

广州市广义模糊随机生态风险调控规划

广州是广东省的省会，也是广东省的政治、经济、科技、教育和文化中心。行政面积约 7434.4 平方公里，共有 11 个行政区；是中国最大的城市之一，有超过 854 万的常住人口。近几十年来，广州经济发展迅速，人口不断增长，能源需求迅速增加。据广州统计局统计，国内生产总值由 2010 年度的 10748 万元增长到 2014 年度的 16768 万元，年均增长率为 13.86%。由于大量依赖化石燃料（如煤、石油和汽油）发电，造成了较为严重的空气污染及生态环境问题。根据《广州市市大气污染物排放清单报告》显示，2014 年度二氧化硫排放量达到 78000 吨，氮氧化物排放量达到 231000 吨，其中，燃料二氧化硫（SO₂）的固定燃烧占 72%，氮氧化物占 29%。虽然政府已经采取了一系列措施来改善环境质量，但日益增加的能源消耗将造成污染物排放的持续增加。全市平均灰霾天气日数 32 天，比上年减少 4 天，但工业废气排放总量逐年增加，2013 年工业废气排放量比上年增加 2.93%。

广州经济社会发展与城市建设均走在国内城市前列，也是较早以建成生态城市为目标开展规划与建设实践的城市之一。广州长期以来的生态城市规划与建设实践颇有成效。在 2012 年中国生态城市竞争力排名中，广州位列第十名，是唯一进入前十名的国内特大城市。尽管如此，广州距生态城市的理想目标仍差距甚远。为了改善生态环境，广州市也尝试多种生态补偿机制。政府通过每亩 24.5 万元的标准进行补偿、落实村民社保、按征地面积的 10% 落实经济发展留用地、对失地农民采取就业指导和培训，并在保护区内提供优先就业岗位等多种措施，保障被征地农民的生存和发展。全年完成低产低效林改造面积 1011 公顷，全市森林覆盖率达到 42.0%，建成 3000 公里绿道。广州市“十三五”规划提出要建设森林城市，增加森林面积的蓄积量，加强森林经营，提高森林碳汇效益。

决策者通常面临资源分配的资源管理问题，为了给决策者提供更多的选择和建议，本课题将全模糊随机优化模型应用于广州市的资源管理系统中。因为现实的生态规划模型中，许多参数都是不确定的，因此采用全模糊方法将参数模糊化，（包括污染物排放成本、加工转化成本以及生态经济补偿成本等），在全模糊的基础上，引进机会约束，用于处理随机不确定性和分析违反约束的风险。除了基本的城市资源规划之外，

考虑到生态森林面积约束，吸收污染物这方面，广州市生态风险规划的模型应用方法如下：

$$M \inf = \sum_{j=1}^n \tilde{c}_j \tilde{x}_j$$

约束：

$$\sum_{j=1}^n a_{ij} \tilde{x}_j \leq b_i^{(p_i)}, i=1,2,\dots,s$$

$$\sum_{j=1}^n \tilde{a}_{ij} \tilde{x}_j \leq \tilde{b}_i, i=s+1,s+2,\dots,m$$

$$\tilde{x}_j \geq 0, j=1,2,\dots,n$$

其中， $\tilde{c} \in \{R\}^{1 \times n}$ ， $\tilde{X} \in \{R\}^{n \times 1}$ ， $\tilde{b} \in \{R\}^{m \times 1}$ ， $A \in \{R\}^{m \times n}$ ， R 表示一组模糊集，此外，

$$\tilde{c} = (\tilde{c}_1, \tilde{c}_2, \dots, \tilde{c}_n), \tilde{X} = (x_1, x_2, \dots, x_n)^T, \tilde{b} = (\tilde{b}_1, \tilde{b}_2, \dots, \tilde{b}_m)^T, A = (a_{ij})_{m \times n} \quad \forall i \in m, j \in n。$$

一个 X 的模糊集(A)可以定义为： $\{x, u_A(x) | x \in X, u_A(x): X \rightarrow [0,1]\}$ ，其中， $u_A(x)$ 表示隶属度函数， $u_A(x)$ 的值越接近于 1，表明 x 属于 A 的可能性越大，反之，如果 $u_A(x)$ 的值越接近于 0，那么 x 不属于 A 的可能性就越大。一个 α -cut 可以定义为一个普通的集合，定义为 $[A]_\alpha$ ，表示隶属度不超过 α 。 α 通常是连续的或离散的模糊区间，因此，在 α -cut 的概念下，不同的 α -cut 水平下，每个模糊参数都可以描述为一系列的区间。模糊参数可以表示为隶属函数的局部分布信息，例如，模糊参数可以表示为一个三角模糊集，具有它的下界、中间值和上界。为了解决此模型，通过改进黄提出的交互式算法，提出了一种逐步式交互算法（SIA），它可以使不确定性直接传递到优化过程和结果解决方案中，此外，逐步式交互算法不会导致复杂的中间模型，只需要相对较低的计算需求。在求解模型之前，模型中的参数需要通过 α -cut 的方法进行模糊化。这里将一组 α -cut 水平设置为 $\alpha=1$ 水平， $\alpha=0.8$ 水平， $\alpha=0.5$ 水平， $\alpha=0.3$ 水平和 $\alpha=0$ 水平。对于任意的 $\alpha \in [0,1]$ ， \tilde{c}_j ， x_j ， a_{ij} 和 \tilde{b}_i 可表示为： $(c_j)_{\alpha_i}^\pm = [(c_j)_{\alpha_i}^-, (c_j)_{\alpha_i}^+]$ ， $(x_j)_{\alpha_i}^\pm = [(x_j)_{\alpha_i}^-, (x_j)_{\alpha_i}^+]$ ， $(a_{ij})_{\alpha_i}^\pm = [(a_{ij})_{\alpha_i}^-, (a_{ij})_{\alpha_i}^+]$ 和 $(b_i)_{\alpha_i}^\pm = [(b_i)_{\alpha_i}^-, (b_i)_{\alpha_i}^+]$ 。 (a^\pm) 定义为 $a^\pm = [a^-, a^+] = \{t \in a | a^- \leq t \leq a^+\}$ 。具体算法如下图所示。

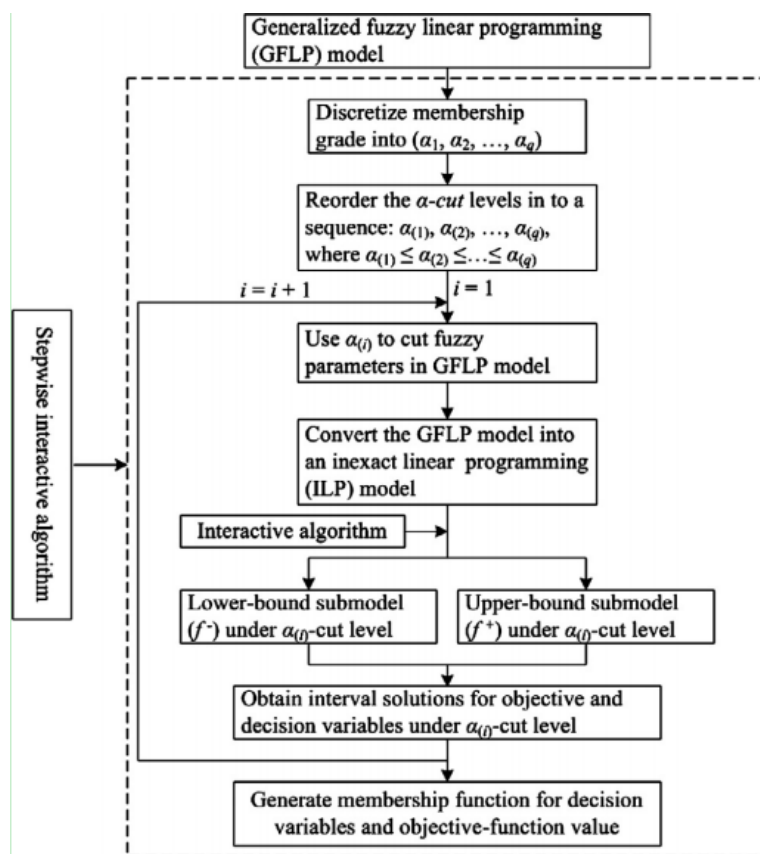


图 1 方法计算流程图

在广州市的生态风险管理调控规划中，我们目标函数主要考虑的是各种成本（加工转化成本、扩容成本、污染物排放成本以及生态林经济补偿成本），约束里面考虑的是物料约束、污染物排放约束，森林面积约束以及扩容约束等。

图 2 给出了不同时期下的资源供应解决方案，其中包括 8 种资源类型（煤炭、柴油、燃料油、原油、液化石油气、焦炭和天然气）。研究表明：除了煤炭和原油之外，其他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 $469.03 \times 10^3 \text{TJ}$ ，而天然气的供应将从 $273.35 \times 10^3 \text{TJ}$ 增加到 $294.59 \times 10^3 \text{TJ}$ 。这有可能是由于煤炭具有高污染排放特点和污染物减排的要求矛盾，虽然煤是所有资源供应中比重较大，但随着时间的推移，煤炭供应量将会不断地减少，相反，天然气供应量将会大大增加，这意味着天然气将是未来主要新能源之一，这样的增长可能是由于广州市政府推广使用新能源汽车以及广州市“十三五”规划里要求要提高清洁能源消费比重有关。

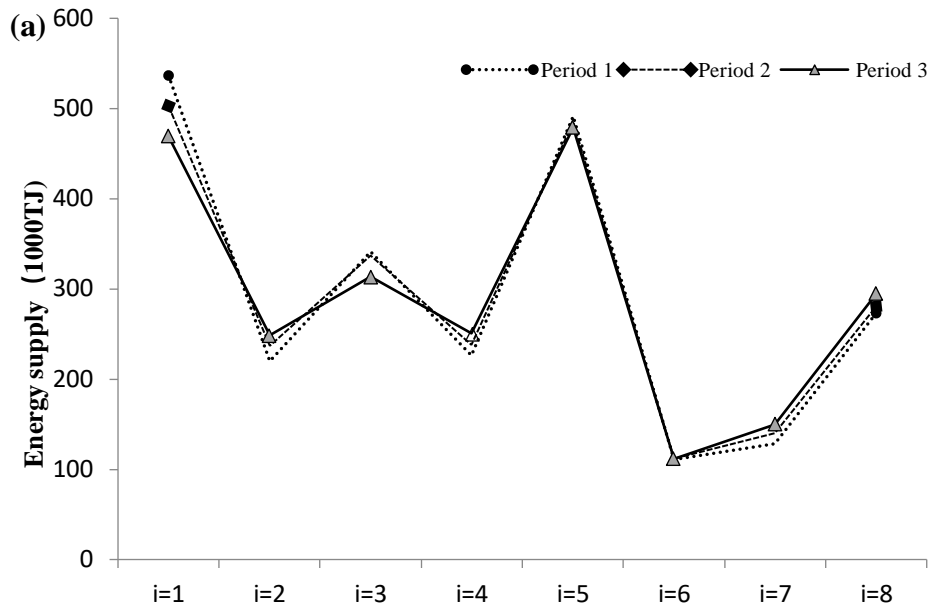


图 2 不同时期下的资源供应

清洁电力技术及扩容结果

图 3 给出了不同 α 水平下的电力供应结果，对于每个发电技术类型来说，除了燃煤发电之外，都具有相同的趋势，燃煤发电量随时间的增长而下降，其他发电形式都随着时间增长而升高，但是燃煤发电仍然占很大一部分比重，但由于资源的短缺和成本压力，燃煤发电原料将随时间的推移而下降，相应的，燃煤设备在任何时候都不会扩大，相比之下，可再生能源的可持续发展会代替化石燃料的快速消耗及其对环境的不利影响，可再生能源发电（包括水力发电、风力发电、光伏发电和生物质发电）将随时间推移而不断增加，例如，水力发电将从 $2.75 \times 10^3 \text{GWh}$ 增加到 $3.07 \times 10^3 \text{GWh}$ ，光伏发电将从 $8.66 \times 10^3 \text{GWh}$ 增加到 $9.62 \times 10^3 \text{GWh}$ ，在这样可再生能源快速增长的情况下，扩容是不可避免的，如图 4 所示，水力发电、风力发电、光伏发电以及生物质发电都在第一时期进行了扩容，天然气发电在第二时期扩容。

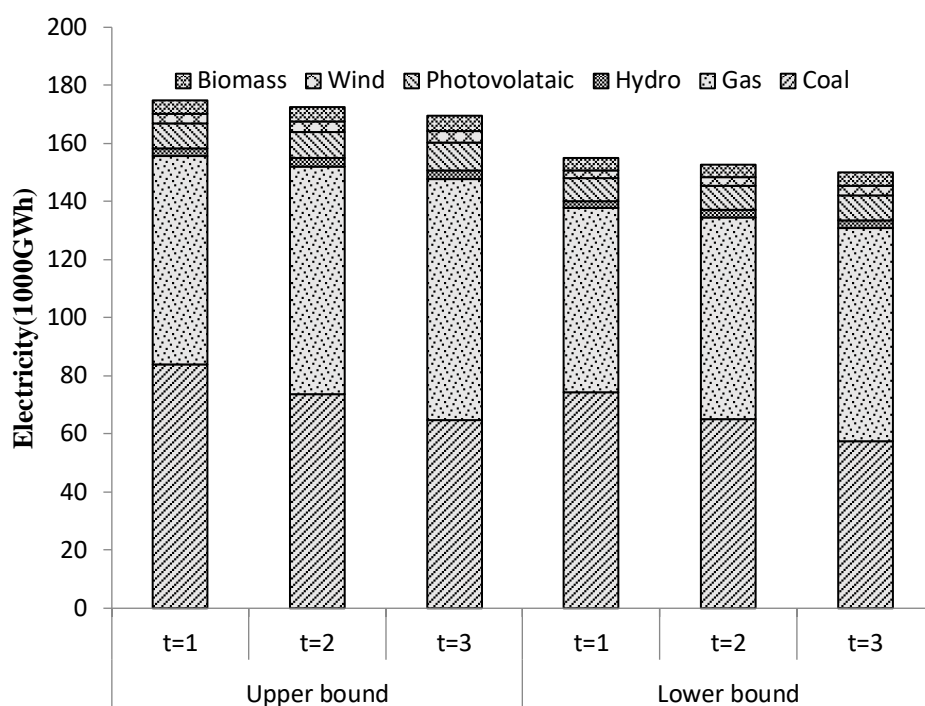


图 3 清洁电力供应结果

	p=0. 01			p=0. 05			p=0. 1		
	t=1	t=2	t=3	t=1	t=2	t=3	t=1	t=2	t=3
Natural gas-fired power	0	2.3	0	0	2.3	0	0	2.3	0
Hydropower (GW)	0.1	0	0	0.1	0	0	0.1	0	0
Photovoltaic power (GW)	0.05	0	0	0.05	0	0	0.05	0	0
Wind power (GW)	0.2	0	0	0.2	0	0	0.2	0	0
Biomass-fired (GW)	0.05	0	0	0.05	0	0	0.05	0	0

图 4 清洁能源扩容结果

污染物排放控制

广州市的化石燃料占主导地位的资源结构造成了严重的空气污染，使空气污染控制压力增大，图 5 显示了污染物的排放结果，其中考虑了二氧化硫（SO₂）、氮氧化物（NO_x）、和颗粒物（PM），结果表明：随着时间的推移，污染物的排放量将会减少，这可能是由于使用了大量的清洁能源以及减少了煤炭的使用的结果，在不同的 α 水平下，污染物排放量也不同， α 值越接近于 1，污染物排放量越少，较低的 α 水平将对应于违反约束和更高水平的污染物排放的风险，这意味着增加环境污染的风险。决策者可以根据城市的规划选择相应的 α 水平。也可以给决策者提供更多的选择及参考。

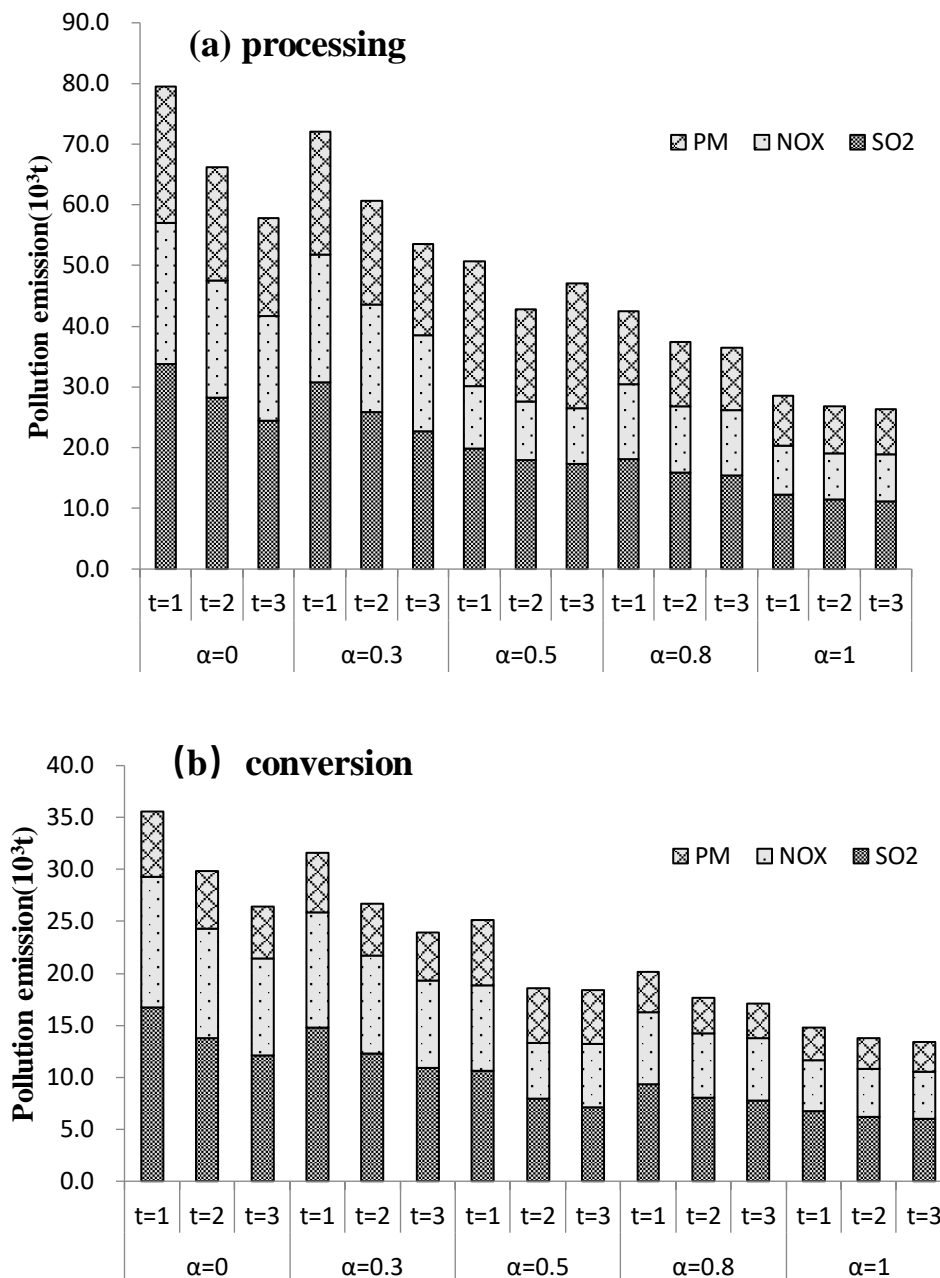
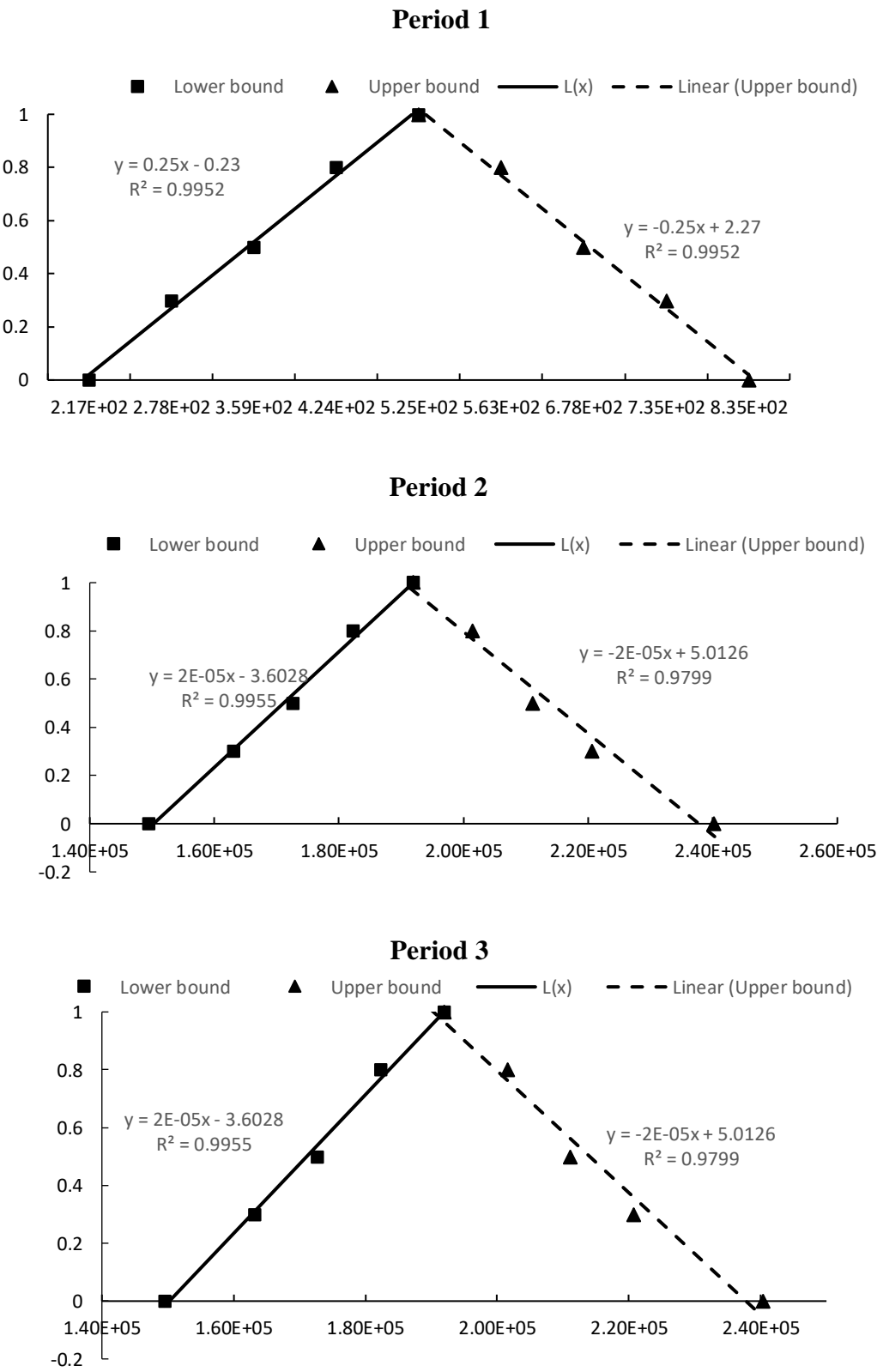


图 5 污染物排放结果

森林面积及系统成本

图 6 给出了不同 α 水平下的森林面积和目标函数值，从决策变量的隶属度函数 (SA) 和目标函数值 (f) 上看，森林效益及其相应的成本在任何 α 水平下都有相应数值，并很好的通过了线性回归，例如，如果决策者倾向于生态森林保护，则可以选择 $\alpha=0.8$ 水平下的值，而当资金不够时，则可以考虑较低的 α 水平， α 水平越接近于 1，

则决策方案越准确，而 α 水平越接近于 0，则给出的解决方案越模糊，决策者可以根据自己的需要选择相应的解决方案。



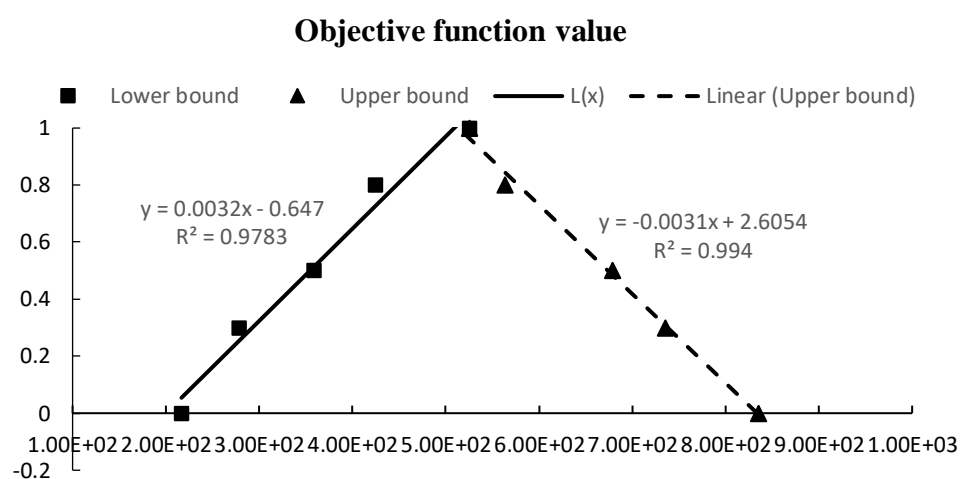


图 6 不同时期下的森林面积及目标函数值