

DOI: 10.5846/stxb202107131886

谭德明,丁仕宇,韩宝龙,潘雪莲,刘红晓.不同发展模式对城市生态系统调节服务价值的影响.生态学报,2022,42(16):6554-6564.

Tan D M, Ding S Y, Han B L, Pan X L, Liu H X. Impact of different development patterns on the value of regulating services of urban ecosystems. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(16): 6554-6564.

不同发展模式对城市生态系统调节服务价值的影响

谭德明¹, 丁仕宇^{1,2}, 韩宝龙^{2,*}, 潘雪莲^{2,3}, 刘红晓⁴

1 南华大学建筑学院, 衡阳 421001

2 中国科学院生态环境研究中心 城市与区域生态国家重点实验室, 北京 100085

3 深圳市环境科学研究院, 深圳 518000

4 中国科学院华南植物园 退化生态系统植被恢复与管理重点实验室 广东省应用植物学重点实验室, 广州 510650

摘要:快速城市化加快了城市生态系统格局的改变,导致生态系统服务价值下降,对城市可持续发展造成阻碍。为了探究何种城市发展模式能够创造更高的生态系统服务价值,以深圳为案例,利用 2010 年、2015 年和 2020 年生态系统类型数据,设置经济、惯性和生态 3 种不同的发展模式,并使用 CA-Markov 模型对 2025 年深圳市各类生态系统变化进行预测。在此基础上创新性地核算了不同模式下的关键生态系统服务价值。结果显示:(1)2015 年到 2020 年,各类生态系统呈现不同变化趋势,人类聚落生态系统快速增长,对各类自然生态系统造成侵占,城区绿地呈现自然减少人工增加趋势。(2)2025 年 3 种发展模式对生态系统类型变化影响显著,惯性发展模式下人类聚落、城区绿地出现扩张,经济发展模式下进一步增长,自然生态系统面积显著减少,生态发展模式下自然生态系统面积得到恢复。(3)3 种模式下的生态系统服务价值变化差异显著,惯性和经济发展模式下,生态系统服务价值显著下降,分别较 2020 年下降 2.67% 和 5.25%。生态发展模式下,生态系统服务价值提高,较经济发展模式提升 5.5%,3 种模式生态系统调节服务总价值差最高达到 38.1 亿元。综合来看,未来的发展模式应当选择以生态保护为优先的发展模式,通过制定有效的生态空间保护措施如生态保护红线划定、城市潜在开发区调整,实施生态工程等提高城市生态空间面积和质量,维持和提高生态系统服务价值,实现经济发展与生态保护的协调并行。

关键词:生态系统服务价值;调节服务;城市;CA-Markov;多模式模拟

Impact of different development patterns on the value of regulating services of urban ecosystems

TAN Deming¹, DING Shiyu^{1,2}, HAN Baolong^{2,*}, PAN Xuelian^{2,3}, LIU Hongxiao⁴

1 College of Architecture, University of South China, Hengyang 421001, China

2 State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China

3 Shenzhen Research Academy of Environmental Sciences, Shenzhen 518000, China

4 Guangdong Provincial Key Laboratory of Applied Botany, Key Laboratory of Vegetation Restoration and Management of Degraded Ecosystems, South China Botanical Garden, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510650, China

Abstract: Rapid urbanization has accelerated changes in urban ecosystem patterns, leading to a decline in the value of ecosystem services and posing an obstacle to sustainable urban development. To explore which urban development patterns create higher ecosystem service values, Shenzhen is used as a case study to set up three different development patterns-

基金项目:国家自然科学基金青年项目《基于生态系统服务功能的城市生态空间管理研究》(71804180);湖南省教育厅重点项目(19A437);湖南省健康城市营造工程技术研究中心(2019TP2073);广东省自然科学基金项目(2018A0303130077)

收稿日期:2021-07-13; 网络出版日期:2022-04-21

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: blhan@rcees.ac.cn

economic, inertial and ecological, using data on ecosystem types in 2010, 2015 and 2020, and to predict changes in various ecosystems in Shenzhen in 2025 using the CA-Markov model. On this basis innovative accounting of the value of key ecosystem services under different models was carried out and compared. The results show that: (1) From 2015 to 2020, all kinds of ecosystems show different change trends. Human settlement ecosystems grow rapidly, causing occupation of all kinds of natural ecosystems. Forest and farmland ecosystems decreased significantly. Urban green space shows an increasing trend, which is mainly reflected in natural reduction and artificial increase. (2) In 2025, the three development modes will have a significant impact on the changes of ecosystem types. Under the inertial development mode, human settlements, urban green space and wetland ecosystem will expand compared with 2020. Under the economic development mode, human settlements and farmland will further increase, the area of natural ecosystem will be significantly reduced, while the area of natural ecosystem under the ecological development mode will be restored. (3) The changes in the value of ecosystem services under the three modes differ significantly. Under the inertial development mode and the economic development mode, the value of ecosystem services decreases significantly due to the reduction in the area of natural ecosystems and the lowering of ecosystem quality, resulting in a decrease of 2.67% and 5.25% respectively compared to 2020. However, under the ecological development mode, the area of natural ecosystems is restored and the quality of ecosystems is improved. The value of ecosystem services increased by 5.5% compared to the economic development model. The difference in the total value of ecosystem regulation services between the three models reached a maximum of 3.81 billion RMB. In a comprehensive view, the future development model should give priority to the development model that prioritizes ecological protection, and improve the area and quality of urban ecological space through the formulation of effective ecological space protection measures such as the delineation of ecological protection red lines, the adjustment of potential urban development zones, and the implementation of ecological projects, maintain and improve the value of ecosystem services, and achieve a harmonious parallel between economic development and ecological protection.

Key Words: ecosystem service value; regulating service; city; CA-Markov; multi-model simulation

改革开放以来,我国城市化进程不断加快,仅四十年间,我国城镇化用地面积从 149342 km²增加至 269235 km²,但草地从 3054213 km²下降为 2656404 km²,对我国生态系统格局产生了深刻影响^[1-3]。生态空间减少的同时,造成了生态系统调节服务能力的降低^[4],城市病愈演愈烈,如气候调节服务的下降导致热岛效应增加^[5]、洪涝调节服务的下降导致城市内涝问题频发^[6]、土壤保持服务下降导致城市河道淤塞^[7]。

生态系统服务是指自然生态系统和构成该系统的物种维持和实现人类生活的条件和过程^[8]。千年生态系统评估将生态系统服务大致划分为四类:物质供给服务,指人类从生态系统获取的各种产品;调节服务,指人类从生态系统过程的调节作用当中获取的各种收益;文化服务,指人们通过精神满足、认知发展、思考、消遣和美学体验而从生态系统获得的非物质收益;支撑服务,指为生产其他所有的生态系统服务而必需的生态系统服务^[9]。其中调节服务对城市生态安全和城市人居环境影响最为深刻,评估方法也相对更为成熟。如 Nedkov 等通过调查洪水的储水功能来评估不同生态系统调节洪水的功能^[10];Zhang 等将北京森林的水源涵养分为截雨、土壤蓄水和淡水供给,并根据森林资源调查数据,估算其功能和经济价值^[11]。Schulp 等研究了欧盟土地利用变化对固定二氧化碳服务的影响^[12]。

由于不同生态系统服务功能量单位不同,如水源涵养功能量为万吨、气候调节功能量为亿千瓦时,所以很难对多种生态系统服务进行综合重要性评估;同时,由于各功能量与居民的社会经济活动直接关联较弱,难以纳入社会经济发展决策。为此,欧阳志云等提出生态系统服务价值及生态系统生产总值概念,认为生态系统生产总值(GEP)可以定义为生态系统为人类提供的产品与服务价值的总和^[13-15]。白杨等用该理论和方法对云南省生态资产和生态系统生产总值进行研究^[16],宋昌素等以青海省为例开展面向生态效益评估的 GEP 核算研究^[17];蔡邦成等探究了在土地利用变化情况下生态系统服务价值的变化^[18];Narita 等对埃塞俄比亚森

林 2015 年的生态产品经济价值进行核算^[19]。

生态系统调节服务能力的高低主要取决于生态空间的面积、分布和质量^[20-23],主要受城市发展空间布局影响^[24-25],而城市发展空间又服务于城市发展模式^[26]。当前学界多采用 Cellular Automata-Markov (CA-Markov) 模型开展城市发展模式的空间发展预测,并考察不同发展模式对生态环境(生态系统服务)的影响。如:Gashaw 等运用 CA-Markov 模型的预测表明延续当前建设用地与耕地向外不断蔓延的发展模式,到 2045 年安达萨流域的生态系统服务价值将下降 5750 万美元^[27];Sannigrahi 运用 CA-Markov 模型模拟了印度孙德尔本斯生物圈地区关键的扩张并进行生态系统服务评估,发现城市扩张对关键生态系统的侵占使得整体生态系统提供服务能力将下降^[28];Estoque 研究表明充分保护森林的发展模式将比城市蔓延扩张的发展模式减少 303.84 hm² 的森林破坏,减少 56 亿美元的生态系统服务价值损失^[29];Gao 等用 CA-Markov 模型模拟石家庄 2030 年在自然开发、农田保护、生态保护发展模式下的生态系统服务价值变化,农田保护情景和生态保护模式明显优于自然开发模式,其中生态保护模式相较自然开发模式能提高生态系统服务价值 7 亿元^[30]。Hoque 等设计了孟加拉国下梅格纳河口发展的四种模式,在四种模式均呈现建设用地增加,生态面积减少的情况下,生态保护优先模式和造林开发优先模式能实现红树林的显著增加,四种模式生态系统服务价值差别达到 13512 万美元^[31]。可以看出,在快速城市化的背景下,城市选择那种发展模式对城市生态系统调节服务及其价值的影响十分显著。

虽然近几年国内外学界对城市空间发展对生态系统服务功能量影响的研究日益增加,但使用生态系统服务价值量变化评估城市发展影响的研究仍十分少见。因此,本文以我国城市化速度最快的城市深圳为案例,设置经济发展模式、惯性发展模式和生态发展模式 3 种不同的发展模式,使用 CA-Markov 模型模拟了 2025 年深圳市生态系统类型变化,并在此基础上创新性地核算了不同模式下的关键生态系统服务价值,以期深圳市城市生态系统服务功能提升、国土空间规划提供决策参考。

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

深圳市位于广东省南部沿海,地势东南高西北低,地形以平原和高台为主,气候为典型的亚热带海洋性气候,受季风影响剧烈,季节性雨量充沛^[32]。深圳市是粤港澳大湾区重要发展引擎,是中国经济中心城市之一,经济总量及增长速度居于全球领先。1990 年深圳人口仅 167.78 万,地区生产总值仅 171.67 亿元;2020 年年末常住人口 1343.88 万,地区生产总值达到 27670.24 亿元,次于上海和北京,位于全国第三,但深圳陆地国土面积仅为北京的 11%,为上海的 30%,已成为全国单位陆地国土面积 GDP 产出最高的城市,2020 年人口城市化水平已经达到 100%。

高速经济发展对深圳的生态系统造成深刻影响,以深圳现有陆地国土面积 1997.27 km² 范围来看,1990 年森林生态系统面积占 52.5%,2020 年下降为 33.8% (图 1)。2019 年 8 月,中共中央国务院出台《关于支持深圳建设中国特色社会主义先行示范区的意见》,对深圳打造人与自然和谐共生的美丽中国典范城市提出了更高的要求。本文选取深圳为研究区具有极强的现实意义。

1.2 数据来源

本研究采用的数据包括 2010 年、2015 年、2020 年三期的生态系统类型空间分布矢量图(30 m 空间分辨率),包括农田生态系统、森林生态系统、城区绿地生态系统、湿地生态系统、人类聚落生态系统和裸地六类,数据来源于深圳市环境科学研究院,由中国环境科学研究院生产;数值高程数据(DEM)来源于 ALOS 卫星 12.5 m 地形数据,坡度、坡向等地形数据通过高程数据计算;植被分布水平数据(NDVI,植被归一化指数)和植被生物量数据(NPP,初级净生产力)由 NASA 官网的 MODIS 数据集;获取交通路网数据及餐饮兴趣点(POI)数据来源于互联网商业地图数据;深圳生态保护红线范围采用基本生态控制线范围为深圳市环境科学研究院;降雨量数据由深圳气象局提供;蒸散发数据由 NASA 官网的 MODIS 数据集;获取不同空间分辨率的地理

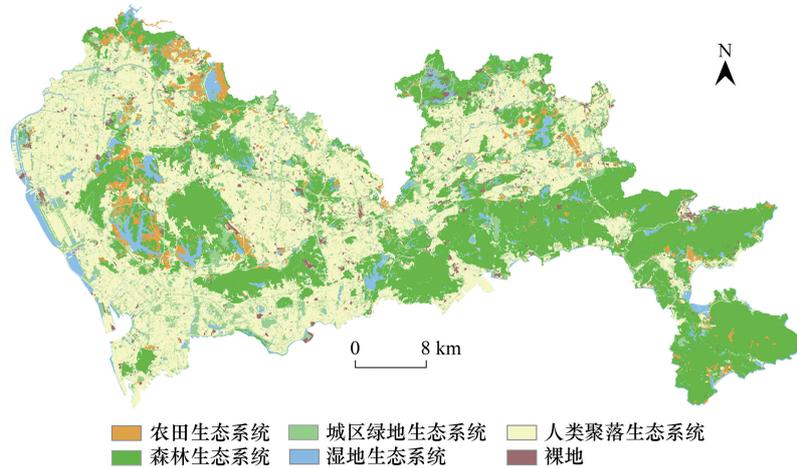


图 1 2020 年深圳生态系统空间分布图

Fig.1 Spatial distribution of ecosystems in Shenzhen in 2020

数据,统一重采样为 30 m 计算。

1.3 CA-Markov 预测方法

CA 称为元胞自动机模型,Markov 称为马尔可夫模型。CA-Markov 模型将两个模型有机地结合起来,综合利用元胞自动机模型在空间上优越的预测能力和马尔可夫模型在时间上数量预测的优良特点,就能够非常有效地改善预测效果,提高精度^[33]。

1.4 3 种发展模式设置

本研究利用 IDRISI 软件的“决策向导”模块选取 DEM、坡度、各级公路距离、铁路距离等因素进行适宜性图集的设置。适宜性图集的设置充分参考《深圳市土地利用总体规划》、《深圳市总体规划》、《深圳市绿地系统规划》等对深圳市发展的要求与城市发展中各类要素的影响,设置惯性发展模式,并在此基础上为了探寻深圳市规划之外的发展可能性,通过调整适宜性图集的参数设置(表 1)经济发展模式与生态发展模式。

表 1 3 种发展模式设置

Table 1 Three development model settings

发展模式 Mode of development	模式设置 Mode settings	具体参数 Specific parameters
生态发展模式 Ecological development model	限制建设用地开发,严格控制生态红线及生态敏感区开发,将森林生态系统、湿地生态系统设为限制转换区域,减少人类聚落生态系统侵占其他地类的转换可能性,裸地增强向生态系统转化的概率	以 2020 年的林地、草地为限制性因素,严格限制其向建设和农田的转型,其中将 2020 年的湿地范围设置为禁止建设区参数设置为 0。其次调整自然生态系统的适宜性参数。对自然生态系统产生主要影响因素为坡度和海拔,森林主要设置为坡度 15° 以上,海拔 42 m 以上,各类交通距离 500 m 距离以上为最适宜发展
惯性发展模式 Inertia development model	土地变化依据历史演化规律	在转换规则中,依据各项规划要求进行设置,主要的人类聚落生态系统设置坡度设置为 0—15 度,距离道路 1000 m 以内,海拔 42 m 以下最为适宜。每种生态系统类型的变化概率与 2015—2020 的变化概率一致
经济发展模式 Development model	突出经济发展对城市扩张的影响,扩大人类聚落生态系统面积,将农田生态系统、森林生态系统、城区绿地生态系统、湿地生态系统均设置为可转换地类,同时裸地类向人类聚落生态系统转移可能性增大	根据深圳市发展的各项政策,将生态保护红线范围内的生态系统空间设置为限制性因素,同时限制人类聚落生态系统向生态系统转化。其次,主要调整人类聚落生态系统的适宜性参数,分析结果表明,坡度 0—15°,海拔 123 m 以下,各类交通距离以 2000 m 范围内最适宜

1.5 生态系统服务评估研究方法

本文对于生态系统调节服务价值的计算使用城市生态智慧管理系统(IUEMS),网址 www.iuems.ac.cn,城市生态智慧管理系统是由中国科学院生态环境研究中心开发的一款面向城市生态系统评估、规划与管理的开放免费软件平台。该平台能够提供各类城市生态系统服务评估及其他典型综合指标核算服务,也包括一些必要的数据库预处理功能,此次需核算的生态系统调节服务均用此平台计算^[34]。

在对 2025 年预测年份的生态系统服务功能进行评估时,采用 IUEMS 的数据增强工具,利用预测的地物覆盖数据和历史 NPP 与 NDVI 数据对 2025 年 NPP 和 2025 年 NDVI 进行模拟。

本研究采用的生态系统服务及其价值评估方法均来自《深圳市生态系统生产总值核算技术规范》(BD4403)^[35],以下仅作简要介绍:

减少泥沙淤积服务采用美国农业部的通用土壤流失方程,其原理是计算没有地表植被覆盖情形下可能发生的土壤侵蚀量与当前地表植被覆盖情形下的土壤侵蚀量的差值。

固定二氧化碳服务采用净生态系统生产力法计算,根据净初级生产力(NPP)与净生态系统生产力(NEP)的相关转换系数换算得到 NEP,通过乘 C 转化为 CO₂的系数得到陆地生态系统固定二氧化碳的质量。

暴雨径流调节服务基于美国农业部水土保持局开发的 SCS-CN 模型,计算暴雨日产生的暴雨降水量减去城市在暴雨日产生的地表径流量得到生态空间削减的暴雨径流量。

水源涵养服务采用水量平衡模型,通过降雨量减去径流量减去湿地生态系统及森林生态系统与城市绿地生态系统的蒸散发量计算涵养的水源量。

气候调节服务采用植被生态系统蒸腾与湿地生态系统蒸发总消耗的能量作为气候调节的功能量。

生态系统服务价值量计算方法为各类生态系统服务功能量与其对应单价的乘积。各类生态系统服务价值量核算参数见下表 2:

表 2 深圳各类生态系统服务价值量核算参数

Table 2 Accounting parameters for the value of various ecosystem services in Shenzhen

一级指标 First level indicators	二级指标 Secondary indicators	核算内容 Accounting content	推荐定价 Recommended pricing	数据来源 Data source
调节服务 Regulation services	减少泥沙淤积	减少泥沙淤积价值	土方清运成本 12.6 元/m ³	《森林生态系统服务功能评估规范》(LY/T 1721);广东省人民代表大会常务委员会 2017 年关于广东省大气污染物和水污染物环境保护税适用税额的决定
	气候调节	植被蒸腾调节温度价值 水面蒸发调节温度价值	普通居民合表用户电价 0.717 元/KWh	中国南方电网深圳供电局有限公司官网
	固定二氧化碳	固碳价值	深圳市碳交易价格(配 额价格)22 元/tCO ₂	深圳市排放权交易所(2019 年)
	暴雨径流调节	城区植被暴雨径流 调节价值	海绵城市蓄水池建设 成本 33.33 元/m ³	城区参考《海绵城市建设技术指南——低影 响开发雨水系统构建》
		郊野植被暴雨径流 调节价值	水库单位库容造价 6.1107 元/m ³	《森林生态系统服务功能评估规范》(LY/T 1721)
水源涵养	水源涵养价值	水库单位库容造价 6.1107 元/m ³	《森林生态系统服务功能评估规范》(LY/T 1721)	

2 结果

2.1 CA-Markov 模型的精度检验

为了表明 CA-Markov 模型预测的精度,将 2020 年的土地利用现状图与 2020 年的土地利用预测图在 IDRISI 软件中进行叠加分析,通过分析,得到 kappa 检验系数为 0.83,符合模型预测精度要求,可以用来进行

土地利用预测。

2.2 生态系统类型变化

根据 2010、2015、2020 三年的各类土地利用类型面积(表 3)对比可以得知,近 10 年来,人类聚落生态系统面积不断增加,共增加 113.38 km²,森林生态系统的面积呈明显下降趋势,共减少 71.83 km²。裸地减少趋势较快,共减少 90.75 km²。城区绿地生态系统呈增加趋势,共增加 59.96 km²。而农田生态系统面积与湿地生态系统变化出现起伏,农田生态系统在 2010—2015 年呈增长趋势,2015—2020 年呈减少趋势,湿地生态系统 2010—2015 年呈减少趋势,2015—2020 年缓慢上升,总体趋势上来看,农田生态系统趋向减少,湿地生态系统快速减少后面积逐渐趋向稳定。

表 3 2010—2020 年深圳市生态系统类型与数量/km²

年份 Year	农田生态系统 Farmland ecosystem	森林生态系统 Forest ecosystem	城区绿地生态系统 Urban green space ecosystem	湿地生态系统 Wetland ecosystems	人类聚落生态系统 Human settlement ecosystem	裸地 Bare ground
2010	71.20	732.95	198.54	112.24	708.63	129.56
2015	79.93	691.90	226.98	103.01	798.14	52.76
2020	68.21	661.12	258.50	104.52	821.98	38.81

2.3 3 种不同发展模式下生态系统类型差异

在 3 种不同发展模式下(图 2、图 3、图 4、表 4),与 2020 年相比,人类聚落生态系统、城区绿地生态系统均出现增加趋势,农田生态系统、森林生态系统、裸地均出现减少趋势。人类聚落生态系统、城区绿地生态系统与森林生态系统变化最为剧烈,从人类聚落生态系统变化来看,2025 经济发展模式增长最多,共增长 67.93 km²,惯性发展模式增加 29.19 km²。从城区绿地生态系统变化来看,3 种模式均出现增加,生态发展模式增长最多,分别增长 112.71 km²、87.16 km²与 50.36 km²。从森林生态系统变化来看,三类发展模式生态发展模式减少最缓慢,共减少 84.26 km²,惯性发展模式减少量最多,共减少 99.63 km²。

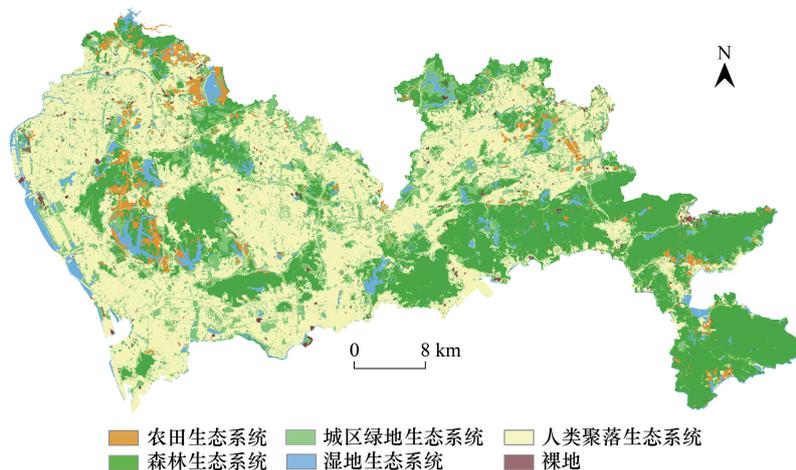


图 2 2025 年惯性发展模式

Fig.2 Inertia development model in 2025

2.4 不同发展模式下 2025 年生态系统服务功能能量与价值量

为了更好地指导深圳市土地利用规划和生态保护,依据 2020 年各项数据及 2025 年 3 种模式的预测结果,计算五种调节服务,五种调节服务分别为固定二氧化碳、减少泥沙淤积、气候调节、水源涵养、暴雨径流调节。

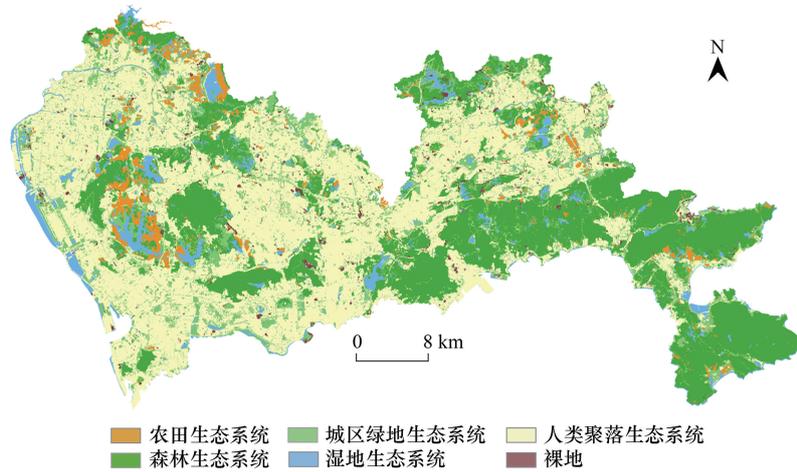


图 3 2025 年经济发展模式

Fig.3 Economic development model in 2025

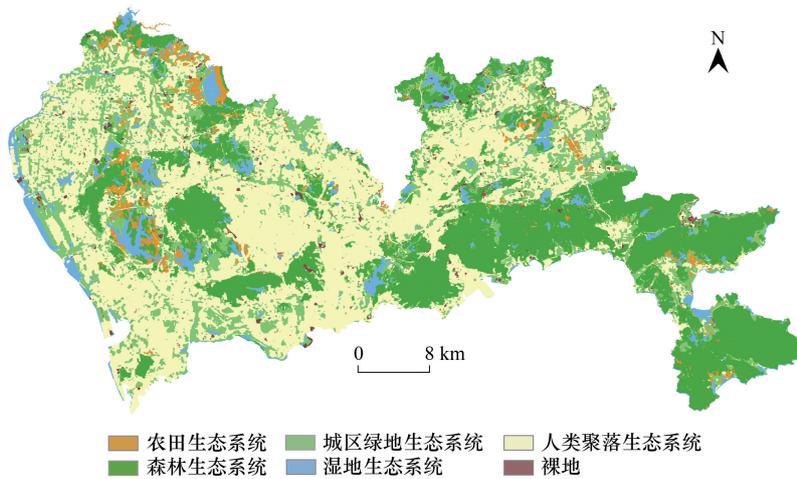


图 4 2025 年生态发展模式

Fig.4 Eco-development model in 2025

从功能量整体来看(表 5),惯性发展情境下,2025 年深圳市各项调节服务的功能量均较 2020 年有所下降,经济发展情境下,除减少泥沙淤积外的各项调节服务的功能量下降较为明显,生态发展模式下各项功能量的值与 2020 年相比略有提升。

经济、惯性和生态发展模式下生态系统调节服务的价值分别为 606.16 亿元、623.56 亿元、644.26 亿元,2020 年各服务的总价值为 639.73 亿元(表 6)。

各发展模式下不同生态系统服务的价值量差异与功能量保持基本一致,除减少泥沙淤积功能中经济发展模式与生态发展模式价值量接近之外,其他生态系统功能均保持生态发展模式价值量最高,惯性发展模式居中,经济发展模式最低。与 2020 年相对比,生态发展模式的各项价值量均有所上升或持平,经济发展模式与惯性发展模式除减少泥沙淤积经济发展模式的价值量较高外,其余均较 2020 年有所下降。

表 4 不同模式生态系统类型面积/km²

Table 4 Area of different model ecosystem types

发展模式 Development model	2025 生态发展模式 Ecological development model in 2025	2025 惯性发展模式 Inertia development model in 2025	2025 经济发展模式 Economic development model in 2025	2020 年发展模式 Development model in 2020
农田生态系统 Farmland ecosystem	54.36	60.70	61.61	68.21
森林生态系统 Forest ecosystem	576.86	561.49	564.02	661.12
城区绿地生态系统 Urban green space ecosystem	371.21	345.66	308.86	258.50
湿地生态系统 Wetland ecosystems	108.25	105.54	102.11	104.52
人类聚落生态系统 Human settlement ecosystem	819.48	860.72	889.91	821.98
裸地 Bare ground	22.99	19.02	26.64	38.81
总计 Total	1953.14	1953.14	1953.14	1953.14

表 5 2020 年与 2025 年功能量对比

Table 5 2020 vs. 2025 functional volumes

年份 Year	发展模式 Development model	固定二氧化碳 Carbon sequestration/ ($\times 10^4$ t)	减少泥沙淤积 Sedimentation reduction/ ($\times 10^6$ t)	气候调节 Climate regulation/ ($\times 10^8$ kWh)	水源涵养 Water retention/ ($\times 10^8$ t)	暴雨径流调节 Storming rain run off/ ($\times 10^7$ t)
2020	实际量	24.54	11.34	742.23	17.98	49.26
2025	经济发展模式	23.99	11.36	701.71	17.25	47.27
	惯性发展模式	24.33	11.31	721.41	17.63	48.15
	生态发展模式	24.78	11.36	743.53	18.09	49.68

表 6 不同发展模式下生态系统服务价值差异/亿元

Table 6 Differences in the value of ecosystem services under different development models

年份 Year	发展模式 Development model	固定二氧化碳 CO ₂ fixating	减少泥沙淤积 Reduced sedimentation	气候调节 Climate regulation	水源涵养 Water retention	暴雨径流调节 Runoff mitigation	总和 Total value
2020	实际量	0.062	1.395	488.24	102.37	47.66	639.73
2025	经济发展模式	0.060	1.398	461.58	98.24	44.88	606.16
	惯性发展模式	0.061	1.392	474.54	100.42	47.15	623.56
	生态发展模式	0.062	1.398	489.09	103.04	50.68	644.26

3 分析

3.1 深圳近五年生态系统类型变化特征分析

深圳市近五年生态系统类型出现显著变化(表 7),主要表现为(1)城区绿地总量增加,呈破碎化趋势,草地主要增加在龙岗区、宝安区与大鹏新区,尤其是龙岗区新增城市绿地面积达到 10.5 km²,其他两个区域分别增加 5.21 km²,5.12 km²,主要原因是由于城市开发带来的人工绿地增加。(2)森林面积下降显著,呈现萎缩趋势,共减少 30.67 km²,其中以龙岗区减少最多,占总转出量的 36%。森林面积主要转为建设用地,转移量达到 17.01 km²,占总转出量的 55%,主要减少的区域为与人类聚落接壤区域,城市开发向外扩张造成森林面积的不断下降。(3)水域面积稳中有升,呈恢复态势,未有明显空间转移。近五年对水污染治理与水源保护效果得到体现。(4)人类聚落生态系统呈蔓延式扩张,增加主要集中在西北部地区,即宝安区、光明区、龙华区、

龙岗区,该四区围绕深圳发展的核心地区,是深圳未来发展的主力中心。(5)农田生态系统整体下降,出现连片减少现象,主要向人类聚落转移,同时退耕还林、退耕还湖也促使一部分农田转化,以光明区和龙岗区下降最多,分别减少 5.41 km²、2.89 km²。(6)裸地面积下降迅速,主要向城区草地和人类聚落转移,一共减少 13.95 km²,其中南山区、宝安区和光明区减少最多。

表 7 2015—2020 年生态系统转移面积
Table 7 Area of ecosystem transfer in 2015—2020

2015 年	2020 年					
	农田生态 系统/km ²	森林生态 系统/km ²	城区绿地 生态系统/ km ²	湿地生态 系统/km ²	人类聚落 生态系统/ km ²	裸地/ km ²
农田生态系统 Farmland ecosystem	61.62	2.57	4.72	2.51	6.40	2.10
森林生态系统 Forest ecosystem	1.75	644.54	17.62	4.05	17.01	6.82
城区绿地生态系统 Urban green space ecosystem	1.95	4.43	160.11	3.33	48.31	8.79
湿地生态系统 Wetland ecosystems	0.37	2.02	3.97	88.89	6.09	1.66
人类聚落生态系统 Human settlement ecosystem	1.43	5.07	50.43	2.58	726.50	12.08
裸地 Bare ground	1.04	2.42	21.50	2.83	17.62	7.35

3.2 2025 年 3 种发展模式对生态系统类型变化的影响

(1) 惯性发展模式下,较 2020 年城市人类聚落生态系统扩张主要发生在龙岗区、南山区和宝安区,城市绿地生态系统扩张主要发生在龙岗区、宝安区和光明区,森林生态系统面积减少主要发生在龙岗区、宝安区和大鹏新区,湿地生态系统增加主要发生在光明区、龙岗区。农田生态系统主要减少地区是光明区和龙华区。

(2) 经济发展模式下,较惯性发展模式城市人类聚落系统扩展多发生在龙岗区、龙华区和南山区,森林生态系统在大鹏新区、宝安区出现明显下降趋势。城区绿地系统缩减主要发生在龙岗区、龙华区和罗湖区,湿地生态系统缩减主要出现在宝安区、坪山区及盐田区。裸地主要减少的区域在福田区、大鹏新区及盐田区。

(3) 生态发展模式下,较惯性发展模式城市人类聚落系统减少主要发生在宝安区及光明区,森林生态系统较惯性发展模式扩张主要发生在龙岗区及盐田区,城区绿地生态系统增加主要发生在宝安区、大鹏新区及坪山区。农田生态系统减少主要分布在大鹏新区及宝安区,湿地生态系统主要增加在宝安区及龙岗区。

根据深圳市十四五规划中对深圳市 2025 年的发展要求,到 2025 年需实现直接供应用地 10 km²,储备用地 40 km²,惯性发展模式与经济发展模式均已经达到十四五规划中对土地利用供应开发的需求。而在深圳市国家森林城市建设总体规划中要求到 2025 年城区绿化覆盖率达到 50% 以上,经济发展模式和惯性发展模式由于建设用地的快速对外扩张导致的生态空间减少,使得两种模式下无法达到 2025 年绿化覆盖率的要求,需要对当前的生态保护政策与经济发展政策进行调整。实际上从 3 种发展模式的结果来看,生态发展模式下增长的生态系统面积转化为建设类用地比建设用地腾退改为生态用地要付出的代价更小,未来的发展模式应当优先选择以生态保护为主的发展模式,并针对城市的实际发展需求进行政策的调整,以实现经济发展与生态保护的协调并行。

3.3 2025 年 3 种发展模式对生态系统服务价值的影响

(1) 按照惯性发展模式和经济发展模式,生态系统服务价值将出现显著下降。惯性发展模式各下降 2.67%,经济发展模式下下降 5.25%。降低的主要原因是自然生态空间面积减少,其中惯性发展模式减少 11.44 km²,经济发展模式减少 49.15 km²;同时,生态质量下降,经济发展模式下,自然空间单位面积 NPP 下降 3.7%,NDVI 下降 0.8%。

(2) 生态发展模式能够促进生态系统服务价值的提升。总价值提升 0.7%,其中减少泥沙淤积提升 0.2%,固定二氧化碳提升 0.9%,气候调节提升 0.1%,水源涵养提升 0.6%,暴雨径流调节提 6.3%。提升的主要原因是自然生态空间面积增长,增长 32.17 km²;同时,生态质量上升,自然空间单位面积 NPP 上升 0.02%,NDVI

上升 0.3%。

4 结论与建议

本研究的主要结论包括:

(1) 各类生态系统呈现不同变化趋势,人类聚落生态系统快速扩张,面积达到 23.83 km²,对农田、森林、城区绿地均造成不同程度的侵占,其中森林生态系统和农田生态系统被显著侵占,分别下降 17.01 km²和 1.75 km²,城区绿地随总体呈现增加,但出现自然减少人工增加的趋势。湿地生态系统得到恢复,恢复的 1.50 km²主要集中在水库及河流疏浚。

(2) 3 种发展模式对生态系统类型变化影响显著,惯性发展模式下,较 2020 年人类聚落、城区绿地、湿地生态系统出现扩张,分别增长 38.74 km²、84.16 km²和 1.02 km²。森林和农田生态系统出现缩减,分别缩减 99.63 km²和 7.51 km²。在此基础上经济发展模式人类聚落和农田进一步扩张,分别增长 29.18 km²和 0.9 km²,自然生态系统面积整体出现缩减,共缩减 37.72 km²。生态发展模式较惯性发展模式自然生态系统得到恢复,增长达到 43.61 km²,人类聚落及农田缩减明显。

(3) 惯性发展模型和经济发展模式下生态系统服务价值出现下降,分别下降 2.67% 和 5.25%。除生态面积显著下降外,生态质量也呈现降低趋势。生态发展模式实现自然生态空间面积增长 32.17 km²,生态系统服务价值显著提升,较经济发展模式提升 5.5%,生态质量出现上升。

基于研究过程和结论,本文针对深圳的生态系统服务价值提升以及未来空间发展提出以下建议:(1) 根据生态系统服务价值高低开展生态保护红线划定,对生态保护红线开展严格保护。(2) 根据生态系统服务价值的空间分布特征,有倾向的优先选择低生态系统服务价值区域进行城市开发活动。(3) 在人类聚落生态系统及其周边地区可以通过海绵工程、屋顶绿化等生态工程进一步提升单位面积的生态系统服务供给能力,提升单位面积生态服务价值产出。

参考文献 (References):

- [1] Liu J Y, Li J, Qin K Y, Zhou Z X, Yang X N, Li T. Changes in land-uses and ecosystem services under multi-scenarios simulation. *Science of the Total Environment*, 2017, 586: 522-526.
- [2] Guida-Johnson B, Zuleta G A. Land-use land-cover change and ecosystem loss in the Espinal ecoregion, Argentina. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2013, 181: 31-40.
- [3] 袁艺,史培军,刘颖慧,谢锋.快速城市化过程中土地覆盖格局研究——以深圳市为例. *生态学报*, 2003, 23(9): 1832—1840.
- [4] Martínez M L, Pérez-Maqueo O, Vázquez G, Castillo-Campos G, García-Franco J, Mehlreter K, Equihua M, Landgrave R. Effects of land use change on biodiversity and ecosystem services in tropical montane cloud forests of Mexico. *Forest Ecology and Management*, 2009, 258(9): 1856-1863.
- [5] Anderson-Teixeira K J, Snyder P K, Twine T C, Cuadra S V, Costa M H, DeLucia E H. Climate-regulation services of natural and agricultural ecoregions of the Americas. *Nature Climate Change*, 2012, 2(3): 177-181.
- [6] 李孝永,匡文慧.北京城市土地利用/覆盖变化及其对雨洪调节服务的影响. *生态学报*, 2020, 40(16): 5525-5533.
- [7] Costanza R, d'Arge R, De Groot R, Farber S, Grasso M, Hannon B, Limburg K, Naeem S, O'Neill R V, Paruelo J, Raskin R G, Sutton P, Van Den Belt M. The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature*, 1997, 387(6630): 253-260.
- [8] Daily G C, *Nature's Services: Societal Dependence on Natural Ecosystems*. 1997, Washington D C: Island Press.
- [9] Millennium Ecosystem Assessment. *Ecosystems and Human Well-Being*. Washington: Island Press, 2005.
- [10] Nedkov S, Burkhard B. Flood regulating ecosystem services—Mapping supply and demand, in the Etropole municipality, Bulgaria. *Ecological Indicators*, 2012, 21: 67-79.
- [11] Zhang B, Xie G D, Li N, Wang S. Effect of urban green space changes on the role of rainwater runoff reduction in Beijing, China. *Landscape and Urban Planning*, 2015, 140: 8-16.
- [12] Schulp C J E, Nabuurs G J, Verburg P H. Future carbon sequestration in Europe—Effects of land use change. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2008, 127(3/4): 251-264.
- [13] 欧阳志云,王如松,赵景柱.生态系统服务功能及其生态经济价值评价. *应用生态学报*, 1999, 10(5): 635-639.

- [14] 欧阳志云, 王效科, 苗鸿. 中国陆地生态系统服务功能及其生态经济价值的初步研究. 生态学报, 1999, 19(5): 607-613.
- [15] 欧阳志云, 朱春全, 杨广斌, 徐卫华, 郑华, 张琰, 肖隼. 生态系统生产总值核算: 概念、核算方法与案例研究. 生态学报, 2013, 33(21): 6747-6761.
- [16] 白杨, 李晖, 王晓媛, Alatalo J M, 江波, 王敏, 刘文俊. 云南省生态资产与生态系统生产总值核算体系研究. 自然资源学报, 2017, 32(7): 1100-1112.
- [17] 宋昌素, 欧阳志云. 面向生态效益评估的生态系统生产总值 GEP 核算研究——以青海省为例. 生态学报, 2020, 40(10): 3207-3217.
- [18] 蔡邦成, 陆根法, 宋莉娟, 黄和平, 韩尚富, 陈克亮. 土地利用变化对昆山生态系统服务价值的影响. 生态学报, 2006, 26(9): 3005-3010.
- [19] Narita D, Lemenih M, Shimoda Y, Ayana A N. Economic accounting of ethiopian forests; a natural capital approach. Forest Policy and Economics, 2018, 97: 189-200.
- [20] 李锋, 王如松, 赵丹. 基于生态系统服务的城市生态基础设施: 现状、问题与展望. 生态学报, 2014, 34(1): 190-200.
- [21] 李锋, 叶亚平, 宋博文, 王如松. 城市生态用地的空间结构及其生态系统服务动态演变——以常州市为例. 生态学报, 2011, 31(19): 5623-5631.
- [22] Costanza R, De Groot R, Sutton P, Van Der Ploeg S, Anderson S J, Kubiszewski I, Farber S, Turner R K. Changes in the global value of ecosystem services. Global Environmental Change, 2014, 26: 152-158.
- [23] Kim H W, Kim J H, Li W, Yang P, Cao Y. Exploring the impact of green space health on runoff reduction using NDVI. Urban Forestry & Urban Greening, 2017, 28: 81-87.
- [24] Lautenbach S, Kugel C, Lausch A, Seppelt R. Analysis of historic changes in regional ecosystem service provisioning using land use data. Ecological Indicators, 2010, 11(2): 676-687.
- [25] 张骞, 高明, 杨乐, 陈成龙, 孙宇, 王金柱. 1988-2013 年重庆市主城九区生态用地空间结构及其生态系统服务价值变化. 生态学报, 2017, 37(2): 566-575.
- [26] 叶欣, 陈春森, 吕利娜, 徐兆阳. 城市空间格局演化分析及多情景模拟——以鸡西市鸡冠区为例. 测绘科学, 2020, 45(10): 173-180.
- [27] Gashaw T, Tulu T, Argaw M, Worqlul A W, Tolessa T, Kindu M. Estimating the impacts of land use/land cover changes on Ecosystem Service Values; the case of the Andassa watershed in the Upper Blue Nile basin of Ethiopia. Ecosystem Services, 2018, 31: 219-228.
- [28] Sannigrahi S, Zhang Q, Joshi P K, Sutton P C, Keesstra S, Roy P S, Pilla F, Basu B, Wang Y, Jha S, Paul S K, Sen S. Examining effects of climate change and land use dynamic on biophysical and economic values of ecosystem services of a natural reserve region. Journal of Cleaner Production, 2020, 257: 120424.
- [29] Estoque R C, Murayama Y. Examining the potential impact of land use/cover changes on the ecosystem services of Baguio city, the Philippines: a scenario-based analysis. Applied Geography, 2012, 35(1/2): 316-326.
- [30] Gao X, Wang J, Li C X, Shen W N, Song Z Y, Nie C J, Zhang X R. Land use change simulation and spatial analysis of ecosystem service value in Shijiazhuang under multi-scenarios. Environmental Science and Pollution Research, 2021, 28(24): 31043-31058.
- [31] Hoque M Z, Cui S H, Islam I, Xu L L, Tang J X. Future impact of land use/land cover changes on ecosystem services in the lower Meghna river estuary, Bangladesh. Sustainability, 2020, 12(5): 2112.
- [32] 史培军, 潘耀忠, 陈晋, 王平, 周武光. 深圳市土地利用/覆盖变化与生态环境安全分析. 自然资源学报, 1999, 14(4): 293-299.
- [33] Naboureh A, Moghaddam M H R, Feizizadeh B, Blaschke T. An integrated object-based image analysis and CA-Markov model approach for modeling land use/land cover trends in the Sarab plain. Arabian Journal of Geosciences, 2017, 10(12): 259.
- [34] 韩宝龙, 欧阳志云. 城市生态智慧管理系统的生态系统服务评估功能与应用. 生态学报, 2021, 41(22): 8697-8708.
- [35] 深圳市市场监督管理局, 深圳市地方标准批准发布公告(总第 50 号), http://amr.sz.gov.cn/xxgk/qt/tzgg/content/post_8567911.html.