

# 珠三角城市群资源生态系统管理

## 1. 珠三角城市群生态特征识别

珠三角地区的城市化、工业化发展，导致了城镇集中连片发展，区域绿地不断被蚕食，林地、草地、耕地大幅度减少，城市之间大型通风走廊、绿色开敞空间、城市绿化隔离带、河流生态廊道被侵占；原生林、次生林遭受破坏，森林生态系统的生态防护功能及生态调节功能不断下降。上述绿地面积的不断减少不仅造成生态环境的直接破坏，也导致了自然碳汇的减少，使得珠三角地区难以消纳区域内化石能源大量使用造成的温室气体排放。这一现状有悖于区域可持续发展的初衷，对区域生态安全造成诸多威胁与挑战。

此外，随着珠三角地区经济的持续增长和人口的持续增加，其能源资源需求也迅速增加。然而，该地区面临着资源严重短缺和能源高度依赖进口的问题。具体来说，珠三角九市受地理位置和资源条件限制，处于我国能源资源供应环节最末端，远离开采地；从能源资源供应情况来看，煤炭来源完全依靠国内其他省市调入和国外进口，石油以外区调入为主，电力供应主要来自本地煤电、气电、核电以及西电东送工程来电。2017 年，珠三角地区全社会用电量为  $4.42 \times 10^5 \text{GWh}$ ，其中本地自供电为  $2.21 \times 10^5 \text{GWh}$ ，自给率仅为 49.9%。这种“缺煤少油乏气”的资源窘境为珠三角的能源安全形势带来了巨大考验。同时，该区域现有能源结构不合理，化石能源消费占比高，与国际先进水平存在较大差距。煤炭消费比重分别高于美国、日本和德国 14.0、1.2 和 6.6 个百分点，与世界平均水平（27.2%）接近，天然气消费比重低于美国、日本、德国和世界平均水平（23.9%）10 个百分点以上。这些化石能源的消耗带来的温室气体的大量排放，导致了珠三角地区空气质量及生态环境的不断恶化，对珠三角城市群建设的可持续性带来了巨大的挑战。这种生态安全问题已成为珠三角地区率先全面建成小康社会的重大制约瓶颈，对该地区经济社会的可持续发展构成了严重的威胁。如何在保持经济稳步增长和居民生活水平逐步提高的同时，达到减排目标，改善区域空气及生态环境质量，并由之建立科学的决策支持体系，是解决珠三角城市群生态问题的必由之路，也是政策制定者的关键任务。

## 2. 珠三角城市群资源生态系统管理模型

本研究以城市群资源环境生态系统为研究对象，展开系统分析，开发珠三角城市群资源生态系统管理模型，揭示区域水资源量对其他资源用量的影响，量化森林碳汇在减排中的作用，为建立生态安全管理提供政策方案。同时针对区域资源生态系统中的复杂性和相关风险，引入区间多阶段随机规划方法，反映系统的动态变化特征，并采用 SVR 技术预测资源需求，通过 STIRPAT 预测的二氧化碳排放。该模型框架可为不同情景下的碳排放模拟提供解决方案，为清洁能源系统规划和碳排放管理提供决策支持。支持向量回归方法

支持向量回归方法（Supporting Vector Regression，简称 SVR）是一种机器学习回归模型。在能源需求模拟中，支持向量回归法因其处理多社会经济因素、解决非线性、高维和动态特性等优点而得到广泛应用，能够很好地应用于各种复杂性和不确定性下的能源系统。在前期研究的基础上，选取居住人口、GDP、第一产业、第二产业和第三产业等 5 个社会经济因素作为模型的数据输入。收集 2000 年至 2018 年的年度数据，并随机排序。将前 12 年的样本和剩余 6 年的样本分别设置为训练集和测试集。本文采用高斯径向基函数作为支持向量机的核函数来处理非线性关系。采用  $n$  次交叉验证的方法确定支持向量机的正则化常数、精度参数和核参数。此外，蒙特卡洛模拟（Monte Carlo Simulation，简称 MCS）是处理随机参数概率分布的一种灵活有效的工具。考虑专家建议和历史数据分析，假设正态分布来模拟电力需求的分布。执行一千次蒙特卡罗运行以生成随机数。然后通过 MCS 得到多个规划时段的电力需求概率分布。

由于测量碳排放的复杂性，在国家或地区缺乏统一的官方碳排放数据记录。在众多由能源消耗引起的碳排放预测模型中，STIRPAT 模型是系统揭示各种人为驱动因素与碳排放等环境影响之间关系的有效方法。该模型可以概括为：

$$I = aP^bA^cT^de$$

本研究借鉴以往研究经验，将二次产业份额和能源消费结构两个参数引入 STIRPAT 模型。此外，将富裕因子  $A$  分解为一项和平方项，实证检验经济水平与二氧化碳排放的关系。经济和社会变化对碳排放的影响可以据此进行分析，具体方法如下：

$$\ln I = a_0 + a_1 \ln P + a_2 \ln A + a_3 \ln T + a_4 \ln(A)^2 + a_5 \ln N + a_6 \ln(IS) + a_7$$

$I$ 是二氧化碳排放， $P$ 是人口， $A$ 代表收入水平（表示为人均 GDP）， $T$ 是技术水平（表示为能源强度，即单位 GDP 能耗吨/10<sup>4</sup>美元）， $S$ 是产业结构（表示为二次工业份额）和  $N$ 是能源消费结构（表示为非化石燃料消费的能源消费总量的比例）。

根据 2006 年 IPCC 国家温室气体清单，与能源相关的二氧化碳排放量可以计算如下：

$$I = \sum_{i=1}^7 E_i \cdot K_i \cdot \frac{44}{12}$$

式中， $I$ 为碳排放总量； $E_i$ 为第  $i$ 种一次能源消耗； $K_i$ 为第  $i$ 种一次能源的碳排放系数。

摘要岭回归通过偏-方差的权衡，在自变量中获得满意的均方误差偏估计，可以解决回归方法的多重共线性问题。

## 多阶段随机规划方法

当不确定性以概率密度（Probability Density Functions，简称 PDFs）的形式表现，并且决策变量需要随时间变化进行阶段性确定时，此种问题能够被构造成为多阶段随机规划（Multistage stochastic programming，简称 MSP）模型。在区域能源规划实际问题中，所研究的系统通常具有动态变化的特征，且系统中存在的不确定性常常以随机变量的形式表征。因此，不同概率水平下每个时期都需要做出相应的决策。上述问题可以借助可追索的多阶段随机规划模型来解决。在多阶段随机规划模型中，不确定性以多层情景树的形式表征（见图 1），且每个时期中随机变量和节点（代表系统状态）呈一一对应关系。

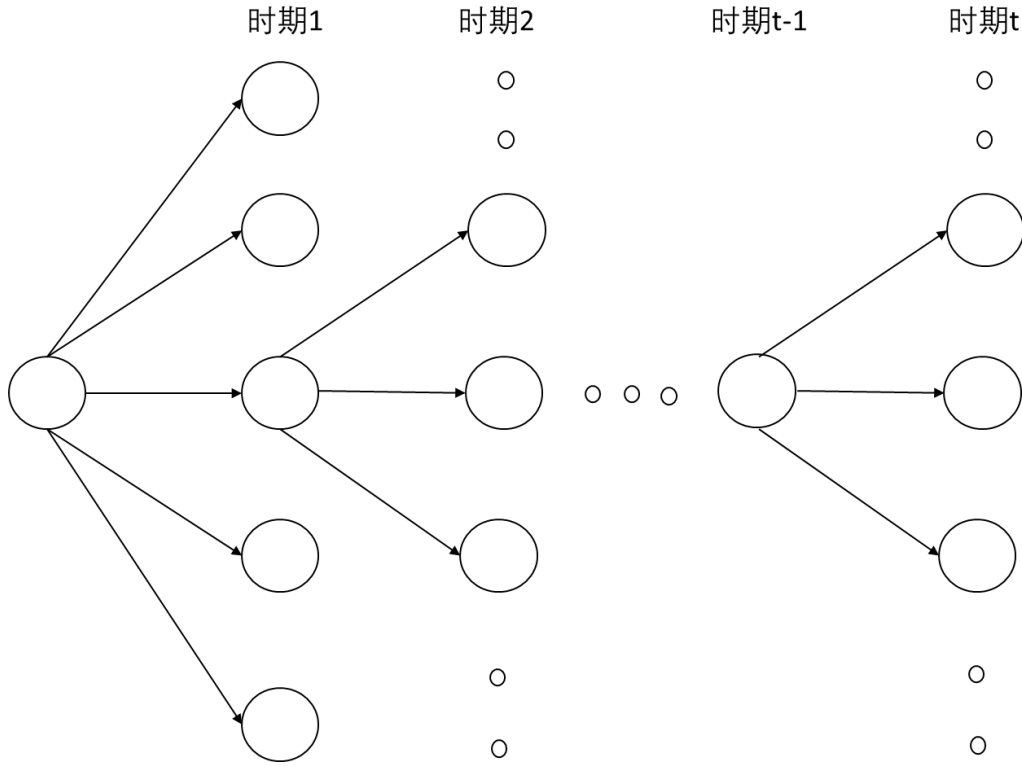


图 1 多阶段随机规划模型示意图

可追索的多阶段随机线性规划（MSP）模型如下：

目标函数：

$$\max f = \sum_{t=1}^T \left( \sum_{j=1}^{n_1} c_{jt} x_{jt} - \sum_{j=1}^{n_2} \sum_{h=1}^{H_1} P_{th} d_{jth} y_{jth} \right)$$

约束条件：

$$\sum_{j=1}^{n_1} a_{rjt} x_{jt} \leq b_{rt}, r = 1, 2, \dots, m_1; t = 1, 2, \dots, T$$

$$\sum_{j=1}^{n_1} a_{ijt} x_{jt} + \sum_{j=1}^{n_2} a'_{ijt} y_{jth} \leq \hat{w}_{ith},$$

$$i = 1, 2, \dots, m_2; t = 1, 2, \dots, T; h = 1, 2, \dots, H$$

$$x_{jt} \geq 0, j = 1, 2, \dots, n_1; t = 1, 2, \dots, T$$

$$y_{jth} \geq 0, j = 1, 2, \dots, n_2; t = 1, 2, \dots, T; h = 1, 2, \dots, H_t$$

其中 $P_{th}$ 是 $t$ 时期情景 $h$ 发生的概率，“L”、“M”和“H”分别代表情景具有低、中、高概率水平。每个时期每个情景都对应着一个固定的概率水平 $P_{th}$ （例如，L-L-L-...-L），

$P_{th} > 0$ 且 $\sum_{h=1}^H P_{th} = 1$ 。 $\hat{w}_{ith}$ 表示具有概率水平 $P_{th}$ 的随机变量。在该模型中，决策变量

分为两个子集：  $x_{jt}$  代表第一阶段决策变量，必须在随机事件发生之前做出决定；  $y_{jth}$  代表随机事件发生之后做出的补偿追索。

### 不确定线性分式风险规划方法

不确定线性分式风险规划是一种处理不确定性下的比率优化问题的有效工具。本研究需要反映制度经济成本和清洁生产之间相互冲突的目标之间的权衡。因此，需要分式规划来平衡两个相互冲突的目标，具体公式如下：

目标函数：

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

约束条件：

$$\begin{aligned} \sum_{j=1}^n a_{ij}^{\pm} x_j^{\pm} &\leq b_i^{\pm}, i = 1, 2, \dots, m \\ x_j^{\pm} &\geq 0, j = 1, 2, \dots, m \\ x_j^{\pm} &\geq 0, j = 1, 2, \dots, n \end{aligned}$$

针对实际问题中的决策变量被认为是整数的情况提出不确定的混合整数分式规划。

目标函数：

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

约束条件：

$$\begin{aligned} \sum_{j=1}^t a_{ij}^{\pm} x_j^{\pm} + \sum_{j=t+1}^n a_{ij}^{\pm} y_j^{\pm} &\leq b_i^{\pm}, i = 1, 2, \dots, m \\ x_j^{\pm} &\geq 0, j = 1, 2, \dots, t (t < n) \end{aligned}$$

### 3. 珠三角城市群生态资源安全系统管理结果分析

首先，模拟了珠三角地区 2000-2018 年能源相关二氧化碳排放，如图 2 所示。结果表明：珠江三角洲地区碳排放量由 2000 年的 56.8 Mt 增加到 2018 年的 193.4 Mt，且增速缓慢。本研究引入岭回归估计，进行岭迹图绘制，如图 2（a）所示。由表 1 可知，

所有变量的脊系数在 0.03 水平上均显著。R<sup>2</sup> 为 0.9916，表明整体拟合是令人满意的。F-统计量的值也显著（F 值=238.2362，F 显著= 0.00）。岭回归方程可以定义为

$$\ln I = -10.00289015 + 1.29836260 \ln P + 0.51194716 \ln A + 0.02668993 (\ln A)^2 + 0.57895528 \ln T - 0.21614096 \ln N + 0.25037369 \ln S$$

表 1 岭回归结果 (K = 0.03)

	B	SE(B)	Beta	B/SE(B)
$\ln P$	1.29836260	0.23450602	0.26559043	5.53658542
$\ln A$	0.51194716	0.03188526	0.48669239	16.05591811
$\ln T$	0.57895528	0.15977850	0.16953283	3.62348672
$(\ln A)^2$	0.02668993	0.00159836	0.45359769	16.69833380
$\ln N$	-0.21614096	0.11284253	-0.06771126	-1.91542106
$\ln S$	0.25037369	0.12931097	0.06404563	1.93621384
$C$	-10.00289015	1.86440627	0.00000000	-5.36518800

显然，人口（ $P$ ）、人均 GDP（ $A$ ）和第二产业份额（ $S$ ）作为珠三角地区的社会经济因素对二氧化碳排放具有正向影响。而能源强度（ $T$ ）和能源消费结构（ $N$ ）作为技术因素具有负向影响。因此，设定情景参数的思路是：在当前政策情景（BAU）下，假设社会发展减缓以减少碳排放（LSD），积极参数被弱化，通过技术发展减少碳排放（CEM），消极参数被强化。图 2（b）还展示了珠三角地区 2020 - 2035 年不同情景下的排放预测结果。可以看出，在规划期间，不同情景的排放峰值存在显著差异，从高到低依次为 BAU、LSD 和 CEM。其中，BAU 情景下的碳排放在 2035 年之前不会达到峰值，并将继续上升，而 LSD 情景将在 2028 年达到峰值 229.1 Mt CO<sub>2</sub>，CEM 情景将在 2025 年达到峰值 224.4 Mt CO<sub>2</sub>。值得注意的是，LSD 方案和 CEM 方案将达到 NDC 减缓气候变化的目标。与 LSD 和 BAU 方案相比，CEM 方案对达到峰值的速度更快，且更低。

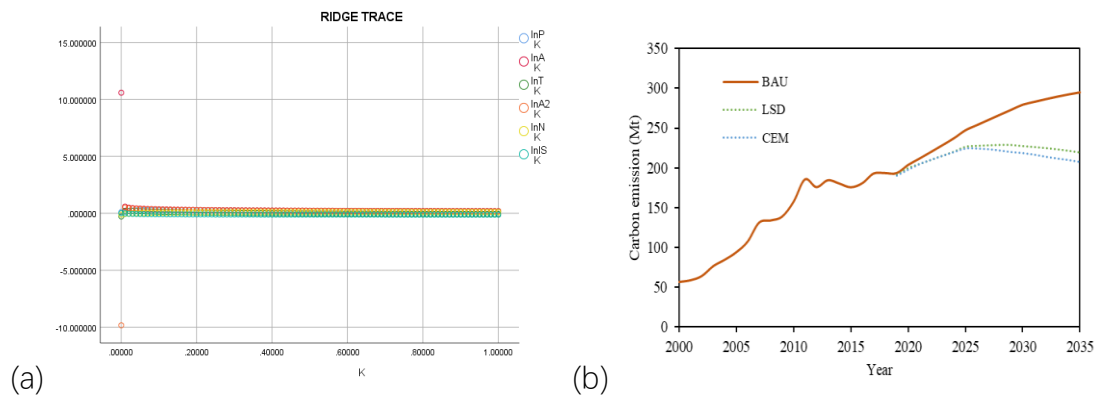


图 2 不同情景下的潜在二氧化碳排放预测

在规划期内，由于能源需求的增加和传统能源的区域性使用，碳排放量会随着时间的推移而增加。与化石燃料相关的活动将是这种增长的主要驱动力。森林能储存大量的碳，并能将二氧化碳从大气中隔离，从而实现碳减排。森林面积代表生态系统吸收/吸收碳的能力。因此，本研究优化了森林面积作为遏制气候变化的替代方案。

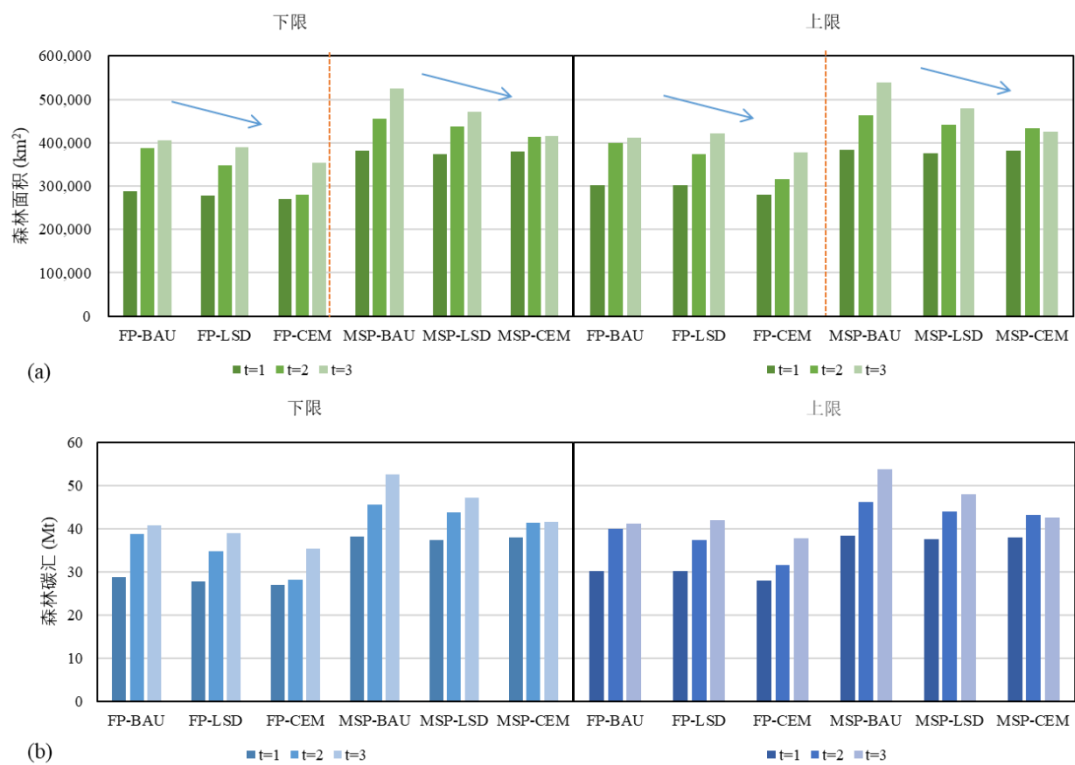


图 3 不同情景下的森林区域管理

图 3 显示了各情景下森林面积及相关碳汇。从该图可以看出，从 2020 年到 2035 年，由于发电量的增加，各情景下森林面积随时间增加。此外，FP 情景下的森林面积建设略低于 MSP 情景，这与森林碳汇的变化相对应。这是因为 FP 模型中清洁能源的

份额高于 MSP 模型，而森林面积的需求低于 MSP 模型。例如，FP 模型在 BAU 情景下，第 1 时期森林面积为 $[287.58, 301.58] \times 10^3 \text{ km}^2$ ，第 3 时期森林面积为 $[406.43, 412.28] \times 10^3 \text{ km}^2$ 。这两个时期对应的碳汇分别为 $[28.75, 30.15] \text{ Mt}$ 和 $[146.73, 148.85] \text{ Mt}$ 。在 MSP 模型中，在第 1 时期，森林面积将为 $[380.77, 384.20] \times 10^3 \text{ km}^2$ ，其相应的碳汇价值为 $[38.08, 38.42] \text{ Mt}$ 。此外，由于其采取了额外努力减少碳排放，在 LSD 和 CEM 情景下森林面积的减少量将小于 BAU 情景的。而在 CEM 下，由于煤的使用量较低，森林面积和相应的碳汇在不同情景下都最小。以 MSP 模型为例，第 3 时期 BAU、LSD 和 CEM 情景的面积分别为 $[525.38, 538.74] \times 10^3 \text{ km}^2$ 、 $[471.81, 479.54] \times 10^3 \text{ km}^2$ 和 $[415.06, 426.40] \times 10^3 \text{ km}^2$ 。不同情景下，随着传统污染能源需求的增加，有增加森林面积的趋势。这是因为森林可以被视为吸收二氧化碳和遏制气候变化的补偿。但是，在清洁能源高度发展的情况下，林区的生态净化能力可能超过了减少工业碳排放的需求。森林碳汇的合理利用对吸收二氧化碳具有重要意义，对减缓碳排放具有重要作用。因此，有必要对能源活动进行统一规划，充分利用森林治理的净化能力。

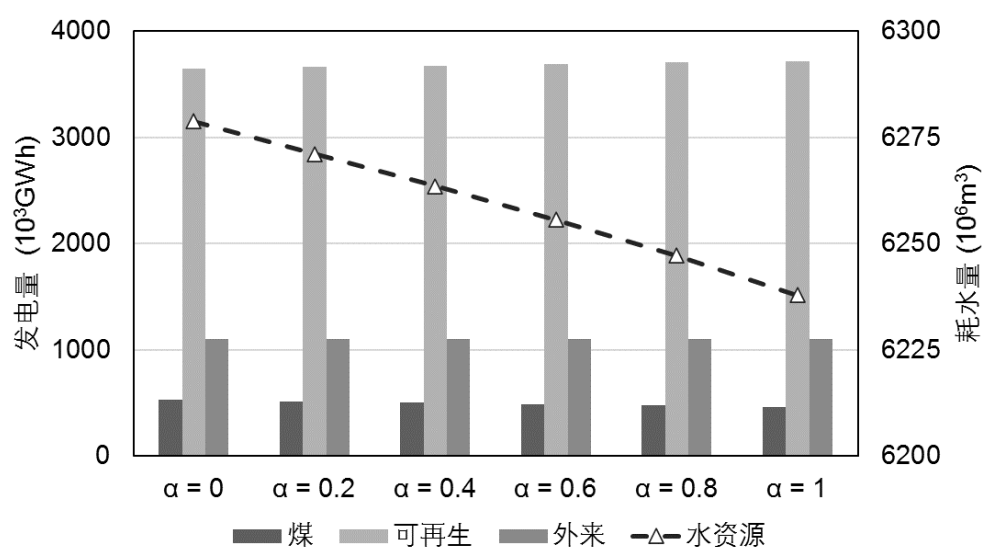


图 4 不同  $\alpha$ -cut 水平下珠三角地区电力供应组合和耗水量

图 4 为不同  $\alpha$ -cut 水平下珠三角地区的电力供应组合和耗水量。在上界子模型中，水资源可用量会随着  $\alpha$ -cut 水平的增加而不断减少。为了缓解珠三角地区的水资源短缺危机，零耗水密度的外来电将成为电力供应组合中的首要选择，即外来电量（为  $1102.5 \times 10^3 \text{ GWh}$ ）将不随  $\alpha$ -cut 水平的变化而变化。另外，不断减少的水资源可用量将促进低耗水密度的可再生电力的生产，相应地，高耗水密度煤电的生产将会受到遏



制，从而有效地促进水资源节约。例如，当  $\alpha$ -cut 水平从 0 增加到 1 时，燃煤发电量将减少  $69.83 \times 10^3$  GWh，可再生能源发电量将增加  $68.70 \times 10^3$  GWh，耗水量将减少  $1.14 \times 10^6$  m<sup>3</sup>。因此，应采取控制煤炭消费，增强区域电网输电能力和提高可再生能源渗透率三者相结合的策略，以有效缓解水资源短缺问题。

基于双目标模型（例如 FP 和 LP-MSP 模型），构造了一个三层的情景树，生成了在每一个时期反映电力需求低（L）、中（M）和高（H）水平的情景集合；它显示了第一时期的 3 个水平（即 L、M 和 H），第 2 时期的 9 个水平，第 3 时期的 27 个水平，总体规划时期内共 39 水平，如图 1 所示。此外，还分析了不同碳排放和电力需求的三种情景。具体来说，BAU 情景基于现实世界的发展，不受任何政策的干扰。结果表明，LSD 下的电力需求最低，CEM 下的碳排放最低。

随着电力需求的快速增长，珠三角地区的电力供应面临巨大挑战。图 5 显示了规划跨度内不同情景下不同转换技术优化的发电量。结果表明，由于人口增长和经济发展，在 FP 和 MSP 两种模式下，不同转换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  $[4206.94, 4406.69] \times 10^3$  GWh，而第 1 期高（H）需求水平为  $[2483.63, 2596.30] \times 10^3$  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  $[3970.53, 4053.35] \times 10^3$  GWh，而第 1 期高（H）需求水平为  $[2483.63, 2508.47] \times 10^3$  GWh。可以看出，由于当地清洁能源大规模扩容，使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。可以看出，无论是 FP 模型还是 MSP 模型，清洁能源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，生物质发电和核电发电量分别由  $[103.26, 103.61] \times 10^3$  和  $[528.23, 737.25] \times 10^3$  GWh 增加到  $[137.56, 138.61] \times 10^3$  和  $[756.11, 964.75] \times 10^3$  GWh。而在 MSP-BAU 情景下，当需求水平由低向高变化时，生物质发电和核电分别由  $[86.11, 86.12] \times 10^3$  和  $[439.75, 439.80] \times 10^3$  GW 变化为  $[86.11, 86.11] \times 10^3$  和  $[661.71, 663.30] \times 10^3$  GWh。

从情景角度来看，结果还表明 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 水平时，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 的清洁能源发电量要高于 BAU 和 LSD。当第 3 期电力需求水平处于 H-H-H 水平时，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  $[3076.22, 3172.49] \times 10^3\text{GWh}$ ， $[2987.01, 3049.50] \times 10^3\text{GWh}$ 。这是由于二氧化碳缓解技术的发展，这也有助于清洁能源生产。

在清洁能源发电方面，通过与 MSP 模型的比较，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。即煤炭发电将减少，取而代之的是更清洁的发电方式。实现这一目标后，清洁发电在 FP 模型中的占比将比在 MSP 模型中的占比高出 8.78%。例如，BAU 情景下，当第三期电力需求水平处于 H-H-H 水平时，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 中核电发电量为  $[772.91, 849.60] \times 10^3\text{GWh}$ ，而 FP 中为  $[14744.73, 1742.75] \times 10^3\text{GWh}$ 。这主要是由于 FP 模式的目标考虑了最大限度地生产清洁能源，这更符合当前政府鼓励清洁能源生产的需要。

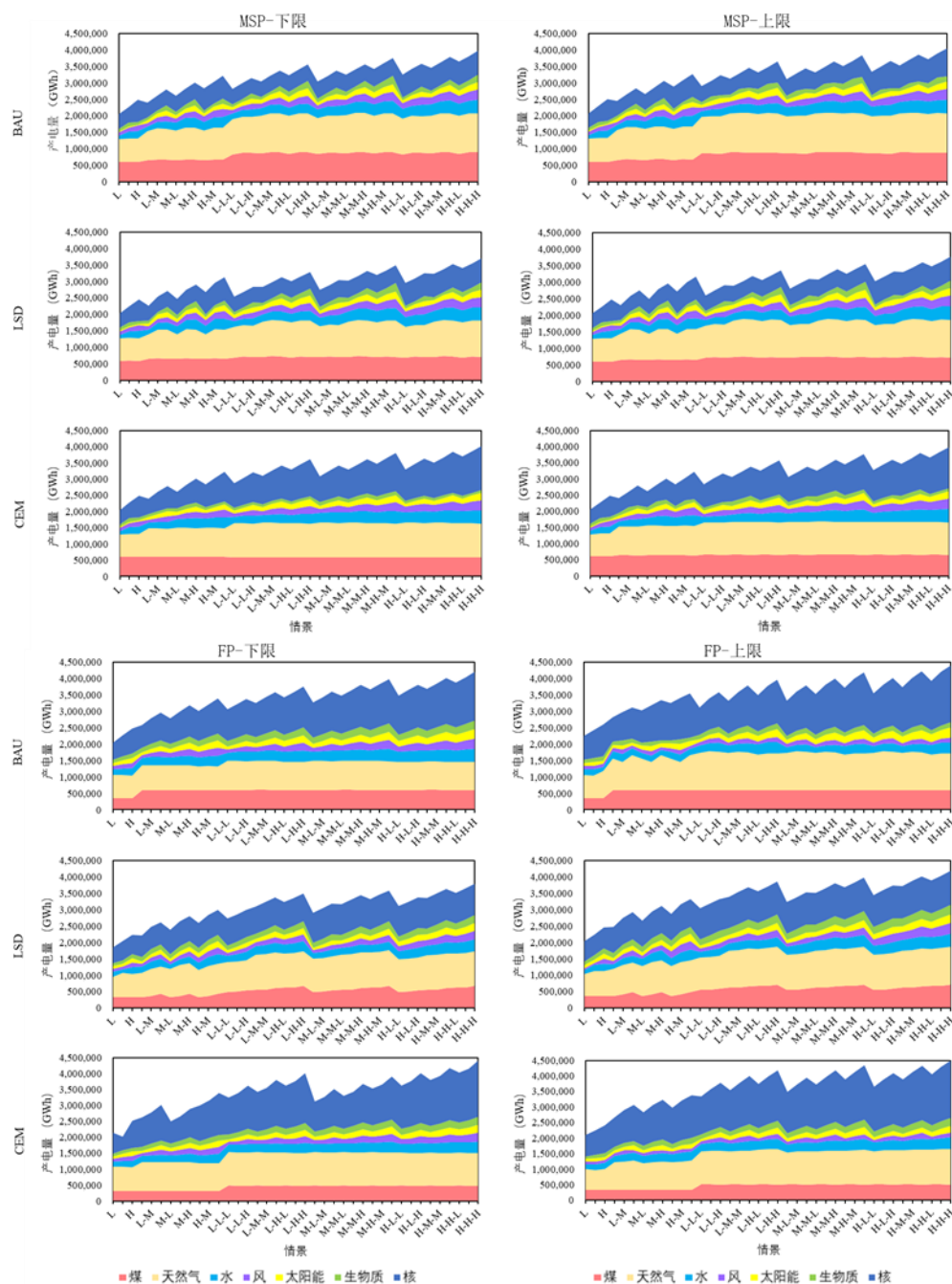


图 5 不同情景下发电计划的清洁能源发电量

图 6 为规划期内不同情景下的平均发电量比例。总体而言，基于珠三角地区的环境政策，其清洁能源比重将占据较大比重，总体上随时间呈上升趋势（即 CEM 情景下 MSP 模型的清洁能源比重从 73% 上升到 83%）。研究表明，天然气和核能是响应清洁电力需求的两种主要电力转换技术，清洁电力需求占比分别为[24, 35]%和[16, 34]%。此外，由于地处中国东南沿海，该地区拥有丰富的水力发电资源。相应的，水力发电在珠江

三角洲能源系统的电力供应中可以发挥重要作用，占[8，10]%。总体而言，与 MSP 模型相比，FP 模型在所有情景下都能带来更高的清洁能源和更低的燃煤发电量。例如，在 BAU 情景下，MSP 模型中燃煤发电所占比例为[24，27]%，在整个时间段内高于 FP 模型的[16，17]%。这主要是因为，在 FP 模型中需要考虑清洁能源发电最大化的目标来控制污染物发电。珠三角地区积极响应低碳排放政策，限制燃煤发电比重，大力发展清洁能源。因此，在 FP 模型中考虑扩大清洁能源发电可以满足当地政策需求。

CEM 和 LSD 方案显示了清洁能源发电的显著改善。与 BAU 相比，CEM 情景下燃煤发电量明显下降，LSD 略有下降。清洁能源发电量在 CEM 情景下显著增加，而在 LSD 情景下略有增加。例如，在 BAU、LSD 和 CEM 情景下整个规划周期内燃煤发电的比例将分别达到 26%、23%和 17%。对于清洁能源产电，核电和天然气发电将占主导位置，在规划末期，BAU，LSD 和 CEM 情景下珠三角地区核能和天然气产电将占总发电量的 53.5%，56%和 61.5%。结果表明，LSD 情景政策可以通过减少总电力需求来实现减排目标，而 CEM 情景政策可以通过增加清洁电力生产的比重来减少碳排放。

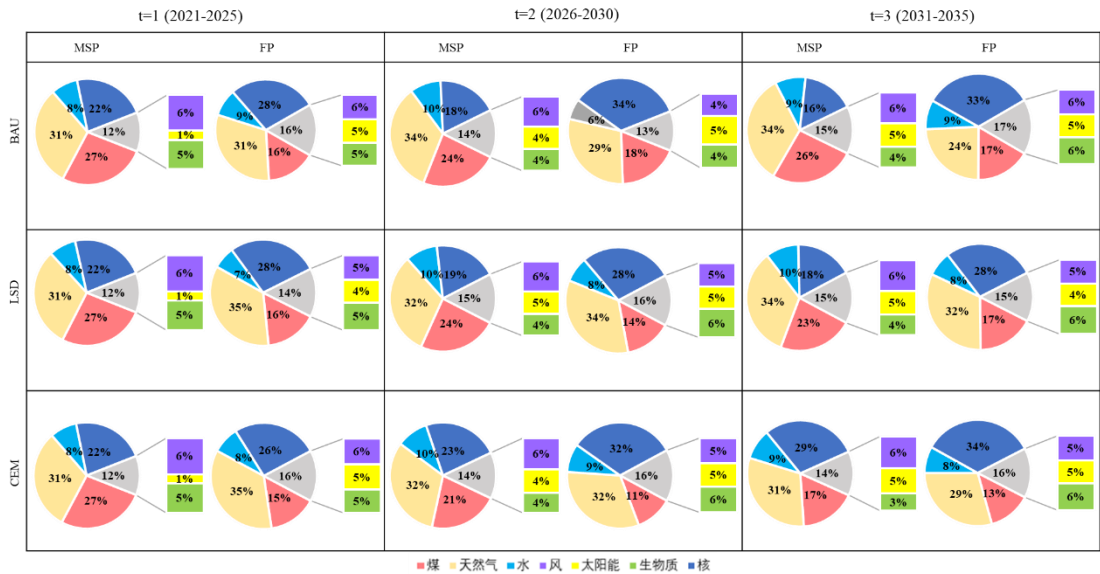


图 6 不同情景下的清洁能源发电量比例

上述结果中局部优化后各能源资源的使用比例将成为下一部分生态安全均衡模拟模型的输入，这种以能源资源系统最优配置为目标的局部均衡模型的社会经济生态效应将通过下一部分深入展示。具体地，局部最优配置将如何影响珠三角城市群生态安全系统的全行业生态安全指标这样的问题将得到很好地解决。