广州市森林生态产品价值核算及时空格局*

潘勇军 李智琦 代色平 乔 煜 陈国财

广州市林业和园林科学研究院 广东广州城市生态系统国家定位观测研究站 广州 510405

摘要：森林生态系统具有重要的生态服务功能，其生态产品价值巨大。参照国家标准（GB/T 38582-2020），对广州市 2009、2014 和 2019 年 3 个核算基准年的森林生态产品价值从物质量和价值量两个方面进行核算，并分析生态产品价值的时空分布格局。结果表明：1）2009、2014、2019 年广州市森林生态产品价值分别为 295.92、324.28、370.04 亿元，年增长率约为 2.5%。2）各区生态产品价值大小依次为：从化>增城>花都>黄埔>白云>番禺>天河>荔湾>海珠>南沙>越秀，其中从化、增城、花都呈现高值聚集现象，天河、海珠、番禺、荔湾、越秀呈现低值聚集现象；增城和从化人均生态产品价值较高而人均 GDP 较低，黄埔区和越秀区人均 GDP 较高而人均生态产品价值较低；生态产品价值与区域人口、经济不匹配。因此，对生态产品价值实现的探索有助于生态产品价值实现与区域经济的良性耦合协调发展。

关键词：森林生态系统；生态产品价值核算；时空格局；广州

DOI：10.12169/zgcsly.2024.06.25.0002

Value Realization and Spatial-temporal Pattern of Forest Ecological Products in Guangzhou City

Pan Yongjun Li Zhiqi Dai Seping Qiao Yu Chen Guocai

(Guanzhou Institute of Forestry and Landscape Architecture/Guangzhou National Field Station for Scientific Observation and Research of Urban Ecosystem, Guangzhou 510405, China)

Abstract: Forest delivers important ecosystem services, with tremendous value in ecological products. In accordance with the national standard (GB/T 38582-2020), we calculate the quantity and value of forest ecological products in Guangzhou with 2009, 2014 and 2019 as the base years, and analyzes the spatial-temporal pattern of the ecological product value. The results show that: 1) The forest ecological products are valued at 29.592, 32.428 and 37.004 billion RMB for 2009, 2014 and 2019, respectively, with an annual growth of 2.5%. 2) The value of forest ecological products in different districts is ordered as Conghua > Zengchen > Huadu > Huangpu > Baiyun > Panyu > Tianhe > Liwan >Haizhu > Nansha > Yuexiu. Conghua, Zengchen and Huadu show the trend of high value aggregation in terms of spatial pattern distribution, while the lower value aggregation is observed in Tianhe, Haizhu, Panyu, Liwan and Yuexiu. Zengchen and Conghua have the highest per capita ecological product value and the lower per capita GDP, and Huangpu and Yuexiu have higher per capital GDP but lower value of forest ecological products. There is a mismatch between ecological product value and regional population and economy. In this sense, exploring value realization is helpful for realizing ecological product values and the coupled and coordinated regional economic development.

Keywords: forests ecosystem; ecological product value accounting; spatial-temporal pattern; Guangzhou

收稿日期：2024-06-25

* 基金项目：国家重点研发计划项目（2021YFE0193200）"；广州市林业和园林局科技项目"广州市城市森林生态效益监测、分析与研究"

第一作者：潘勇军（1971-），男，博士，高级工程师，研究方向为城市生态系统生态过程监测、生态系统服务功能价值评估。E-mail：pyjzsj@126.com

生态系统的产品与服务功能是人类生存与发展基础，具有重要的生态价值和经济价值[1]。寻求一种超越 GDP 的核算指标，科学评估和核算自然生态系统对人类生态福祉的贡献，成为各国努力的方向。2021 年 4 月 26 日，我国印发的《关于建立健全生态产品价值实现机制的意见》指出，要有效解决生态产品“难度量”问题，建立健全生态产品价值实现机制，是践行“绿水青山”就是“金山银山”理念的关键路径[2-3]。生态产品价值实现是要把生态系统服务提供的、没有体现在 GDP 统计体系中的额外附加价值显现出来[4]，生态产品价值核算是将资源环境变成一种可衡量、可比较的生产要素，衡量和展示生态系统的状况和变化，把自然资产和生态产品纳入经济制度决策中，以完善国民财富核算体系[5-7]。

自 Costanza 等核算了全球自然资本总量后，自然资源的生态价值受到越来越多的关注，多个国家相继建立了经济和生态核算体系，联合国统计委员会环境经济核算体系 2012－中心框架（《SEEA-2012 中心框架》）及《环境经济核算体系：生态系统核算》（SEEA EA）促使经济报告要体现森林、湿地和其他生态系统等自然资本的价值[8-10]。以“绿水青山”为代表的高质量森林、草地、湿地等生态系统既为人类提供了物质产品，也提供了调节服务和文化服务产品，其生态产品价值是全球总经济价值的重要组成部分[11-14]。我国核算了 2018 年森林生态系统服务价值达 15.88 万亿元，比 2013 年增长了 25.24%[15-16]；我国国家和地方也相继出台了一系列生态产品总值核算技术规范，内蒙古、深圳、丽水等 100 多个市县开展了生态产品总值核算。然而生态产品价值核算应用于价值实现及与区域经济良性耦合协调发展的研究还有待深入，需要选择具备条件的地区开展试点工作，，探索更多生态产品价值实现路径。

广州市为粤港澳大湾区的核心城市，人为活动强度高，森林、湿地和绿地等绿色生态资源是生态城市建设的核心，其生态产品价值评估结果可为“绿水青山”转化为“金山银山”提供科学依据。本研究从物质量和价值量两个方面对广州市森林生态产品价值进行核算，为绿水青山“标价”，分析其时空格局趋势，了解区域自然生态系统对社会经济发展的支撑作用和对人类福祉的贡献，探究通过生态保护补偿等手段，引导生态保护和绿色发展，推动广州高质量发展。

1 研究区概况

广州市（112°57′—114°3′E，22°26′—23°56′N）地处广东省中南部，北回归线附近，珠江三角洲北缘，濒临南海，面积约 7 434.40 km^2，处于粤中低山与珠江三角洲之间的过渡地带。广州市气候属典型的南亚热带季风性海洋气候，年太阳辐射总量为 4 400~5 000 $MJ \cdot m^{-2}$，年日照数在 1 770~1 940 h；年平均气温 21.40 ℃，日均气温 0 ℃以上；年平均降雨量 1 689.30~1 876.50 mm，雨季（4—9 月）降水量占全年的 85%左右。广州市共有 11 个行政区，2009 年森林覆盖率为 38.2%，2014 年为 42.03%，2019 年达 41.6%，其中从化森林面积最大（约占森林总面积的 45.4%），其次是增城（26.8%）和花都区（11.35%），构建了联通山水、贯穿城区、蓝绿相融、功能复合的生态空间网络，维育着市域生态资源集中分布的 9 大重要生态片区。广州市 2023 年 GDP 排名位居全国城市第四，达 3.04 万亿元（增速为 4.6%），常住人口数量达 1 882.7 万人。

2 研究方法

2.1 数据来源

本研究森林资源数据来自第七次（2004—2008 年）、第八次（2009—2013 年）和第九次（2014—2018 年）的广州市森林资源调查，均以 2009、2014 和 2019 年作为核算基准年；生态数据主要依托广东广州城市生态系统国家定位观测研究站及其周边区域长期观测的生态观测数据；社会公共数据采用国家或地方权威机构公布的数据，包括《广州市统计年鉴》及广州市各区国民经济和社会发展统计公报等。

2.2 核算体系

基于“可描述、可测度、可计量”原则，依据《森林生态系统服务功能评估规范》（GB/T 38582-2020），采用分布式测算方法，选取森林生态系统保育土壤、林木养分固持、涵养水源、

固碳释氧、净化大气环境、生物多样性保护和森林游憩 7 项功能 21 项指标对广州市森林生态系统所提供的生态产品物质量和价值量进行核算评估。此外，森林生态系统物质产品功能基本已纳入国民经济核算体系（SNA）统计，遵循国际统计标准，不做重复核算。对于森林游憩功能核算，采用林业旅游与休闲产值替代法进行核算。

2.3　空间格局分析

采用 ArcGIS10.5 软件进行局部空间自相关分析（Local Moran's），分析生态产品价值的热点区域（高高值），潜在热点区域（低高值）等。

3　结果与分析

3.1　广州市森林生态产品价值核算

3.1.1　生态产品物质量核算

从功能物质量测算结果（表 1）可以看出，广州市森林生态系统提供的生态产品功能效果显著。对比 2009—2019 年生态产品功能物质量，森林生态系统提供的生态产品功能不断增强，表明广州市森林质量得到提升，生态功能不断完善。

广州市森林生态系统 2009、2014 和 2019 年固定二氧化碳当量分别为 337.7、365.09 和 410.12 万 $t \cdot 年^{-1}$，分别相当于抵消了 2019 年全市工业碳排放量的 7.90%、8.54% 和 9.59%。可见，在当前碳达峰、碳中和“30/60”战略目标行动方案中，森林发挥“碳库”的重要作用。

2009、2014 和 2019 年森林涵养水源功能总物质量分别相当于全市 2019 年同地表水资源总量（98.23 亿 m^3）的 11.72%、11.44% 和 12.95%，分别是溪流河水库库容总量（3.25 亿 m^3）的 3.54 倍、3.46 倍和 3.91 倍。广州市森林生态系统发挥着巨大的涵养水源功能，犹如一座绿色水库，这对维护广州市乃至珠三角地区的水资源安全、保障水资源永续利用具有重要作用。

3.1.2　生态产品价值量核算

由表 2 可知，广州市 2009、2014 和 2019 年森林生态产品价值分别为 295.92、324.28、370.04 亿元，占当年 GDP 的 5.62%、4.45% 和 4.49%。2019 年的广州市森林生态产品价值相比 2009 和 2014 年分别增加了 74.12 和 45.76 亿元，增幅分别为 25% 和 14.1%，年增长率约为 2.5%。单位面积生态产品价值分别为 10.24、11.10 和 11.69 万元 $\cdot hm^{-2}$。

森林生态产品价值以森林涵养水源的价值所占比例最高，占 38.7%～42.87%；净化大气价值和固碳释氧价值占比相对较高；最小的是林木养分固持价值，其价值量占总价值量的比例均在 1%以下（表 2）。

表 1　广州市森林生态产品物质量

服务	功能类别	指标类别		2009 年	2014 年	2019 年
支持服务	保育土壤	固土/（10^4 t · a^{-1}）		1 190.63	1 218.39	1 240.39
		减少氮流失/（10^4 t · a^{-1}）		1.15	1.12	1.26
		减少磷流失/（10^4 t · a^{-1}）		4.45	4.64	4.70
		减少钾流失/（10^4 t · a^{-1}）		43.75	46.25	45.85
		减少有机质流失/（10^4 t · a^{-1}）		259.32	272.00	294.54
	林木养分固持	氮固持/（10^4 t · a^{-1}）		6.89	7.25	8.03
		磷固持/（10^4 t · a^{-1}）		0.95	1.00	1.19
		钾固持/（10^4 t · a^{-1}）		1.43	1.51	1.68
调节服务	涵养水源	调节水量/（10^8 m^3 · a^{-1}）		11.51	11.24	12.72
	固碳释氧	固碳/（10^4 t · a^{-1}）		92.09	99.57	111.85
		释氧/（10^4 t · a^{-1}）		219.53	238.66	269.07
	净化大气环境	提供负离子/（10^{22} n · a^{-1}）		175.60	177.29	200.88
		吸收气体污染物/（10^4 t · a^{-1}）	吸收 SO_2	2.89	3.17	3.53
			吸收氟化物	0.03	0.06	0.07
			吸收氮氧化物	0.16	0.17	0.19
		滞尘/（10^4 t · a^{-1}）	滞纳 TSP	391.31	405.16	405.47
			滞纳 PM_{10}	1.24	1.28	1.35
			滞纳 $PM_{2.5}$	0.33	0.36	0.37

表 2 广州市森林生态系统生态产品价值量 亿元

服务	功能类别	价值量		
		2009 年	2014 年	2019 年
支持服务	保育土壤	34. 27	35. 47	36. 68
	林木养分固持	2. 23	2. 33	2. 58
调节服务	涵养水源	126. 87	129. 42	143. 18
	固碳释氧	40. 29	43. 76	53. 78
	净化大气环境	49. 7	51. 57	51. 88
供给服务	生物多样性保护	32. 29	35. 69	35. 92
文化服务	森林游憩	10. 27	26. 05	46. 01
合计		295. 92	324. 28	370. 04

3.2 生态产品价值空间格局特征

根据分布式测算方法，统计出各区森林生态产品价值（图 1）。广州市 11 个区 2009、2014、2019 年森林生态产品价值量空间分布格局表现为：从化、增城和花都区于 3 个基准年均排前 3，分别占当年森林生态系统生态产品总价值量的 46. 7%、27%和 11. 4%；2019 年不同区域的森林生态产品价值大小依次从化>增城>花都>黄埔>白云>番禺>天河>荔湾>海珠>南沙>越秀区，说明不同区域的同一种生态系统类型为人类提供的产品和服务不尽相同，即北部山区（从化市、花都区和增城区）大于中部地区（白云区、越秀区、天河区、黄埔区、海珠区和荔湾区）和南部地区（番禺区和南沙区），其中北部区域的森林生态产品价值为 78%～86. 37%、中部区域的生态产品价值为 12. 34%～14. 49%、南部区域的生态产品价值为 1. 29%～1. 90%。由此可见，从化、增城的森林面积较大，森林生态产品价值远大于中部和南部地区，可以作为广州市北部的生态屏障，维持着广州市及珠三角城市群的生态安全。

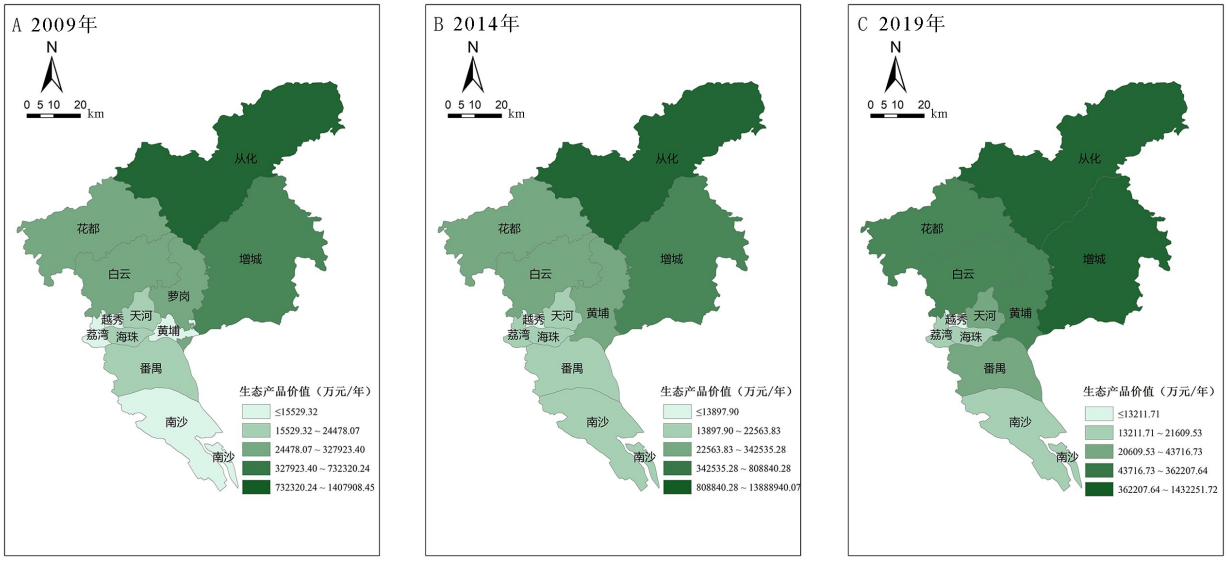


图 1 广州市各区森林生态产品价值示意图

利用莫兰指数探索广州市森林生态产品价值的空间分布特征可知：2009、2014 和 2019 年广州森林生态产品价值空间分布的 Moran's I 分别为 0. 341、0. 377、0. 395，均>0；P 值小于 0. 05，Z 得分大于 1. 65，说明广州市各区森林生态产品价值存在空间正相关性。其中，增城、从化和花都 3 个区位于第一象限，表明它们之间存在高高聚集，相似程度高；天河、海珠、番禺、荔湾、越秀 5 个区在第三象限，出现低低聚集的现象。

比较 2009、2014、2019 年的莫兰指数可以发现，广州市各区的森林生态产品价值空间分布结构一直发生着聚集变化。广州市域绿色生态空间建设围绕着“富有活力和国际竞争力的一流湾区”和“珠三角国家森林城市群”的战略目标，共同保护粤港澳大湾区山体生态屏障，加强区域山水生态廊道建设，提升森林品质，增强生态系统服务功能，从而使生态产品价值量越来越高，尤其是北部增城、从化生态保护区的生态产品价值尤为突出，这也反映了森林生态系统为人类提供生态福祉、促进区域社会经济发展、维持生态系统服务的功能。

3.3　广州市区域经济、人口、生态产品价值耦合特征

对广州市各区的人口总数、人均 GDP、人均生态产品价值等社会经济属性进行深入的热点分析（Getis-Ord Gi*）[17]（图 2）发现：森林生态系统所提供的生态产品价值与人口分布之间存在显

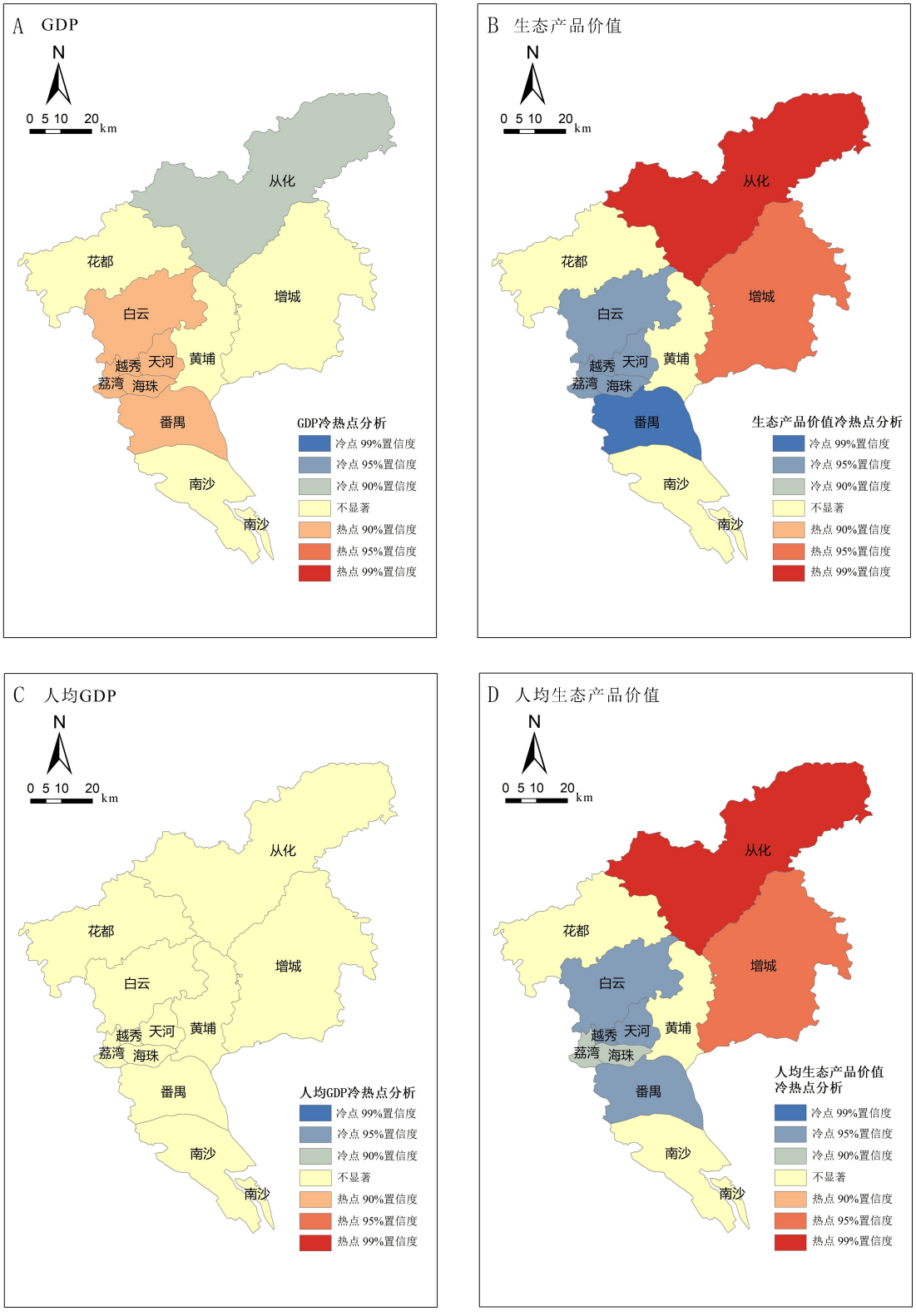


图 2　广州市各区生态产品价值、GDP、人居 GDP 和人均生态产品价值热点分析

著的不匹配，反映出资源分配的不均衡。增城区和从化区的人均生态产品价值相对较高，然而两个区的人均 GDP 却较低，表征其生态产品的价值未能有效转化为经济效益，可能存在着生态经济发展的潜在瓶颈。相较之下，黄埔区和越秀区在人均 GDP 方面表现较为突出，反映出这两个区在经济活动中的强劲实力，但人均生态产品价值较低，这一反差必须引发对城市化进程和生态环境之间平衡的深思，政策制定者在推动经济发展的同时，更要重视生态产品的保护与可再生价值的提升。

森林生态补偿被视为一种行之有效的生态保护经济手段。依据广州市各区生态产品价值量得到不同区域的多功能定量补偿的分配系数，其中从化、增城和花都区的分配系数较高，分别为 44.2%、28.23%和 11.18%，生态补偿总量分别为 6.07、3.88 和 1.53 亿元，生态补偿总量与补偿系数均与生态产品价值量成正比。

4 讨论

通过对广州市森林生态产品价值核算发现，涵养水源、保育土壤、林木养分固持、固碳释氧、净化大气环境、生物多样性保护、森林游憩 7 项生态产品的价值于 2009、2014 和 2019 年分别为 295.92、324.28、370.04 亿元，且稳步提升，年增幅约为 2.5%，其中生态产品的功能量价值量增长趋势比较客观地反映生态系统的生态过程。这是因为近年来广州市狠抓林业生态工程建设质量，落实林地使用定额管理，提升了森林生态系统品质，维持了生态服务功能的可持续性，从而使生态产品价值实现了稳步增长。

本研究发现，广州市具有较高价值量的森林生态产品项为涵养水源、固碳释氧、净化大气环境、保育土壤、生物多样性保护，这与我国森林生态系统服务功能价值评估结果基本一致[18]，突出了城市森林各项服务功能的等级性，说明城市森林生态系统拥有较高的固碳释氧和净化空气服务的生态产品价值。与同区域的惠州市森林生态系统相比，广州市由于林分面积较小，生态产品价值量相对较低，但广州市单位面积价值量（10.2 万元 · hm^{-2}）与全国的平均水平相当（10.5 万元 · hm^{-2}）[18]，高于惠州市（6.95 万元 · hm^{-2}）[19]、低于南京市（300.01 亿元，单位面积价值量为 17.75 万元 · hm^{-2}，2018 年）[20]。这表明广州市森林生态服务及生态产品的综合效益还有提升空间。

目前，国家已出台了《生态产品总值核算规范（试行）》，为生态产品的核算工作提供重要的指导和标准。各地也相继推出了相应的生态产品价值核算规范。本研究依据《森林生态系统服务功能评估规范（GB/T38582-2020）》，获取广州森林生态系统的基础数据和生态参数，通过模型的物质量输出和相关价值法的结合，进行了初步的价值量核算。由于评估过程中数据获取和指标选择的差异，会造成与基于其他核算方法得到的区域生态产品价值的对比存在一定差异，值得深度商酌。在小尺度区域的生态产品价值核算时基础数据和生态参数获取难度较大，需要加大对技术领域的创新和研究。

区域经济与生态产品价值之间存在相互影响和相互制约的耦合协调关系，广州应加强森林生态系统的管理，提升北部山区森林质量，提高涵养水源和水土保持能力，充分发挥其生态屏障作用，为区域经济发展提供发展空间和生态基础，同时要利用生态优势发展特色全域生态旅游的乡村振兴道路[21]。良好的生态环境是最公平的生态产品，是最普惠的民生福祉[22]，广州市应以生态产品价值为基础，推动横向生态补偿由单一生态要素向多生态要素转变，创新生态补偿机制[21-23]，实现生态公平[24-25]，推进生态产品价值实现与区域经济的可持续发展。

本研究仅对广州市森林生态系统所提供生态产品及价值进行核算和分析，还需加强对其他生态系统，如农田、草地、海洋等生态系统的生态产品价值核算，完善广州市域内生态产品价值核算体系，科学有效地挖掘自然要素的生态价值，找准生态产品价值实现的着力点，丰富拓展生态产品价值实现路径。

5 结论

1）广州市森林生态系统生态产品总体呈增长趋势，但空间差异较大。

2）广州市森林生态产品价值空间格局与区域

人口、经济空间格局明显不匹配。人均 GDP 与人均生态产品价值的空间分布呈反比，急需发挥政府的调节作用，通过生态产品价值就地实现和迁地实现路径推动生态产品全民共享，实现生态公平。

3）广州市生态产品价值实现，需要政府对以生态安全为主体功能的从化、增城、花都等区所付出的生态保护投入以及丧失发展机会所导致的经济损失提供经济补偿，建立以生态架构为目标的公共投资以及开发援助，保障生态保护区域与从生态保护中获益的区域之间的公平正义。

参考文献

[1]向雪萍,齐增湘.生态系统调节服务价值实现的景观规划策略:以耒阳市为例[J].中国城市林业,2024,22(1):62-69.

[2]王金南,王夏晖.推动生态产品价值实现是践行“两山”理念的时代任务与优先行动[J].环境保护,2020,48(14):8-13.

[3]王金南,刘桂环.完善生态产品保护补偿机制 促进生态产品价值实现[J].中国经贸导刊,2021(11):44-46.

[4]BATEMAN I J, HARWOOD A R, MACE G M, et al. Bringing ecosystem services into economic decision-making:land use in the United Kingdom[J].Science,2013,341(6141):45-50.

[5]姜雅,黎晓言,张硕辰.国际绿色 GDP 核算现状及启示[J].国土资源情报,2021(2):15-21.

[6]GUERRY A D, POLASKY S, LUBCHENCO J, et al. Natural capital and ecosystem services informing decisions:From promise to practice[J].Proceedings of the National Academy of Science, 2015,112(24):7348-7355.

[7]LEIBENATH M, KURTH M, LINTZ G. Science-policy interfaces related to biodiversity and nature conservation:the case of natural capital Germany—TEEB-DE[J]. Sustainability, 2020, 12(9): 3701.

[8]BÖSCH M, ELSASSER P, FRANZ K, et al. Forest ecosystem services in rural areas of Germany: Insights from the national TEEB study[J].Ecosystem Services,2018,31:77-83.

[9]COSTANZA R.Valuing natural capital and ecosystem services toward the goals of efficiency, fairness, and sustainability[J]. Ecosystem Services,2020,43:101096.

[10]高敏雪.《环境经济核算体系(2012)》发布对实施环境经济核算的意义[J].中国人民大学学报,2015,29(6):47-55.

[11]许超,孟楠,王文静,等.澳门城市绿色基础设施生态系统服务供需匹配[J].中国城市林业,2022,20(1):29-35,95.

[12]黄龙生,王兵,牛香,等.济南市森林生态系统服务功能空间格局研究[J].生态学报,2019,39(17):6477-6486.

[13]黄龙生,王兵,牛香,等.济南市森林生态系统服务功能的维持机制[J].生态学报,2018,38(23):8544-8554.

[14]刘阳,梁淑榆,蔡怡然,等.北京市浅山区森林生态系统服务功能评估[J].中国城市林业,2020,18(2):88-94.

[15]王兵,任晓旭,胡文.中国森林生态系统服务功能及其价值评估[J].林业科学,2011,47(2):145-153.

[16]“中国森林资源核算研究”项目组.生态文明制度构建中的中国森林资源核算研究[M].北京:中国林业出版社,2015.

[17]宋家鹏,陈松林.基于生态系统服务簇的福州市生态系统服务格局[J].应用生态学报,2021,32(3):1045-1053.

[18]杨海江,勾晓华,唐呈瑞,等.2010—2021 年中国森林生态系统服务功能价值评估研究进展[J].生态学杂志,2024,43(1):244-253.

[19]徐云.广东惠州森林生态系统服务功能与价值评估[J].林业资源管理,2023(3):140-145.

[20]左松源,陈国富,左宗贵,等.南京市森林生态系统服务功能与价值评估[J].林业资源管理,2021(6):76-82.

[22]赵士洞,张永民.生态系统与人类福祉:千年生态系统评估的成就、贡献和展望[J].地球科学进展,2006,21(9):895-902.

[21]陈梅,纪荣婷,刘溪,等.“两山”基地生态系统生产总值核算与“两山”转化分析:以浙江省宁海县为例[J].生态学报,2021,41(14):5899-5907.

[23]王兵,牛香,宋庆丰.中国森林生态系统服务评估及其价值化实现路径设计[J].环境保护,2020,48(14):28-36.

[24]高晓龙,林亦晴,徐卫华,等.生态产品价值实现研究进展[J].生态学报,2020,40(1):24-33.

[25]潘勇军,王兵,牛香.让自然资本成为主流,用生态 GDP 核算美丽中国[J].温带林业研究,2018,1(3):10-18.