

珠三角城市群生态安全评估分析

珠三角城市群生态安全评价系统是由 8 类因素共 54 个指标组成的一个复合系统（详见表 1），综合评价历史 2010-2020 年的生态安全状况，并预测未来至 2027 年生态安全趋势，为地区生态安全管理决策提供有效地帮助。8 类因素包括：人口社会、资源用量、生态用地、大气环境、水体环境、固体废物、经济和环境其他。所选用的统计数据主要来源于 2010-2019 年珠江三角洲 9 个城市的《城市统计年鉴》、《农村统计年鉴》、《社会经济统计年鉴》和《国民经济和社会发展统计公报》，以及 2010-2019 年《广东省统计年鉴》提供的相关数据。

表 1 珠三角城市群生态安全评价指标体系

目标层	因素层	指标层	属性
珠三角城市群生态安全评价指标体系	人口社会	人口密度	-
		人口自然增长率	-
		年末户籍人口数	-
		城镇化率	-
		城镇登记失业率	-
		平均每万人口普通高校在校学生数	+
		平均每万人口中小学生在学生数	+
		规模以上工业企业每万人 R&D 活动人员	+
		千人卫生技术人员	+
		卫生机构数	+
		城镇恩格尔系数	-
		人均道路面积	+
		人均住房面积	+
	资源用量	人均水资源量	+
		用水量/水资源总量	+
		万元 GDP 用水量	-
		原煤消耗比例	-
		万元 GDP 能耗	-
	生态用地	人均耕地面积	+
		人均公共绿地面积	+
		森林覆盖率	+
		建成区绿化覆盖率	+
		灌木林面积	+
	大气环境	万元 GDP SO ₂ 排放强度	-
		万元 GDP 烟尘排放强度	-
		空气综合污染指数	-
		酸雨频率	-
		年平均降水量	+
		年平均气温	+
	水体环境	万元 GDP 废水排放量	-
		饮用水质达标率	+
		工业废水达标处理率	+
		城市生活污水处理率	+
	固体废物	万元 GDP 固废排放强度	-

经济	工业固体废物处置利用率	+
	生活垃圾无害化处理率	+
	城镇人均可支配收入	+
	人均固定资产投资额	+
	人均 GDP	+
	经济密度	+
	城市基础设施投资	+
	研究与发展经费占 GDP 比例	+
	第三产业占 GDP 比例	+
	第二产业占 GDP 比例	-
	化肥施用实物量	-
	农药施用量	-
	成灾面积占受灾面积比例	-
	灾害直接经济损失	-
	大陆海岸线长度	+
	水域面积率	+
	水土流失治理面积	+
	道路交通噪声监测等效声级	-
	区域环境噪声等效声级	-

首先，基于模糊随机生态安全评估方法，得出第一套 2010-2027 年珠三角城市群生态安全评价结果。为了能更好地揭示不同要素对生态安全系统的影响，基于情景扰动和优化驱动的动态 CGE 模型，得出第二套未来 2021-2027 年生态安全水平发展态势。情景设置包括 LSD 和 CEM 情景。LSD 为缓慢社会经济发展情景，即在能源强度与化石燃料使用维持不变的情况下，通过减缓工业经济增长从而减少排放量。CEM 为碳减排情景，即在工业增长率维持不变的情况下，采取相应的减排措施，例如增加新技术从而帮助减少能源强度与化石燃料的使用量。此生态安全评估系统能全面反映生态安全评价指标体系的完备性、动态性、可比性和层次性，为城市群生态安全的管理与调控提供科学依据。在咨询专家意见的基础上，结合本研究的计算结果，将珠三角城市群生态安全评价结果分为 5 个等级，包括不安全、较不安全、一般安全、较安全和高度安全（如表 2 所示）。

表 2 珠三角城市群生态安全水平等级

生态安全指数取值范围	< 0.4	0.4-0.6	0.6-0.7	0.7-0.9	>= 0.9
安全水平等级	不安全	较不安全	一般安全	较安全	高度安全

根据上述相关指标体系、数据、情景设置以及安全等级分级标准，得出一套珠三角城市群历史 2010-2020 年生态安全等级评价结果，以及两套未来 2021-2027 年生态安全等级评价结果。基于模糊随机生态安全评估结果，2010-2020 年珠三角城市群生

态安全值总体呈稳定上升趋势（如图 1 所示），生态安全等级从不安全发展至一般安全状态，说明历经长时期的综合整治，珠三角生态安全状况有了质的改善。其中 2015 年整体安全水平较 2014 年有大幅度提升，主要原因为生活垃圾无害化处理率的提升（如图 2 所示）。但 2017 年的安全水平有小幅下降，这主要是由人均道路面积缩减，工业固体废物处置利用率减少以及灾害直接经济损失的增加导致的。2020 年安全水平也有小幅下降，主要是由城镇登记失业率上升造成的，这说明社会经济状态和环境响应是制约生态安全水平的主要限制因子。评价结果预测珠三角未来总体生态安全水平将维持在一般安全状态，说明未来时期珠三角生态安全问题仍需关注。在 2021-2027 年，珠三角生态安全等级呈先下降、后上升的趋势（如图 1 所示）。其中，2022 年生态安全等级预测由 2021 年的 0.63 降至 0.61，主要原因为成灾面积比例与水土流失治理面积的增加（如图 2 所示）。2022-2027 年，生态安全值预测将缓慢提升至 0.69，这主要是由人口社会和经济要素指标的提升，例如人均 GDP 和经济密度的增加，第二产业占 GDP 比重的减少以及城镇恩格尔系数的增长等。同时环境因素指标也对安全值的提升起到了重要的作用，比如万元 GDP SO_2 和万元 GDP 烟尘排放强度以及废水排放量的减少，城市污水处理能力的提升。虽然珠三角生态安全等级在未来后期呈上升趋势，但由于人口密度的增长，用水量与能耗的增加，人均耕地和灌木林面积的缩减以及区域道路环境噪声的增强，珠三角安全水平变化较平缓，没有实质性的大幅提升。因此，结果表明人口、资源压力与环境状态可能是未来制约珠三角生态安全水平的限制因子。

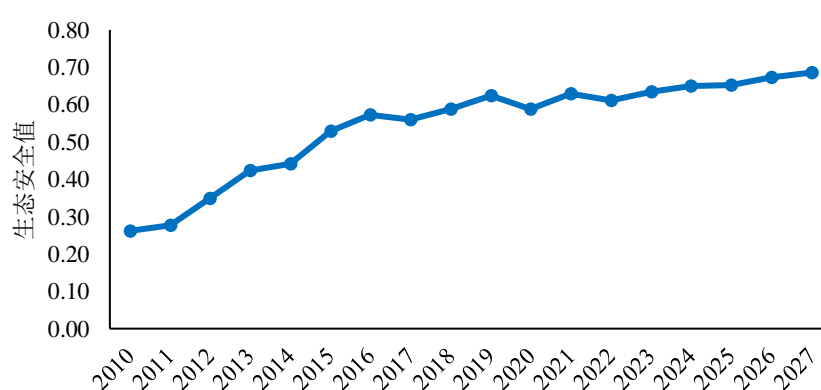


图 1 珠三角城市群生态安全水平变化趋势（2010-2027 年）

		基于模糊综合评判生态安全等级																基于优化驱动模型生态CGE (LSD情景模拟)																基于优化驱动模型生态CGE (CEM情景模拟)															
		2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035	2036	2037	2038	2039	2040	2041	2042	2043	2044	2045	2046	2047										
1.人口社会	人口密度	0.0241	0.0207	0.0202	0.0203	0.0203	0.0204	0.0205	0.0205	0.0205	0.0205	0.0205	0.0205	0.0205	0.0205	0.0205	0.0205	0.0205	0.0205	0.0205	0.0205	0.0205	0.0205	0.0205	0.0205	0.0205	0.0205	0.0205	0.0205	0.0205	0.0205	0.0205	0.0205	0.0205	0.0205	0.0205	0.0205	0.0205	0.0205	0.0205									
	人口自然增长率	0.0019	0.0013	0.0009	0.0013	0.0016	0.0012	0.0012	0.0012	0.0012	0.0012	0.0012	0.0012	0.0012	0.0012	0.0012	0.0012	0.0012	0.0012	0.0012	0.0012	0.0012	0.0012	0.0012	0.0012	0.0012	0.0012	0.0012	0.0012	0.0012	0.0012	0.0012	0.0012	0.0012	0.0012	0.0012	0.0012	0.0012	0.0012	0.0012	0.0012								
	城镇年末常住人口数	0.0044	0.0036	0.0030	0.0019	0.0018	0.0018	0.0018	0.0018	0.0018	0.0018	0.0018	0.0018	0.0018	0.0018	0.0018	0.0018	0.0018	0.0018	0.0018	0.0018	0.0018	0.0018	0.0018	0.0018	0.0018	0.0018	0.0018	0.0018	0.0018	0.0018	0.0018	0.0018	0.0018	0.0018	0.0018	0.0018	0.0018	0.0018	0.0018	0.0018	0.0018							
	城镇化率	0.0010	0.0014	0.0010	0.0010	0.0010	0.0010	0.0010	0.0010	0.0010	0.0010	0.0010	0.0010	0.0010	0.0010	0.0010	0.0010	0.0010	0.0010	0.0010	0.0010	0.0010	0.0010	0.0010	0.0010	0.0010	0.0010	0.0010	0.0010	0.0010	0.0010	0.0010	0.0010	0.0010	0.0010	0.0010	0.0010	0.0010	0.0010	0.0010	0.0010	0.0010							
	城镇登记失业率	0.0002	0.0004	0.0004	0.0003	0.0007	0.0005	0.0002	0.0008	0.0004	0.0003	0.0003	0.0003	0.0003	0.0003	0.0003	0.0003	0.0003	0.0003	0.0003	0.0003	0.0003	0.0003	0.0003	0.0003	0.0003	0.0003	0.0003	0.0003	0.0003	0.0003	0.0003	0.0003	0.0003	0.0003	0.0003	0.0003	0.0003	0.0003	0.0003	0.0003	0.0003	0.0003						
	万人中普通高等院校在校生数	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000						
	万人中中等专业学校在校生数	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000					
	规模以上企业万人R&D活动十人	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000				
	卫生技术人员	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000				
	城镇恩格尔系数	0.0010	0.0002	0.0000	0.0002	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001			
	人均耕地面积	0.0000	0.0002	0.0001	0.0001	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000			
	人均水资源量	0.0000	0.0002	0.0001	0.0001	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000			
2.资源利用	用水量-水资源总量	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000				
	万元GDP用水量	0.0000	0.0001	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000				
	能源消耗比例	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000				
	万元GDP能耗	0.0000	0.0001	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000				
	人均耕地面积	0.0000	0.0002	0.0001	0.0001	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000				
	人均公共绿地面积	0.0000	0.0004	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000				
	森林覆盖率	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000				
	建成区绿化覆盖率	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000				
	建成区绿化覆盖率	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000				
	建成区绿化覆盖率	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000				
	建成区绿化覆盖率	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000				
3.生态环境	万元GDP-0.5-1.0-1.5-2.0-2.5-3.0-3.5-4.0-4.5-5.0-5.5-6.0-6.5-7.0-7.5-8.0-8.5-9.0-9.5-10.0-10.5-11.0-11.5-12.0-12.5-13.0-13.5-14.0-14.5-15.0-15.5-16.0-16.5-17.0-17.5-18.0-18.5-19.0-19.5-20.0-20.5-21.0-21.																																																

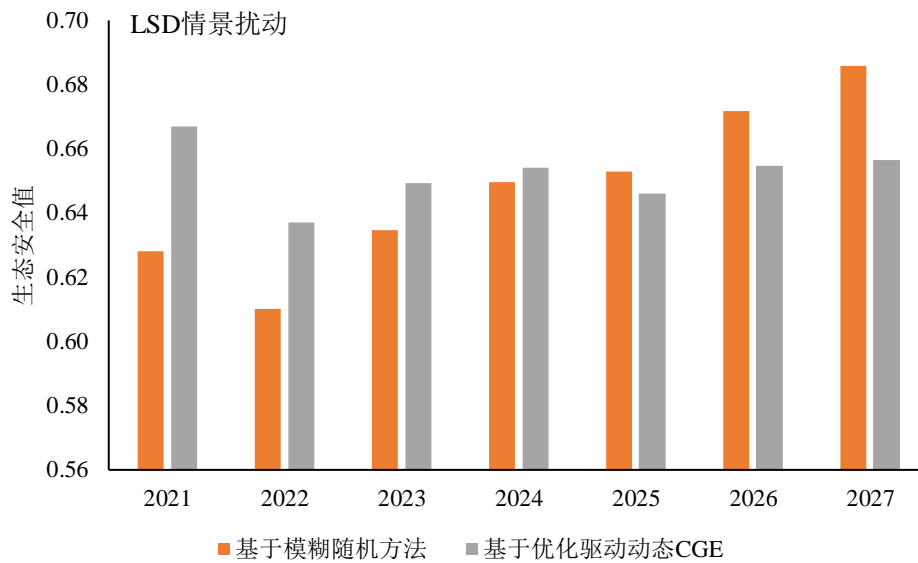


图 3 LSD 情景下珠三角城市群未来生态安全评估（2021-2027 年）

CEM 情景下的 2021-2027 年珠三角总体生态安全水平与 LSD 情景相似（如图 4 所示），呈现先下降、后波动的趋势，但其安全水平相较于 LSD 情景偏低。影响生态安全的主要原因是由于 CEM 情景下，工业增长率持续提升，而采取的相应减排措施力度不够。同时，相较于 LSD 情景，CEM 情景下第三产业的发展受到了约束，导致产业结构的优化停滞不前，所以该指标安全值较低（如图 2 所示）。

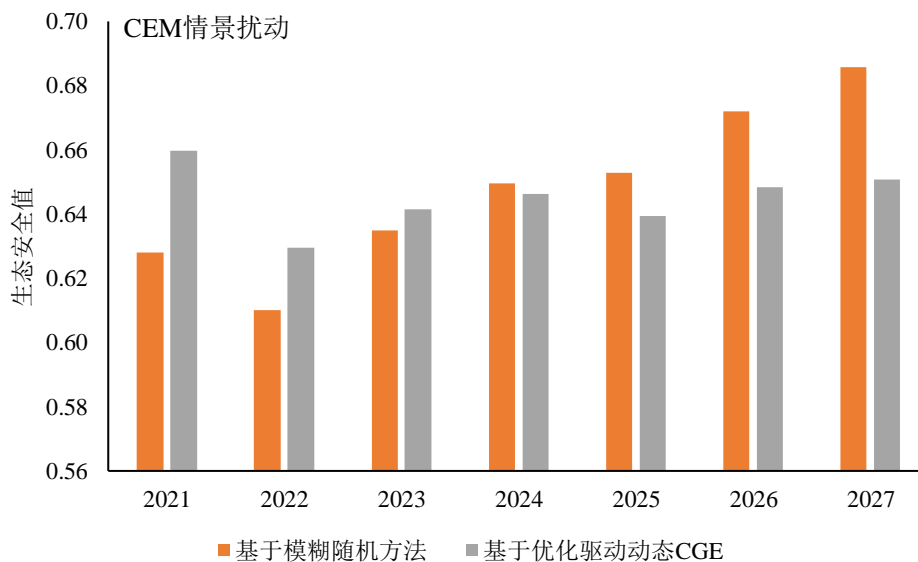


图 4 CEM 情景下珠三角城市群未来生态安全评估（2021-2027 年）

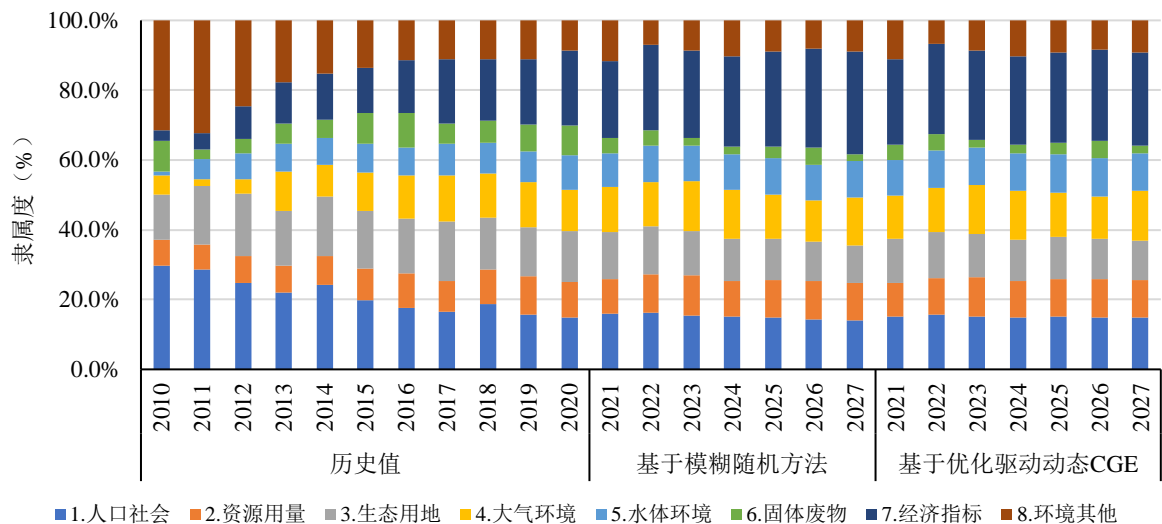


图 5 珠三角生态安全指标隶属度 (2010-2027 年)

从生态安全指标隶属度的角度分析（如图 5 所示），经济指标的贡献率呈逐步递增的趋势，从 2010 年的 3.0% 增长至 2020 年的 21.5%。资源用量、生态用地、大气和水体环境的贡献率也从 2010 年的 7.3%、13.1%、5.4% 和 1.0% 上升至 2020 年的 10.3%、14.7%、11.7% 和 10.0%。但人口社会、固体废物和环境其他指标的贡献率从 2010 年的 29.7%、8.9% 和 31.5% 下降至 2020 年的 14.7%、8.5% 和 8.6%。2021-2027 年的生态安全指标隶属度预测没有较大的趋势变化。经济指标的贡献率预测将逐步增加至 2027 年的 29.4%，其次，资源用量、大气和水体环境指标将缓慢上升至 10.6%、13.8% 和 10.4%。人口社会、生态用地、固体废物和环境其他指标将下降至 2027 年的 14.1%、10.8%、2.0% 和 8.9%。此外，情景的扰动对生态安全指标的隶属度没有带来显著的变化。通过上述生态安全指标隶属度的变化可看出，珠三角生态安全水平的提高是依赖于长时期对于资源用量的管控。但从长远看，人工调节不能替代自然调节，未来应着重关注于产业结构的转变，即推进发展现代化服务业，从而降低区域生态环境压力，帮助区域的生态安全迈向更高的水平。

针对珠三角城市群的复杂性，此城市群生态安全评价系统能全面反映生态安全指标体系的完备性、动态性、可比性和层次性。结果表明人口、资源压力与环境状态可能是未来制约珠三角生态安全水平的限制因子。同时，珠三角产业结构亟需深层次优化，需加速推进第三产业现代化服务业发展。因此，通过对珠三角城市群复合系统的生态安全动态评估以及不同情景的扰动，掌握珠三角城市群历史生态安全水平以及对未来不同发展趋势，为城市生态系统综合诊断与风险预测技术的开发提供技术支持。

