

吴隽宇, 张一蕾, 江伟康. 粤港澳大湾区生态系统碳储量时空演变 [J]. 风景园林, 2020, 27 (10) : 57-63.

粤港澳大湾区生态系统碳储量时空演变

Spatio-Temporal Evolution of Ecosystem Carbon Storage in Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area

吴隽宇 张一蕾 江伟康

WU Juanyu, ZHANG Yilei, JIANG Weikang

开放科学 (资源服务)
标识码 (OSID)



中图分类号: TU982

文献标识码: A

文章编号: 1673-1530(2020)10-0057-07

DOI: 10.14085/j.fjyl.2020.10.0057.07

收稿日期: 2020-03-31

修回日期: 2020-08-05

吴隽宇 / 女 / 博士 / 华南理工大学建筑学院副教授 / 亚热带建筑科学国家重点实验室、广州市景观建筑重点实验室成员 / 本刊特约编辑 / 研究方向为风景园林遗产保护、生态系统服务价值评估

WU Juanyu, Ph.D., is an associate professor in the School of Architecture, South China University of Technology, member of State Key Laboratory of Subtropical Building Science and Guangzhou Municipal Key Laboratory of Landscape Architecture, and a contributing editor of this journal. Her research focuses on landscape heritage protection and evaluation of ecosystem service value.

张一蕾 / 女 / 华南理工大学建筑学院风景园林系在读硕士研究生 / 研究方向为风景园林遗产保护、生态系统服务价值评估

ZHANG Yilei is a master student in the Department of Landscape Architecture, School of Architecture, South China University of Technology. Her research focuses on landscape heritage protection and evaluation of ecosystem service value.

江伟康 / 男 / 华南理工大学建筑学院风景园林系在读硕士研究生 / 研究方向为风景园林遗产保护、生态系统服务价值评估

JIANG Weikang is a master student in the Department of Landscape Architecture, School of Architecture, South China University of Technology. His research focuses on landscape heritage protection and evaluation of ecosystem service value.

摘要: 作为生态系统服务的重要评价指标之一, 碳储量及其变化的研究是近年来全球陆地生态系统碳循环和应对气候变化的重要课题。在人类活动干扰和气候变化加剧的背景下, 粤港澳大湾区作为中国重要经济核心区之一正在发生快速的变化, 面临巨大的生态环境压力。通过利用 InVEST 模型, 对粤港澳大湾区 2005、2010、2015、2018 年碳储量进行定量评估, 分析其时空演变及空间差异性。结果表明: 1) 大湾区在 2005、2010、2015、2018 年的碳储量分别为 202.41×10^6 、 200.87×10^6 、 199.99×10^6 、 200.10×10^6 t, 变化呈现先减少后增加的趋势; 2) 大量的林地、耕地面积被建设用地所侵占, 大湾区碳储量降低了 1.14%, 年损失率为 0.09%; 3) 2015—2018 年大湾区固碳量转负为正, 说明近年来政府推行的生态保护政策初见成效。在低碳湾区发展目标下保护耕地和林地, 大力推进增绿碳汇工程将会大大提高湾区的碳储存与固碳能力。

关键词: 风景园林; 生态系统服务; 粤港澳大湾区; 碳储量; InVEST 模型; 时空演变

基金项目: 国家自然科学基金 (编号 51978274)

Abstract: As an important evaluation index of ecosystem services, carbon storage and its change researches are an important topic of global terrestrial ecosystem carbon cycle and tackling climate change in recent years. Due to increased human activity interference and climate change, the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area (GBA), one of the most important economic core areas in China, is undergoing rapid changes and facing huge ecological environment pressure. With the InVEST model, this research quantitatively evaluates the carbon storage of GBA in 2005, 2010, 2015 and 2018 respectively, and analyzes the spatio-temporal evolution and spatial differences. The results show that: 1) In 2005, 2010, 2015 and 2018, the carbon storage of GBA was 202.41×10^6 t, 200.87×10^6 t, 199.99×10^6 t and 200.10×10^6 t respectively, and the change of total carbon storage showed a trend of decreasing first and then increasing; 2) A large amount of forest land and cultivated land was occupied for construction purpose, the total carbon storage of GBA decreased by 1.14%, and the annual loss rate stood at 0.09%; 3) From 2015 to 2018, the carbon sequestration in GBA turned from negative to positive, indicating that the government's ecological protection policies have achieved initial results in recent years. Under the development goal of the low-carbon bay area, the carbon storage and carbon sequestration capacity of GBA would be greatly improved by protecting cultivated areas and forest land and vigorously promoting the project of green enhancement and carbon sink project.

Keywords: landscape architecture; ecosystem services; Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area; carbon storage; InVEST model; spatio-temporal evolution

Fund Item: The National Natural Science Fund of China (No. 51978274)

1 研究背景与现状

气候变化是当前全球面临的重要环境问题之一, 如何缓减气候变化对人类社会发展的影响受到全球各国政府和人民的高度重视。《京都

议定书》《巴黎协定》和《联合国气候变化框架公约》一系列具有明确目标和高度约束力的国际协议, 敦促世界各国通过切实行动降低温室气体排放和提升碳固持能力, 减缓全球升温速

率^[1848]。据全球二氧化碳浓度最新的测定数据显示,2019年5月地球大气层中的二氧化碳浓度已经达到415 ppm,成为1400万年以来的峰值^[19]。2019年11月中国科学院发布《应对气候变化报告2019:防范气候风险》,报告中指出中国是全球气候变化的敏感区和影响显著区之一,20世纪中叶以来,中国升温速率明显高于全球同期水平^[20]。二氧化碳浓度不断上升带来的全球温室效应将会导致极端气候灾害的频发,生态系统的固碳与碳储存能力对区域气候的变化、全球变暖的缓解有重要意义,因此对碳储量及其变化、如何提高陆地生态系统碳储量的研究成为近年来全球陆地生态系统服务和应对气候变化的重要课题。

研究陆地生态系统碳储量及其变化是目前全球气候变化研究的重点之一,而土地利用类型的变化是影响陆地生态系统碳循环的关键因素。自20世纪50年代起,国际上已有学者开始对全球碳储量进行估算。科学家们通过实地观测、控制实验、模型模拟以及整合分析与数据挖掘等手段在全球范围内对陆地生态系统碳储存开展了大量的研究^[4]。同时,新的方法和技术手段为生态系统碳储存的动态研究提供了可能^[5]。总体来说,国外对碳储量的研究主要集中在3个方面:碳储量的估算及其方法研究、碳储量影响因素研究以及碳汇价值研究^[64-5]。国内关于碳储量的研究起步相对较晚。20世纪90年代开始,中国科学家开始关注土地利用和覆被变化对土壤碳库和碳循环的影响。朴世龙等通过地面清查结合遥感数据、生物地球化学模型和大气反演模型,定量描述了中国的碳收支及其变化机理,研究结果显示中国陆地生态系统碳汇的空间分布并不均匀,主要位于中国南部^[7];张亮等基于广东省2007年森林资源数据,采用材积源生物量法,研究广东省森林植被碳储量空间分布格局,认为广东省森林植被碳储量在不同经济区和流域空间分布格局严重不均^[8];朱鑫通过开展珠江三角洲经济区多目标区域地球化学调查获得土壤全碳及有机碳数据,采用“单位土壤碳量”方法计算土壤碳储量,研究了珠江三角洲经济区土壤有机碳总体分布,并通

过与其他地区进行对比得出珠江三角洲土壤碳密度水平较低^[9]。随着科学与技术的发展,ArcGIS技术与InVEST(Integrated Valuation of Ecosystem Services and Trade-offs)模型的出现为研究大尺度区域的碳储存时空演变提供了支撑。韩依纹等以韩国首尔市为例,基于2005年和2015年首尔市的生境数据,运用InVEST模型对碳储量进行估算,将绿地的碳储存定量可视化,探索城市中各种绿地类型的碳储存能力和空间分布特点^[10]。吴佩君等基于InVEST模型探索了广东省1980—2010年陆地生态系统的碳储量变化及城市扩张对碳储量的影响,结果表明城市扩张对生态环境的压力不断加剧,其中珠江三角洲城市扩张导致的碳储量减少占广东省城市扩张所致的碳储减少总量的80%以上^{[11]27}。可见,城市化及其引起的土地覆被变化对城市生态系统碳储存服务的动态进展具有重要的影响,对区域不同土地类型的碳储存研究将有利于土地利用空间格局的优化和管理机制的完善。在研究方法上,国内外学者多采用量化模型的方法探究土地利用变化对碳循环的影响,不同学者曾先后使用过“薄记”模型、CASA(Carnegie-Ames-Stanford Approach)模型和InVEST模型进行研究。“薄记”模型从最早的小尺度研究拓展到区域尺度上的应用;CASA模型则被广泛应用于植被净初级生产力和碳循环的研究;而由美国斯坦福大学、大自然保护协会(The Nature Conservancy,简称TNC)与世界自然基金会(World Wide Fund for Nature,简称WWF)共同开发的InVEST模型不但能量化评估区域碳储量及其变化趋势,还能全面评估其他生态系统服务量,有助于区域生态系统服务的综合评估,具有较强的实用性。

中国是全球最大的发展中国家,粤港澳大湾区作为中国开放程度最高、经济活力最强、人口最密集的区域之一,近年来经历了快速的城市扩张和经济发展,取得了显著的绩效。然而经济增长不可避免地带来碳排放增加的环境问题,由于发展所需,能源消耗和温室气体排放量在短期内增加的趋势将难以改变^[1849],粤港澳大湾区又是中国经济活力

最高的区域之一,在未来的气候变化会议中将会面临国际社会对中国温室气体限排、减排的巨大压力。《京都议定书》中规定:世界各国可以通过增加陆地生态系统碳储量来抵消经济发展中的碳排放量。2019年发布的《粤港澳大湾区发展规划纲要》将“绿色发展,保护生态”确定为大湾区合作六项基本原则之一,在此背景下大湾区的生态环境建设面临着巨大挑战,因此对大湾区碳储量的深入研究意义重大且十分迫切。

尽管通过模型对生态系统服务碳储量模拟计算的研究文章已有不少,但多数研究只针对碳储量的计算结果及时空分布进行了总结讨论,仅停留在现象分析层面,未针对具体研究区域进一步探讨生态系统服务碳储量变化与人为要素、工程措施、政策管理的相互作用影响及成因分析。鉴于此,笔者通过ArcGIS软件和InVEST模型相结合,基于粤港澳大湾区2005、2010、2015、2018年4期的土地利用变化数据评估各期大湾区碳储量的空间分布情况,探究2005—2018年大湾区碳储量的时空演变规律,综合评价大湾区不同土地利用类型及不同城市间的生态系统碳储存能力水平,结合区域相关生态工程探究,对变化趋势的影响效应进行了归因分析,最终提出研究区未来土地利用规划及区域提升碳储量建议,为未来区域土地利用管理的良性发展及相关生态工程的效应拓展提供切实的参考依据。

2 研究地区与研究方法

2.1 研究区概况

粤港澳大湾区是由广东省广州、深圳、珠海、佛山、惠州、东莞、中山、江门、肇庆9个珠三角城市和香港、澳门2个特别行政区组成的世界级城市群,位于中国东南沿海,总面积为5.6万km²,属亚热带季风气候。作为“一带一路”国家战略建设的重要支撑,粤港澳大湾区是区域经济的领头羊,2018年末区域人口超过7000万(表1),区域生产总值为10.867万亿元,达到了国内生产总值的12.07%,人均生产总值为156203元,是中国经济活力最强的区域之一。粤港澳大湾区作

为全球第四大湾区,与美国纽约湾区、美国旧金山湾区、日本东京湾区相比,在环境品质、区域发展“韧性”等软环境条件上仍存在较大追赶的空间^[12],面对高速城市化进程和经济发展强度,城镇用地的需求不断增加,农田和林地等自然生态系统面积下降,生态环境保护与经济发展之间的矛盾日益突出^[13]。1961年以来,大湾区区域平均气温每10年上升0.21℃,存在明显的年际变化,最高平均气温出现在2015年(23.3℃),2018年粤港澳大湾区的气候属于较差年景:平均气温为22.9℃,较常年升高了0.4℃^[14],总体有明显变暖的趋势。

2.2 研究方法

笔者在2005、2010、2015和2018年研究区土地利用数据基础上,经相关文献整理修正,确定大湾区陆地生态系统主要土地利用类型的地上生物量、地下生物量、土壤碳密度数据库;将土地利用和碳密度数据输入InVEST模型得到对应年份湾区碳储量分布图,结合土地利用类型探究粤港澳大湾区陆地生态系统碳储存能力的时空变化特征。最后以评估结果为依据,讨论政策对大湾区碳储量变化的影响与作用,提出研究区未来土地利用规划及区域碳储存能力提升建议,为粤港澳大湾区的生态环境保护思路提供决策依据(图1)。

本研究中对生态系统服务碳储存的模拟和评估采用InVEST3.2.0模型完成。InVEST是当前为数不多的能够将生态系统服务价值量化的实用性能较强的评估模型,其中的“碳储存与固持模块”将土地利用覆被类型与碳储量、固碳量结合进行评估研究,输出结果直观可靠。

模型中生态系统碳储量计算是以土地利用类型为评估单元,根据研究区内不同土地利用类型地上碳库、地下碳库、土壤碳库和死亡碳库的平均碳密度数据,通过栅格计算评估陆地生态系统碳储量^[15],本研究仅考虑地类固碳情况。各类土地利用类型的碳密度计算公式如下:

$$C_i = C_{i_above} + C_{i_below} + C_{i_soil} + C_{i_dead}, \quad (1)$$

式中, C_i 是指第 i 种土地利用类型的碳密度, C_{i_above} 是指第 i 种土地利用类型地上生物量的

表 1 2018 年粤港澳大湾区各城市面积及人口数量
Tab. 1 The urban area and population of the cities in Guangdong-Hong Kong-Macao GBA in 2018

粤港澳大湾区城市 / 特别行政区	面积 / 万 km ²	人口 / 万人
广州	0.743	1 490
深圳	0.200	1 303
珠海	0.174	189
佛山	0.380	790
惠州	1.135	483
东莞	0.246	839
中山	0.178	331
江门	0.951	460
肇庆	1.489	415
香港	0.111	749
澳门	0.003	67
合计	5.609	7 116

碳密度, C_{i_below} 是第 i 种土地利用类型地下生物量的碳密度, C_{i_soil} 是指第 i 种土地利用类型土壤的碳密度, C_{i_dead} 是指第 i 种土地利用类型死亡的有机质碳密度。

然后,基于各类土地利用类型的碳密度和研究区域土地利用数据,计算区域内生态系统的总碳储量:

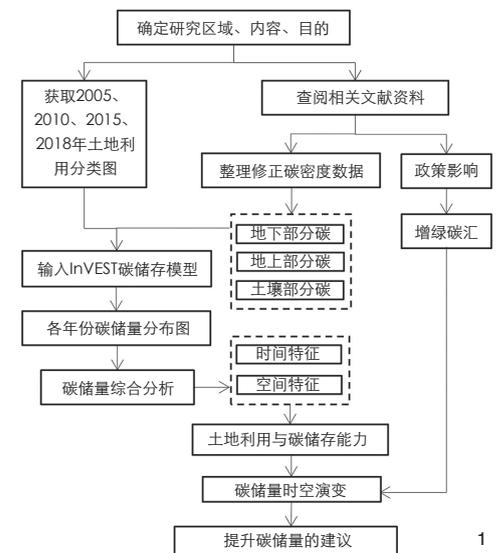
$$C_{total} = \sum_{i=1}^n (C_i \times A_i) \quad (2)$$

式中, C_{total} 为区域总碳储量,研究区一共有 n 种土地利用类型, C_i 是指第 i 种土地利用类型的碳密度, A_i 为第 i 种地类的面积。

2.3 数据来源

1) 粤港澳大湾区2005、2010、2015、2018年4期的120 m精度土地利用数据来自中国科学院资源环境科学数据中心。研究区土地利用类型划分为耕地、林地、草地、水域、建设用地、未利用地6类,用作InVEST模型输入参数之一。

2) InVEST碳储存计算模型所用的碳库数据参考InVEST手册和相关文献^{[11][25, [16-21]}整理修正确定。由于本研究关注大湾区陆地生态系统的碳储存,且水域各类碳库碳密度观测难度大,因此将水域碳密度设为0;将林地、耕地的地上生物量与地下生物量比值定为4;草地地下生物量与地上生物量比值定为4.5;



1 技术路线图
Technology roadmap

建设用地以及未利用地的地下地上生物量比值为0.1。死亡有机碳储量在综合碳储量中的比例相对较小,在本研究中不做计算。综合《2010年中国陆地生态系统碳密度数据集》整理得到本研究选取的各类土地利用类型的碳密度值(表2)。

3 结果与分析

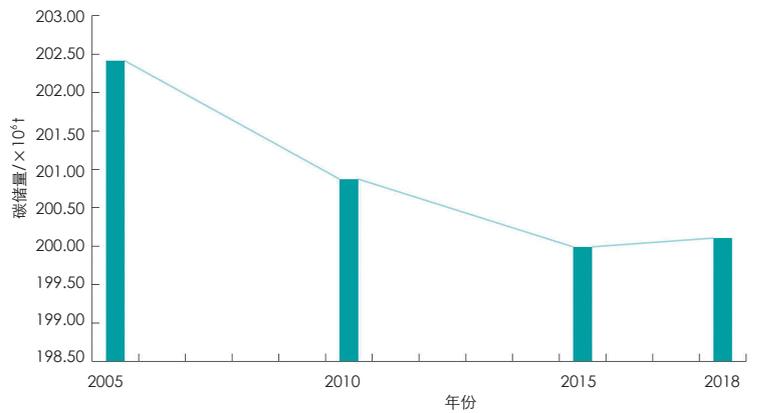
3.1 碳储存时间变化特征

粤港澳大湾区2005年的总碳储量为 202.41×10^6 t, 平均密度为 3.61 kg/m^2 ; 2010年总碳储量 200.87×10^6 t, 平均密度 3.59 kg/m^2 ; 2015年总碳储量 199.99×10^6 t, 平均密度 3.57 kg/m^2 ; 2018年总碳储量 200.10×10^6 t, 平均密度 3.58 kg/m^2 。从粤港澳大湾区整体碳储量的时间变化情况看(图2), 2005—2018年粤港澳大湾区的总碳储量呈下降的趋势, 其中2005—2010年降幅最大, 平均每年减少 0.15×10^6 t; 2010—2015年减速变缓, 平均每年减少 0.09×10^6 t; 在2015年左右出现拐点, 碳储量变化趋势由减少变为轻微回升, 平均每年增加 0.04×10^6 t。综合这13年间, 大湾区的碳储量年损失率是0.09%, 表明2005—2018年大湾区的生态系统受到了一定的干扰, 碳储存能力被破坏, 原本储存在大湾区陆地生态系统中的植物、土壤的一部分碳释放到大气中, 增加了大湾区的气候环境压力, 自

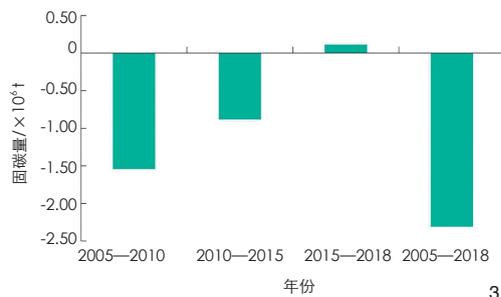
表2 粤港澳大湾区各类土地利用类型的碳密度值

Tab. 2 Carbon density values of various land use types in Guangdong-Hong Kong-Macao GBA

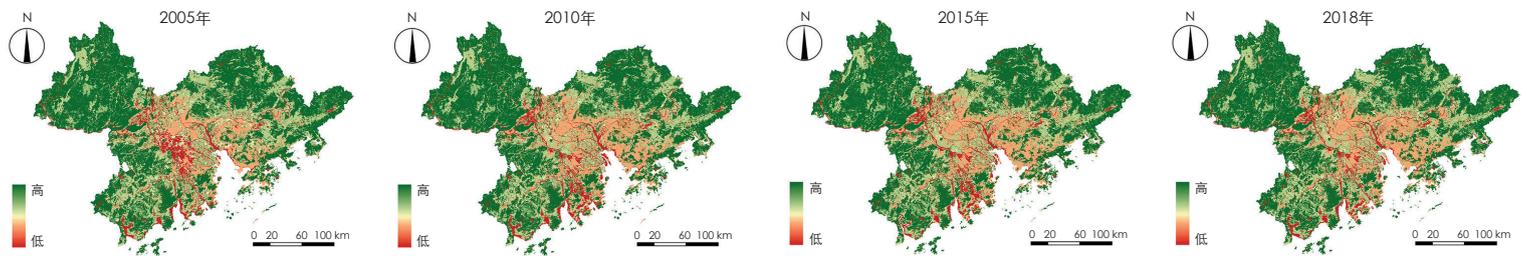
		单位: t/hm ²		
一级土地利用类型	二级土地利用类型	地上部分碳密度	地下部分碳密度	土壤部分碳密度
耕地	水田	16.61	4.15	10.84
	旱地	16.27	4.07	10.84
林地	有林地	21.10	5.28	22.57
	灌木林	20.74	5.19	9.40
	疏林地	21.16	5.29	22.57
	其他林地	16.98	4.25	22.57
草地	高覆盖度草地	2.15	9.68	9.99
	中覆盖度草地	2.10	9.43	9.99
	低覆盖度草地	0.72	3.22	9.99
建设用地	城镇用地	0.92	0.09	15.88
	农村居民点	1.35	0.14	22.15
	其他建设用地	1.17	0.12	15.88
未利用地	沙地	18.32	1.83	0.84
	沼泽地	5.70	0.57	23.12
	其他未利用土地	20.87	2.09	0



2



3



4

2 粤港澳大湾区 2005—2018 年总碳储量变化
Changes of total carbon storage in Guangdong-Hong Kong-Macao GBA (2005-2018)

3 粤港澳大湾区 2005—2018 年固碳量变化
Changes of carbon sequestration in Guangdong-Hong Kong-Macao GBA (2005-2018)

4 粤港澳大湾区 2005—2018 年碳储量分布
Distribution of carbon storage in Guangdong-Hong Kong-Macao GBA (2005-2018)

2015 年开始不利干扰程度有所减缓, 大湾区碳储量总体水平呈现缓慢上升的态势。

利用 2005、2010、2015、2018 年 4 期的碳储量, 可得到固定时间段内碳储存的净变化值(固持或者损失), 若为正, 则证明该段时间区域生态系统将碳固定到植物和土壤中, 为碳汇区; 若为负, 则证明该段时间区域生态系统释放了原本储存的碳到大气中, 不利于碳汇。粤港澳大湾区 2005—2010 年释放碳 1.54×10^6 t, 2010—2015 年释放碳 0.88×10^6 t, 可见生态系统固碳能力正逐步退化(图 3); 2015—2018 年固定碳 0.11×10^6 t, 固碳效应由负转为正, 固碳作用加强, 表明这 3 年间大湾区为碳汇

区。总体来看, 尽管 2005—2018 年粤港澳大湾区固碳量为负, 累计释放碳 2.31×10^6 t, 但 2015—2018 年大湾区的固碳量转负为正, 表明大湾区具有一定的碳汇潜力。

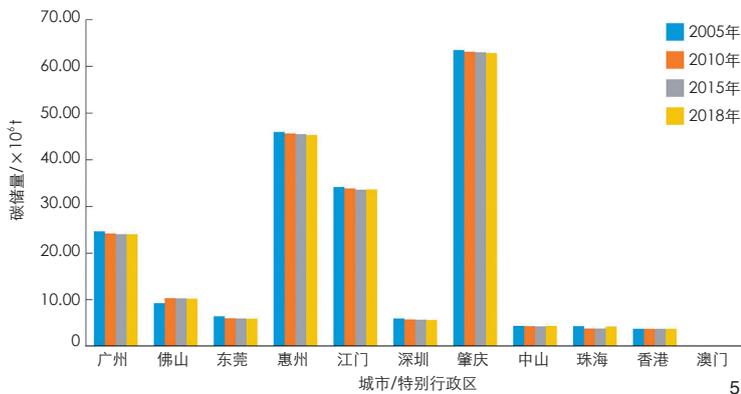
3.2 碳储存空间分布特征

粤港澳大湾区 2005—2018 年 4 期碳储量存在明显的空间分布特征, 各城市碳储存能力差异性显著: 大湾区东北、西部两翼的生态屏障区, 碳储存能力高, 对应的大湾区重要节点城市为肇庆、惠州和江门(图 4~6)。这 3 个城市的碳储量占大湾区总量的 70.9%~71.1%, 是大湾区林地分布最广、面积最为集中的区域, 对大湾区的平均单位面积碳储量贡献最

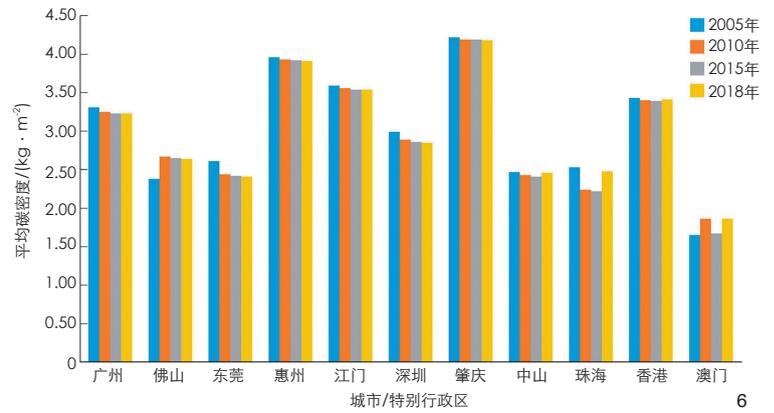
大, 是主要的碳汇资源; 湾区中部城市广州、佛山碳储量次之, 南部城市东莞、深圳、中山、珠海碳储量最低。值得一提的是, 香港的用地面积虽小, 仅占大湾区面积的 2%, 但香港的单位面积碳密度值高于广州、深圳、佛山、东莞等市。以 2018 年数据为基准, 大湾区的城市群按照各城市或特别行政区土地平均碳密度值由高到低排序是: 肇庆、惠州、江门、香港、广州、深圳、佛山、珠海、中山、东莞、澳门, 其中除肇庆、惠州外, 其他城市的碳密度值均小于大湾区的平均碳密度值。

3.3 土地利用类型与碳储存能力关系

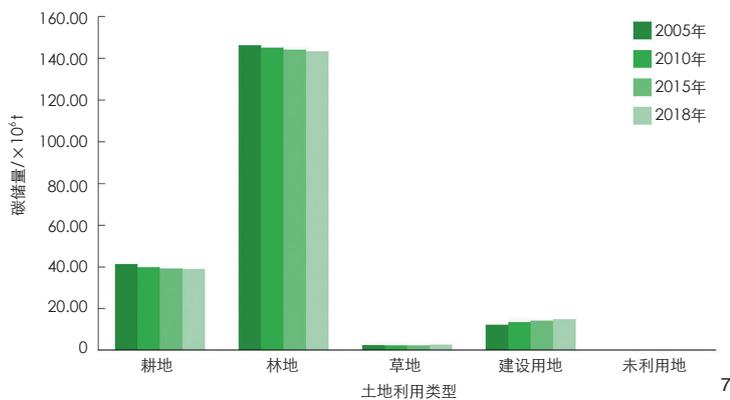
由于不同土地利用类型碳储存能力有



注: 澳门特别行政区2005年碳储量为 0.05×10^6 t, 2010年为 0.06×10^6 t, 2015年为 0.06×10^6 t, 2018年为 0.06×10^6 t。



6



注: 粤港澳大湾区未利用地碳储量2005年为 0.03×10^6 t, 2010年为 0.02×10^6 t, 2015年为 0.02×10^6 t, 2018年为 0.02×10^6 t。

5 粤港澳大湾区 2005—2018 年各城市碳储量变化

Change of carbon storage of cities in Guangdong-Hong Kong-Macao GBA (2005—2018)

6 粤港澳大湾区 2005—2018 年各城市平均碳密度变化

Change of average carbon density of cities in Guangdong-Hong Kong-Macao GBA (2005—2018)

7 粤港澳大湾区 2005—2018 年各类用地碳储量变化

Carbon storage changes of various land use in Guangdong-Hong Kong-Macao GBA (2005—2018)

表 3 粤港澳大湾区各类土地利用类型的面积变化
Tab. 3 Area changes of land use types in Guangdong-Hong Kong-Macao GBA

土地利用类型	2005—2010 年		2010—2015 年		2015—2018 年		2005—2018 年
	面积 / km ²	变化率 / %	面积 / km ²	变化率 / %	面积 / km ²	变化率 / %	面积 / km ²
耕地	-505.53	-3.84	-180.67	-1.43	-51.13	-0.41	-737.34
林地	-209.92	-0.69	-206.56	-0.69	-157.56	-0.53	-574.03
草地	-43.74	-3.81	-0.87	-0.08	142.10	12.87	97.49
水域	-114.28	-2.66	-143.56	-3.43	-183.72	-4.55	-441.56
建设用地	980.09	15.28	394.21	5.33	441.53	5.67	1815.83
未利用地	-7.23	-37.41	-2.73	-22.57	-0.83	-8.88	-10.79

差异, 粤港澳大湾区的碳储量与土地利用类型存在空间关联性。将大湾区 2005、2010、2015、2018 年这 4 期各类用地碳储量对比分析(图 7), 林地的碳储存能力最高, 约占总碳储量的 72.2%, 耕地次之, 约占 20.4%。草地、建设用地、未利用地碳储存能力较低, 分别为 1.2%、6.1%、0.1%。可见, 林地和耕地是湾区总碳储量的核心部分, 其面积大小与碳储量变化密切相关。数据显示, 2005—2018 年大湾区林地和耕地的碳储量明显减少, 其中林地碳储量减少了 2.87×10^6 t, 耕地碳储量减少了 2.31×10^6 t。

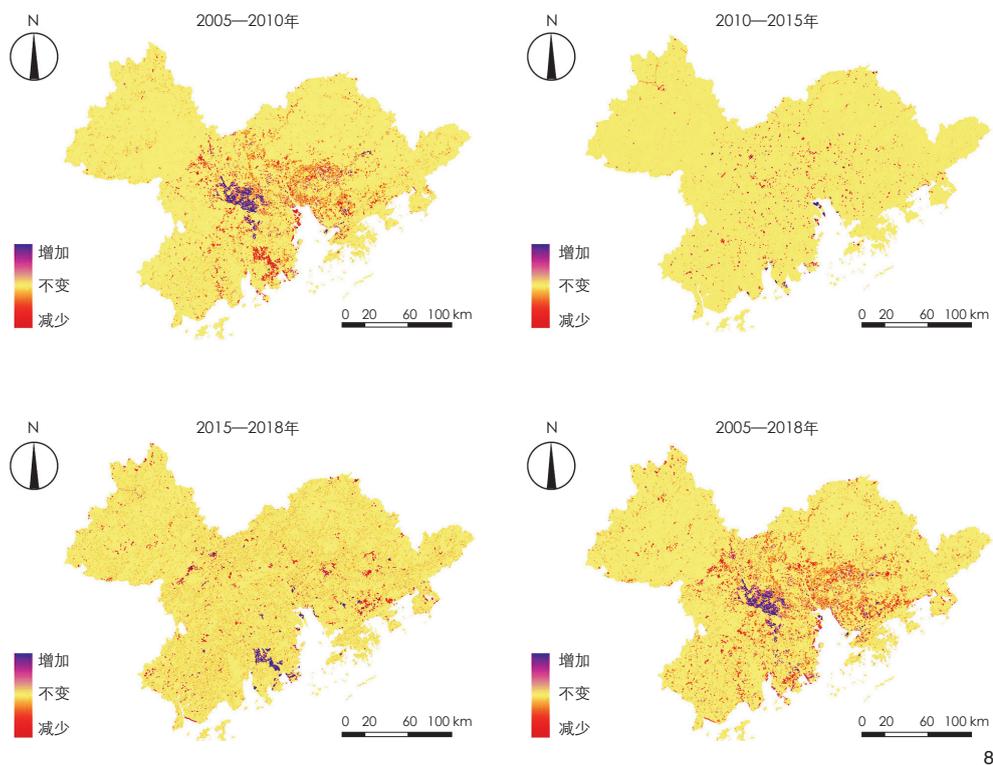
从 2005—2018 年大湾区土地利用类型面积变化趋势来看(表 3), 建设用地、草地面积增长, 耕地、林地、水域及未利用地面积下降。大湾区建设用地面积变化最大, 增长了 1815.83 km², 而作为对碳储存贡献最大的两类用地——林地和耕地面积分别减少了

574.03 km² 和 737.34 km²。可见城市扩张侵占了大量的林地、耕地, 导致原本储存的碳释放进入大气, 这是近年来湾区碳储量下降的根本原因。从各阶段分析, 2005—2010 年耕地、林地、草地的减少速度最快, 建设用地急速增长; 2010—2015 年, 耕地、草地减少速度明显降低, 林地下降速度趋缓, 建设用地增长速率也逐渐减缓, 约为上阶段的 1/3; 2015—2018 年, 耕地减少速度继续减缓, 林地减少速度得到初步控制, 草地增速明显。

3.4 碳储量时空演变及差异分析

粤港澳大湾区 2005—2018 年碳储量的空间分布格局及其变化趋势的空间分布均呈现明显的空间差异性(图 8)。2005—2018 年大湾区有 7561 km² 的用地碳储量发生变化, 其中碳储量增加的地区有 2774 km², 主要分布在各城市的碳储量低值区域; 而碳储量减少的地区, 集中分布在深圳、东莞和佛山, 减

少的面积达 4787 km², 约为碳储量增加地区面积的 1.8 倍, 可见大湾区的生态系统服务碳储存受到了威胁。粤港澳大湾区的 11 个城市中, 碳储量变化较为明显的是肇庆、惠州、广州、东莞、佛山。究其原因, 大湾区中部城市群, 如广州、东莞、珠海、佛山 4 市, 城市扩张现象尤为凸显, 城市周边的林地、耕地被侵占, 部分未利用地转化为建设用地。林地和耕地面积的锐减导致了湾区碳储量大幅降低; 从 2010 年开始, 大湾区虽然仍存在零散分布的碳储量不断减少的区域, 但是中部地区较为集中的区域, 其碳储量削减的现象已经有所减缓, 说明政府意识到以往的发展模式对生态系统碳储存能力的破坏, 开始重视生态保护。2015—2018 年大湾区内碳储量增加的区域面积超过了碳储量减少的区域面积, 可见大湾区生态系统所遭受的破坏已逐步得到了控制, 生态修复工作初见成效。



8 粤港澳大湾区 2005—2018 年碳储量变化分布
Distribution of carbon storage changes in Guangdong-Hong Kong-Macao GBA (2005—2018)

表 4 粤港澳大湾区 2005—2018 年碳储量变化归因
Tab. 4 Attribution of carbon storage change in Guangdong-Hong Kong-Macao GBA (2005—2018)

年份	总碳储量变化	土地利用变化	地方政策	主要原因
2005—2010	减少 1.54×10^6 t, 损失严重	林地、耕地、草地大面积减少, 建设用地明显增加	忽视农林地的生态重要性, 缺乏切实保护政策, 保护力度不强	碳储存能力高的用地类型(如林地、耕地、草地)被碳储存能力低的用地类型(如建设用地)侵占
2010—2015	减少 0.88×10^6 t, 损失速率减缓	耕地、草地减少速率明显变缓, 林地减少速率得到控制	基本农田保护补贴机制试行和推广; 退耕还林还草推行; 林业生态建设、扩大造林规模和森林面积	控制碳储存能力低的用地类型对碳储存能力高的类型侵占
2015—2018	增加 0.11×10^6 t, 变化趋势转变	耕地、林地减少速率变缓, 草地增加	全面推进垦造水田工作, 坚持特殊保护永久基本农田; 新一轮退耕还林还草、南方现代草地畜牧业推进行动等工程、草原生态保护补助奖励政策; 碳汇工程造林、构建稳定森林生态屏障	向碳储存能力更高的用地类型(如林地)转换, 增加碳储存能力高的用地面积; 在面积有限的情况下对碳储存能力较高的用地提升质量(疏林地变为有林地)

3.5 政策影响碳储量的变化

值得关注的是, 从 2010 年起大湾区碳储量减缓逐渐变缓, 自 2015 年始大湾区碳储量变化出现拐点, 呈现正增长态势。结合实际情况可得, 近年来湾区各级政府推行的一系列保护林地、耕地等生态用地和增绿造林的政策能有效地控制城市扩张对林地、耕地的侵占, 促进了生态系统碳储存能力的恢复与提高。针对以上变化特征对大湾区内各城市

的相关政策进行分析, 由于香港和澳门较早就形成了比较完备的林地、耕地相关保护体系与政策, 确保了城市重要的碳库来源, 因此港澳地区碳储量变化较为稳定。而其余 9 个城市的碳储量在 2005—2018 年均有明显的波动。2010—2015 年的大湾区的碳储量下降速率相较于 2005—2010 年相对变缓, 主因是 2011 年广东省林业局大力推动珠三角地区的林业生态建设, 通过 2011 年《广东省应对气候变化

方案》着力扩大造林规模和森林面积, 增加森林碳汇, 充分发挥林业在应对气候变化方面的积极作用^[22-23]。同时为了推进森林碳汇重点造林工程项目, 2012 年广东省委、省政府开展了新一轮绿化广东工作, 推动森林碳汇、生态景观林带、森林进城围城三大重点工程, 2013 年广东省委、省政府提出在珠三角地区建设全国首个国家森林城市群, 共同推动山水林田湖草系统治理, 并提出具体的六大建设任务: 森林生态屏障、绿色生态廊道、城市生态绿核、森林生态服务、绿色生态水网、自然生态文化。自 2015 年开始, 大湾区碳储量有明显的提升, 固碳量由负转正, 碳汇能力不断增强。2016 年珠三角国家森林城市群建设启动, 2017 年《全国草原保护建设利用“十三五”规划》明确提出对南方草地区重点实施新一轮退耕还林还草、草原生态保护补助奖励政策, 2018 年珠三角地区统计完成碳汇工程造林达 800 km², 造林示范点 2 621 个, 森林覆盖率提升到 51.8%, 初步构建了稳定的森林生态屏障。从 2005—2018 年粤港澳大湾区的碳储量和固碳量的变化趋势可以看出环保政策对大湾区碳储量变化与碳汇功能起到了积极的促进作用。

4 结论与建议

固碳作为生态系统重要的调节服务, 对全球气候变化的影响至关重要, 土地利用是影响碳循环的重要因素之一。笔者基于 2005、2010、2015、2018 年 4 期遥感影像数据, 通过 InVEST 模型对 2005—2018 年间粤港澳大湾区碳储量进行定量评估及时空演变分析研究。具体结论如下: 2005—2018 年大湾区的总碳储量呈下降的趋势, 其中 2005—2015 年减速变缓, 在 2015 年左右出现拐点, 至 2018 年有逐步增加的趋势, 这得益于近年来政府环保政策的积极影响; 由于城市扩张侵占了大量的林地、耕地, 导致原本储存的碳释放进入大气, 这是近年来湾区碳储量下降的根本原因; 大湾区的碳储量分布具有明显的空间异质性, 大湾区的城市群各城市或特别行政区土地平均单位面积碳储存能力由强到弱排序是: 肇庆、惠州、江门、香港、广州、深圳、佛山、

珠海、中山、东莞、澳门(以 2018 年数据为基准)。

研究表明, 2005—2018 年的粤港澳大湾区碳储量总量降低了 1.14%, 年损失率是 0.09%, 这与城市扩张侵占农林用地有关。类似的碳储量损失情况还存在于中国其他地区, 如辽中南城市群 2000—2010 年碳储量年损失率是 0.3%^[64]; 湖北省的碳储量 2010—2015 年年损失率为 0.26%^[24]; 京津冀地区碳储量 2000—2015 年的年损失率是 0.03%^[25]。可见中国人口密集地区陆地生态系统的碳储存正受到不同程度的威胁。近年来由于国家以及地方政府的重视, 2015—2018 年粤港澳大湾区总碳储量提升了 0.06%, 一方面是因为对林地、耕地的保护, 另一方面得益于创建“国家森林城市群”等增绿碳汇举措的执行。然而根据《应对气候变化报告 2019: 防范气候风险》预测, 粤港澳大湾区未来平均气温还将持续上升, 至 2050 年, 年平均气温可能升高 1.4 °C^[26]。面对未来气候变化将带来的威胁, 大湾区生态系统的碳储存能力的保护提升不容松懈。粤港澳大湾区作为与纽约湾区、旧金山湾区、东京大湾区这三大湾区并驾齐驱的世界级城市群, 以仅占全国 0.6% 的土地面积, 4.9% 的常住人口比例, 创造了接近全国 13% 的经济总量, 其碳排放强度下降目标的提出, 为大湾区带来了巨大的压力和挑战。在《粤港澳大湾区发展规划纲要》中明确提出创新绿色低碳发展模式, 主动适应气候变化。在低碳湾区发展目标下, 林地、耕地在碳储存与固碳能力方面具有重要的作用与影响。

综上所述, 对大湾区未来的生态建设提出如下建议。1) 明确长期以来建设用地的加速扩张侵占大量的耕地与林地, 导致生态系统固碳能力下降。因此需严格落实生态保护红线和耕地保护红线的划定, 保障湾区碳库的主要来源。2) 肯定近年来政府对生态环境的重视与发展, 例如积极推进国家森林城市群的创建, 积极开展碳汇造林、见缝插绿等工作使湾区固碳能力不断提升。在未来绿色湾区的目标下, 积极推进森林碳汇、天然林保护、退耕还林、生态景观林带、森林进城围城、乡村绿化美化等重点生态工程, 从而

构建稳定的森林生态安全体系。3) 针对湾区各个城市不同的发展水平和碳储存能力, 实施差异化的恢复提升策略: 肇庆、惠州、江门是湾区的生态屏障, 森林覆盖度高, 应严格控制城市的扩张, 并划定生态红线加强保护区域内完整的大面积林地, 确保湾区主要碳汇来源; 高城市化水平的香港和澳门保持现有稳定的生态环境平衡, 可适当优化城市内绿地的质量, 提升有限面积的碳储量; 中心城市广州和深圳应通过改善绿地质量, 增加立体绿化, 构建生态廊道增加生态斑块之间的连通, 加强区域内生态修复等措施增强生态系统固碳能力; 佛山、中山、东莞、珠海等地应避免低效的外延扩张, 城市建成区内部需完善多级绿地系统建设, 城乡接合部严格加强对耕地的保护, 通过划定生态红线控制城镇扩张。

本研究仅对粤港澳大湾区林地、草地、耕地、建设用地、未利用地等固碳过程进行了研究, 未涉及其他碳循环过程。今后的研究应该综合碳储存和碳排放等环节, 挖掘土地利用变化和碳源碳汇之间的相应机理, 进一步研究土壤保持、水源供给等生态系统服务, 综合考量生态系统服务价值体系, 为粤港澳大湾区生态系统服务研究提供方法与参考。

参考文献 (References):

[1] 方精云, 于贵瑞, 任小波, 等. 中国陆地生态系统固碳效应: 中国科学院战略性先导科技专项“应对气候变化的碳收支认证及相关问题”之生态系统固碳任务群研究进展[J]. 中国科学院院刊, 2015, 30 (6): 848-857, 875.
 [2] 中新网. 大气二氧化碳浓度突破 415ppm 科学家: 人类历史首见 [EB/OL]. (2019-05-14) [2020-03-15]. <http://www.chinanews.com/gj/2019/05-14/8835892.shtml>.
 [3] 中国社会科学院, 中国气象局. 应对气候变化报告 2019: 防范气候风险 [M]. 北京: 社会科学文献出版社, 2019.
 [4] 宋冰, 牛书丽. 全球变化与陆地生态系统碳循环研究进展[J]. 西南民族大学学报(自然科学版), 2016, 42 (1): 14-23.
 [5] 刘留辉, 邢世和, 高承芳, 等. 国内外土壤碳储量研究进展和存在问题及展望[J]. 土壤通报, 2009, 40 (3): 697-701.
 [6] 韩晋榕. 基于 InVEST 模型的城市扩张对碳储量的影响分析 [D]. 长春: 东北师范大学, 2013.
 [7] 朴世龙, 方精云, 黄耀. 中国陆地生态系统碳收支[J]. 中国基础科学, 2010, 12 (2): 20-22, 65.
 [8] 张亮, 林文欢, 王正, 等. 广东省森林植被碳储量空间分布格局[J]. 生态环境学报, 2010, 19 (6): 1295-1299.

[9] 朱鑫. 珠江三角洲经济区土壤碳储量及有机碳时空变化规律研究[J]. 华南地质与矿产, 2014, 30 (2): 176-185.
 [10] 韩依纹, 张舒, 殷利华. 大都市区绿地碳储存能力及其空间分布特点探究: 以韩国首尔市为例[J]. 景观设计学, 2019, 7 (2): 55-65.
 [11] 吴佩君, 刘小平, 黎夏, 等. 基于 InVEST 模型和元胞自动机的城市扩张对陆地生态系统碳储量影响评估: 以广东省为例[J]. 地理与地理信息科学, 2016, 32 (5): 2, 22-28, 36.
 [12] 王景诗, 李永洁. 从珠江三角洲到粤港澳大湾区演变看规划响应[J]. 南方建筑, 2019 (6): 1-5.
 [13] 王文静, 韩宝龙, 郑华, 等. 粤港澳大湾区生态系统格局变化与模拟[J]. 生态学报, 2020, 40 (10): 3364-3374.
 [14] 伍红雨, 翟志宏, 张羽. 1961—2018 年粤港澳大湾区气候变化分析[J]. 暴雨灾害, 2019, 38 (4): 303-310.
 [15] 柯新利, 唐兰萍. 城市扩张与耕地保护耦合对陆地生态系统碳储量的影响: 以湖北省为例[J]. 生态学报, 2019, 39 (2): 672-683.
 [16] 周汝波, 林媚珍, 吴卓, 等. 珠江西岸生态系统碳储量对土地利用变化的响应[J]. 生态科学, 2018, 37 (6): 175-183.
 [17] 朱鹏飞. 基于 InVEST 模型的广西沿海地区土地利用/覆被变化的生态效应研究 [D]. 南宁: 广西师范学院, 2018.
 [18] 方精云, 郭兆迪, 朴世龙, 等. 1981 ~ 2000 年中国陆地植被碳汇的估算[J]. 中国科学 (D 辑: 地球科学), 2007 (6): 804-812.
 [19] 荣检. 基于 InVEST 模型的广东西江流域生态系统产水与固碳服务功能研究 [D]. 南宁: 广西师范学院, 2017.
 [20] 朴世龙, 方精云, 贺金生, 等. 中国草地植被生物量及其空间分布格局[J]. 植物生态学报, 2004 (4): 491-498.
 [21] 李克让, 王绍强, 曹明奎. 中国植被与土壤碳储量[J]. 中国科学 (D 辑: 地球科学), 2003 (1): 72-80.
 [22] 岑苗, 戴晓军. 广东省制定 2011 年国际森林年广东行动方案: 共建绿色家园 共享幸福广东[J]. 国土绿化, 2011 (3): 18-19.
 [23] 广东省人民政府. 印发广东省应对气候变化方案的通知 (2011-01-24) [2020-05-16]. http://www.gd.gov.cn/gkmlpt/content/0/139/post_139497.html.
 [24] HANG Y, HUANG J, LIU D. Linking Climate Change and Socioeconomic Development to Urban Land Use Simulation: Analysis of Their Concurrent Effects on Carbon Storage[J]. Applied Geography, 2020, 115: 102-135.
 [25] CHAO W, ZHAN J, CHU X, et al. Variation in Ecosystem Services with Rapid Urbanization: A Study of Carbon Sequestration in the Beijing-Tianjin-Hebei Region, China[J]. Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C, 2019, 110: 195-202.
 [26] 金羊网. 至 2050 年粤港澳大湾区年平均气温或升近 1.4 °C [EB/OL]. (2019-11-23) [2020-08-02]. <http://www.chinanews.com/gj/2019/05-14/8835892.shtml>.

图表来源 (Sources of Figures and Tables):

图 1 由作者绘制; 图 2~8 由作者将中国科学院资源环境科学数据中心土地利用数据输入 InVEST 模型“碳储存与固持模块”结果整理绘制。表 1 由作者根据澳门统计局、香港政府统计处、广东统计局公开数据整理编绘; 表 2 由作者根据参考文献 [11, 16-21] 整理编绘; 表 3、4 由作者绘制。

(编辑 / 刘昱霏)