

粤港澳大湾区生态系统服务价值的时空演化 及其影响机制

刘志涛^{1,3}, 王少剑², 方创琳^{1,3}

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101; 2. 中山大学地理科学与规划学院 广东省城市化与地理环境空间模拟重点实验室, 广州 510275; 3. 中国科学院大学资源与环境学院, 北京 100049)

摘要: 生态系统服务是生态要素、结构、功能和产品造福于人类社会的媒介和通道。根据生态系统服务价值(ESV)及其影响机制调节人类社会对生态系统的利用强度和保护方式,对于实现人地和谐的可持续发展目标具有重要意义。本文以粤港澳大湾区作为研究对象,依托遥感数据修订ESV核算结果,更加准确地揭示2000—2015年粤港澳大湾区ESV的时空演变特征,并引入面板分位数回归深入探索生态系统服务影响因素的分段效应,增加对生态系统服务影响机制的认识。结果显示:① 2000—2015年粤港澳大湾区ESV减速下降,下降区域主要分布在粤港澳大湾区中部和珠江入海口两岸等城市快速扩张区。② 在城市交界处,土地利用变化会带来更为强烈的ESV变化。③ 在ESV水平不同的区域,影响因素具有不同的影响效果。用地完整度仅在ESV的低值区可以促进生态系统服务能力提升。气温对生态系统服务能力的正向作用随ESV的提高而增强,经济密度对生态系统服务能力的负向作用随ESV的提高而减弱,二者均会导致ESV高值区与低值区间的差距增大,形成“自然马太效应”。

关键词: 生态系统服务;时空演变;影响机制;面板分位数回归;粤港澳大湾区

DOI: 10.11821/dlxb202111014

1 引言

生态系统服务(Ecosystem Services)来源于直接或间接促进人类福祉的生态系统结构、功能或过程^[1-2],是人类从生态系统中获得效益的统称^[3]。自1992年联合国环境公署颁布《1972—1992年的世界环境状况报告》,给世界各国敲响环境保护的警钟;到2000年联合国将“确保环境的可持续能力”列为千年发展目标之一,生态保护逐渐成为世界各国的重要发展议题;再到2005年联合国发布千年生态系统评估(The Millennium Ecosystem Assessment)报告,明确生态系统服务评估对于生态保护的重要性——关乎人地共生的生态系统服务研究逐步成为全球学术热点。生态系统服务的空间格局及其演化体现着区域生态系统的外在状况,生态系统服务的影响因素及其作用方式阐释着影响生态系统的内在机理。把握生态系统服务的外在时空演化和内在影响机理,对识别区域生态系统服务问题、维持区域生态平衡、促进区域可持续发展具有重要意义^[4-6]。

收稿日期: 2020-07-29; 修订日期: 2021-04-24

基金项目: 教育部人文社会科学研究规划基金项目(21YJAZH087) [Foundation: Ministry of Education Research in the Humanities and Social Sciences Planning Fund, No.21YJAZH087]

作者简介: 刘志涛(1997-), 男, 黑龙江黑河人, 博士, 中国地理学会会员(S110015667M), 研究方向为城市地理、城镇化及其生态环境效应。E-mail: liuzhitao20@mails.ucas.ac.cn

通讯作者: 王少剑(1986-), 男, 河南驻马店人, 博士, 副教授, 博士生导师, 中国地理学会会员(S110011019M), 研究方向为城市地理、城市与区域规划。E-mail: 1987wangshaojian@163.com

生态系统服务价值 (Ecosystem Service Value, ESV) 是生态系统服务能力的量化估计, 其评估途径主要分为币值化和能值化两类^[7]。其中, 货币形式的生态系统服务价值便于民众理解和决策者使用, 可有效辅助空间规划、生态管制和生态修复^[8-10], 应用最为广泛。生态系统服务价值是描绘生态系统服务时空演变的基础, 其准确核算至关重要。但已有研究多数仅沿用谢高地等提出的“中国陆地生态系统服务价值当量因子表”^[11-12], 认为同种用地具有相同的生态系统服务价值当量^[6, 13-15], 忽视了植被繁茂程度的潜在影响。而植被影响着多种生态过程, 在碳汇、水土保持、水源涵养等生态系统服务中发挥重要作用, 忽视植被生长情况的生态系统服务价值核算将明显失准。因此本文依托遥感图像识别确定区域植被的实际状况, 利用归一化植被指数 (NDVI) 对生态系统服务价值进行现实修订, 进而获得准确度更高且更契合实际情况的生态系统服务价值核算结果。

若刻画区域生态系统服务空间格局是“知其然”, 探索区域生态系统服务影响机理则是“知其所以然”, 更有助于把握生态系统问题的根源, 指导区域生态建设。生态系统服务的影响因素可分为自然因素 (生物、气候、土壤、地形) 和人文因素 (土地利用、社会经济)。在自然因素方面, 生物自身性状^[16]和生物多样性^[17-18]均会影响生态系统服务能力; 气候对生态系统服务的影响存在着直接调节水热条件^[19-20]和通过影响生物行为带来间接作用^[21]双路径; 土壤作为生物成长、寄居的本底生态要素, 其有机碳积累^[22]和水分循环^[23]等理化性质对生态系统服务功能有巨大影响; 地形通过影响地表温度、光照强度、蓄水能力等生态条件, 间接调控土壤保持力、供水能力和作物生产能力等生态系统服务功能^[24-27]。在人文因素方面, 土地利用类型、土地利用总体格局和土地开发强度的变化, 均会影响生态系统服务水平^[28], 在国内研究广泛; 经济、人口等社会经济因素作为生态系统服务的间接影响因素, 通过影响开发、污染等直接影响因素来发挥作用^[3]。生态系统服务的影响机理复杂, 国内的相关研究还不够深入。多数研究采用相关性分析^[29-31]、逐步回归^[32-33]、Logistic 回归^[5]等方法简单识别影响因素的作用, 虽然有部分研究考虑了影响因素间的交互作用^[34]和影响效果的空间分异^[35], 但均未摆脱“自变量与因变量之间的关系是固定的”的潜在认知假设, 忽视了影响因素在生态系统服务水平不同的区域带来影响差异的可能。而分位数回归模型可以在因变量的不同分位点获得对应的回归系数, 是活跃在统计学前沿领域的回归方法^[36]。本文引入该方法, 首次探索在不同生态系统服务价值水平下, 生态系统服务影响因素的效果差异, 进一步完善了对生态系统服务影响机制的认识。

国内的生态系统服务研究可根据研究对象划分为局部地区、城市群和全国 3 个尺度。局部地区尺度的价值评估^[37-41]研究数量最多, 内容多以研究区域生态系统服务价值的时空分布特征为核心, 特异性与应用性强, 规律性与理论性弱。全国尺度的价值评估研究, 主要产生于生态系统服务研究兴起的早期, 具有探索生态系统服务价值空间分布规律、提供对全国生态系统服务状况的认知以及支持国家环保事业发展的特点: 何浩等发现陆地生态系统服务价值与植被的地带性分布梯度基本一致^[42]; 王兵等指出经济林生态系统与水热条件和生物多样性具有趋同的空间分布特征^[43]; 关于全国林地、草地生态系统服务价值评估, 推动了中国可持续经济核算体系的建设与发展^[44-45]。城市群尺度的研究在最近几年刚刚起步, 研究数量较少^[46-47]。总体而言, 战略价值更高的全国和城市群尺度的生态系统服务研究不足。作为中国开放程度最高、经济活力最强、城镇化速度最快的区域之一, 粤港澳大湾区高强度的经济开发和城市扩张破坏了原有生态环境的要素、结构和功能, 为其生态文明建设带来了巨大挑战。同时, 作为中国首个国家正式审批建设的大湾区, 粤港澳大湾区承担着先行实现生态和经济的高水平协调发展, 发挥先锋模范

作用的战略责任。在国家高度重视生态文明建设的背景下，加强粤港澳大湾区的生态系统服务研究，对于解决区域发展问题乃至支持国家宏观发展布局均具有重要战略价值。

因此，本文以粤港澳大湾区为研究对象，引入遥感生态指标NDVI以提高生态系统服务价值评估的精度和准确度，进而描绘出更确切的生态系统服务时空演变特征；同时首次采用面板分位数回归模型，探索生态系统服务影响因素在不同生态系统服务价值水平的效应差异，为生态系统服务影响机制研究开辟新视角，研究结果可为粤港澳大湾区的生态保护和可持续发展提供精细的科学指引。

2 研究区概况与研究方法

2.1 研究区概况

粤港澳大湾区（21°25'N~24°30'N, 111°12'E~115°35'E），与纽约湾区、旧金山湾区、东京湾区并称世界四大湾区，肩负着构建全面开放新格局、推动“一国两制”事业发展、支撑“一带一路”建设的重要战略任务。粤港澳大湾区由广州、深圳、佛山、东莞、惠州、中山、珠海、江门、肇庆9市和香港、澳门两个特别行政区构成（图1），总面积达到5.6万km²。在自然环境方面，粤港澳大湾区内河网密布，水量充沛，以亚热带和热带季风气候为主，水热条件良好；地形西北高，东南低，山地集中在北部，平原地区主要分布于中部和沿海地区。在人文环境方面，截至2019年，粤港澳大湾区人口突破7000万，GDP总量达到11.6万亿元。粤港澳大湾区以5%的全国人口和0.58%的国土面积，创造超过12%的全国GDP，是中国经济活力最强的区域之一。高速的城镇化和经济发展给粤港澳大湾区的生态文明建设带来巨大挑战，如何实现经济和生态的协同发展已成为粤港澳大湾区未来发展的重要议题。

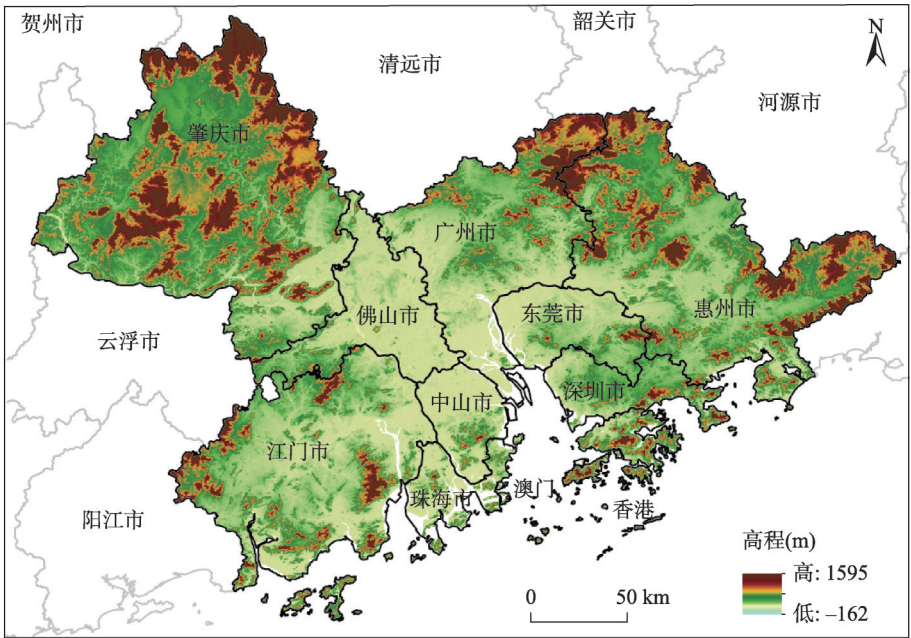


图1 粤港澳大湾区区位图

Fig. 1 Location of the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area (GBA)

2.2 影响因素及数据来源

2.2.1 影响因素选择 综述国内外研究成果发现,生态系统服务的影响因素主要包含地形、气候、土壤、生物、土地利用类型、土地利用格局、土地利用强度和社会经济因素。本文以此为基础,进行影响因素选取。受数据可得性的限制,土壤、生物和土地利用强度因素未纳入本文;地形因素由于仅有2000年数据而无法满足面板数据条件,未纳入本文;气候、社会经济和土地利用格局因素的对应变量被选作面板分位数回归的自变量;土地利用类型是最主要的生态系统服务影响因素之一^[48-49],会直接影响生态系统服务价值变化^[50]和生态系统服务之间的流动与相互作用^[51-52],但其数据形式无法应用于面板分位数回归方法。考虑到土地利用类型因素的重要性,以及土地利用类型易于在人为管控下促进生态系统服务改善的政策性,本文通过弹性系数测度土地利用类型变化对生态系统服务价值的影响,使用全局弹性系数反映土地利用类型对生态系统服务价值影响的时间演变,使用局部弹性系数表征土地利用类型影响生态系统服务价值的空间分异。

2.2.2 面板分位数回归的变量选取

(1) 自变量选取。在气候方面,水热条件是气候状况的重要表征,气温、降水直接影响着生态系统的服务价值,其影响效果有着明显的空间分异^[19-20],气候因素选取年均降水量(PRE)和年均气温(TEM)作为自变量。在社会经济方面,人口密度表示日常生活强度,经济密度表示生产活动强度,生产和生活结合可反映社会经济整体情况,社会经济因素选取人口密度(POP)和经济密度(GDP)作为自变量,上述变量数据来源于中国科学院资源环境科学数据中心(<http://www.resdc.cn>)。在土地利用格局方面,不同的土地利用结构会产生不同的生态过程,从而提供不同水平的生态系统服务^[53]。平均邻近指数反映土地利用斑块的邻近程度和破碎度,与土地利用结构的破碎度成反比^[54],可表征用地结构完整度。土地利用结构因素选取平均邻近指数(MPI)作为自变量,变量数据利用Patch Analyst模块在ArcGIS 10.5中计算获得。为提高空间描绘精度和回归分析准确度,本文将粤港澳大湾区划分为5 km×5 km尺度的格网(2594个)。

(2) 因变量选取。本文以生态系统服务价值(ESV)为研究的因变量。土地利用数据和归一化植被指数(NDVI)数据被应用于核算生态系统服务价值,土地利用数据解译于Landsat TM/ETM和Landsat 8遥感影像,NDVI数据提取于SPOT/VEGETATION和MODIS遥感影像,两类数据均为2000年、2005年、2010年、2015年4期,数据来源于中国科学院资源环境科学数据中心(<http://www.resdc.cn>)。根据研究需求,本文将土地利用数据重分类为森林、草地、农田、建设用地、水域、未利用地6类,结合NDVI数据和粮食价格统计数据在ArcGIS中通过提取、叠置、关联、栅格计算、空间统计等方法获得粤港澳大湾区2000—2015年的生态系统服务价值。

2.3 研究方法

2.3.1 生态系统服务价值核算 谢高地等^[11-12]以Costanza等^[2]的成果为基础,通过对中国多位生态学领域的专家进行问卷调查,构建了中国生态系统服务价值当量因子表。其中,2007年研究成果的调查问卷数量及问卷回收率更高,更具可信度和科学性,本文将其作为全国基础当量因子表。同时,通过调查2015年的《广东省统计年鉴》《中国农产品价格调查年鉴》和广东华南粮食交易中心统计数据,测算粤港澳大湾区粮食单产市场价格(香港澳门几乎无农业用地,忽略不计),按单位面积农田生态系统服务价值等于平均粮食单产市场经济价值的1/7计算^[12],获得适用于粤港澳大湾区的基础当量因子表(表1)。由于在农田、林地和草地等有植被覆盖的用地类型上,植物繁茂程度的差异,会使相同用地类型提供具有明显区别的生态服务水平^[55]。因此,本文利用植被归一化指数

表1 粤港澳大湾区单位面积生态系统服务价值当量表(元 hm⁻² a⁻¹)

Tab. 1 Factor table of ESV per unit area in the GBA

生态系统服务类型	土地利用类型				
	森林	草地	农田	水域	未利用地
供给服务	8875	2118	3727	2360	161
调节服务	38075	15820	10323	97039	1394
支持服务	22872	11020	6677	10296	1528
文化服务	5577	2333	456	11905	644

(NDVI) 反映区域内的植物状态，对研究单元格的生态系统服务价值再次修订，最终获得粤港澳大湾区的生态系统服务价值。具体公式为：

$$ESV = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^o A_{ij} B_{ik} C_{ik}$$
 (1)

$$C_{ik} = \frac{NDVI_{ik}}{\overline{NDVI}_i}$$
 (2)

式中： A_{ij} 表示第*i*种土地利用类型第*j*种生态系统服务的生态系统服务价值系数； B_{ik} 表示第*i*种土地利用类型在第*k*个研究单元的面积； C_{ik} 表示第*i*种土地利用类型在第*k*个研究单元的NDVI修订系数； \overline{NDVI}_i 为第*i*种土地利用类型的均值； $CNDVI_{ik}$ 为第*i*种土地利用类型在第*k*个单元格的NDVI值；*i*、*j*、*k*分别表示土地利用类型、生态系统服务类型、研究单元编号，*m*、*n*、*o*为与之对应的数量，*m* = 5、*n* = 9、*o* = 2594。

2.3.2 生态系统服务价值的土地利用变化响应弹性 弹性是衡量一个变量对另一个变量变化的响应程度的指标。本文利用这种方法来衡量由土地利用/土地覆盖变化（LUCC）引起的生态系统服务价值（ESV）的百分比变化^[56]，公式如下：

$$E = \left| \frac{(ESV_{t_1} - ESV_{t_0}) / ESV_{t_0}}{LUP} \right|, \quad LUP = \frac{\sum_{i=1}^n \Delta L_i}{\sum_{i=1}^n L_i}$$
 (3)

式中：*E*表示ESV响应土地利用变化的弹性指数；*t*₀表示研究初始期，*t*₁表示研究末尾期；*LUP*表示土地利用变化百分比； ΔL_i 表示*i*种土地利用类型的土地利用变化面积，*L_i*表示*i*种土地利用类型的总面积。

2.3.3 面板分位数回归模型 面板数据兼具横截面和时间两个维度，使得面板样本容量大幅增加，可明显提高回归结果的精确度，因此本文基于2000年、2005年、2010年和2015年的4期面板数据，分析粤港澳大湾区生态系统服务价值的影响机理。固定效应模型和随机效应模型是常用的面板回归模型，可以从整体上识别变量之间的关系，在影响因素分析中十分常用。Hausman检验结果显示，固定效应模型更适合于本文，其公式为：

$$y_{kt} = \beta_1 PRE_{kt} + \beta_2 TEM_{kt} + \beta_3 MPI_{kt} + \beta_4 POP_{kt} + \beta_5 GDP_{kt} + \mu_k + e_{kt}$$
 (4)

式中： β 为回归系数；*y_{kt}*为因变量；*PRE_{kt}*、*TEM_{kt}*、*MPI_{kt}*、*POP_{kt}*和*GDP_{kt}*为自变量； μ_k 为个体效应，其值随机但不随时间变化；*e_{kt}*为扰动项。

面板固定效应模型关注影响因素*x*对生态系统服务*y*的条件期望*E* (*y*|*x*) 的影响，但这实际上是一种均值回归，在条件分布*y*|*x*不是对称分布的情况下，回归结果实际上只是反映了影响因素与生态系统服务之间关系的一部分^[36]。但在分位数回归模型中，处于不同分位点的因变量会获得对应的自变量系数估计值，能够考察在不同ESV水平的区域，影响因素与生态系统服务的关系变化。此外，基于全样本数据进行回归的分位数回归模

型能够避免分阶段线性回归的截断问题，并且具有受极端值干扰小，能够获得稳健系数估计的优点^[57]。因此，本文使用面板分位数回归深入探索生态系统服务的影响因素：

$$Q_{y_{it}}(\tau|x_{it})=\beta_1(\tau)PRE_{it}+\beta_2(\tau)TEM_{it}+\beta_3(\tau)MPI_{it}+\beta_4(\tau)POP_{it}+\beta_5(\tau)GDP_{it}+\mu_k(\tau)+e_{it} \tag{5}$$

式中： $Q_{y_{it}}(\tau|x_{it})$ 为因变量的 τ 条件分位数； τ 为分位数， $\tau \in (0, 1)$ ； $\beta(\tau)$ 为在 τ 分位数处的回归系数； $\mu_k(\tau)$ 为在 τ 分位数处的个体效应，其他参数同上。为了更细致的展现生态系统服务价值随影响因素数值变化的动态性，选取0.1~0.9以0.1为增幅的9个分位点作为本文的模型分位数。

3 结果分析

3.1 生态系统服务价值的时空演变

参照表1，结合式(1)~(2)得到粤港澳大湾区生态系统服务价值栅格图像，利用空间统计工具获得粤港澳大湾区生态系统服务价值总量，结果表明：2000—2015年粤港澳大湾区的生态系统服务价值持续下降，由2000年的2959.62亿元下降到2015年的2828.54亿元，共计下降131.08亿元，年均下降8.74亿元。粤港澳大湾区自1978年改革开放以来的快速城镇化，给生态环境带来了巨大的压力^[58]。人口城镇化带来的资源消耗和废物排放^[59]，促使了森林的生物量减少，压迫了湿地等调节系统；空间、经济和社会城镇化诱发的用地变化，显著影响了生态系统的服务能力^[60]，粤港澳大湾区的生态系统服务价值在城镇化的负面影响中下降。2000—2005年间，生态系统服务价值下降2.36%，占总下降量的52.6%。但自2005年起，广东省实行《集体建设土地使用权流转管理办法》，明确限制了政府征用集体建设用于房地产开发的行为，可有效遏制市场导向的城市扩张；同时，集体建设用地的流转可以促使农村居民向小城镇集中，为旧村复耕提供了条件^[61]。2010年，广东省政府与国家环境保护部正式签署了《共同推进和落实〈珠江三角洲地区改革发展规划纲要（2008—2020年）〉合作协议》，全力推动广东产业升级和环保基础设施建设，并采取了在珠三角区域内不再规划新建燃煤燃油电厂、禁止建设陶瓷厂水泥厂等高污染工厂等一系列措施，有效遏制了珠三角地区的生态环境恶化。因此，2005—2010年和2010—2015年间，粤港澳大湾区的生态系统服务价值下降速度减慢且趋于稳定，分别仅下降1.05%和1.08%。4类一级生态系统服务（供给服务、调节服务、支持服务和文化服务）均具有类似的变化趋势（图2），可见粤港澳大湾区近些年的生态保护措施初见成效，人地关系正逐步改善。

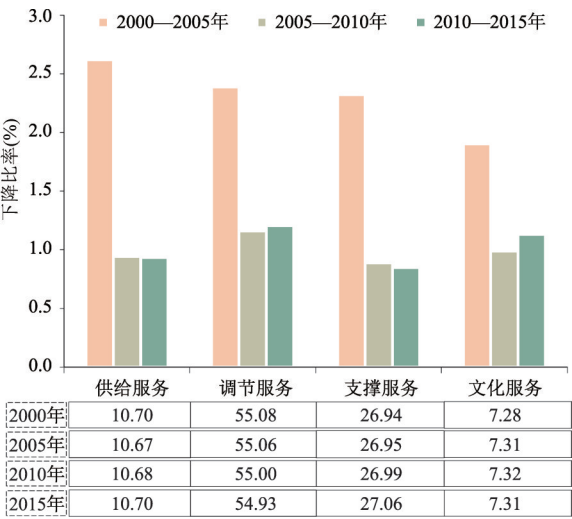


图2 2000—2015年粤港澳大湾区生态系统子服务价值结构及下降比率(%)

Fig. 2 Structure and decline rate of ecosystem sub-service value in the GBA from 2000 to 2015 (%)

在粤港澳大湾区的生态系统服务价值结构方面,4类一级生态系统服务的相对比例并没有明显变化,生态系统服务价值结构较为稳定;其中,调节服务价值占比最高,达到55%左右,可见湾区生态系统主要发挥消解人类污染与保障生态系统稳定的作用。对粤港澳大湾区的各二级生态系统服务(食物生产、原材料生产、气体调节、气候调节、水文调节、废物处理、土壤保持、生物多样性、美学景观)进行核算,结果显示湾区的主导生态系统服务类型为水文调节服务,其2000—2015年的生态系统服务价值分别为552.11亿元、539.43亿元、531.99亿元、524.81亿元,均处于当年首位,且下降量逐年递减。粤港澳大湾区林木茂盛的植被特性以及珠江的自我调节能力已为水文调节服务提供了有力支撑,同时结合“南粤水更清行动计划”等一系列人为治水措施,湾区的水环境有望进一步改善。而粤港澳大湾区的食物生产服务价值最低,年均不足70亿元,这与湾区着重发展制造业与服务业的产业特性密切相关。

对生态系统服务价值的变化进行空间定位(图3),发现不同时期生态系统服务价值的变化存在明显的空间分异。2000—2005年间,粤港澳大湾区45.77%的空间生态系统服务价值下降,主要分布在粤港澳大湾区中部、珠江入海口两岸、肇庆中部和惠州北部,基本与城市建设用地扩张空间重合。2005—2010年间,粤港澳大湾区生态系统服务价值降低的空间占比缩小为42.07%;下降空间由粤港澳大湾区中部向外围转移,分布在肇庆西北部、江门和惠州大部分地区;而广州、东莞、深圳、珠海和中山等区域的生态系统服务价值则有所提高。城市发展阶段的差异是这种转变的重要原因,2005—2010年粤港澳大湾区中部和珠江入海口两岸的大部分空间已转化为城市建设用地,城市进入建设用地“存量挖掘”阶段,注重对已有建设用地利用效率的提高,对生态用地的占用减少;而粤港澳大湾区外围城市仍处于“增量发展”阶段,城市建设用地新增速率较快。此外,广东省2008年开始实行的“双转移”战略推动了劳动密集型产业向粤港澳大湾区外围三市、粤东西两翼和粤北山区转移,粤港澳大湾区中部和珠江入海口两岸的环境污染压力也在此过程中转向外围。2010—2015年间,粤港澳大湾区生态系统服务价值降低的空间占比进一步缩小为38.25%;下降空间分布零散,仅在肇庆南部小规模集聚。从整体来看,2000—2015年间,除江门、香港、澳门、惠州中部和广州北部以外,粤港澳大湾区的生态系统服务价值均大面积降低;其中,大幅度下降区域(降幅超过100万元)主要集中在粤港澳大湾区中部和珠江入海口东岸,以东莞和深圳的生态系统服务价值下降最为严重。

本文进一步通过热点分析,揭示2000—2015年粤港澳大湾区生态系统服务价值的空间集聚特征及其演变规律(图4)。粤港澳大湾区一半地区的ESV空间集聚特征不显著,显著区域以高ESV的空间集聚为主。ESV的高值区集中分布在粤港澳大湾区的东北部和西北部的山地区域,ESV的低值区则集中分布在中部、珠江入海口两岸和滨海区域。2000—2015年间,ESV的高值集聚区没有明显变化,而低值集聚区在2000—2005年发生了明显扩张,扩张区域主要分布在东莞和深圳,在2005—2015年则表现出连片的趋势。总体而言,粤港澳大湾区内部的生态系统服务出现明显的分区差异,中部和沿海区域连片成为城镇化建设的“前沿阵地”,北部山地成为提供生态系统服务支撑的“后勤区域”。

3.2 生态系统服务价值对土地利用变化的响应

土地利用类型变化对生态系统服务有显著的影响^[62-64],本文利用空间分析方法,引入弹性指数反映生态系统服务价值对土地利用变化的响应。2000—2015年间,粤港澳大湾区土地利用类型变化面积达到5440.02 km²,主要集中在东莞、广州、佛山、中山、深圳和珠海,其中2000—2005年间土地利用变化的面积最大,达到3585 km²(图5)。

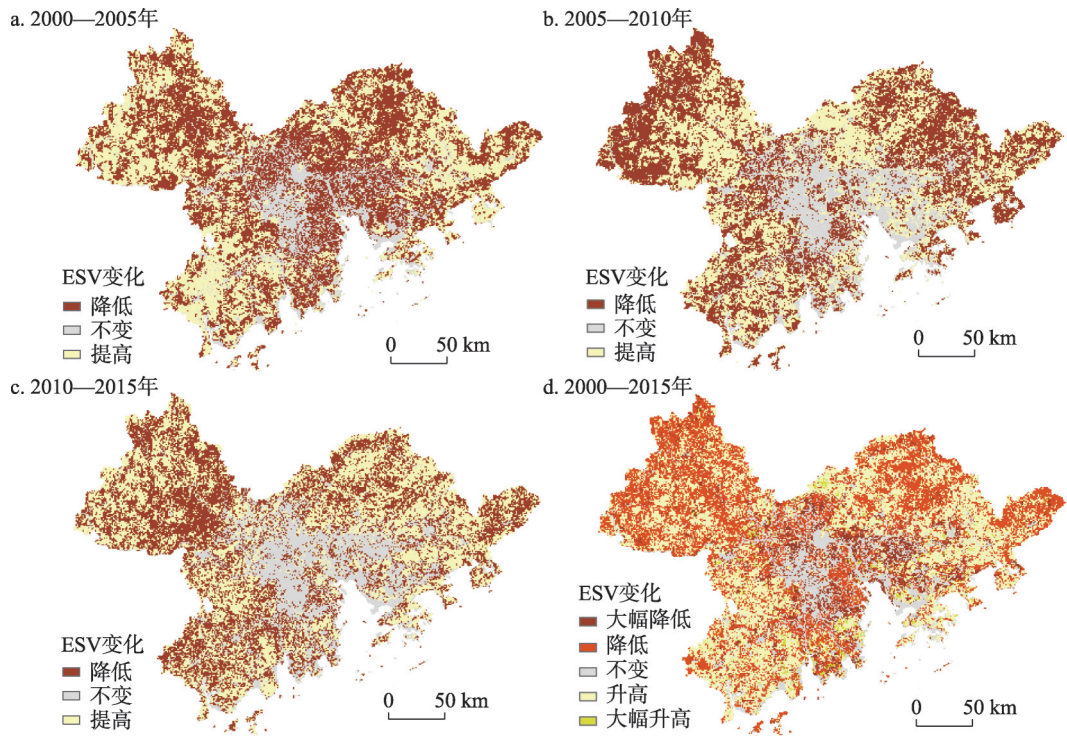


图3 2000—2015年粤港澳大湾区生态系统服务价值变化的空间分布
Fig. 3 Spatial distribution of ESV variation in the GBA from 2000 to 2015

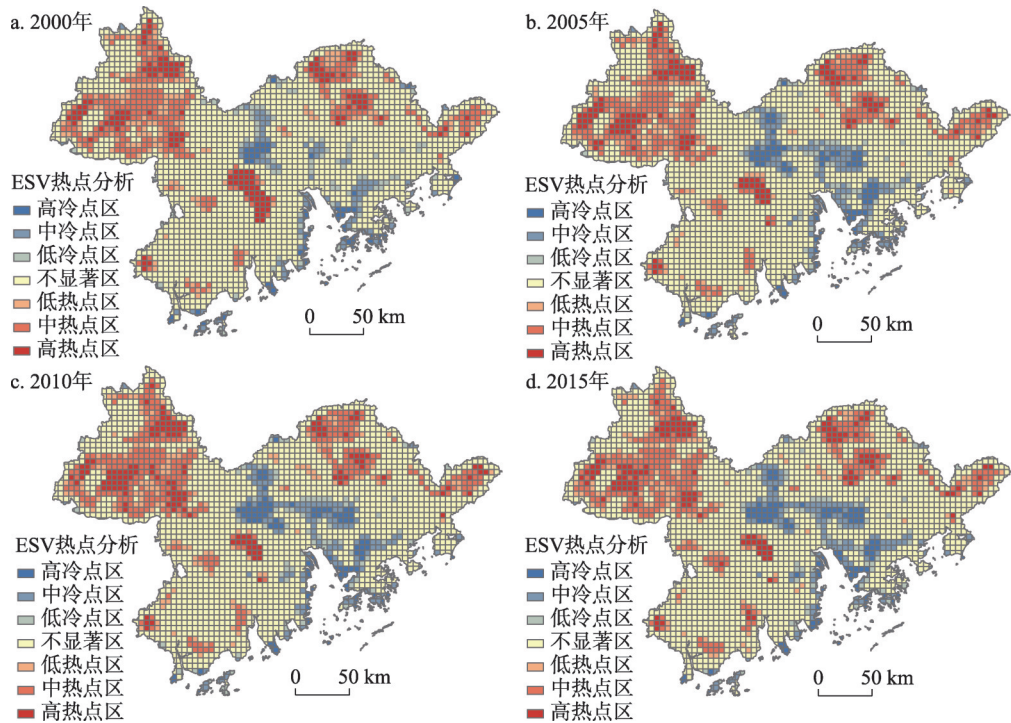


图4 2000—2015年粤港澳大湾区生态系统服务价值空间集聚特征
Fig. 4 Spatial agglomeration characteristics of ESV in the GBA from 2000 to 2015

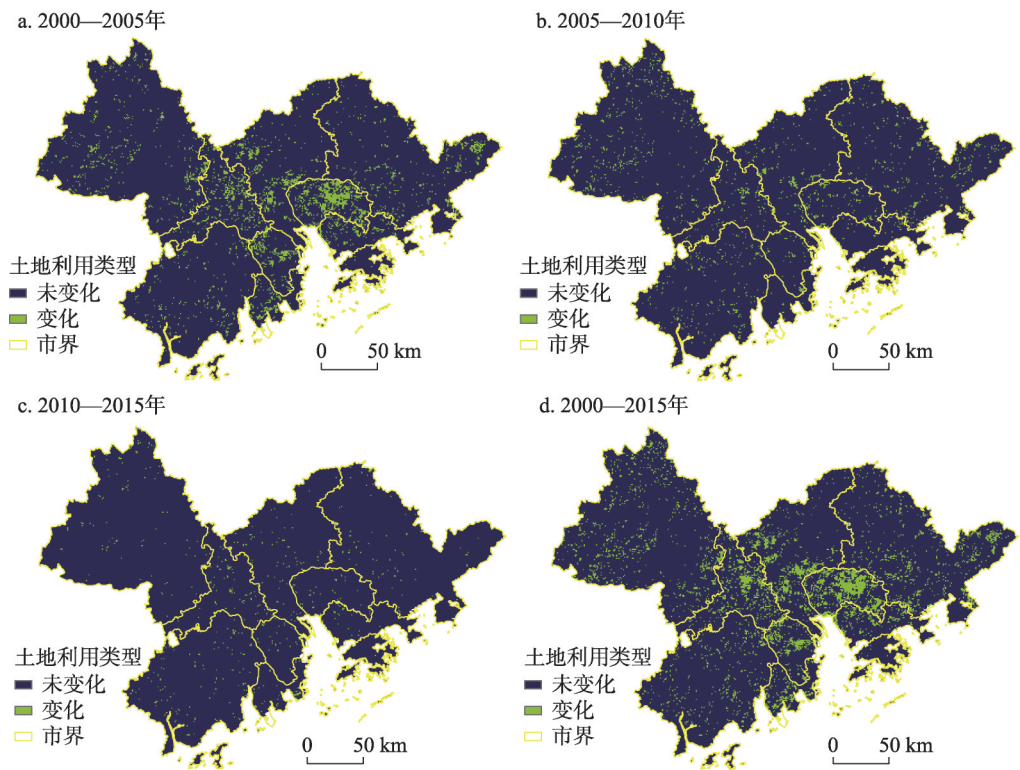


图5 2000—2015年粤港澳大湾区土地利用变化
Fig. 5 Land use change in the GBA from 2000 to 2015

粤港澳大湾区生态系统服务价值变化相对于2000—2005年和2005—2010年土地利用变化的平均弹性分别为0.38和0.31，但在2010—2015年间跃升至1.08。这表明在2000—2010年间土地利用变化对生态系统服务的干扰能力较弱，而在2010—2015年间这种干扰能力大幅增强。2000—2010年间土地利用类型变化范围大但平均弹性指数反而较低，是由于此时的土地利用变化种类繁多，既有林地、耕地向建设用地的转化，也有林地、水域向耕地的转化，单位面积土地利用变化带来的生态系统服务价值降低较少；2010—2015年间土地利用类型变化的面积较小，但主要是生态用地向城镇建设用地的转化，发生转化的区域的生态系统服务能力完全消失，生态系统服务价值变化幅度大，表现为平均弹性指数较高。由此，粤港澳大湾区在未来进行生态文明建设时，加强对城镇建设用地扩张的科学管理将成为重中之重。

对2000—2015年弹性指数进行精确的空间统计（图6），结果显示，粤港澳大湾区中部的弹性指数较高；高弹性指数网格在城市交界处集聚，这种现象在广州—佛山交界处和深圳—东莞交界处尤为明显，肇庆、惠州、江门与其他相对发达城市的交界处也表现出高弹性指数集聚的特征。自2009年广佛肇、深莞惠、珠中江三大经济圈战略构想提出，粤港澳大湾区的一体化水平不断提高，城市交界处的开发建设和人类活动带来了显著的生态系统服务功能衰退。随着粤港澳大湾区内部联系的不断加强，城市交界处作为城市互动的最直接区域，未来同样面临着生态用地被占用、生态系统服务功能衰退的风险。如何通过土地转置、创新土地开发模式等方法实现粤港澳大湾区生态保护和经济发展的双赢，是未来粤港澳大湾区土地利用管理的重要思考方向。

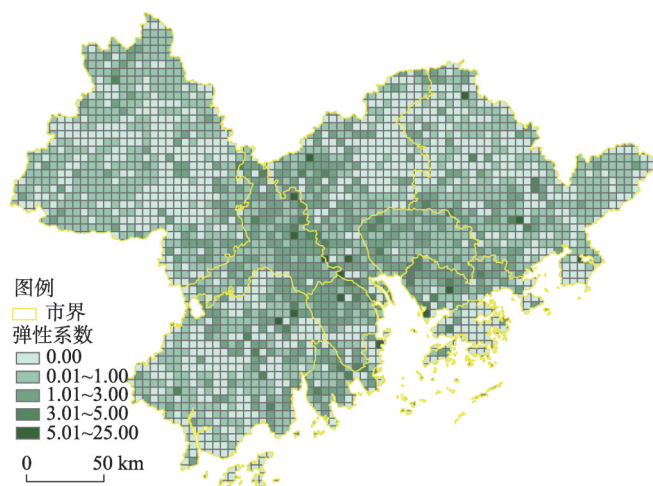


图6 2000—2015年粤港澳大湾区弹性系数空间分布

Fig. 6 Distribution of elastic index in the GBA from 2000 to 2015

3.3 生态系统服务影响因素的分段效应

分析生态系统服务影响因素的分段效应,有助于深入了解影响因素对生态系统服务的作用机理。根据豪斯曼检验结果,本文选择面板固定效应模型来分析生态系统服务的综合影响因素。面板固定效应回归属于线性回归,对因变量有严格的正态分布假设。本文的因变量数据表现出低峰度、左偏态的分布特征,拒绝正态分布假设,因此使用Bloom算法对因变量正态化处理。而分位数回归并不强烈要求必须满足误差项的假设条件,可以对非正态分布的变量进行稳健估计^[57],故在分位数回归中仍使用原始数据。此外,异方差的存在会降低面板固定效应回归的效率,本文使用稳健性标准误解决异方差问题^[36]。为精确识别影响因素的分段效应,本文分9个分位进行面板分位数回归(表2)。

面板固定效应回归结果表明,仅年均气温(TEM)和经济密度(GDP)对粤港澳大湾区的生态系统服务价值有显著影响。年均气温(TEM)的回归系数为正,表明高温提供的热量条件对于提升生态环境质量、增强生态系统服务能力有明显的贡献。经济密度(GDP)的回归系数为负,表明人类的经济活动对生态环境有着显著的胁迫作用,高强度的经济开发会大幅度降低生态系统服务价值。

面板分位数回归结果则更详细地揭示了各变量的回归系数值及显著性随分位数变动而发生的变化,可以帮助理解面板固定效应回归中部分变量不显著的原因以及显著变量的分段效应。观察年均降水(PRE)、人口密度(POP)和平均邻近指数(MPI)的分位数回归结果发现,3个自变量的回归系数均发生了正负转变,此种作用效果的前后矛盾是其面板固定效应回归结果不显著的重要原因。0.1~0.5分位回归的结果显示,平均邻近指数(MPI)的回归系数在5%的水平上显著为正,即在生态系统服务价值低的区域,用地越完整生态系统服务价值越高。可见在人类活动频繁的城市建成区,保证用地完整连片对于提高生态系统服务价值有积极作用。

年均气温(TEM)的分位数回归结果显示,0.1~0.9分位的回归系数均显著为正且逐渐增大,即生态系统服务价值越高的区域,年均气温对于生态系统服务能力提高的贡献越大。植物作为生态系统的关键要素,参与生态系统的原料生产、气候调节、水文调节、土壤保持等各项服务,其生长状况对于生态系统服务功能起着决定性作用,生态系统服务价值也可以侧面反映植物的繁茂程度。生态系统服务价值高的区域植物更加繁

表2 2000—2015年粤港澳大湾区生态系统服务价值影响因素的面板回归结果
Tab. 2 Panel regression results of factors influencing ESV in the GBA from 2000 to 2015

回归类型	变量回归系数及标准误				
	PRE	TEM	POP	GDP	MPI
固定效应回归	-1.47E-06 (1.59E-06)	1.69E-03*** (5.11E-04)	2.48E-06 (2.58E-06)	-2.92E-06*** (1.11E-06)	1.49E-02 (1.74E-02)
0.1分位回归	-121.24 (98.43)	84723.41** (33532.16)	-431.80 (472.47)	-145.72** (60.14)	1897395.00** (859333.60)
0.2分位回归	-87.22 (79.58)	87474.14*** (27111.55)	-252.42 (382.00)	-144.63*** (48.63)	1612107.00** (694778.80)
0.3分位回归	-63.99 (68.81)	89352.91*** (23441.90)	-129.90 (330.35)	-143.88*** (42.04)	1417254.00** (600800.40)
0.4分位回归	-40.98 (60.89)	91213.39*** (20740.32)	-8.58 (292.48)	-143.14*** (37.20)	1224297.00** (531790.40)
0.5分位回归	-10.60 (56.55)	93670.10*** (19251.33)	151.63 (271.84)	-142.16*** (34.52)	969503.20** (494041.20)
0.6分位回归	25.10 (61.81)	96557.23*** (21051.82)	339.91 (297.04)	-141.00*** (37.75)	670069.60 (539974.70)
0.7分位回归	56.87 (74.11)	99126.38*** (25245.84)	507.45 (355.97)	-139.98*** (45.28)	403615.10 (647257.80)
0.8分位回归	91.41 (92.21)	101919.10*** (31414.65)	689.57 (442.78)	-138.87** (56.34)	113968.60 (805223.40)
0.9分位回归	134.27 (118.18)	105384.80*** (40262.84)	915.57 (567.26)	-137.48* (72.21)	-245464.60 (1031756.00)

注：括号内为稳健性标准误，*表示 $p < 0.1$ 、**表示 $p < 0.05$ 、***表示 $p < 0.01$ 。

茂，对高温提供的热量利用更加充分，因此气温对生态系统服务能力提升的正向作用在ESV的高值区更加显著。上述结果表明，如气温等自然条件对生态系统服务的影响具有“自然马太效应”，生态系统服务价值高的区域利用水热条件的能力强，进一步提升生态系统服务能力，而生态系统服务价值低的区域利用水热条件的能力弱，生态系统服务能力提升的速度慢，二者的差距会进一步拉大。

观察经济密度（GDP）的分位数回归系数变化发现，0.1~0.9分位的回归系数均显著为负且逐渐增大，负向作用逐渐减小，即生态系统服务价值越高的区域，经济活动对于生态系统服务的压迫越小。本文认为之所以呈现出这种规律，是因为ESV的高值区往往是未被开发的原始生态环境，发生在其内部的经济活动少、强度低，经济活动的负面影响较弱；而ESV的低值区往往是开发强度较大、经济水平较高的区域，经济活动对生态系统服务的负面影响显著。由此可知，远离人类社会的原始生态环境虽有最强的生态系统服务能力，最值得保护的价值，但其经济开发条件差的现状同样为其增加了先天的保护，而临近人类社会的城郊生态系统已经具有一定的经济开发基础，最容易遭受经济活动的胁迫。粤港澳大湾区未来在进行生态管控时，应着重保护已被部分开发的生态环境免遭进一步的破坏。

生态系统服务影响因素的分段效应让我们对生态系统服务价值演化的影响机制产生如图7所示的新认识：自我强化——ESV的高值区具有更茂盛的植被、更丰富的物种和更高效的生态循环，对自然能源的利用能力强，其ESV的自然积累速度相较于ESV低值区更快；自我保护——ESV高值区在空间上往往位于远离城市的地区，会受到地形、交通距离和开发基础条件的保护而难以被破坏，而ESV低值区所处的环境往往更临近人类活动区，面对更大的人为开发压力。综合而言，ESV高值区在自我强化能力和自我保护能力方面均明显强于ESV低值区，区域间的ESV差距会在这种反馈机制中不断扩大。

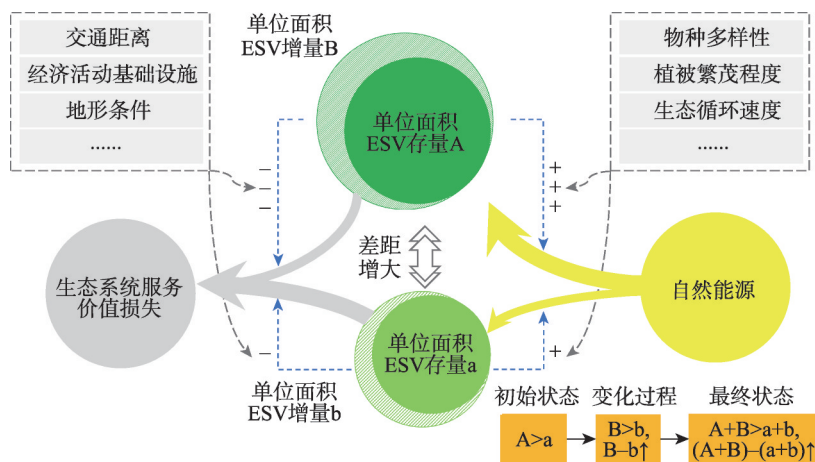


图7 生态系统服务价值演化的自我强化与自我保护机制

Fig. 7 Self-reinforcement and self-protection mechanism of ecosystem service value evolution

4 结论与讨论

4.1 结论

基于2000—2015年多种遥感数据和格网数据,结合统计分析、空间分析和面板分位数回归模型,本文揭示了粤港澳大湾区生态系统服务价值的数值变化和空间分布特征,并深入探究了生态系统服务价值对土地利用类型变化的响应,以及在生态系统服务价值水平不同的区域,影响因素发挥作用的差异,得到如下结论:

(1) 2000—2015年间,粤港澳大湾区的生态系统服务总价值持续下降,总计达131.08亿元。但自2005年起下降速度大幅减缓,表征着粤港澳大湾区在向人地和谐的高水平发展阶段迈进。4类一级生态系统服务价值具有与总价值类似的变化趋势,其中调节服务价值占比最高,从属于调节服务的水文调节服务是粤港澳大湾区的主导服务类型。进一步分析生态系统服务价值变化的空间分布发现,粤港澳大湾区中部和珠江入海口两岸的生态条件近些年有所恢复,但综合2010—2015年的变化而言,该人类活动集中区仍是生态系统服务下降幅度最大的区域。此外,生态系统服务价值的热点分析表明,生态系统服务价值的高值区集中分布在粤港澳大湾区北部的山地区域,低值区则在中部、珠江入海口两岸和滨海区域集聚。

(2) 土地利用类型变化对粤港澳大湾区生态系统服务价值的影响在2000—2010年较弱,但在2010—2015年强烈。2010—2015年间,粤港澳大湾区土地利用类型变化较少,但生态用地转化为城镇建设用地的比例更高,带来了强烈的生态系统服务价值变化。对2000—2015年弹性系数进行空间统计发现,影响强度大的网格在城市交界处集聚,可见城市交界处的城市互动和开发行为,给推行一体化、网络化的粤港澳大湾区带来生态管控方面的挑战。

(3) 用地完整度仅在生态系统服务价值的低值区与生态系统服务价值正相关,在城市建成区等生态系统服务价值低值区,更应保证用地完整性。气温对生态系统服务价值的正向作用在生态系统服务价值越高的区域越强;经济密度对生态系统服务价值的负向作用在生态系统服务价值越高的区域越弱。生态系统服务价值高的区域自我强化能力强,且受人类活动的胁迫弱,而生态系统服务价值低的区域刚好相反。若无外界干预,

此类机制会不断扩大生态系统服务价值高值区和低值区的差距,形成生态系统的“马太效应”。生态系统服务价值低的区域缺少自然提升的条件且更易受到人类开发破坏,更应成为粤港澳大湾区生态保护的重点。

4.2 讨论

生态系统服务作为自然环境和人类福祉之间耦合交互的桥梁与纽带,其相关研究已经成为人地关系研究领域的重要议题^[65]。生态系统服务价值核算将生态学问题转化为公众领域易于解读的指标形式,帮助发现问题;生态系统服务影响机制探究将生态问题的产生机理阐释清楚,帮助解决问题,二者结合可在区域生态系统管理和生态决策优化的过程中发挥巨大作用。生态系统服务价值评估需保证现适性和准确性,随着人与自然环境的关系不断演进,当量因子表需适应时代动态更新;考虑生态系统服务价值研究的地方性,更多具有时效性和地方性的生态指标和高精度遥感数据应纳入评估体系;生态系统服务评价模型可充分考虑生态过程,将成为价值评估的未来方向。深入且空间指向性明确的生态系统服务影响机制分析,具备更高的理论意义和现实价值。面板分位数回归可按分位点将因变量划分,获得不同ESV水平下的影响效应,进而深入理解影响机理,同时结合ESV的空间布局将影响效应在空间上定位,提供明确的政策指引。但受模型特点限制,地形等非时变性因素无法纳入研究,存在影响机理分析不全面的问题,未来可结合其他研究方法探索完整的影响机理。

本文以具有重要战略意义的粤港澳大湾区为研究对象,通过对生态系统服务价值的时空分布特征、生态系统服务价值对土地利用变化的响应和生态系统服务影响因素的分段效应3个方面分析,获得如下政策启示:①城市交界处的ESV最易受用地类型变化影响,随着粤港澳大湾区一体化和网络化进程的加快,严格管控城市交界区域的建成区扩张,同时完善城市内部的生态用地占补机制,实现有占必补以保证生态用地总量将是维护生态系统服务能力的重要应对手段;②人类聚集区的用地完整有助于提高生态系统服务价值。对于粤港澳大湾区的城市,在进行建设用地扩张时以连续扩张为主,减少城市飞地带来的生态用地破碎,同时充分利用建设用地间夹杂的未利用地,做好存量挖掘;对于粤港澳大湾区的乡村,通过合村并居适当减少乡村聚落的空间破碎度,既节约土地资源,又可以减少乡村聚落的水、电、路网对自然生态系统的割裂,还能提高行政资源和公共资源的社会服务效率^[66]。③优先保护生态系统服务价值较低的生态环境,依托遥感技术和责任制打破生态系统服务“马太效应”,保证粤港澳大湾区全域的生态系统服务能力均衡发展。

参考文献(References)

- [1] Costanza R, de Groot R, Sutton P, et al. Changes in the global value of ecosystem services. *Global Environmental Change*, 2014, 26: 152-158.
- [2] Costanza R, d'Arge R, de Groot R, et al. The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature*, 1997, 387(6630): 253-260.
- [3] Millennium Ecosystem Assessment. *Ecosystems and Human Well-Being: Synthesis*. Washington, DC: Island Press, 2005.
- [4] Guan Qingchun, Hao Jinmin, Shi Xuejie, et al. Study on the changes of ecological land and ecosystem service value in China. *Journal of Natural Resources*, 2018, 33(2): 195-207. [管青春, 郝晋珉, 石雪洁, 等. 中国生态用地及生态系统服务价值变化研究. *自然资源学报*, 2018, 33(2): 195-207.]
- [5] Qu Lulu, Liu Yansui, Zhou Yang, et al. Spatio-temporal evolution of ecologically-sustainable land use in the Luoxiao mountains and responses of its ecosystem services: A case study of Jinggangshan City in Jiangxi Province. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(10): 3468-3481. [璩路路, 刘彦随, 周扬, 等. 罗霄山区生态用地时空演变及其生态系统服务功能的响应: 以井冈山为例. *生态学报*, 2019, 39(10): 3468-3481.]
- [6] Huang Muiyi, Fang Bin, Yue Wenzhe, et al. Spatial differentiation of ecosystem service values and its geographical

- detection in Chaohu Basin during 1995-2017. *Geographical Research*, 2019, 38(11): 2790-2803. [黄木易, 方斌, 岳文泽, 等. 近 20a 来巢湖流域生态服务价值空间分异机制的地理探测. *地理研究*, 2019, 38(11): 2790-2803.]
- [7] Li Shuangcheng. Reflections on ecosystem service research. *Landscape Architecture Frontiers*, 2019, 7(1): 82-87. [李双成. 生态系统服务研究思辨. *景观设计学*, 2019, 7(1): 82-87.]
- [8] Crossman N D, Bryan B A. Identifying cost-effective hotspots for restoring natural capital and enhancing landscape multi-functionality. *Ecological Economics*, 2009, 68: 654-668.
- [9] Crossman N D, Bryan B A, Summers D M. Carbon payments and low-cost conservation. *Conservation Biology*, 2011, 25: 835-845.
- [10] de Groot R, Brander L, van der Ploeg S, et al. Global estimates of the value of ecosystems and their services in monetary units. *Ecosystem Services*, 2012, 1(1): 50-61.
- [11] Xie Gaodi, Zhen Lin, Lu Chunxia, et al. Expert knowledge based valuation method of ecosystem services in China. *Journal of Natural Resources*, 2008, 23(5): 911-919. [谢高地, 甄霖, 鲁春霞, 等. 一个基于专家知识的生态系统服务价值化方法. *自然资源学报*, 2008, 23(5): 911-919.]
- [12] Xie Gaodi, Lu Chunxia, Leng Yunfa, et al. Ecological assets valuation of the Tibetan Plateau. *Journal of Natural Resources*, 2003, 18(2): 189-196. [谢高地, 鲁春霞, 冷允法, 等. 青藏高原生态资产的价值评估. *自然资源学报*, 2003, 18(2): 189-196.]
- [13] Huang Muiyi, Yue Wenze, Fang Bin, et al. Scale response characteristics and geographic exploration mechanism of spatial differentiation of ecosystem service values in Dabie Mountain area, central China from 1970 to 2015. *Acta Geographica Sinica*, 2019, 74(9): 1904-1920. [黄木易, 岳文泽, 方斌, 等. 1970—2015 年大别山区生态服务价值尺度响应特征及地理探测机制. *地理学报*, 2019, 74(9): 1904-1920.]
- [14] Chen Duanlv, Chen Zhefu, Peng Baofa. Spatial differentiation and coupling effect between land ecosystem services value and economic development: A case study of West Dongting Lake area. *Geographical Research*, 2018, 37(9): 1692-1703. [陈端吕, 陈哲夫, 彭保发. 土地利用生态服务价值与经济发展的协调及空间分异: 以西洞庭湖区为例. *地理研究*, 2018, 37(9): 1692-1703.]
- [15] Liu Guilin, Zhang Luocheng, Zhang Qian. Spatial and temporal dynamics of land use and its influence on ecosystem service value in Yangtze River Delta. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34(12): 3311-3319. [刘桂林, 张落成, 张倩. 长三角地区土地利用时空变化对生态系统服务价值的影响. *生态学报*, 2014, 34(12): 3311-3319.]
- [16] Bello F, Lavorel S, Díaz S, et al. Towards an assessment of multiple ecosystem processes and services via functional traits. *Biodiversity and Conservation*, 2010, 19(10): 2873-2893.
- [17] Gamfeldt L, Snäll T, Bagchi R, et al. Higher levels of multiple ecosystem services are found in forests with more tree species. *Nature Communications*, 2013, 4: 1340. DOI: 10.1038/ncomms2328.
- [18] Engelhardt K A M, Ritchie M E. Effects of macrophyte species richness on wetland ecosystem functioning and services. *Nature*, 2001, 411(6838): 687-689.
- [19] Braun D, Jong R D, Schaepman M E, et al. Ecosystem service change caused by climatological and non-climatological drivers: A Swiss case study. *Ecological Applications*, 2019, 29(4): e1901. DOI: 10.1002/eap.1901.
- [20] Wang H, Zhou S L, Li X B, et al. The influence of climate change and human activities on ecosystem service value. *Ecological Engineering*, 2016, 87: 224-239.
- [21] Prather C M, Pelini S L, Laws A, et al. Invertebrates, ecosystem services and climate change. *Biological Reviews*, 2013, 88(2): 327-348.
- [22] Milne E, Banwart S A, Noellemeyer E, et al. Soil carbon, multiple benefits. *Environmental Development*, 2015, 13: 33-38.
- [23] Wang Y Q, Shao M A, Liu Z P. Vertical distribution and influencing factors of soil water content within 21-m profile on the Chinese Loess Plateau. *Geoderma*, 2013, 193-194: 300-310.
- [24] Zhu M, He W, Zhang Q, et al. Spatial and temporal characteristics of soil conservation service in the area of the upper and middle of the Yellow River, China. *Heliyon*, 2019, 5(12): e2985. DOI: 10.1016/j.heliyon.2019.e02985.
- [25] Shoko C, Mutanga O, Dube T. Remotely sensed C3 and C4 grass species aboveground biomass variability in response to seasonal climate and topography. *African Journal of Ecology*, 2019, 57(4): 477-489.
- [26] Han H Q, Dong Y X. Assessing and mapping of multiple ecosystem services in Guizhou Province, China. *Tropical Ecology*, 2017, 58(2): 331-346.
- [27] Muñoz J D, Steibel J P, Snapp S, et al. Cover crop effect on corn growth and yield as influenced by topography. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2014, 189: 229-239.
- [28] Fu Bojie, Zhang Liwei. Land-use change and ecosystem services: Concepts, methods and progress. *Progress in Geography*, 2014, 33(4): 441-446. [傅伯杰, 张立伟. 土地利用变化与生态系统服务: 概念、方法与进展. *地理科学进*

- 展, 2014, 33(4): 441-446.]
- [29] Wang Yahui, Dai Erfu, Ma Liang, et al. Spatiotemporal and influencing factors analysis of water yield in the Hengduan Mountain region. *Journal of Natural Resources*, 2020, 35(2): 371-386. [王亚慧, 戴尔阜, 马良, 等. 横断山区产水量时空分布格局及影响因素研究. *自然资源学报*, 2020, 35(2): 371-386.]
- [30] Zhao Zhigang, Yu De, Han Chengyun, et al. Ecosystem services value prediction and driving forces in the Poyang Lake Eco-economic Zone. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37(24): 8411-8421. [赵志刚, 余德, 韩成云, 等. 鄱阳湖生态经济区生态系统服务价值预测与驱动力. *生态学报*, 2017, 37(24): 8411-8421.]
- [31] Gong Shihan, Xiao Yang, Zheng Hua, et al. Spatial patterns of ecosystem water conservation in China and its impact factors analysis. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37(7): 2455-2462. [龚诗涵, 肖洋, 郑华, 等. 中国生态系统水源涵养空间特征及其影响因素. *生态学报*, 2017, 37(7): 2455-2462.]
- [32] Sun Binfeng, Zhao Hong, Lu Fei, et al. Spatial and temporal patterns of carbon sequestration in the Northeastern Forest Regions and its impact factors analysis. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(14): 4975-4983. [孙滨峰, 赵红, 逯非, 等. 东北森林带森林生态系统固碳服务空间特征及其影响因素. *生态学报*, 2018, 38(14): 4975-4983.]
- [33] Chen Shanshan, Liu Kang, Bao Yubin, et al. Spatial pattern and influencing factors of water conservation service function in Shangluo City. *Scientia Geographica Sinica*, 2016, 36(10): 1546-1554. [陈姗姗, 刘康, 包玉斌, 等. 商洛市水源涵养服务功能空间格局与影响因素. *地理科学*, 2016, 36(10): 1546-1554.]
- [34] Dai Erfu, Wang Yahui. Spatial heterogeneity and driving mechanisms of water yield service in the Hengduan Mountain region. *Acta Geographica Sinica*, 2020, 75(3): 607-619. [戴尔阜, 王亚慧. 横断山区产水服务空间异质性及归因分析. *地理学报*, 2020, 75(3): 607-619.]
- [35] Hou Wenjuan, Gao Jiangbo, Dai Erfu, et al. The runoff generation simulation and its spatial variation analysis in Sanchahe basin as the south source of Wujiang. *Acta Geographica Sinica*, 2018, 73(7): 1268-1282. [侯文娟, 高江波, 戴尔阜, 等. 基于SWAT模型模拟乌江三岔河生态系统产流服务及其空间变异. *地理学报*, 2018, 73(7): 1268-1282.]
- [36] Chen Qiang. *Advanced Econometrics and Stata Application*. Beijing: Higher Education Press, 2014. [陈强. *高级计量经济学及Stata应用*. 北京: 高等教育出版社, 2014.]
- [37] You Huiming, Han Jianliang, Pan Dezhao, et al. Dynamic evaluation and driving forces of ecosystem services in Quanzhou Bay estuary wetland, China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2019, 30(12): 4286-4292. [游惠明, 韩建亮, 潘德灼, 等. 泉州湾河口湿地生态系统服务价值的动态评价及驱动力分析. *应用生态学报*, 2019, 30(12): 4286-4292.]
- [38] Deng Chuxiong, Zhong Xiaolong, Xie Binggeng, et al. Spatial and temporal changes of land ecosystem service value in Dongting Lake area in 1995-2015. *Geographical Research*, 2019, 38(4): 844-855. [邓楚雄, 钟小龙, 谢炳庚, 等. 洞庭湖区土地生态系统的服务价值时空变化. *地理研究*, 2019, 38(4): 844-855.]
- [39] Xiang Chen, Yan Lijiao, Han Yicai, et al. Evaluation of ecosystem services of the Thousand-Island Lake, Zhejiang, China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2019, 30(11): 3875-3884. [相晨, 严力蛟, 韩轶才, 等. 千岛湖生态系统服务价值评估. *应用生态学报*, 2019, 30(11): 3875-3884.]
- [40] Cui Lijuan, Pang Bingliang, Li Wei, et al. Evaluation of ecosystem services in the Zhalong wetland. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36(3): 828-836. [崔丽娟, 庞丙亮, 李伟, 等. 扎龙湿地生态系统服务价值评价. *生态学报*, 2016, 36(3): 828-836.]
- [41] Jia Junmei, Luo Wei, Du Tingting, et al. Valuation of changes of ecosystem services of Tai Lake in recent 10 years. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35(7): 2255-2264. [贾军梅, 罗维, 杜婷婷, 等. 近十年太湖生态系统服务功能价值变化评估. *生态学报*, 2015, 35(7): 2255-2264.]
- [42] He Hao, Pan Yaozhong, Zhu Wenquan, et al. Measurement of terrestrial ecosystem service value in China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2005, 16(6): 1122-1127. [何浩, 潘耀忠, 朱文泉, 等. 中国陆地生态系统服务价值测量. *应用生态学报*, 2005, 16(6): 1122-1127.]
- [43] Wang Bing, Lu Shaowei. Evaluation of economic forest ecosystem services in China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2009, 20(2): 417-425. [王兵, 鲁绍伟. 中国经济林生态系统服务价值评估. *应用生态学报*, 2009, 20(2): 417-425.]
- [44] Yu Xinxiao, Lu Shaowei, Jin Fang, et al. The assessment of the forest ecosystem services evaluation in China. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(8): 2096-2102. [余新晓, 鲁绍伟, 靳芳, 等. 中国森林生态系统服务功能价值评估. *生态学报*, 2005, 25(8): 2096-2102.]
- [45] Xie Gaodi, Zhang Yili, Lu Chunxia, et al. Study on valuation of rangeland ecosystem services of China. *Journal of Natural Resources*, 2001, 16(1): 47-53. [谢高地, 张德镒, 鲁春霞, 等. 中国自然草地生态系统服务价值. *自然资源学报*, 2001, 16(1): 47-53.]
- [46] Liu Jinya, Wang Dongchuan, Zhang Lihui, et al. Estimation of the ecosystem service value of the Beijing-Tianjin-Hebei

- urban agglomeration based on multi-boundary improvement. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(12): 4192-4204. [刘金雅, 汪东川, 张利辉, 等. 基于多边界改进的京津冀城市群生态系统服务价值估算. *生态学报*, 2018, 38(12): 4192-4204.]
- [47] Wang Wantong, Sun Ting, Wang Jinxia, et al. Annual dynamic monitoring of regional ecosystem service value based on multi-source remote sensing data: A case of central plains urban agglomeration region. *Scientia Geographica Sinica*, 2019, 39(4): 680-687. [王万同, 孙汀, 王金霞, 等. 基于多源遥感数据的区域生态系统服务价值年际动态监测: 以中原城市群为例. *地理科学*, 2019, 39(4): 680-687.]
- [48] Cord A F, Bartkowski B, Beckmann M, et al. Towards systematic analyses of ecosystem service trade-offs and synergies: Main concepts, methods and the road ahead. *Ecosystem Services*, 2017, 28: 264-272.
- [49] Lei Jinrui, Chen Zongzhu, Chen Xiaohua, et al. Spatio-temporal changes of land use and ecosystem services value in Hainan Island from 1980 to 2018. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, 40(14): 4760-4773. [雷金睿, 陈宗铸, 陈小花, 等. 1980—2018年海南岛土地利用与生态系统服务价值时空变化. *生态学报*, 2020, 40(14): 4760-4773.]
- [50] Schirpke U, Tscholl S, Tasser E. Spatio-temporal changes in ecosystem service values: Effects of land-use changes from past to future (1860- 2100). *Journal of Environmental Management*, 2020, 272: 111068. DOI: 10.1016/j.jenvman.2020.111068.
- [51] Kusi K K, Khattabi A, Mhammdi N, et al. Prospective evaluation of the impact of land use change on ecosystem services in the Ourika watershed, Morocco. *Land Use Policy*, 2020, 97: 104796. DOI: 10.1016/j.landusepol.2020.104796.
- [52] Gomes L C, Bianchi F J J A, Cardoso I M, et al. Land use change drives the spatio-temporal variation of ecosystem services and their interactions along an altitudinal gradient in Brazil. *Landscape Ecology*, 2020, 35(7): 1571-1586.
- [53] Fu B J, Wang S, Su C H, et al. Linking ecosystem processes and ecosystem services. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 2013, 5(1): 4-10.
- [54] Xiao Han, Ouyang Zhiyun, Zhao Jingzhu, et al. Analysis of landscape spatial structure in Hainan Island. *Acta Ecologica Sinica*, 2001, 21(1): 20-27. [肖寒, 欧阳志云, 赵景柱, 等. 海南岛景观空间结构分析. *生态学报*, 2001, 21(1): 20-27.]
- [55] Xu Lifan, Xu Xuegong, Luo Tao, et al. Services based on land use: A case study of Bohai Rim. *Geographical Research*, 2012, 31(10): 1775-1784. [徐丽芬, 许学工, 罗涛, 等. 基于土地利用的生态系统服务价值当量修订方法: 以渤海湾沿岸为例. *地理研究*, 2012, 31(10): 1775-1784.]
- [56] Yuan S F, Zhu C M, Yang L X, et al. Responses of ecosystem services to urbanization-induced land use changes in ecologically sensitive suburban areas in Hangzhou, China. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2019, 16(7): 1124. DOI: 10.3390/ijerph16071124.
- [57] Koenker R, Hallock K F. Quantile regression. *Journal of Economic Perspectives*, 2001, 15(4): 143-156.
- [58] Luo Ti, Liu Yanfang, Kong Xuesong. System coupling between urbanization and eco-environment: Research progress in China. *Tropical Geography*, 2014, 34(2): 266-274. [罗媿, 刘艳芳, 孔雪松. 中国城市化与生态环境系统耦合研究进展. *热带地理*, 2014, 34(2): 266-274.]
- [59] Wang Xiaoke, Ouyang Zhiyun, Ren Yufen, et al. Perspectives in long-term studies of urban ecosystem. *Advances in Earth Science*, 2009, 24(8): 928-935. [王效科, 欧阳志云, 仁玉芬, 等. 城市生态系统长期研究展望. *地球科学进展*, 2009, 24(8): 928-935.]
- [60] Zhang Qian, Gao Ming, Yang Le, et al. Changes in the spatial structure of ecological land and ecosystem service values in nine key districts of Chongqing City over the past 25 years. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37(2): 566-575. [张骞, 高明, 杨乐, 等. 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.]
- [61] Tang Xiaolian, Wei Qingquan. Study on effects and countermeasures on urban land management by the circulation of collective-owned construction land: Guangdong as an example. *China Land Science*, 2006(3): 19-23. [唐晓莲, 魏清泉. 集体建设用地使用权流转实施后对城市土地管理的影响及对策: 以广东省为例. *中国土地科学*, 2006(3): 19-23.]
- [62] Guo Chunyang, Gao Shang, Zhou Boyan, et al. Effects of land use change on ecosystem service value in Funiu Mountain based upon a grid square. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(10): 3482-3493. [郭椿阳, 高尚, 周伯燕, 等. 基于格网的伏牛山区土地利用变化对生态服务价值影响研究. *生态学报*, 2019, 39(10): 3482-3493.]
- [63] Li Tao, Gan Dexin, Yang Zhijian, et al. Spatial-temporal evolvement of ecosystem service value of Dongting Lake area influenced by changes of land use. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2016, 27(12): 3787-3796. [李涛, 甘德欣, 杨知建, 等. 土地利用变化影响下洞庭湖地区生态系统服务价值的时空演变. *应用生态学报*, 2016, 27(12): 3787-3796.]
- [64] Liu Yongqiang, Liao Liuwen, Long Hualou, et al. Effects of land use transitions on ecosystem services value: A case study of Hunan province. *Geographical Research*, 2015, 34(4): 691-700. [刘永强, 廖柳文, 龙花楼, 等. 土地利用转型的生态系统服务价值效应分析: 以湖南省为例. *地理研究*, 2015, 34(4): 691-700.]
- [65] Zhao Wenwu, Liu Yue, Feng Qiang, et al. Ecosystem services for coupled human and environment systems. *Progress in*

Geography, 2018, 37(1): 139-151. [赵文武, 刘月, 冯强, 等. 人地系统耦合框架下的生态系统服务. 地理科学进展, 2018, 37(1): 139-151.]

[66] Long Hualou, Tu Shuangshuang. Rural restructuring: Theory, approach and research prospect. Acta Geographica Sinica, 2017, 72(4): 563-576. [龙花楼, 屠爽爽. 论乡村重构. 地理学报, 2017, 72(4): 563-576.]

Spatiotemporal evolution and influencing mechanism of ecosystem service value in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area

LIU Zhitao^{1,3}, WANG Shaojian², FANG Chuanglin^{1,3}

(1. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China;

2. Guangdong Provincial Key Laboratory of Urbanization and Geo-simulation, School of Geographical Sciences and Planning, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China;

3. School of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Ecosystem services are the media and channels through which ecological elements, structures, functions and products benefit human society. Regulating the utilization intensity and protection methods of the human society on the ecosystem according to the ecosystem service value (ESV) and its influencing mechanism is of great significance for achieving the sustainable development goals of harmony between man and land. This paper takes the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area (GBA) as the research object and revises the ESV accounting results based on remote sensing data to more accurately reveal the spatiotemporal evolution characteristics of ESV in the GBA from 2000 to 2015. And, panel quantile regression is implemented to deeply probe the segmentation effects of the factors affecting ecosystem services and to increase the understanding of the influencing mechanism of ecosystem services. The main results are as follows: (1) In the GBA, the value of regulation services accounts for the highest proportion among the four ecosystem sub-services. From 2000 to 2015, the total ESV declined with a decreasing rate, and the values of leading ecosystem service and hydrologic regulation service had the similar variation trend. The decline areas were mainly distributed in the central part of the GBA and areas along the Pearl River Estuary. (2) Elastic index, indicating response of ESV to land use change, reached the peak (1.08) between 2010 and 2015. Changes in land use types per unit area induced greater ESV declines. The spatial distribution of elastic index showed that land use changes brought about more intense ESV variations at the junction of cities from 2000 to 2015. (3) In areas with different ESV levels, influencing factors have different effects. Land use integrity can only promote ecosystem service capabilities in low-ESV areas. The positive effect of temperature on ecosystem service capacity increase with the increase of ESV, which is self-reinforcement of ecosystem. Moreover, the negative effect of economic density on ecosystem service capacity decreases with the increase of ESV, which is self-protection of ecosystem. Combination of the self-reinforcement and self-protection will lead to the ESV gap between the high- and low-ESV areas, and induce the "natural Matthew effect".

Keywords: ecosystem services; spatiotemporal evolution; influencing mechanism; panel quantile regression; Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area