^3$ TJ， $[402.97, 433.28] \times 10^3$ TJ， $[393.73, 424.04] \times 10^3$ TJ。对于其他能源（例如汽油，柴油，LPG 等），其主要消费终端将是与电力生产无直接关系的交通运输和居民用户等部门。因此，两种情景模式下这些能源的规划方案无明显差异。

综合比较两种情景下的能源供应情况，主要差异在于原煤的供应。在情景 1 模式下，可再生能源开发利用程度较大，部分燃煤发电其被代替，因此对于原煤的需求更少。在情景 2 模式下，考虑到燃煤发电相比可再生能源发电价格更加便宜，因此，在满足环境政策限制的前提下优先利用燃煤发电，对于原煤的需求也更多。

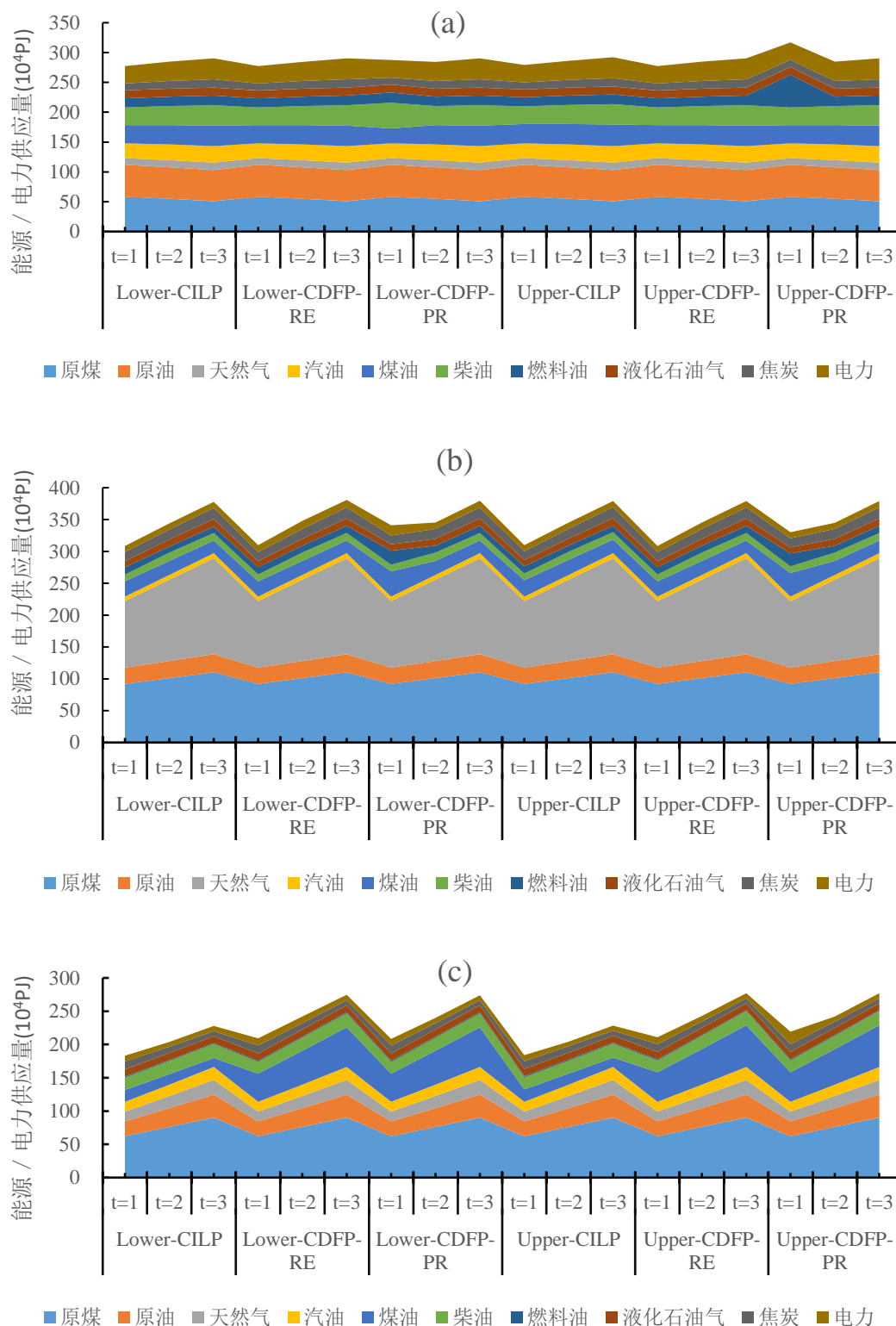


图 4 规划区域中（a）广州、（b）佛山、（c）肇庆的能源供应方案

针对广佛肇地区，能源供应仍由一次能源（例如原煤和原油）主导，但城市

之间的能源供应多种多样（详见图 4）。广州的原煤供应量将从第一时期的 $[5.79, 5.88] \times 10^5 \text{PJ}$ 降至第三时期的 $[5.05, 5.13] \times 10^5 \text{PJ}$ 。这是由于许多大型燃煤电厂被关闭或更换以减少燃煤发电造成的城市污染。作为经济发达的一线城市，广州的电力需求量保持高速增长，将从 $[2.85, 2.89] \times 10^5 \text{GWh}$ 增加到 $[3.46, 3.47] \times 10^5 \text{GWh}$ 。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，其供应量从 $[9.08, 9.13]$ ， $[10.29, 10.35] \times 10^5 \text{PJ}$ 上升到 $[10.89, 10.95]$ ， $[14.90, 14.94] \times 10^5 \text{PJ}$ 。作为一个经济相对欠发达的城市开发区，虽然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 **Error! Reference source not found.** 可，CDFP 模型中两种方案的供应量均大于 CILP 模型中两种方案的供应量。以第一时期供电量为例，通过 CDFP-RE 模型得到的广州、佛山、肇庆供电量结果分别为 $[29.22, 29.43]$ ， $[9.57, 11.07]$ ， $[10.26, 11.00] \times 10^4 \text{GWh}$ ；通过 CDFP-PR 模型得到的供电量分别为 $[29.22, 29.48]$ ， $[9.51, 15.07]$ ， $[10.04, 18.77] \times 10^4 \text{GWh}$ ；而通过 CILP 模型获得的数据为 $[29.12, 29.32]$ ， $[9.44, 9.47]$ ， $[8.75, 9.22] \times 10^4 \text{GWh}$ 。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。

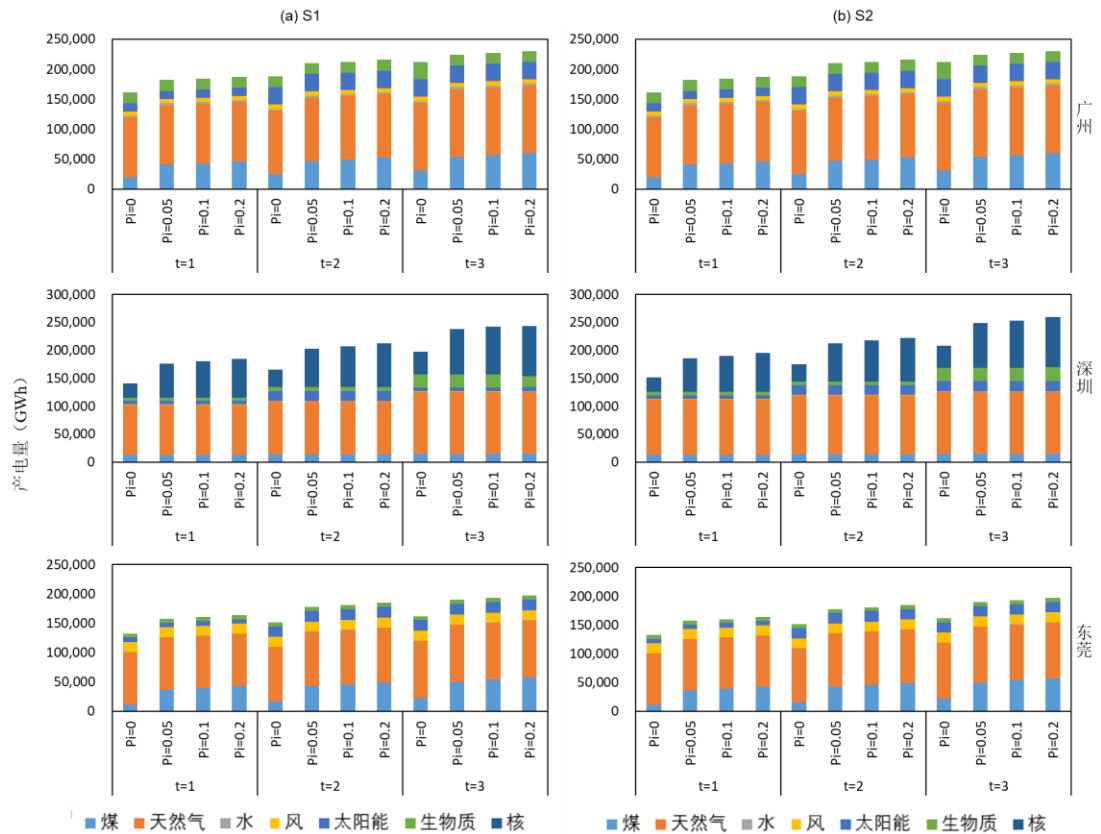


图 5 不同城市不同情景下不同 p_i 值的发电量

对于广深莞区域，随着电力需求的迅速增长，电力供应系统面临着电力不充足和不安全的风险，而水资源短缺严重加剧了这种风险。图 5 显示了在违反不同的水资源可用量约束（即 p_i 水平）下观察到的电力供应趋势。 $1 - p_i$ 表示相应的可用水资源的概率， p_i 水平表示违反水资源约束的概率。随着时间的推移，广深莞区域的发电量将逐年增加，从周期 1 的 $[429.7, 440.4] \times 10^3 \text{ GWh}$ 增加到周期 3 的 $[561.1, 575.1] \times 10^3 \text{ GWh}$ ，且没有违反水资源用量约束（ $p_i = 0$ ）。

在规划期间，（广深莞区域？还是每个城市？）的发电量随着每个城市的 p_i 值的增加而增加。例如，在第 1 时期 S1 情景下，当 p_i 从 0 增加到 0.2 时（该地区）的发电量从 $[429.7, 451.1] \times 10^3 \text{ GWh}$ 增加到 $[536.1, 562.9] \times 10^3 \text{ GWh}$ 。这是由于随着 p_i 值的增加，违背水资源可用量的风险也会增加，从而更多的水资源被用于发电。随着水资源可用量风险的增加，不同城市对于当地发电结构的调整方式也不同。一些耗水量大的发电设施的发电量（如煤电厂和核电厂）会随着 p_i 水平的增加而增加。对于广州和东莞，其发电量增加将主要由于煤电增加而引起的。例如，在第 1 时期，广州燃煤发电将增加 $[45.8, 46.2] \times 10^3 \text{ GWh}$ ，东莞将增加 $[31.1, 32.3] \times 10^3 \text{ GWh}$ ， p_i 从 0 上升到 0.2。在第 1 时期中，随着 p_i 从 0 上升到 0.2，深圳的核电量将增加 $[44.2, 45.2] \times 10^3 \text{ GWh}$ 。

此外，结果还表明，由于深圳对电力的高需求，深圳发电量的增长速度要高于其他两个城市。在低风险期，深圳发电量将从 $[141.0, 144.6] \times 10^3 \text{ GWh}$ 增加到 $[198.0, 202.9] \times 10^3 \text{ GWh}$ ，增长率为 $[39.0, 41.0]\%$ 。这一增长主要可以通过清洁能源来解决（其中，天然气使用量增加 $[15.6, 16.5]\%$ ，生物质发电使用量增加 $[12.6, 13.1]\%$ ，核电使用量增加 $[10.8, 11.3]\%$ ）生物质和核能发电量将逐步增加，这是由于深圳的碳排放量低，传统资源（煤炭、天然气等）短缺，以及“十三五”规划对可再生能源的政府补贴。因此，深圳清洁能源的扩张保持快速增长是必然的。此外，深圳市的发电量在不同情景下表现出显著的差异，合作情景下的发电量平均比非合作情景下的发电量高出 1.2%。

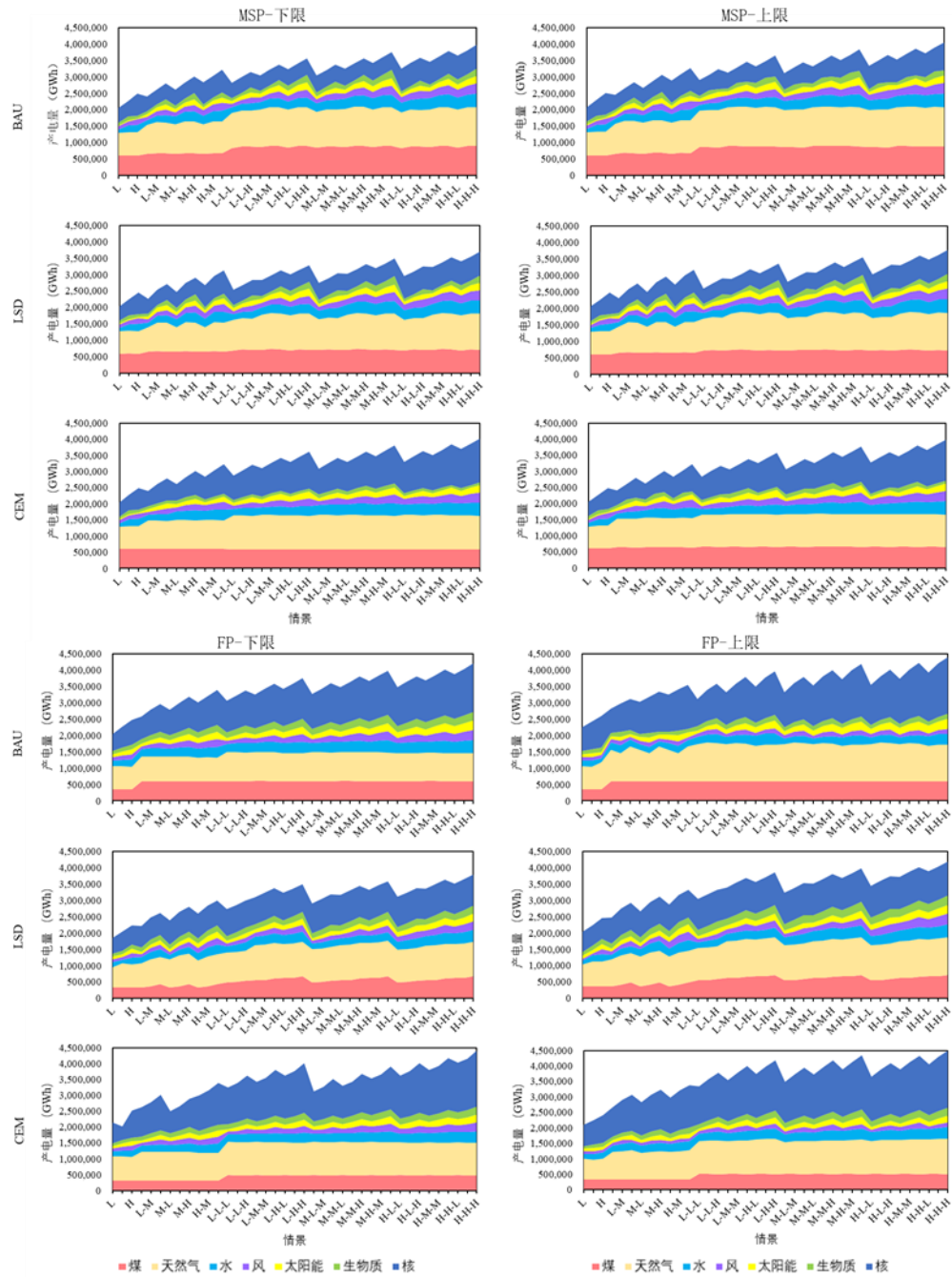


图6 不同情景下发电计划的FMSE模型求解

珠三角作为全国经济发展的核心区域，该地区的电力需求快速增长，其电力供应面临着巨大挑战。图6展示了在规划时间跨度内，不同情景下珠三角地区不同能源发电技术的发电量。结果表明，由于人口增长和经济发展，在FP和MSP两种情景下，不同发电技术的发电量都将逐渐增加，以满足更高的电力需求。例如，FP-BAU情景下，当第3期各时段需求水平较高（H-H-H）时，总发电量为 $[4206.94, 4406.69] \times 10^3 \text{GWh}$ ，而当第1期高（H）需求水平时，总发电量为 $[2483.63, 2596.30] \times 10^3 \text{GWh}$ 。同样，MSP-BAU情景下，当第3期各时段需求

水平较高（即 H-H-H）时，总发电量为 $[3970.53, 4053.35] \times 10^3 \text{GWh}$ ，而当第 1 期高（H）需求水平时，为 $[2483.63, 2508.47] \times 10^3 \text{GWh}$ 。根据结果可知，由于当地清洁能源大规模扩容，使得清洁发电单位成本最大化，FP 模型得到的两种方案的发电量均大于 MSP 模型得到的结果。因此，无论是 FP 模型还是 MSP 模型，清洁能源的发电量都随着需求水平的提高而增加，以满足未来较高的电力需求。与 FP 模型相比，MSP 中可再生能源和核电的总增量相对较低。例如，FP-BAU 情景下第 1 期需求水平由低向高变化时，生物质和核能发电量分别由 $[103.26, 103.61] \times 10^3$ 和 $[528.23, 737.25] \times 10^3 \text{GWh}$ 增加到 $[137.56, 138.61] \times 10^3$ 和 $[756.11, 964.75] \times 10^3 \text{GWh}$ 。而在 MSP-BAU 情景下，当需求水平由低向高变化时，生物质和核能发电量分别由 $[86.11, 86.12] \times 10^3$ 和 $[439.75, 439.80] \times 10^3 \text{GW}$ 变化为 $[86.11, 86.11] \times 10^3$ 和 $[661.71, 663.30] \times 10^3 \text{GWh}$ 。

根据结果可知，不同情景下的发电量有所差异，LSD 的发电量低于 BAU 和 CEM。在 MSP 模型中，当第 3 期电力需求水平为 H-H-H 时，SED 情景下总发电量为 $[3693.91, 3773.83] \times 10^3 \text{GWh}$ ，BAU 和 CEM 情景下总发电量为 $[3970.53, 4053.35] \times 10^3 \text{GWh}$ ， $[3984.25, 4020.88] \times 10^3 \text{GWh}$ ，这是由于人口和 GDP 增长速度较低，导致电力需求降低。此外，CEM 情景下的清洁能源发电量要高于 BAU 和 LSD 情景下的清洁能源发电量。当第 3 期电力需求水平处于 H-H-H 时，CEM 情景下的清洁发电总量为 $[3339.52, 3427.01] \times 10^3 \text{GWh}$ ，而 BAU 和 LSD 情景下的清洁发电总量为 $[3076.22, 3172.49] \times 10^3 \text{GWh}$ ， $[2987.01, 3049.50] \times 10^3 \text{GWh}$ ，这是由于碳消除技术的发展，进一步推动助于清洁能源的使用。

在清洁能源发电方面，将 FP 模型与 MSP 模型进行比较，可以证明 FP 模型的优势。FP 模型旨在提高可再生能源和最大化系统效率。即减少煤炭发电将，采用更清洁的发电方式。根据结果可知，清洁发电的在 FP 模型中的占比将比其在 MSP 模型中的占比高出 8.78%。例如，在 BAU 情景下，当第三期电力需求水平处于 H-H-H 时，煤电发电量将从 MSP 模型中的 $[880.86, 894.31] \times 10^3 \text{GWh}$ 下降到 FP 模型中的 $[590.10, 594.13] \times 10^3 \text{GWh}$ 。相反，MSP 模型中核能发电量为 $[772.91, 849.60] \times 10^3 \text{GWh}$ ，而 FP 模型中为 $[14744.73, 1742.75] \times 10^3 \text{GWh}$ ，这主要是由于 FP 模型的目标考虑了最大限度地利用清洁能源，这更加符合当前政府对清洁能源政策的落实。

综上所述，珠三角城市群复合生态系统是一个以九个城市为核心向周围辐射

而构成的多层次、多组分、多目标且内部高度互动的动态生态系统集合体，能源-环境联动关系构成了其复杂性的重要组分。本研究开发了不确定性 Coupla 随机分析技术以量化由珠三角城市群三大经济圈内部的能源-环境联动关系以及生态系统参数的不确定性而产生的高度复杂性。结果表明，此定量分析技术能够从多种不同的情景发展角度出发，构建珠三角城市群能源-环境联动的约束关系，以区间和概率分布的形式表征系统参数的不确定性，从而有效量化了珠三角城市群复合生态系统的复杂性。