

城市群生态系统安全指标分析

针对城市群尺度生态安全研究较为缺乏以及研究时序不长且缺乏其过程和动态分析的研究现状，本研究以多层级珠三角城市群为研究对象，建立了一套 8 层次、54 个具体指标的城市群生态安全评价指标体系，并构建了生态安全预测模型，综合评价 2010—2027 年的生态安全状况以了解和掌握珠三角城市群生态安全的状况、趋势及空间分异，为地区生态安全维护与管理决策提供依据。

1 人口社会指标

社会持续性作为可持续发展概念的基本要素之一，其与经济持续性、生态持续性相互独立又相互联系，共同推进多层次生态安全屏障的构建。因此，选取典型的单城市及多城市群为研究区域，并构建一体化的生态安全指标评估体系，能够为可持续发展策略的制定与选择提供科学依据。

社会系统压力指标是反映人口发展和社会经济发展速度的重要指标，包括户籍年末人口数、人口自然增长率、人口密度及城镇化水平等指标。根据图 1 所示，广州市的人口自然增长率和人口密度逐年增加，其人口密度将由每平方米 2094.32 人上升到 2497.37 人（2020 年到 2027 年），将成为中国人口最密集的城市之一。由于不断增加的人口压力，使得广州市的资源环境问题日益突出，如耕地、矿产资源短缺等，从而制约了该地区的可持续发展。同时，城镇登记失业率、城镇恩格尔系数、人均住房面积及人均道路面积等社会系统状态指标能够反映一个地区的人民生活水平。根据广州市的社会系统状态指标趋势可知（详见图 2），该地区的恩格尔系数及城镇登记失业率逐年下降，而人均住房面积及人均道路面积逐年增加，该趋势表明广州市的经济发展状况稳步改善，人民生活水平不断提高。此外，科教文卫水平作为反映人文综合实力的重要指标，对推动社会创新发展起到积极作用，其包括高等教育、九年义务教育、科技发展及卫生服务水平等指标。根据图 3 所示，广州市的高等教育率超过 10%，九年义务教育率高达 17%，每千人常住人口拥有约 15 名卫生技术人员，每万人常住人口拥有约 90 名科技发展人员，表明该地区不仅具备雄厚的师资力量和成熟的教育体系，而且拥有健全的医疗卫生服务体系及优渥的高层次人才引进政策。

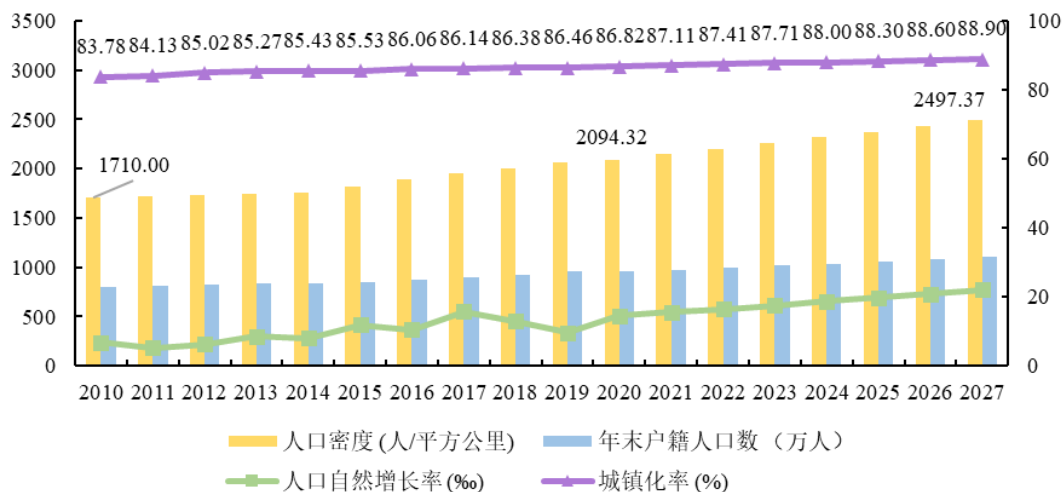


图 1 广州市社会系统压力指标趋势 (2010-2027 年)

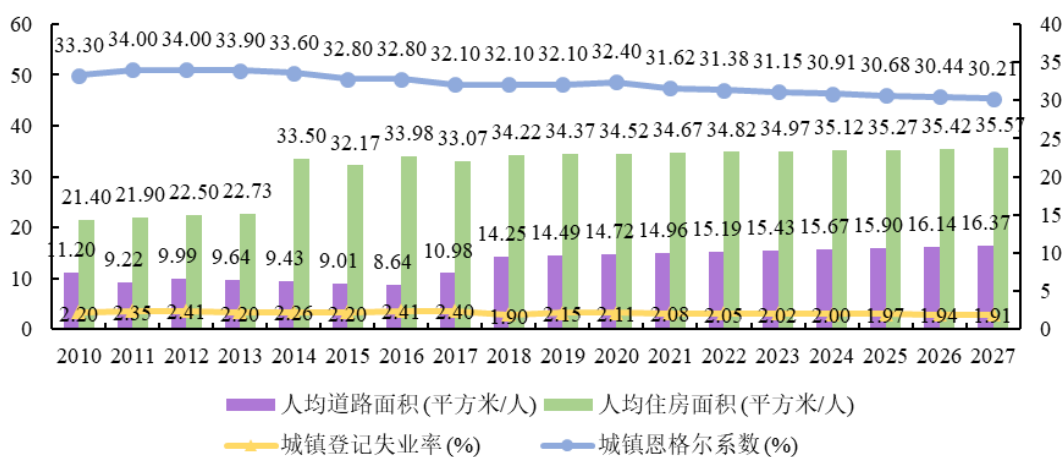


图 2 广州市社会系统状态指标趋势 (2010-2027 年)

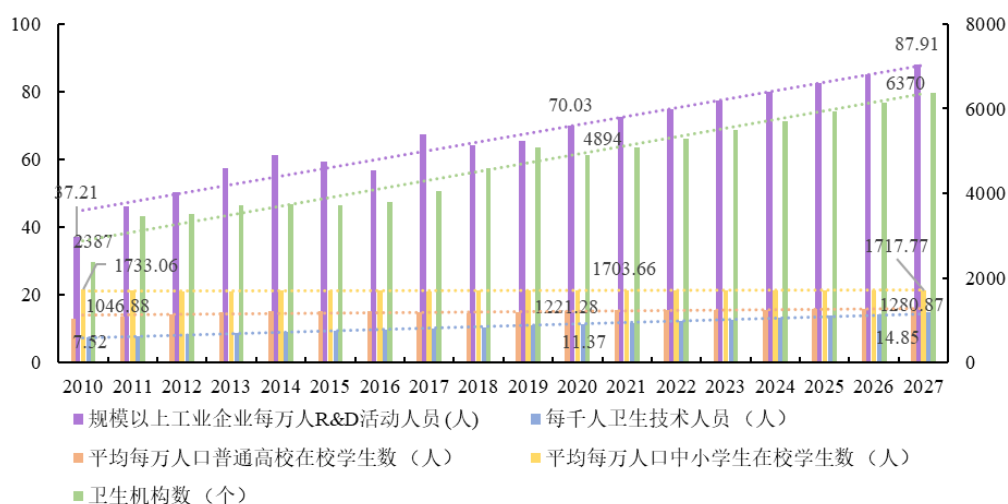


图 3 广州市社会系统反应指标趋势 (2010-2027 年)

相较于单城市，城市群是一个多核心的城市系统，其社会系统指标能够更全面、更深入地衡量社会发展水平。广深莞城市群作为珠三角经济活力最强，社会发展水平最高的核心区域，其人口密度将于 2027 年达每平方公里约 4672 人（详见图 4），表明该区域将面临着巨大的人口压力。同时，根据图 5 所示，随着城镇化进程的不断推进，该区域的城镇化水平将超过 92%，其中深圳市的城镇化水平早已达 100%。不断增加的城镇化水平不仅完善了该地区产业结构而且提供了良好的就业环境，使得该区域的城镇登记失业率不断下降，并于 2027 年降至 1.93%。但在该区域经济快速发展的同时，生态环境也面临着负面的影响，如自 2018 年起，人均道路面积及人均住房面积逐年下降，主要归因于不断增加的人口压力。此外，广深莞的高等教育率仅约 5%（详见图 6），远低于广州市的高等教育水平，这是由于深圳市的高等院校较少，高等教育资源匮乏等。与此同时，广深莞城市群于 2027 年每万人常住人口将拥有 208 人科技发展人员，表明了该区域鼓励科技创新，落实人才引进措施，积极推动我国科技事业的发展，以提升我国的整体科技水平。

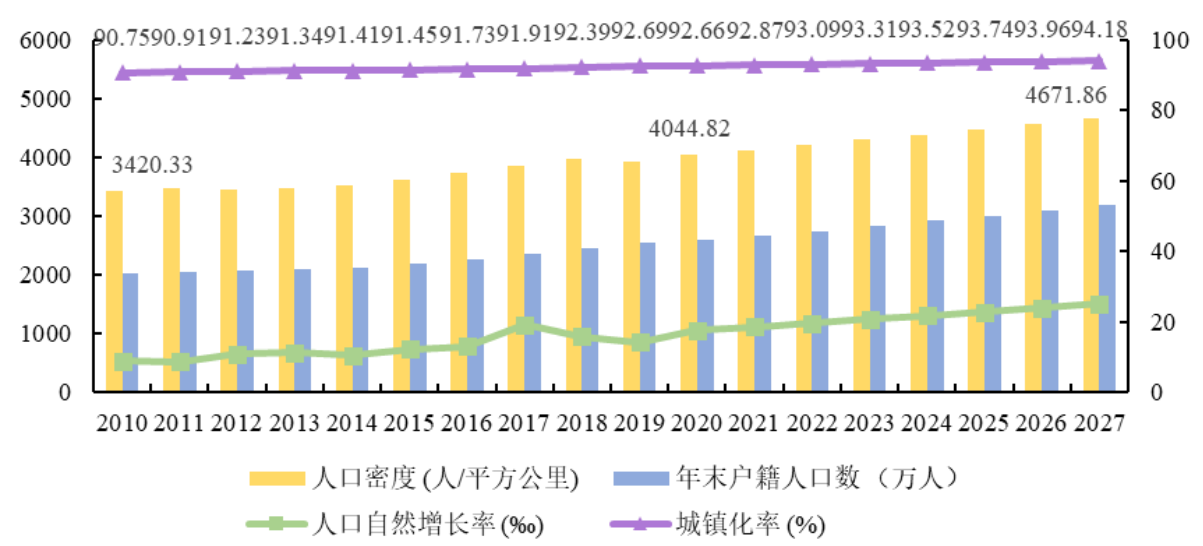


图 4 广深莞城市群社会系统压力指标趋势 (2010-2027 年)

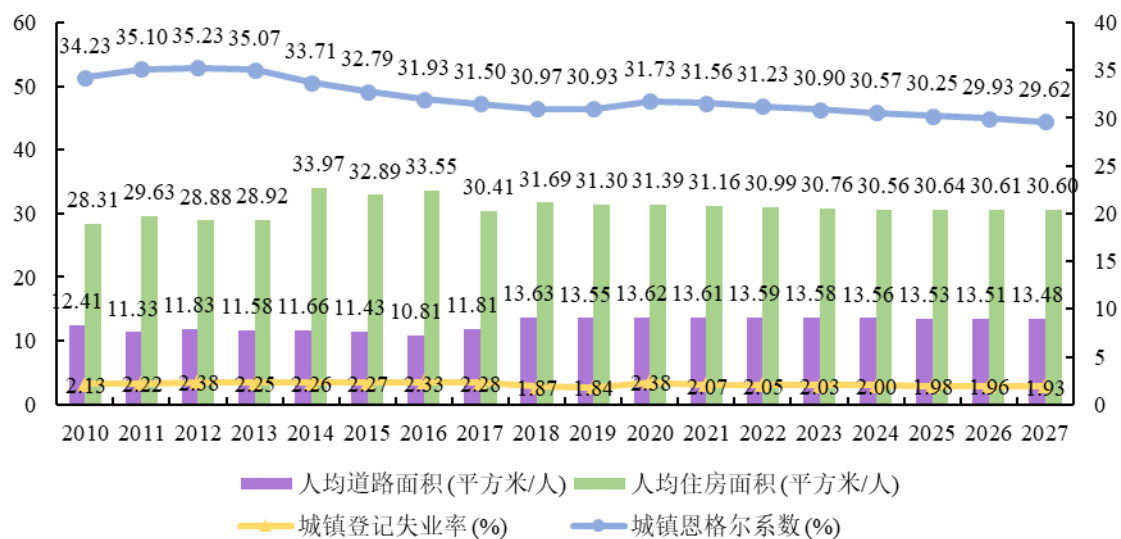


图 5 广深莞城市群社会系统状态指标趋势 (2010-2027 年)

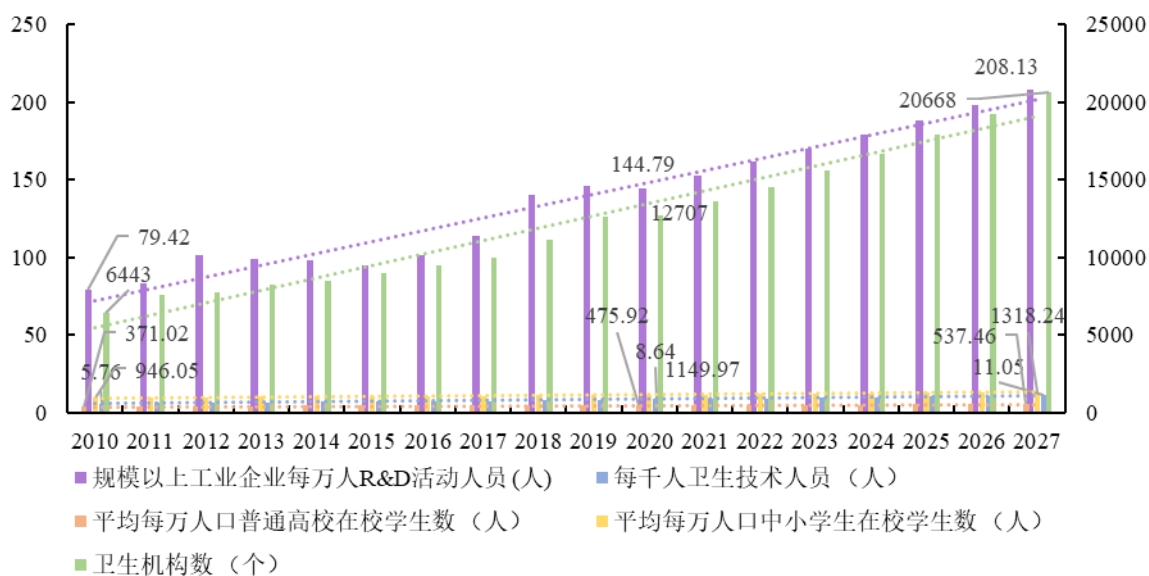


图 6 广深莞城市群社会系统反应指标趋势 (2010-2027 年)

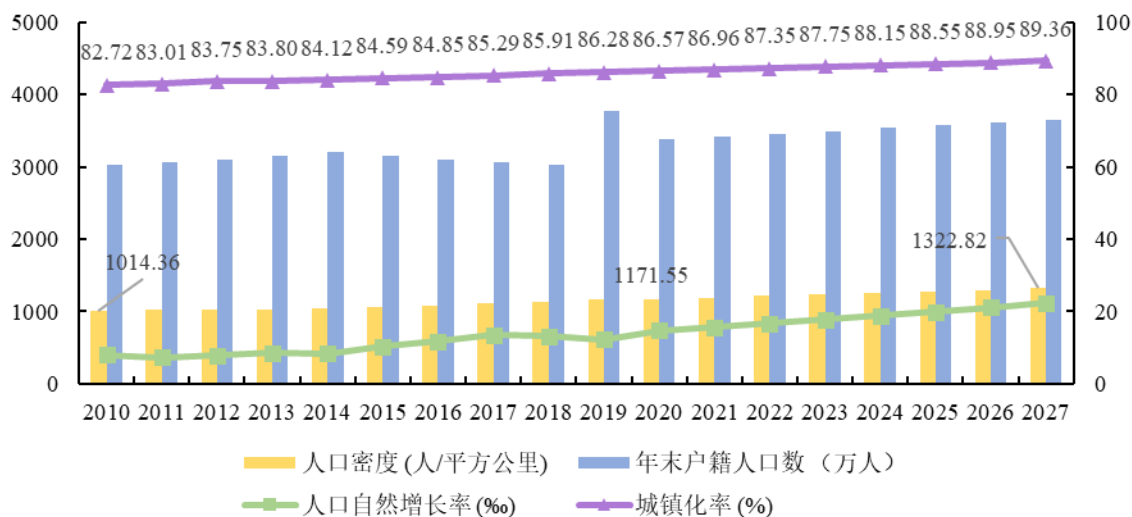


图 7 珠三角社会系统压力指标趋势 (2010-2027 年)

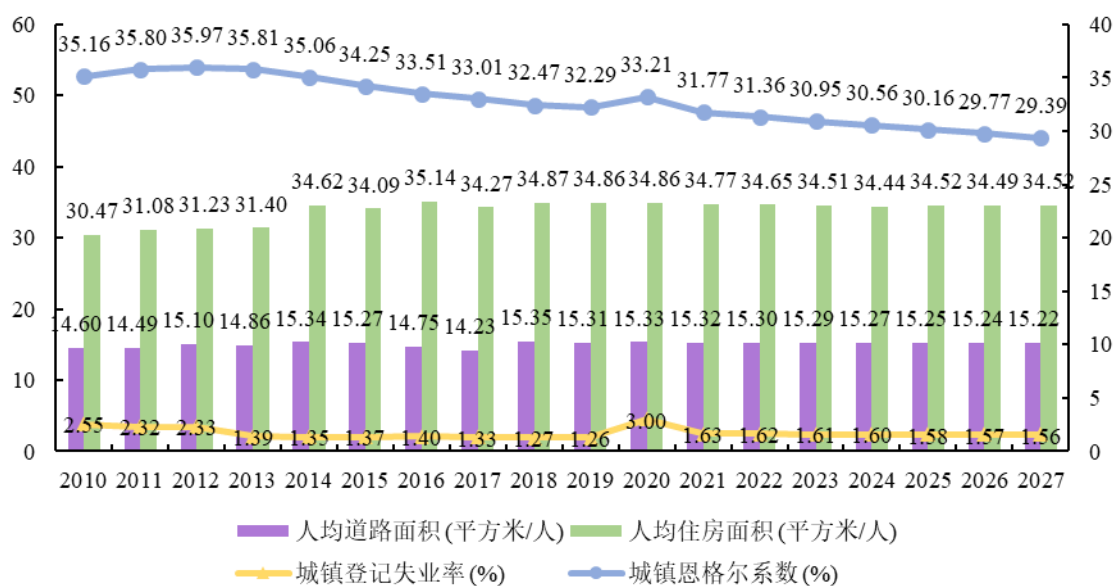


图 8 珠三角社会系统状态指标趋势 (2010-2027 年)

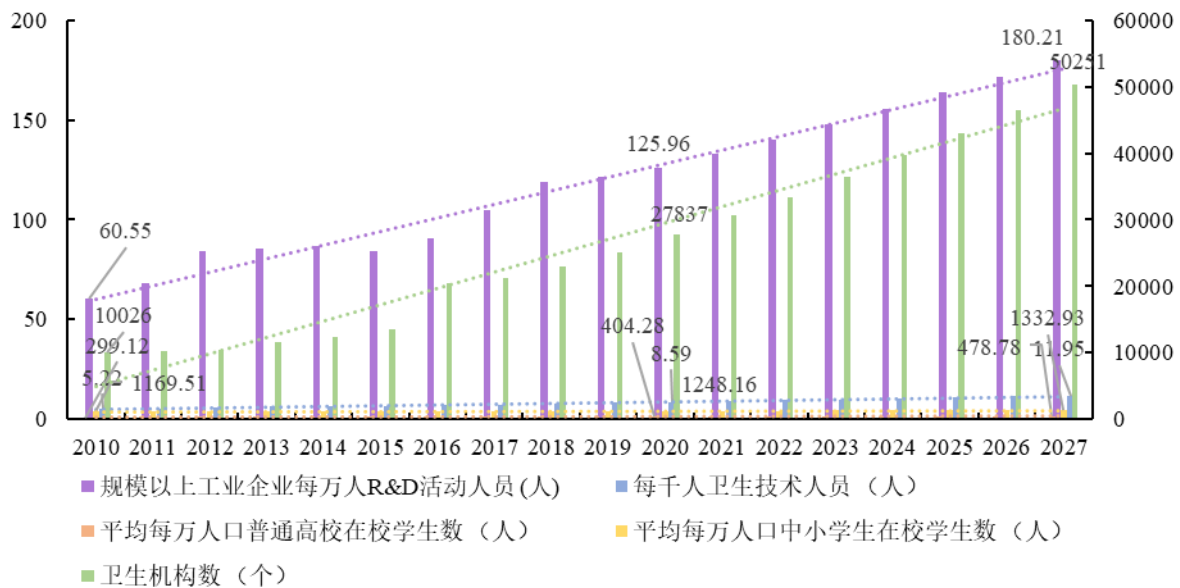


图 9 珠三角社会系统反应指标趋势 (2010-2027 年)

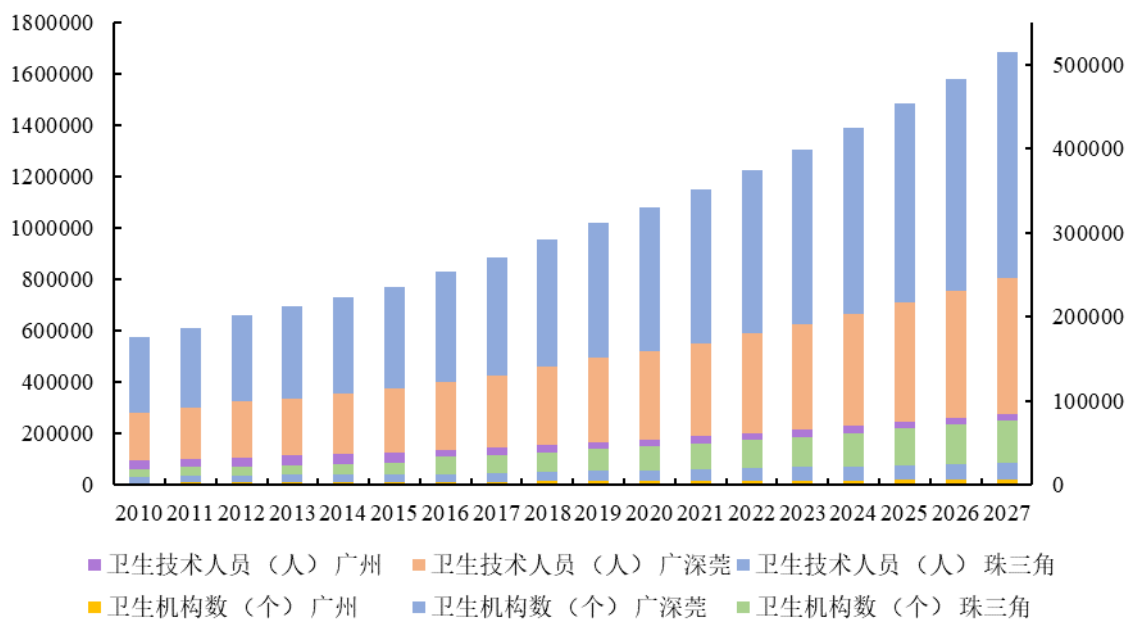


图 10 多层次区域社会系统卫生水平指标对比 (2010-2027 年)

珠江三角洲（简称“珠三角”）城市群是指分布在珠江三角洲或泛珠江三角洲经济区的主要城市，行政区划上包括广州、深圳、珠海、中山、东莞、佛山、江门、肇庆和惠州九个城市。根据图 7 所示，珠三角区域的人口密度仍然保持较高水平，继续超过上海和北京，成为人口最为密集的区域之一，这是由广州、深圳过高的人口密度导

致。同时，相较于2010年，珠三角的城镇恩格尔系数将由35.16%降至2027年的29.39%（详见图8），表明该区域的人民消费结构在稳步完善，生活水平在不断提高。此外，珠三角区域的卫生人员和卫生机构主要集中在广深莞三个城市（详见图9和图10）。因此，平衡发展珠三角城市群其它城市的卫生技术水平，建立完善的卫生服务体系，以保障珠三角区域生态安全，是当前亟需解决的问题。

总之，将人文社会指标纳入珠三角城市群生态安全评价指标体系有利于构建该地区生态安全屏障。由于珠三角城市群各个城市人文社会压力、状态及响应指标不尽相同，因地制宜采取相关政策能够促进该地区的可持续发展。具体而言，需要平衡珠三角城各个城市的卫生教育水平，合理调整产业结构以减少广深地区的人口压力，并通过积极引进高层次人才提高该区域的科技创新水平。

2 资源用量

该部分对三个层级生态系统的水资源指标（人均水资源量、用水量与水资源总量的比值以及万元GDP用水量）和能源资源指标（万元GDP能耗和原煤消耗比例）进行了现状和未来变化趋势的评估。

（1）水资源

图11和图12分别显示了三个层级历史（2010-2020年）和未来（2021-2027年）时期人均水资源量、用水量与水资源总量比值以及万元GDP用水量。按照人均水资源量是否低于600立方米的衡量标准，广州属于缺水型城市，广深莞经济圈和珠三角城市群均严重缺水。广州市多年平均人均水资源量为514立方米，仅为全省人均水资源量的三分之一，该市相当部分生产生活用水依靠外部调水。深圳作为全国经济中心城市，是全国最缺水的城市之一，其中80%的水源从市外的东江引入，多年来，深圳一直在为节水而努力。东莞市作为世界工厂，尽管河网密布，也是一个严重缺水的城市，多年平均本地水资源总量为20.76亿立方米，人均占有量仅两百多立方米，不到国际公认的人均500立方米的严重缺水线的二分之一。广州、深圳、东莞组成的广深莞经济圈同样面临生产生活缺水的现状，其历史时期人均水资源量的多年平均值仅为360立方米。两个层级（广州市和广深莞）用水量与水资源的总量比值较高，均为80%左右，进一步凸显了用水需求大，水资源总量少的矛盾。珠三角城市群多年平均人均水资源

量约为 500 立方米，城市群的快速发展，使水资源短缺的问题显得越来越突出。根据预测结果，到 2027 年，三个层级用水和水资源情况较历史时期变动不大。不过随着珠江三角洲水资源配置工程的建设 and 后期输配水，三个层级缺水的现状有望得到极大改善。万元 GDP 用水量反应总用水效率，该值越低，其用水效率越高。历史时期，三个层级万元 GDP 用水量均呈现下降趋势，分别下降了 40（广州市）、20（广深莞）和 30（珠三角）立方米/万元，表明用水效率的极大提高。预测结果显示，未来该值基本保持稳定并维持在较低水平（约 20~30 立方米/万元）。

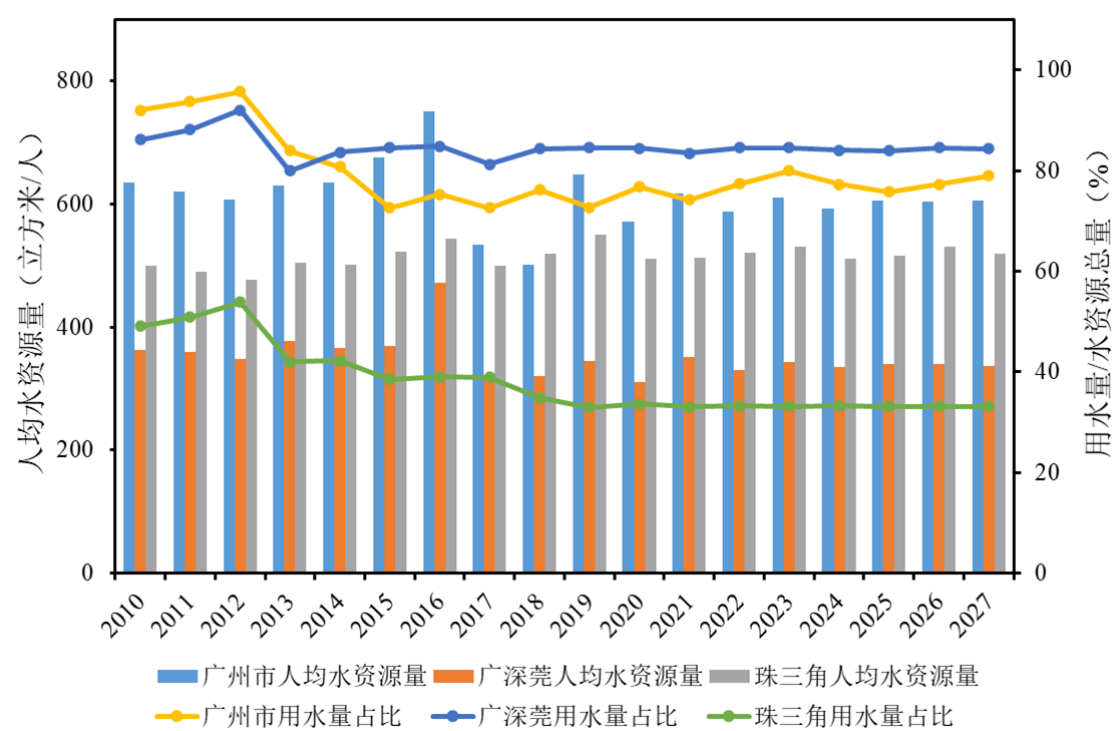


图 11 三个层级人均水资源量及用水量与水资源总量比值（2010-2027 年）

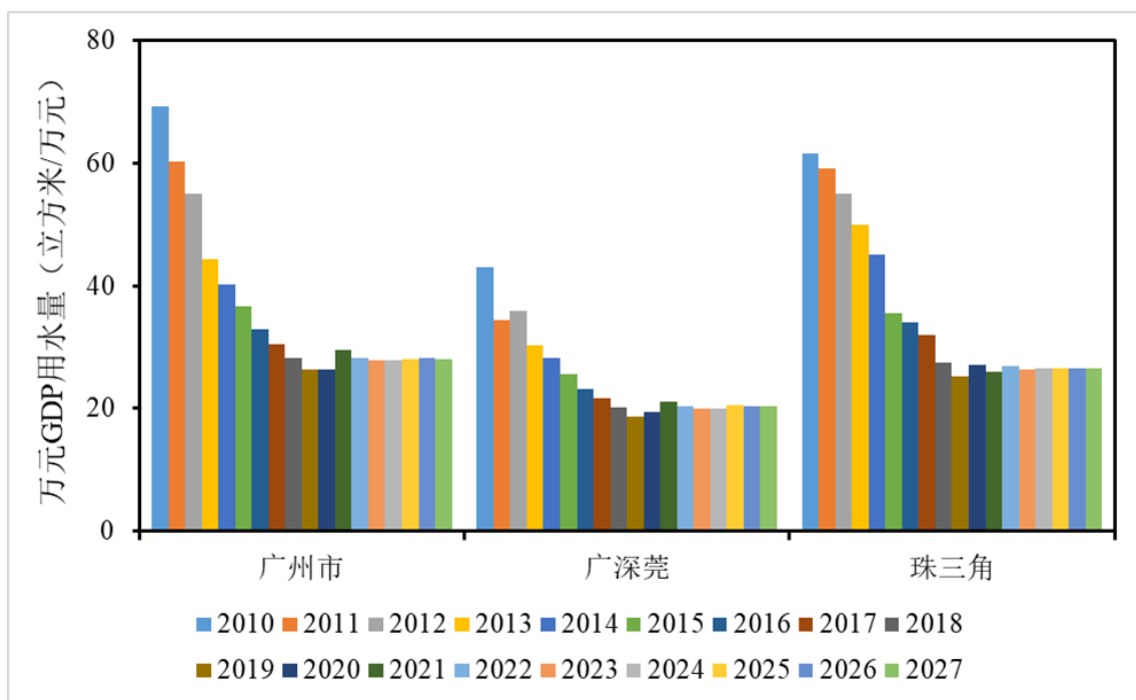


图 12 三个层级万元 GDP 用水量 (2010-2027 年)

(2) 能源资源

图 13 是三个层级万元 GDP 能耗和原煤消耗比例的历史值 (2010-2020 年) 和预测值 (2021-2027 年)。类似于万元 GDP 用水量，万元 GDP 能耗可以反应总用能效率，该值越低，其能效越高。2010 年到 2020 年，三个层级的该值均有明显下降，分别下降了约 40% (广州市)、46% (广深莞) 和 48% (珠三角)，表明政策手段对化石能源的限制和用能技术的持续升级使三个层级的用能效率获得了极大地提高。预测结果显示，未来该值会进一步下降，到 2027 年达到 0.15 ~ 0.24 吨标煤/万元。原煤消耗比例也呈现出类似的趋势，从历史到未来煤耗占比持续下降 (广州市从 30% 下降到约 10%；广深莞经济圈从 56% 下降到 35%)。对于珠三角城市群，原煤消耗占比从 2010 年到 2020 年下降了约 10%，到 2027 年，该值下降幅度较小，保持在相对稳定水平。原煤消耗比例的下降表明未来三个层级的能源电力系统将更加清洁和可持续。

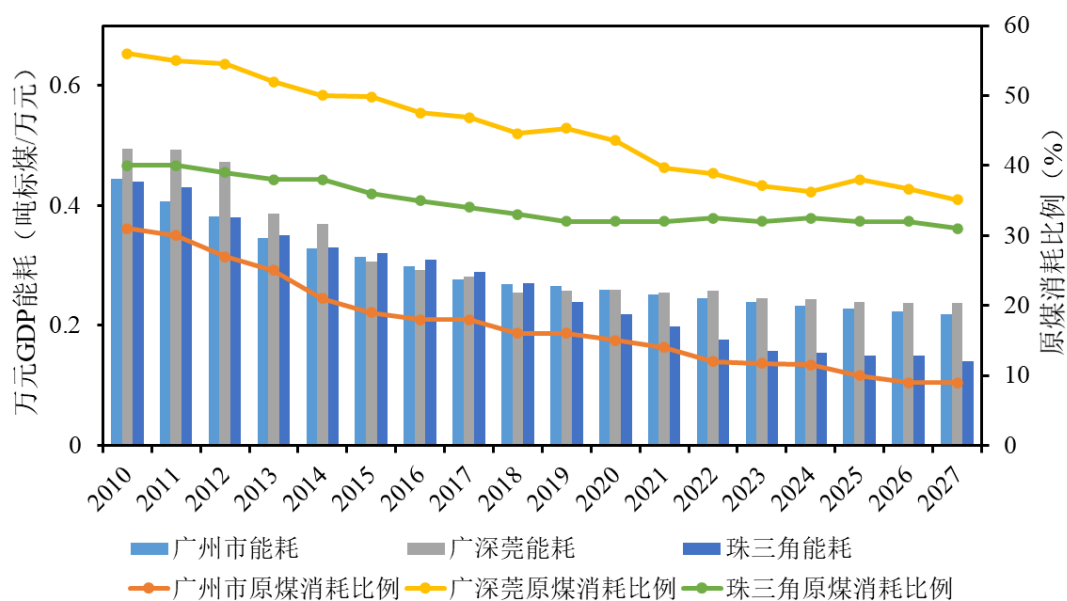


图 13 三个层级万元 GDP 能耗和原煤消耗比例 (2010-2027 年)

结果表明，虽然难以改变三个层级对应城市水资源短缺的现状，但是未来各个层级城市的用水效率将会提高；另一方面，未来三个层级的清洁能源将占据更大的比重，整个能源电力系统将更加可持续。因此，从资源角度来看，未来三个层级生态系统的安全等级将会有所提升。

3 生态用地

图 14 展示了珠三角不同区域尺度耕地面积的动态变化情况。由图可以看出，自 2010 年以来，珠三角地区人均耕地面积总体呈下降趋势。首先，从历史角度考虑，广州人均耕地面积由 2010 年的 0.0125 公顷/人下降到 2020 年的 0.0090 公顷/人，下降幅度达 28.0%，广深莞区域的人均耕地面积由 0.0117 公顷/人下降到 0.0067 公顷/人，下降幅度达 42.7%。人均耕地面积大幅度的下降主要是由该区域高速的城市化带来的，这一结论与该区域高度发达的社会经济现状一致。我们还可以发现，珠三角的整体趋势与广州-广深莞区域不尽相同，呈现一个先增后减的倒 U 字形趋势。其中，2010-2012 年呈上升趋势，人均耕地面积由 0.0199 公顷/人上升到 0.0221 公顷/人；2012-2020 年呈下降趋势，由 0.0221 公顷/人下降至 0.0146 公顷/人。这是因为在珠三角九市中，除广深莞等经济高度发达城市外，也存在肇庆，江门等略欠发达地区；为满足区域内粮食供给，部分欠发达地区将增加耕地面积，提升农产品产量。但是，随着工业化进程的

加快，这些城市也逐步摆脱了对第一产业的依赖，布局产业升级，淘汰落后产能；这导致了工业用地的增加及耕地面积的相应减少，从而引发了人均耕地面积的整体下降。未来的预测值同样展示了相似的趋势，广州人均耕地面积由 2020 年的 0.0090 公顷/人下降到 2027 年的 0.0070 公顷/人；广深莞区域的人均耕地面积由 0.0067 公顷/人下降到 0.0051 公顷/人；而珠三角整体也下降至 0.0113 公顷/人。从工业发展的角度考虑，随着农业科技水平的提高，单位耕地面积作物产量不断上升，可以将更多的耕地用来发展高附加值产业。但是，从粮食安全的角度出发，耕地是宝贵的自然资源，更是粮食生产的必要要素，必须实行最严格的耕地保护制度，牢牢守住耕地红线。因此，对耕地指标的安全核算是保障珠三角生态系统安全稳定发展的重要环节，刻不容缓。

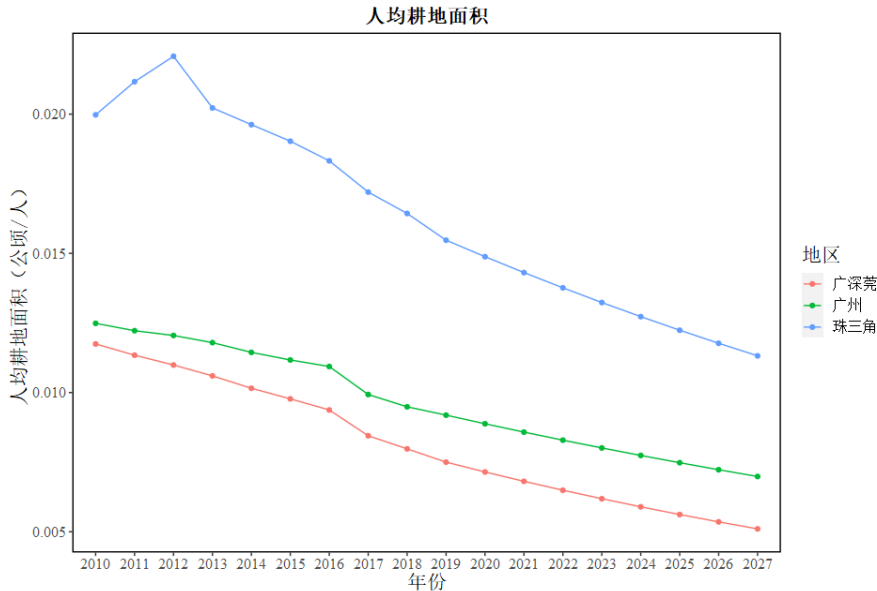


图 14 广州-广深莞-珠三角地区人均耕地面积

图 15 展示了珠三角不同区域尺度人均绿地面积的变化情况。在不同区域尺度下，变化趋势有一定差异性。首先，我们从历史数据的角度进行分析。从图中可以看出，珠三角整体呈先增加后平稳的趋势；其人均绿地面积从 2010 年的 13.63 m²/人先增长到 2016 年的 19.60 m²/人，而后稳定在这一水平。广深莞的增长趋势与珠三角整体类似，从 2010 年的 13.29 m²/人先增长到 2016 年的 20.24 m²/人，之后保持较稳定状态。明显可以看出，2010-2016 年间，广深莞地区的人均绿地面积增速大于珠三角整体，从 2010 年的不到整体平均水平到 2016 年的超过整体水平；这主要得益于经济发达地区对环境保护重视程度的空前提高，这在广州体现的尤为明显。广州的人均绿地面积从

2010 年的 $11.87 \text{ m}^2/\text{人}$ 增长到 2016 年的 $22.39 \text{ m}^2/\text{人}$ ，增幅高达 88.63%，并在 2016 年后继续保持增长态势，于 2020 年达到 $23.51 \text{ m}^2/\text{人}$ ，远超同时期的珠三角平均水平（ $19.52 \text{ m}^2/\text{人}$ ）以及广深莞平均水平（ $21.13 \text{ m}^2/\text{人}$ ）。一方面，这一提升得益于政府对于环境保护的重视，积极制定中长期规划及政策，努力完善绿地保护机制，建立健全相应法律法规；在各界的通力合作下，将广州打造成美丽花城。另一方面可以看出，珠三角地区生态建设潜力巨大，区域内各城市可以以广州为模板，深入践行“绿水青山就是金山银山”的号召，充分考虑绿地生态要素在生态文明建设当中的重要角色，进一步提升珠三角城市群生态系统鲁棒性，打造生态安全模范先行区。对未来数据的预测也验证了我们的推论，2020-2027 年，广州的人均绿地面积继续保持高增长速度，在这七年间增加了 $1.96 \text{ m}^2/\text{人}$ ，达到 $25.47 \text{ m}^2/\text{人}$ ；而珠三角整体指标也在该时间段内展现了上升趋势，从 2020 年的 $19.52 \text{ m}^2/\text{人}$ 增长到 2027 年的 $19.84 \text{ m}^2/\text{人}$ ，支持“国家森林城市”的创建。

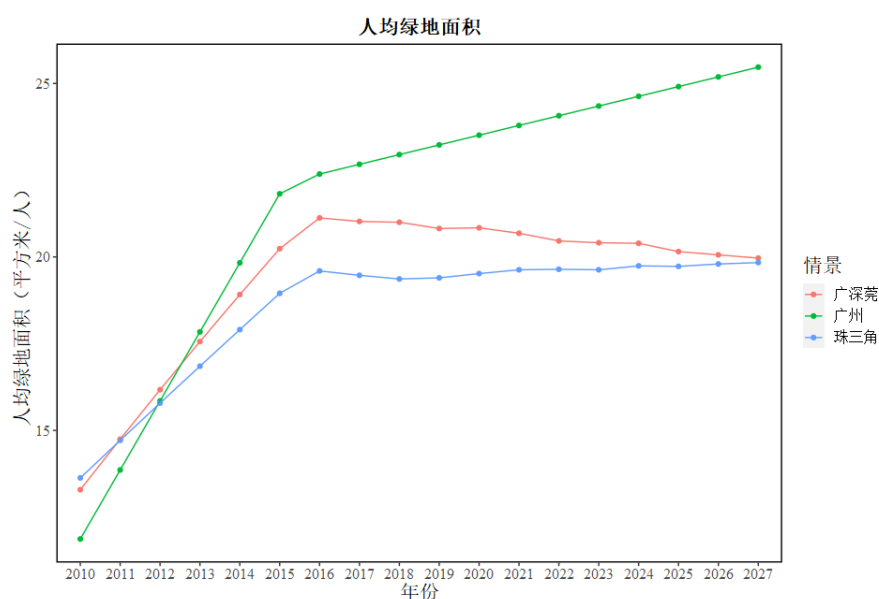


图 15 广州-广深莞-珠三角地区人均绿地面积

图 16 展示了珠三角不同区域尺度各种植被类型覆盖率的变化情况。由于森林与灌木林大部分是在自然界中长期演化天然形成的，其在研究时期内体量变化不大。广州灌木林覆盖率由 2010 年的 6.44% 上升到 2020 年的 7.16%，并将在 2020-2027 年间保持平稳态势；广深莞区域灌木林覆盖率在 2010-2020 年由 6.33% 上升到 7.09%，并在未来时期在这一水平波动；珠三角整体在 2010-2020 年间由 6.74% 下降到 6.32%，并保持小

幅下降趋势。三区域尺度 2010-2020 年间历史数据波动值均在 1%以内。同样的，广州森林覆盖率由 2010 年的 41.40%上升到 2020 年的 42.13%，广深莞区域由 40.12%上升到 40.98%，珠三角整体由 49.47%上升到 51.75%，三个区域尺度的森林覆盖率在 2020-2027 年间均保持稳定。总体来说，广州与广深莞区域森林覆盖率低于珠三角的平均水平。对于建成区绿化覆盖率，三个区域尺度均保持不同程度的上升态势。其中，珠三角整体的建成区绿化覆盖率由 2010 年的 37.14%增长到 2020 年的 44.14%，增长了 7 个百分点，在三个区域尺度中增幅最大；在 2020-2027 时间段，该指标将保持稳定。主要原因是随着城市化进程的加速，除广深莞外的珠三角城市对绿化及生态保障的要求逐步提高，致力于拓展城市群生态空间，改善人居环境。但是，这种良好态势在 2017 年后有减缓趋势。究其原因，这与城市发展过程达到一定瓶颈有着直接关系。珠三角城市群内部分城市无序化发展大量挤压森林体系和生态水网，城市内部、城市间生态破碎化问题严重，城乡绿化美化水平不均，生态服务功能亟待提高。然而，考虑到广州人均绿地面积依然保持增长态势的客观事实，这种瓶颈可以通过社会各方通力合作达到突破。珠三角各市应以广州为示范，在建立生态安全体系的基础上，辨识生态安全中的关键环节，推进生态环境可持续发展进程，体现区域生态高度融合、生态安全一体化建设的内在要求，将珠三角地区打造为全国首个“国家级森林城市群建设示范区”。

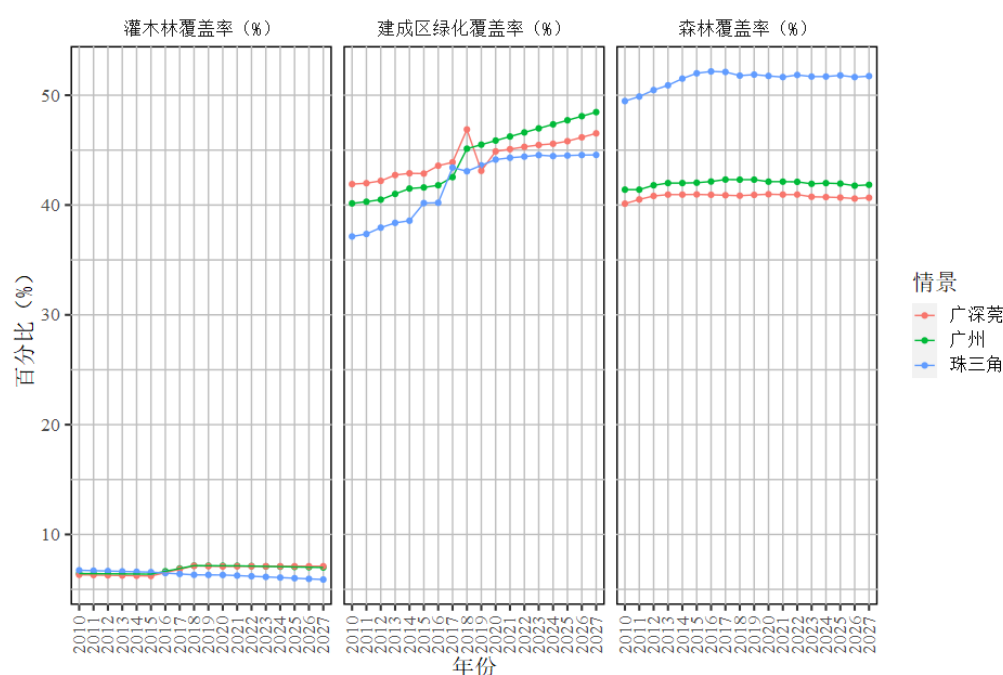


图 16 广州-广深莞-珠三角地区灌木林、建成区绿化、森林覆盖率

通过对不同用地生态指标的分析可以发现：（1）珠三角耕地面积整体上是下降趋势，这说明，随着农业科技水平的提高，单位耕地面积作物产量不断上升，可以将更多的耕地用来发展高附加值产业。但是，从粮食安全的角度出发，必须牢牢守住耕地红线，对耕地指标的安全核算刻不容缓。（2）从人均绿地面积考虑，珠三角地区生态建设潜力巨大，区域内各城市应更深入地践行“绿水青山就是金山银山”的号召，充分考虑绿地生态要素在生态文明建设当中的重要角色，进一步提升珠三角城市群生态系统鲁棒性，打造生态安全模范先行区。（3）从各种植被类型覆盖率的变化情况考虑，珠三角城市群，需要打破城市建设瓶颈，在建立生态安全体系的基础上，推进生态环境可持续发展进程，体现区域生态高度融合、生态安全一体化建设的内在要求，将珠三角地区打造为全国首个“国家级森林城市群建设示范区”。

4 大气环境质量

人类活动如工矿企业、汽车驾驶、餐饮业、楼房道路建设等都会向大气排放有毒有害污染物。在经济率先高速发展的珠三角，较早地遭遇了大气污染等环境问题。由于该区域工业和交通部门的快速发展，以及化石燃料的高强度使用，大量污染物被排放至大气中，如 SO_2 ，烟尘，氮氧化物等。因此引发了严重的酸雨污染，不仅加速了建筑、铁路、桥梁的腐蚀，给社会经济发展带来巨大的损失，同时严重破坏生态环境，进而引起温室效应和臭氧层破坏，生物多样性减少等问题。通过文献综述，本研究选取了 6 个代表性大气环境指标，即万元 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，以及年平均气温，用来评估珠三角多层次区域大气环境质量。

硫化物排放强度以及烟尘排放强度被广泛用以代表一个区域工业活动强度。近几年来，广东省建立了大气污染控制政策体系，使大气环境得到较好的改善。历年来，广州，广深莞，以及珠三角区域工业万元 GDP SO_2 排放强度，以及万元 GDP 烟尘排放强度均有所下降，并在未来持续下降。2015 年，广东省省政府与环境保护部签署了《广东省大气污染防治目标责任书》，决定深入推进电厂污染减排，全面推动锅炉污染治理，强化其它行业污染综合治理。如图 17 所示，2020 年广州，广深莞，和珠三角

预期万元 GDP SO₂ 排放强度为 0.011, 0.329, 0.061 kg, 比 2010 年降低了 98.5, 97.%, 和 95.5%, 并预测在 2027 年将降至 0.002, 0.006, 0.011 kg。2020 年广州, 广深莞, 和珠三角预期万元 GDP 烟尘排放强度为 0.040, 0.061, 0.110 kg, 比 2010 年降低了 62.2, 51.8, 和 64.7%, 预测在 2027 年将降至 0.01, 0.031, 0.043 kg。

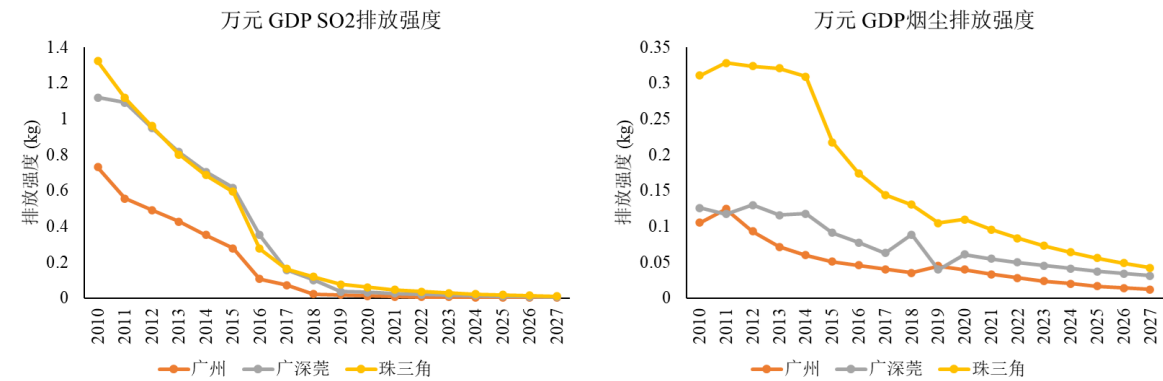


图 17 多区域万元 GDP SO₂ 排放强度及万元 GDP 烟尘排放强度变化趋势

酸雨率是判别某地区是否为酸雨区的重要指标。由于广东省 70%的火电装机容量和发电量聚集在珠三角, 二氧化硫、氮氧化物等致酸雨物质排放量巨大, 珠三角成为了全球三大酸雨区域之一。面对如此严峻的城市空气质量问题, 政府进行了大量的污染减排工作。2020 年, 酸雨问题得到大幅改善, 属于重酸雨区的城市数目从 2019 年的 2 个减少至 0 个。硫酸化合物为珠三角区域降水中的主要致酸物质, 大气中的二氧化硫和二氧化氮浓度的大幅下降, 也使得广州, 广深莞, 以及珠三角地区酸雨问题在 2010 年至 2020 期间, 得到大幅改善, 并在未来表现为稳定下降趋势 (如图 18 所示)。此外空气质量综合指数是描述城市环境空气质量综合状况的无量纲指数, 综合考虑了《环境空气质量指数 (AQI) 技术规定》 (HJ633-2012) 中规定的: SO₂、NO₂、PM₁₀、PM_{2.5}、CO、O₃ 等六种污染物污染程度, 空气质量综合指数值越大表明综合污染程度越重。从整体看来, 广深莞的空气综合污染指数最高, 其次为珠三角, 但三个区域在 2013 年污染指数显著下降, 降幅分别达 21.78, 20.85, 和 20.84%, 并保持缓慢下降趋势。

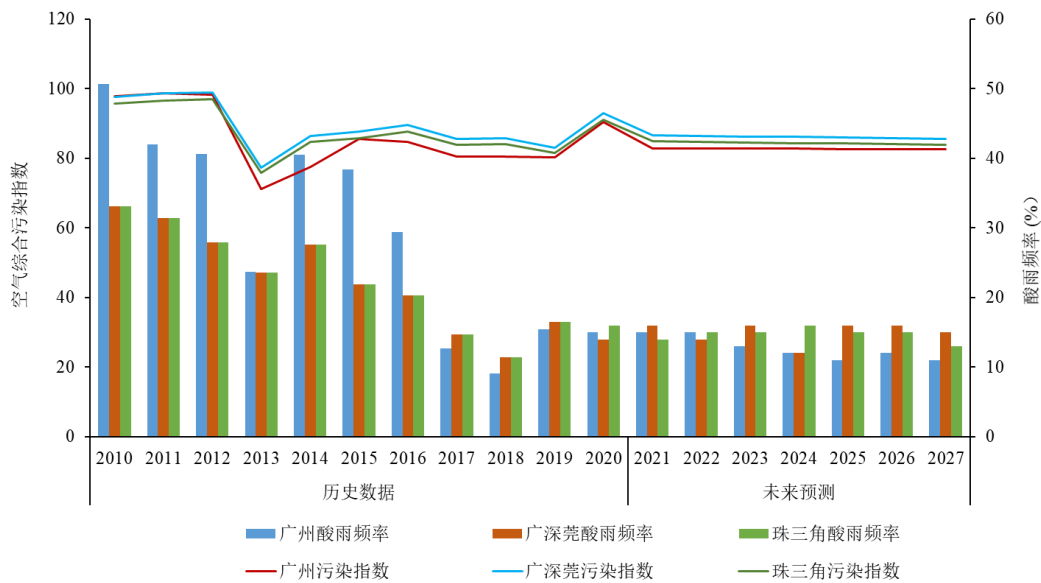


图 18 多层次空气综合污染指数与酸雨频率

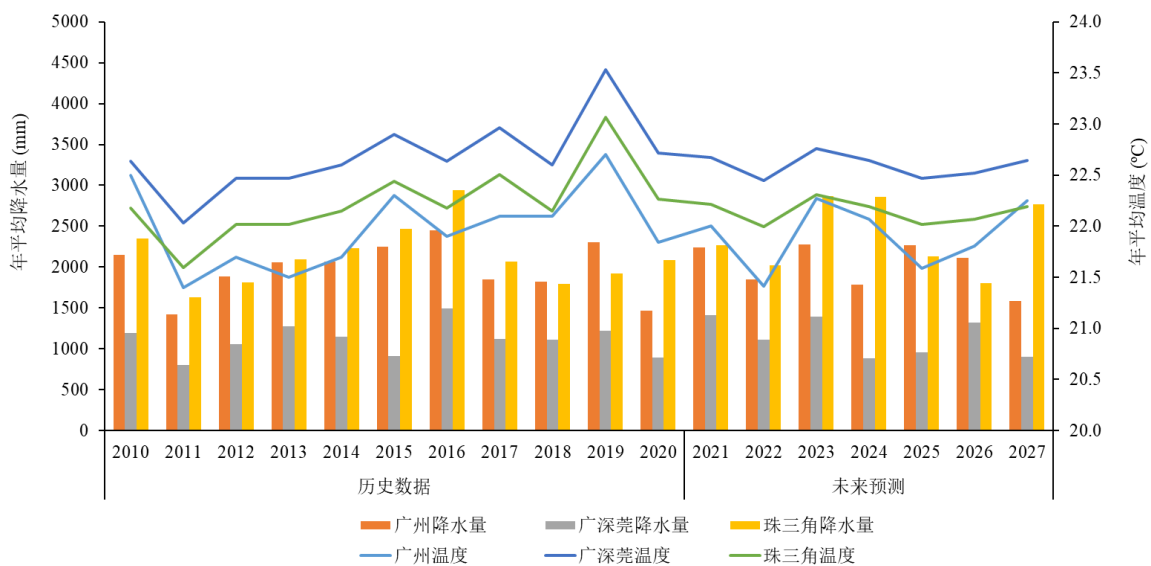


图 19 多层次年均降水量与年平均气温

年平均降水量以及年平均温度是一地气候气象的重要衡量指标之一。珠江流域处于我国降雨量最丰富的南方地区，受气候变暖及其引起的海平面上升、降水不均、流域干旱等问题的影响，珠三角地区降雨变化大，导致咸潮以及风暴潮等活动越来越频繁。经过随机预测，广州，广深莞，珠三角区域的年平均降水量将分别在[1421.2, 2448.6], [798.7, 1489.3], [1632.3, 2939.7]mm 区间内波动，年平均温度也将保持整体趋势不变，分别在[21.4, 22.7], [22.0, 23.5], [21.6, 23.1] °C 区间内波动（如图 19 所示）。两项气候指标基本在历史区间的范围波动，但对生态安全的影响存在时空差异。同时，

珠江三角洲的年平均气温显示随机波动特征。随着降雨模式和年均气温的变化，伴随极端天气事件的加剧，珠三角区域可能面临气候变化带来的生境变化，生态屏障岌岌可危。

5 水体环境质量

该部分对三个层级生态系统的水体环境指标（万元 GDP 废水排放量、饮用水质达标率、工业废水达标处理率和城市生活污水处理率）进行了现状和未来变化趋势的评估。

图 20 和图 21 显示了三个层级对应城市水质指标的历史值与未来预测值。随着广东省生态环境政策的出台和相关治理措施的落实，整个珠三角地区的水环境污染状况持续改善。具体表现为三个层级万元 GDP 废水排放量持续下降（如图 20 所示），从 2010 年的 10 ~ 15 降到约 6.7 ~ 10 吨/万元（到 2020 年），该值在未来将下降到 3.9 ~ 7.8 吨/万元（到 2027 年）。其它水质指标（饮用水质达标率、工业废水达标处理率和城市生活污水处理率）对应的数值在历史时期已达到较高水平，到 2020 年，均高于 95%（如图 21 所示），根据预测，未来三个层级饮用水质将 100% 达标，工业废水达标处理率和城市生活污水处理率均将高于 96%。

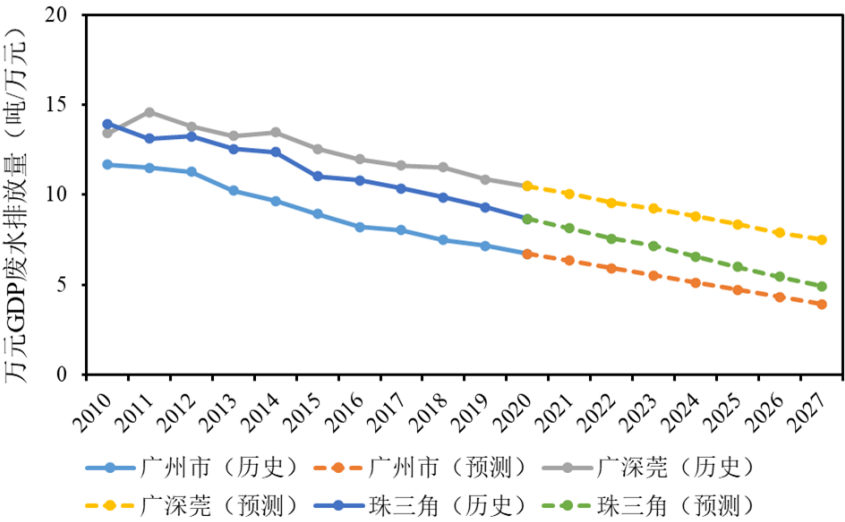


图 20 三个层级万元 GDP 废水排放量（2010-2027 年）

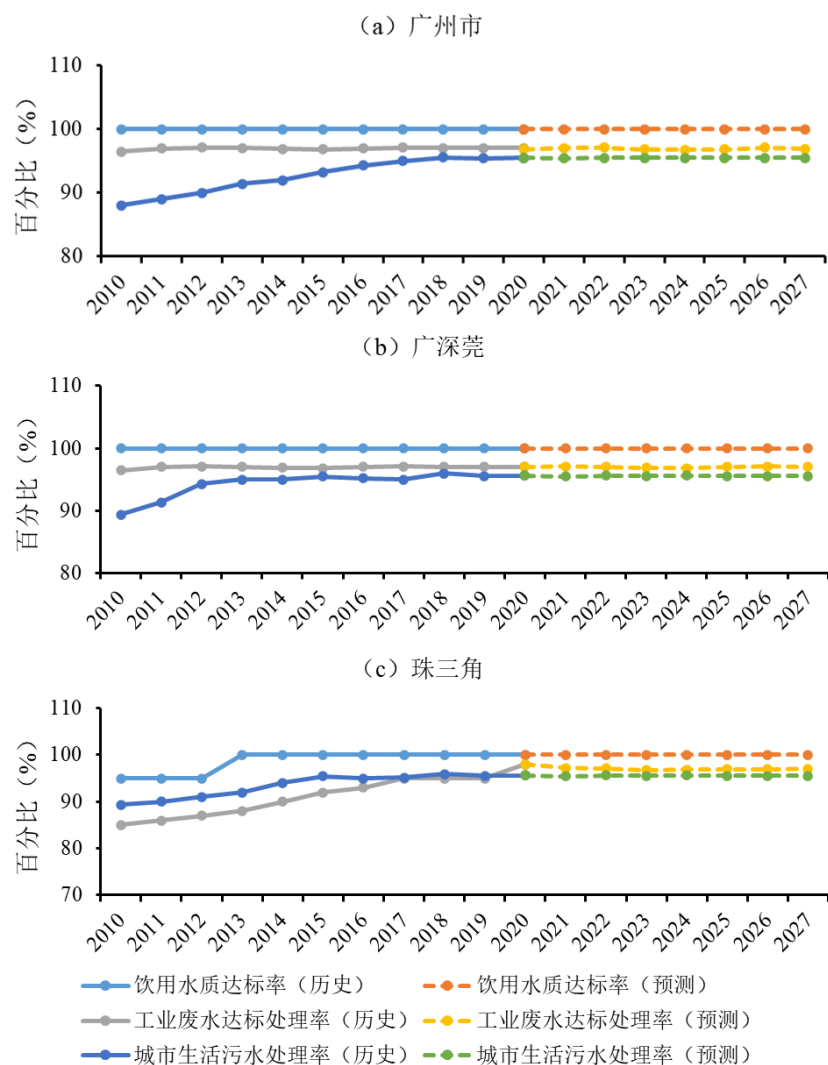


图 21 三个层级饮用水水质达标率、工业废水达标处理率和城市生活污水处理率（2010-2027 年）

6 固体废弃物质量

随着城市化进程的加速和人民生活水平的逐步提高，珠三角出现了越来越多的固体废弃物，严重污染环境。降低固体废弃物产生强度，有效处理工业固体废弃，提高废物处置利用率，生活垃圾无害化处理率将是生态安全的保障。珠三角区域固废污染主要以工业固废和生活固废为主，固废排放程度有下降趋势。2010 年至 2015 年珠三角区域单位 GDP 固废产生量明显降低，广州，广深莞，和珠三角的降幅高达 60.6，29.5，40.8%，并在未来维持稳定（如图 22 所示）。同时城镇生活垃圾无害化处理率，三个区域在过去逐年增长，并均在 2018 年达到 100%，且维持该水平。一般工业固体

废物综合利用率，在历史和未来均维持相对稳定的水平，广州，广深莞，和珠三角区域的综合利用率，分别在[81.1, 96.5]，41.5, 59.1]和[83.8, 94.7]%的范围内波动，其中广深莞的平均固体废物综合利用率最低（如图 23 所示）。

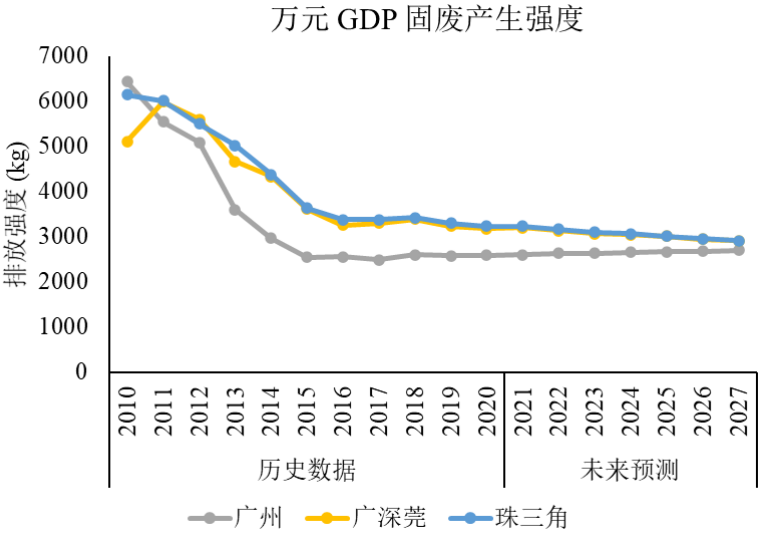


图 22 多层次万元 GDP 固体废弃物产生强度

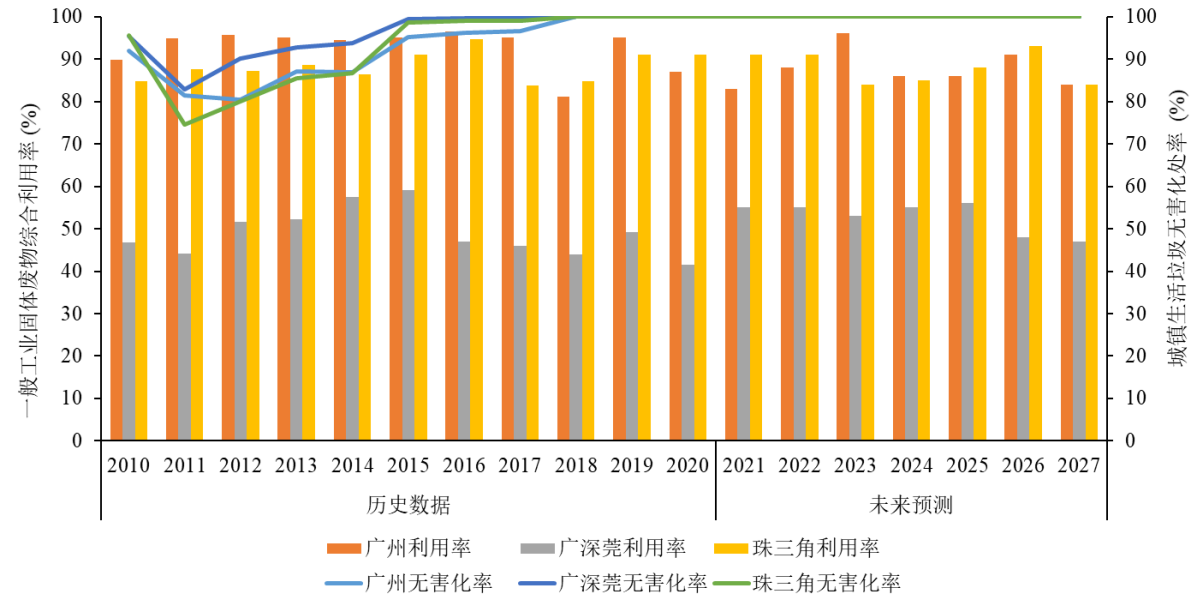


图 23 多层次固体废弃物综合利用率与生活垃圾无害化处理率

7 经济指标

经济的快速发展，产业结构的变化，基础设施的增加以及居民生活水平的提升，均会直接或间接地影响地区的生态系统结构和服务功能。其中，衡量经济发展状况的指标，是反映一个地区经济发展和结构变化的重要因素。因此，经济指标是评估地区生态安全不可或缺的关键部分。根据《广东省统计年鉴》（2019 年）中的各地区经济数据，对珠三角九个城市地区 2000-2019 年的生产总值（GDP）进行分析（如图 24 所示），其位居前四的城市包括广州、深圳、佛山、以及东莞，并所占全省比例较大。GDP 是反映经济总体状况最重要的指标。通过此指标，可对各地区经济发展程度进行初步识别，由此可看出珠三角的经济主体主要集中在这四个地区。因此选取广州市、广深莞经济圈以及珠三角城市群为典型研究区域。对 2010-2019 年三个层级各类经济指标进行趋势对比分析，并进行未来 2021-2027 年的预测，从而体现多层式经济发展状态评估与展望。

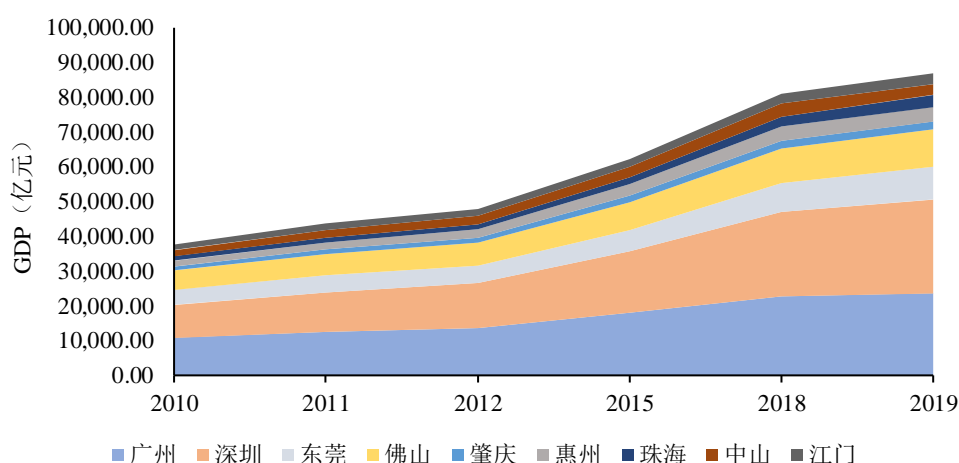


图 24 珠三角九城市地区生产总值（2010-2019 年）

首先，为了分析三个层级（广州、广深莞、珠三角）的经济综合状况，选取了人均 GDP 和经济密度指标。人均 GDP 常作为发展经济学中衡量经济发展状况的指标。经济密度则是指人均 GDP 与区域面积之比，而经济增长、产业结构转变、生产要素流动、城市化、及政策调控都可对经济密度带来不同程度的影响。因此，人均 GDP 和经济密度是重要的宏观经济指标，在地区具有一定程度的代表性。如图 25 所示，三个层级人均 GDP 处于稳步增长趋势。2010-2020 年广州、广深莞、以及珠三角人均 GDP 年均分别增长 6.6%、7.7%和 7.6%左右。根据发展趋势预测，2021-2027 年三个层级人均 GDP

年均增长 5.0%以上。随着人均 GDP 的稳步增长，三个层级的经济密度也持续提高。如图 26 所示，相比 2010 年，广州、广深莞、珠三角经济密度在 2020 年各增长 137%、132%和 142%。预测 2021-2027 年，广州和珠三角经济密度年均增长将维持在 4.8%以上，而广深莞城市群将维持在 3.8%以上。

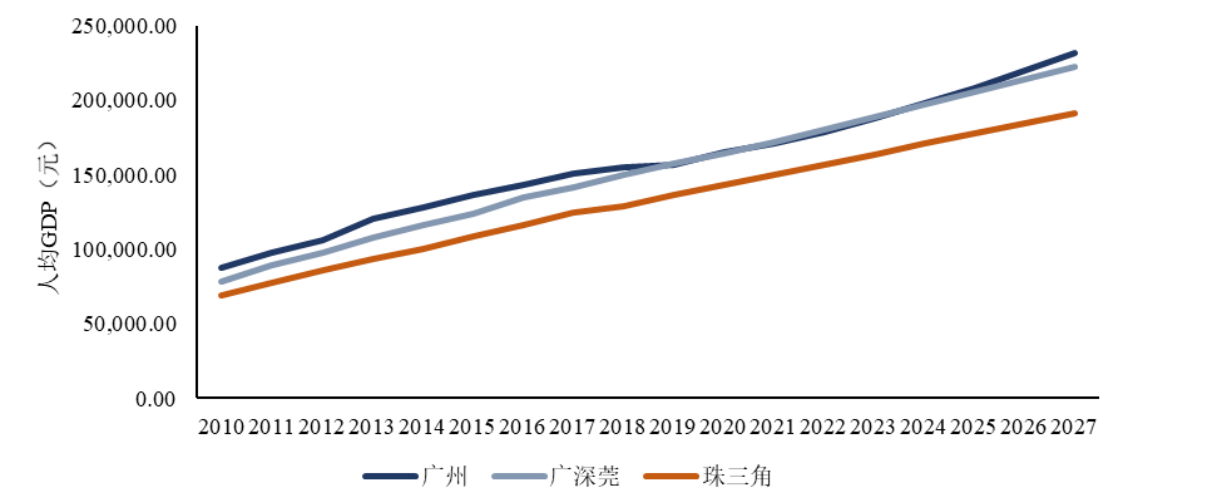


图 25 三层级人均地区生产总值（2010-2027 年）

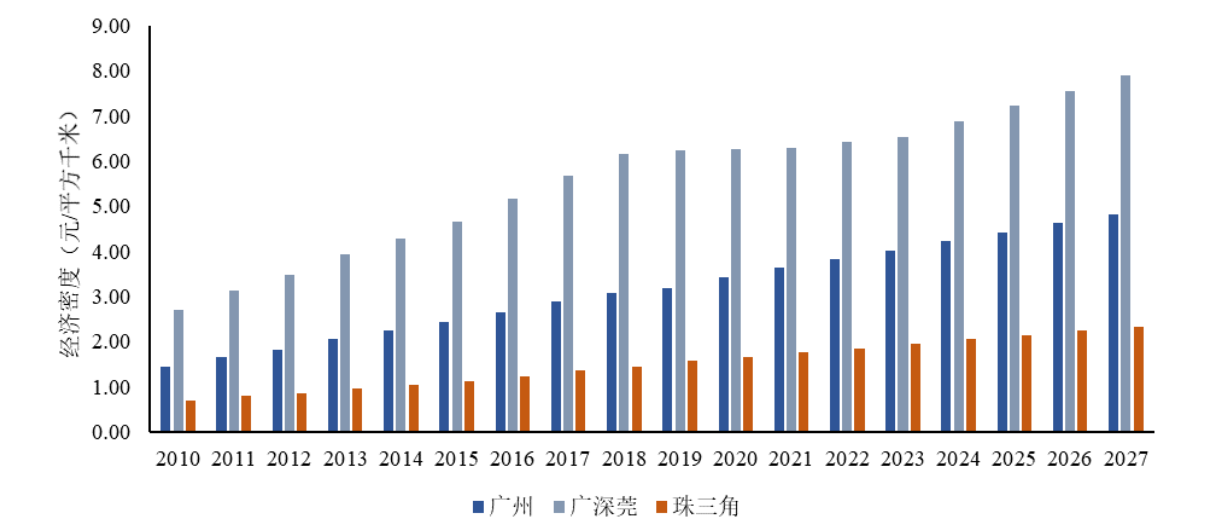


图 26 三层级经济密度（2010-2027 年）

由于产业结构转变是影响经济密度变化的动力因素之一，因此进一步分析三个层级的产业结构变化是必不可少的。按照国家统计局《三次产业划分规定》，第二产业是指采矿业、制造业、建筑业、电力、热力、燃气及水生产和供应业；第三产业是指服务业，包括批发和零售业、交通运输、信息传输、科学研究和技术服务业、水力、环境和公共设施管理业等。如图 27 所示，广州、广深莞及珠三角的第二产业占比呈逐

步下降趋势。相比 2010 年，三个层级第二产业占比在 2019 年各减少 26%、11%和 16%。预测 2021-2027 年，第二产业占比将持续缩减，其中广州市的下降趋势较为明显。而第三产业相反，将成为三个层级经济的主要动力。2020 年广州第三产业占 GDP 比重 72%，广深莞和珠三角各占 60%左右（如图 27 所示）。至 2027 年，第三产业占比预测将提高至 82%（广州）、65%（广深莞）和 66%（珠三角）。城镇化发展一般规律显示，当城镇化发展至超过 70%水平以上时，第三产业创造价值和吸纳就业能力将远远高于第二产业。从目前三个研究区域经济结构发展态势来看，广深莞和珠三角仍处在亟需加快发展和创造机会阶段。

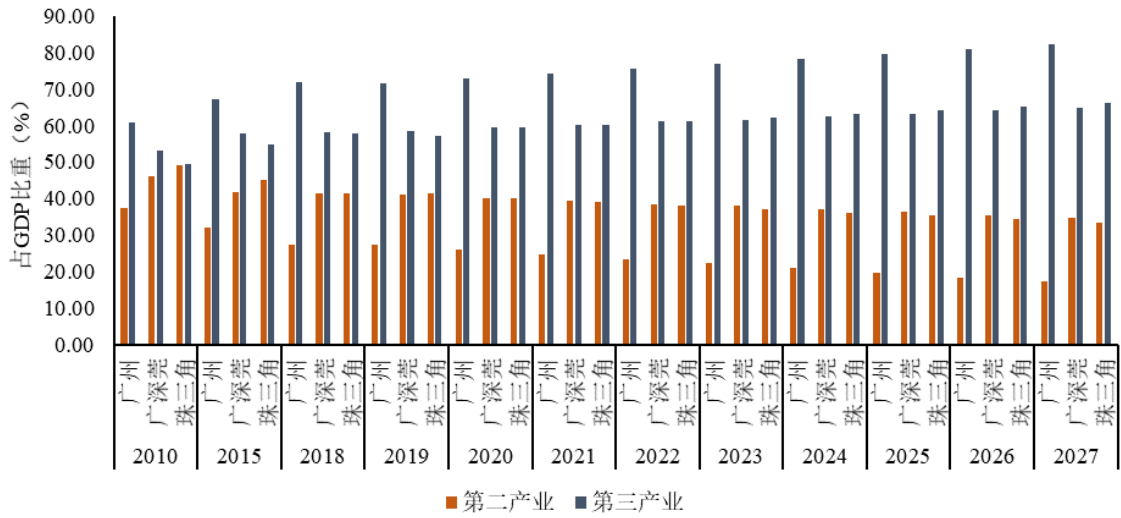


图 27 三层级第二产业/第三产业占 GDP 比重（2010-2027 年）

广东省“十四五”《规划纲要》中明确提出，提升创新能力，充分发挥创新对高质量发展的驱动作用是“十四五”时期经济社会发展主要目标之一。如图 28 所示，相比 2010 年，三个层级研究与发展经费占比在 2020 年有了显著的提高，各占 3.0%（广州）、3.7%（广深莞）和 3.5%（珠三角）。其中，广深莞和珠三角的比重高出全省平均水平 0.74%和 0.53%。此比重预测将维持年均增长在 5.5%（广州）、4.1%（广深莞）和 3.5%（珠三角）以上，至 2027 年分别达到 4.4%、4.9%和 4.5%。但与广东省“十四五”规划中提到的年均增长 10%的目标相比，三个区域仍需在未來加强研究与發展經費的投入。

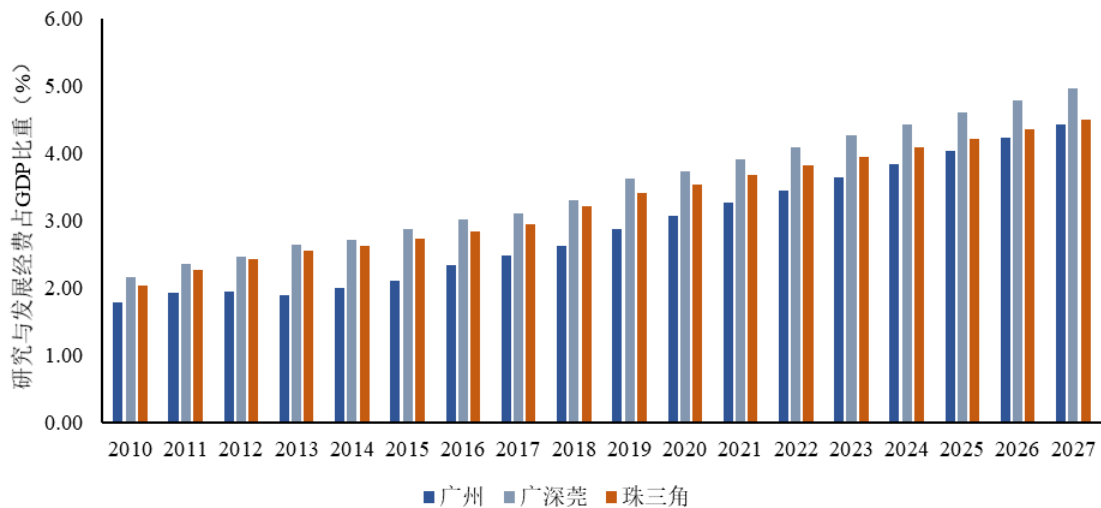


图 28 三层级研究与发展经费占 GDP 比重 (2010-2027 年)

《广东省新型城镇化规划（2014-2020 年）》颁布实施后，三个层级城镇化水平有了质的提升，同时居民生活水平也有了显著提高。如图 29 所示，2019 年三个层级城镇人均可支配收入为 6.5 万元（广州）、6.1 万元（广深莞）和 5.7 万元（珠三角），相比 2014 年分别增长 51%、51%和 53%。至 2027 年，城镇人均可支配收入预测将维持逐步增长趋势，其中珠三角整体增长趋势较为明显，年均增长维持在 4.3%。2019 年三个层级人均固定资产投资额为 4.2 万元（广州）、3.7 万元（广深莞）和 2.8 万元（珠三角），至 2027 年预测将均达到 4.5 万元。

由于城市基础设施发展的不可持续性，三个层级的城市基础设施投入在未来会有所缓和。如图 29 所示，2019 年各层级的城市基础设施投资为 1889 亿元（广州）、2421 亿元（广深莞）和 3177 亿元（珠三角），相比 2010 年各增长 42%、37%和 42%。广州和广深莞预测未来投入将逐渐变缓，2021-2027 年年均增长 1.8%左右。而珠三角后期的投入相对滞后，2021-2027 年预测年均增长 0.31%左右。

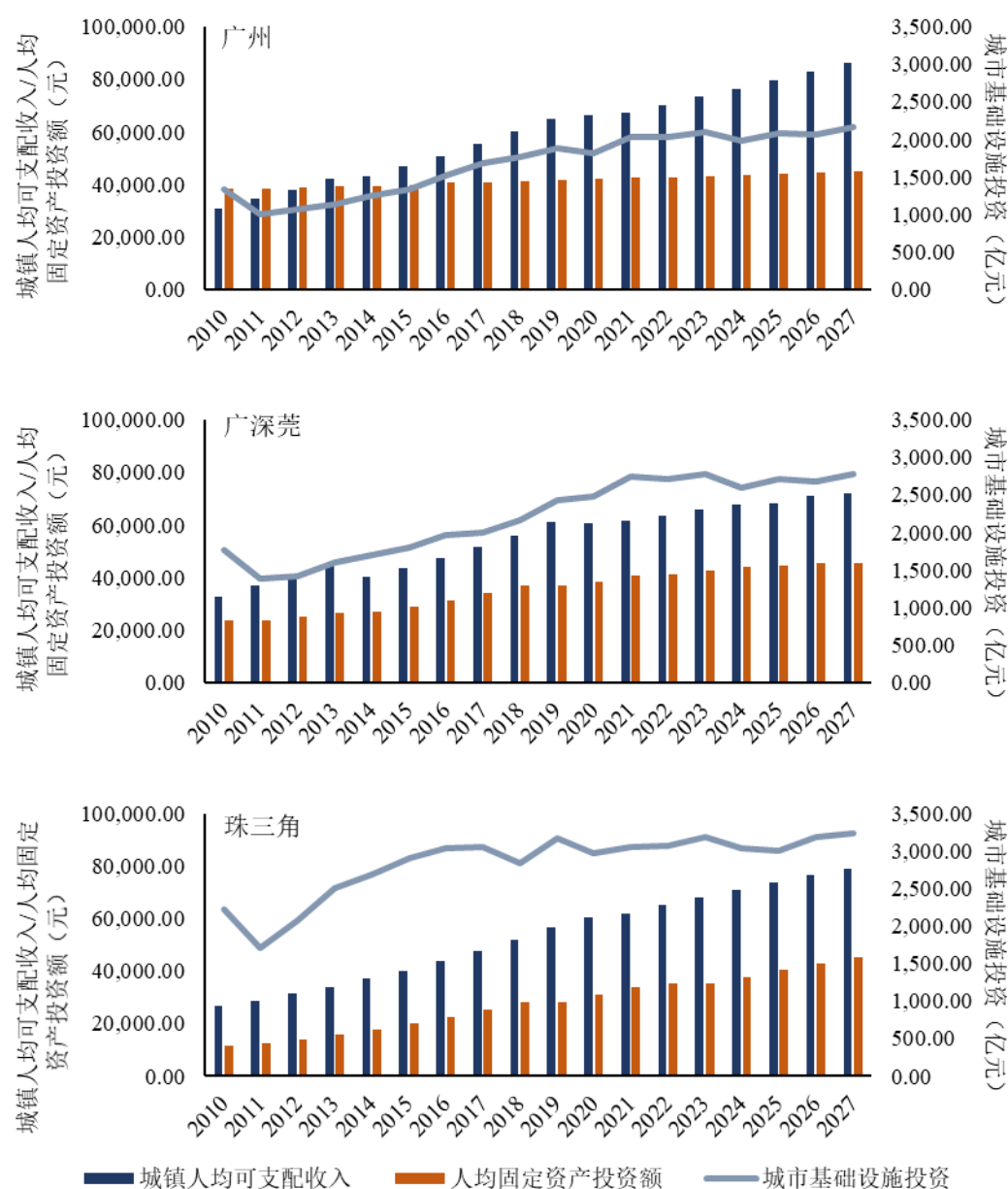


图 29 三层级城镇人均可支配收入/人均固定资产投资额/城市基础设施投资 (2010-2027 年)

通过对经济指标的综合分析及预测，三个层级经济综合实力持续增强，人均 GDP 和经济密度指标呈稳定增长趋势。城镇人均可支配收入与人均固定资产投资额保持稳定增长态势，与经济增长同步。因此，结果表明，三个层级的居民生活水平有了质的提高。此外，科技创新能力也不断增强，三个层级的研究与发展经费的占比未来将均突破 4.0%。但从各层级经济结构发展来看，第三产业仍处于创造机会，亟需加快发展

阶段。同时，由于城市基础设施发展的不可持续性，未来三个层级的城市基础设施投入将逐渐变缓。

8 其它环境指标

除大气、水体、固废相关指标以外，其它环境指标包括 10 个与环境质量密切相关的度量因子，包括化肥施用实物量、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、环保重点城市道路交通噪声路段超标率。

在农业生产中，随着肥料施用量的增加，肥料的效益逐渐降低，对农产品品质及环境的影响加剧，同时由于农药的施用，使得农田土壤污染严重。2010 年以前，珠三角地区单位播种面积的化肥和化学农药使用量高于全国平均水平，超过 40%的农田菜地重金属污染超出安全标准，其中 10%属于严重超标。然而，随着“十三五规划”的开展，广东省大力推进农作物病虫害绿色防控、专业化统防统治、高效农药药械使用、测土配方施肥技术、果菜茶有机肥替代化肥等工作，以及实施农药、化肥使用量零增长行动。从 2016 年开始，广州，广深莞，珠三角地区的化肥和农药施用量明显降低，农业绿色防控覆盖率逐年增加（如图 30 所示）。经预测，2027 年广州，广深莞，珠三角地区的化肥施用实物量将分别降至 95,665，112,312，464,521 吨，比 2010 年分别降低 11.0，7.8，24.3%。农药施用量将分别降至 2,493，3,166，16,496 吨，比 2010 年的水平分别降低 23.9，30.0，41.0%。

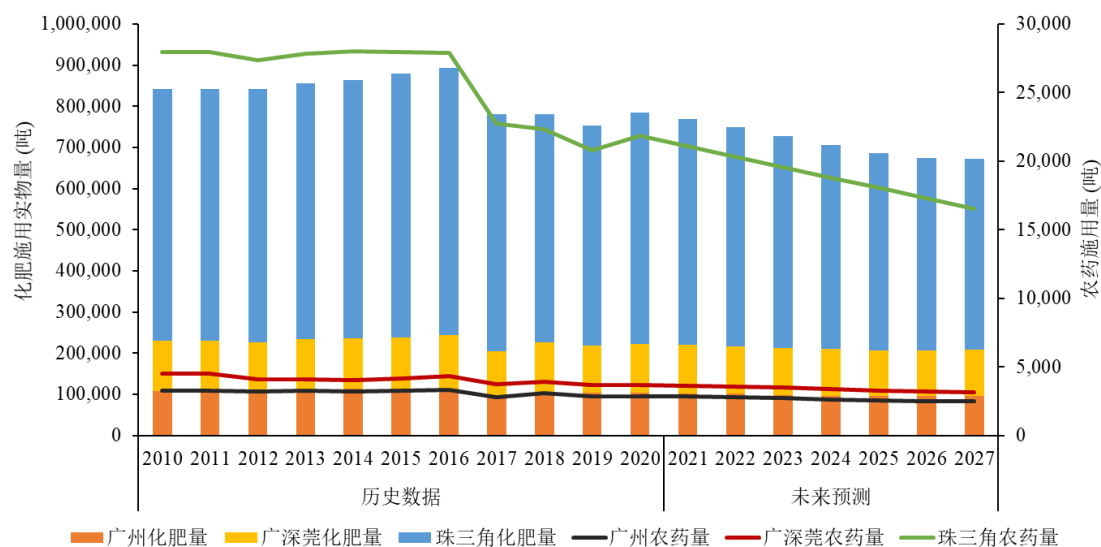


图 30 多层次农业化肥与农药施用量

珠三角具有世界上最为复杂的河网，河网密度高达 0.68-1.07 km/km，大陆海岸线较长，地势低平之处人口密集，极易受洪旱灾害影响。同时，由于极端降水加剧，该区域的农田受灾面积持续增加。2015 年，广州遭遇“彩虹”，“莲花”等多次强台风事件，导致该年成灾受灾面积达到顶峰，然后逐年递减。但由于未来气候预测的不确定性，在 2020 年之后，成灾受灾面积比将呈现随机波动趋势，波动范围为[24.5, 100]%，广深莞与珠三角地区亦呈现类似趋势，波动范围分别为[27.5, 80.0]和[25.0, 71.0]%（如图 31 所示）。同时珠三角地区在 2017 年遭遇“天鸽”等风暴潮，发生二十年一遇高潮位，与该年其它自然灾害一并遭受经济损失 22.9 亿人民币。由于气候变化和极端气候频发，广州，广深莞，和珠三角受自然灾害引发的经济损失在未来也将逐年增加。此外，广州以及广深莞区域的水域面积率在 2018 年上升之后，保持稳定，而珠三角区域的水域面积率呈缓慢降低趋势（如图 32 所示），主要由于耕地面积以及其它用地的变化。同时，三个区域的水土流失治理面积在 2018 年呈波动变化（如图 32 所示），主要由于泛珠三角区域水土流失类型复杂，分布广泛，危害严重，治理难度大。

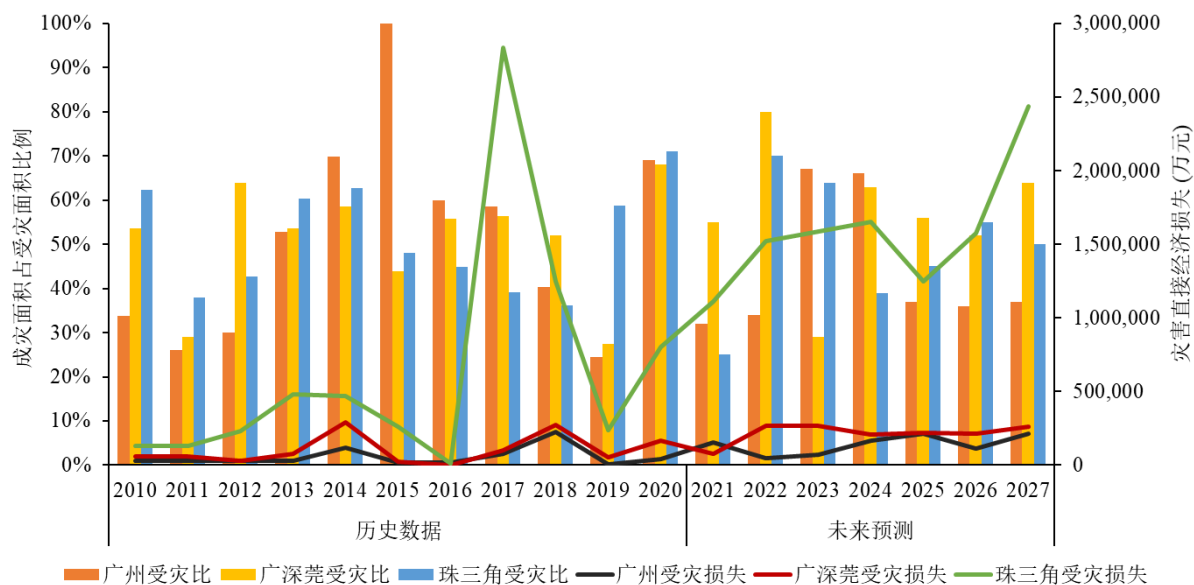


图 31 多层级成灾受灾面积比与灾害直接经济损失

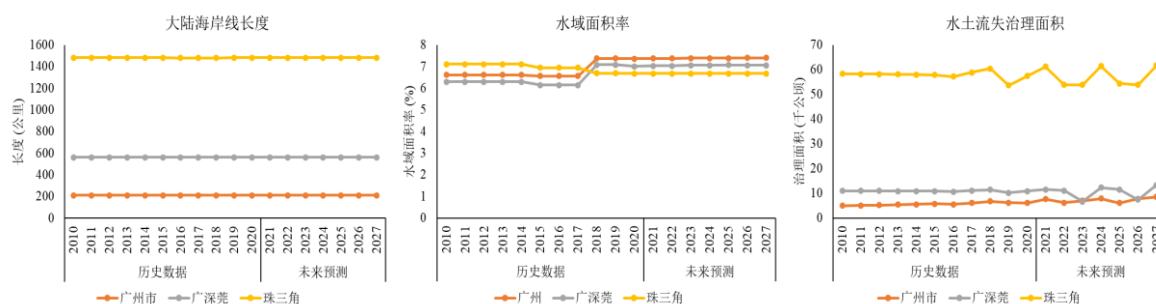


图 32 多层级海岸线长度、水域面积率与水土流失治理面积

噪音污染在保证城市生态安全的进程中的地位越来越重要。“十四五”规划纲要明确提出“加强环境噪声污染治理”，这是环境噪声污染治理有关内容首次纳入国民经济和社会发展规划。然而在珠三角迅速的城市化进程中，环保重点城市道路交通噪声路段超标率呈现增长趋势，广州，广深莞，和珠三角区域的超标率将从 23.4，12.8，18.1%（2010 年），在 2027 年分别增至 49.7，43.5，46.6%（如图 33 所示）。对于道路交通噪声监测等效声级和区域环境噪声等效声级，广州在三个区域中均为最高，而广深莞最低。其中三个区域的道路交通噪声监测等效声级在历年保持较小的变化，而区域环境噪声将呈现递增趋势，广州，广深莞和珠三角区域从 2010 年至 2027 年的增幅分别为 1.7，25.0，10.9%。在我国生态环境逐步向好的过程中，不受噪声污染，已经成为提升人民群众获得感幸福感安全感必不可少的一部分。

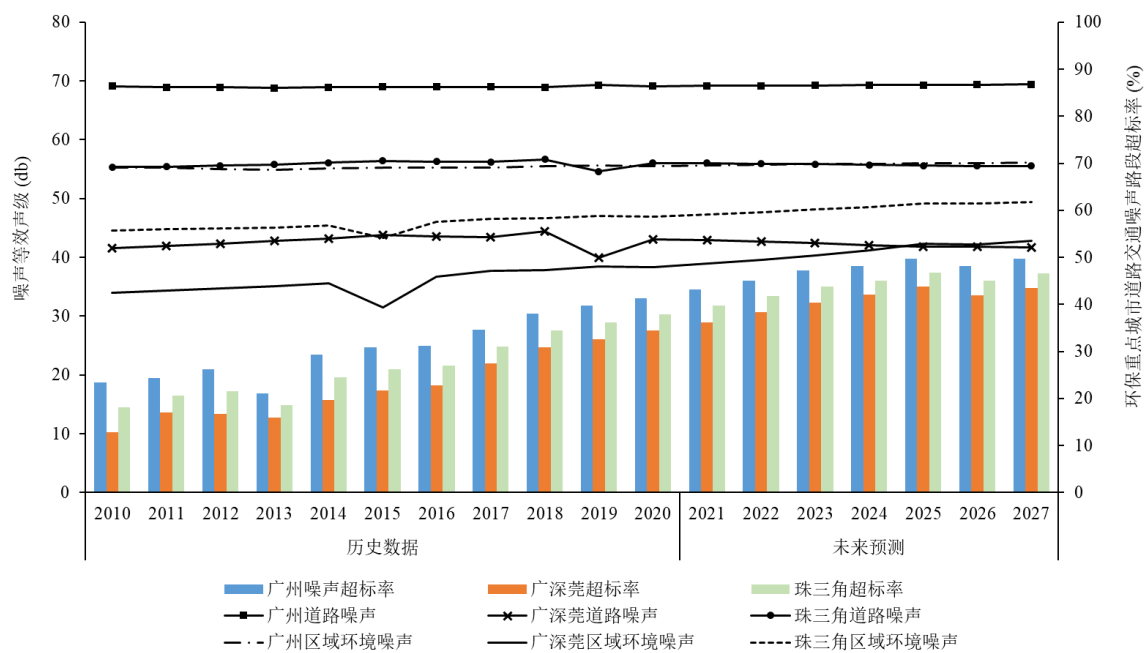


图 33 多层次噪声等级与超标率