

DOI: 10.20103/j.stxb.202208082258

袁海威, 龚建周, 陈雅婷, 陈康林, 吴卓, 邱霓. 基于地域区划的广东省陆域生态系统服务簇与模式识别. 生态学报, 2023, 43(22): 9384-9401.

Yuan H W, Gong J Z, Chen Y T, Chen K L, Wu Z, Qiu N. Recognition and analysis of ecosystem service cluster patterns in Guangdong Province based on region division. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(22): 9384-9401.

基于地域区划的广东省陆域生态系统服务簇与模式识别

袁海威, 龚建周*, 陈雅婷, 陈康林, 吴卓, 邱霓

广州大学地理科学与遥感学院, 广州 510006

摘要: 识别区域生态系统服务簇及其结构模式, 是揭示人地系统客观规律的前提和基础。基于中国气候区划、农业自然区划和主体功能区划成果和三级流域单元, 并遵循统一性、一致性、区域共轭性等规律, 坚持尽可能保持自然与行政边界完整性的原则, 对广东省陆域进行自上而下为主的地域区划, 以最大化保持流域单元和生态系统的完整性; 按照区划单元测算粮食供给、原料生产、水资源供给等 12 项区域典型生态系统服务价值量和 z-score 分值, 最后运用 K-均值聚类法, 进行生态系统服务簇与模式识别。得到以下结果: 广东省陆域涵盖中亚热带、南亚热带和边缘热带 3 个自然地带, 可划分为 9 个经济片区共 34 个自然的流域单元, 形成了“3+9+34”的三级地域区划方案; 识别出水文调节保护型、水土保持调节型、生态保育公园型、生态宜居和谐型、综合协调供给型共 5 类生态系统服务簇的结构模式, 展示出广东省陆域生态系统服务簇以珠三角为核心的空间对称分布模式; 受地形、地貌等自然地理环境和土地利用等人类活动的影响, 不同区域生态系统服务簇各具独特的地形和地理特征, 承担着生态系统服务功能各异。基于这些结果, 研究提出生态系统服务簇模式的差异化生态系统管控措施, 为省域国土空间规划的实践提供研究支撑。

关键词: 生态系统服务簇; 结构模式; 综合区划; K-均值聚类; 广东省

Recognition and analysis of ecosystem service cluster patterns in Guangdong Province based on region division

YUAN Haiwei, GONG Jianzhou*, CHEN Yating, CHEN Kanglin, WU Zhuo, QIU Ni

School of Geography and Remote Sensing, Guangzhou University, Guangzhou 510006, China

Abstract: The effective and systematic identification of the regional ecosystem service clusters and structural patterns is prerequisite and foundation for revealing the objective laws of human-earth system. Based on the results of climatic zoning, agricultural natural zoning, major functional zoning division, and three-level watershed unit in China, the land area regionalization of Guangdong Province was carried out from top to bottom following the rules of unity, relative consistency, regional conjunction and the principle of maintaining the integrity of natural and administrative boundaries as far as possible to maximize the integrity of watershed units and ecosystems. The values and z-score of 12 typical ecosystem services such as grain supply, raw material production, and water resource supply were calculated according to the zoning units. Finally, the K-means cluster method was applied to identify ecosystem service clusters and patterns. The results are as follows: the study area covered three natural zones, namely the middle subtropical zone, the south subtropical zone and the marginal tropical zone, and was further divided into nine economic zones with a total of 34 watershed units, forming a three-level zoning

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(42071123); 国家自然科学基金青年项目(42201104); 广东省哲学社会科学“十三五”规划 2019 年度项目(GD19CGL19)

收稿日期: 2022-08-08; 采用日期: 2023-04-07

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: gongjzh66@126.com

system of "3+9+34". Five types of ecosystem service cluster structure patterns were identified to objectively demonstrate the symmetrical spatial distribution characteristics of terrestrial ecosystem services in Guangdong Province with the Pearl River Delta as the core, which include hydrologic regulation and protection type, soil and water conservation regulation type, ecological conservation park type, ecological livable and harmonious type, and comprehensive coordinated supply type. Affected by terrain, landform and other natural geographical environment as well as human activities such as land use, each region of ecosystem service cluster type has its own unique terrain and geographical characteristics and undertakes different ecological service functions. Based on the research results of recognition and analysis of ecosystem service cluster patterns under region division, we made some discussions on proposal for differentiated ecosystem control measures based on ecosystem service clusters, which could provide a reference for regional sustainable development.

Key Words: ecosystem service cluster; cluster pattern; region division; K-means clustering; Guangdong Province

生态系统结构与生态过程相互作用,驱动着生态系统的整体动态,呈现出生态系统功能;当某一种或多种生态系统功能与人类需求相关联时,就构成支持人类生命系统的生态系统服务^[1]。生态系统服务不仅建立起从自然生态系统到人类福祉的关联,还架构起从生态系统研究到辅助政策制定的桥梁^[2]。

生态系统服务是对人类生存及生活质量有贡献的生态系统产品和功能,包括生产、支持、调节和文化等几大类型^[3]。在特定的空间上,多种生态系统服务往往时空共现,形成并组合成生态系统服务簇^[4-5]。由于生态系统服务种类的多样性、空间分布的不均衡性以及人类选择的差异性等多方因素,致使同一地域空间的各生态系统服务常常表现出此消彼长的权衡和协同作用,呈现出不同组合结构特征的生态系统服务簇模式^[6]。由于事物结构的显性及易于量化,通过结构和过程的研究进而推断功能,已是生态系统服务研究的范式^[7-8],也是生态系统服务权衡与协同研究的前提^[4]。如:吴健生等^[9]进行生态系统服务簇的层次聚类,再将结果运用于生态用地功能分类的案例研究;李慧蕾等^[10]借助神经网络聚类识别生态系统服务簇,进行生态功能区划分。目前,进行生态系统服务簇识别的成熟方法是聚类法^[8-10]。但是,在运用该方法过程中,往往以行政区域或规则格网为最小分析单元,这可能会割裂某些生态系统,不利于揭示各生态系统服务类型之间的内在关系。

综合区划为此提供了一个可行的研究视角。综合区划是将研究区划从自然地域拓展到自然与人文综合作用形成的地域系统^[11],根据地表自然综合体的相似性与差异性将地域进行子区划分,再按照子区单元来认识地域系统的发生、发展与分布规律^[12-13]。这种研究思路已成为揭示地表现象相似性与差异性的基本路径与有效方法^[14]。如:林浩曦等^[15]利用多个已有区划研究成果,结合行政区划和流域边界建立冰冻圈服务综合区划技术,熊善高等^[16]基于生态系统服务功能重要性开展了生态空间划定。尽管如此,在实际应用过程中,过于依赖自然地理要素而忽视经济社会要素^[14],也没有形成统一的生态系统服务分区框架、技术和方法,需要建立起一套保持生态系统结构和功能完整单元的地域区划方案^[11]。

广东省是中国经济的大省和强省,其中的珠三角地区与港澳一起,已是国家建设世界级城市群、参与全球竞争的重要空间载体。目前,广东省正按照《广东省国土空间规划(2020—2035)》内容,全面实践“一核一带一区”国土空间新格局方案,厘清省域生态系统服务关系和结构模式是实践这一方案的理论支撑。本文借助地理学综合区划的思想,综合自然与人文社会因素进行广东省陆域生态系统的划分,继而识别生态系统服务簇模式,亦可深化自然地理学研究方法。

1 地域区划的理论及流程

进行省级地域区划是将省域自然系统划分不同的分区,再基于地域单元探索生态系统服务规律。按照郑度先生对区划属性的定性,属于区域区划^[13],即区划结果的各单元在地域上彼此相邻,但是空间上具有不可重复性或重叠性^[10]。开展地域区划是揭示区域生态系统相似性与差异性的基本路径与有效方法^[14]。

1.1 地域区划的理论支撑

在中国区域划分的研究和应用中,最具代表性和权威性的区划成果有 1978 年中国气候区划、1988 年中国农业自然区划和中国主体功能区划。其中,依据热量和水分指标,1978 年的中国气候区划方案把全国划分成六个气候带和一个高原气候区,进一步划分成 8 个一级气候区和 32 个二级气候省,华南沿海区域属于我国亚热带与热带的过渡区域,共涵盖 3 个温度带^[17]。丘宝剑先生和黄秉维先生根据温度带和湿润度的划分,将中国分为 38 个农业自然区域(即 1988 年中国农业自然区划方案),广东省涵盖其中的 3 个农业区^[18]。中国主体功能区划采用综合地理区划的方法,进行了国家和省域尺度的两级编制^[19],提出了全国国土空间保护和利用基本格局的方案^[20],广东省域被划分为 6 个主体功能片区。这三种区划成果是本文第一、二级陆域地域区划的理论支撑。

流域生态系统理论是本文将流域作为第三级区划单元的重要依据。流域是地球内营力作用下的基本轮廓,是由分水线所包围的河流集水区和陆地生态系统的基本单元,更是由自然—社会—经济共同构成的复杂系统。流域既相对封闭有着独立边界,具有相对独立的特征、结构和自身的规律^[21];又同时与外界保持着物质和信息交流的整体^[22]。如:存在上、下游区域间物质能量及信息的交互传递过程,进而形成空间流动及溢出效应^[23]。从流域的封闭性、系统性和生态系统的完整性考虑,流域成为生态系统服务簇研究的理想单元^[11]。

1.2 地域区划方案与流程

综合研究区地域分异规律和已有区划成果^[17-18, 20],在遵循发生统一性、相对一致性、区域共轭性、综合性等规律,坚持尽可能保持自然与行政边界完整性的原则下,基于三级流域单元,对广东省陆域系统进行自上而下为主的三级地域单元划分。其中,如果一、二级划分方案割裂了三级流域单元,则基于流域边界进行自下而上微调一、二级单元边界,以维持区域划分单元的完整性(图 1)。具体区划方法如下:

将 1978 年中国气候区划成果与 1988 年中国农业自然区划进行空间叠置处理,以两者间的平均位置为基础,兼顾现行县级行政区域边界完整性,确立一级分区的边界。在遵循区域共轭性原则下,综合一级区划成果和广东省主体功能区分类进行空间叠置与合并,确实二级分区边界。将二级区划结果与流域单元叠加,进行三级子区域划分,具体方法是:根据研究区海拔高度(DEM)空间分布数据,经创建无凹陷点 DEM,完成流向分析、流量统计并定义地表最小的地表径流,以河流流向、流量栅格数据开展河网分级,创建河流链接并对栅格河网进行矢量化,根据所需提取三级流域面。特别地,局部二级单元与流域单元边界存在不完全套合的问题,则以三级流域单元为准,进行自下而上的一、二级区划边界微调。

2 数据与方法

2.1 研究区概况与数据来源

2.1.1 研究区概况

广东省地处中国大陆最南部(20°13'—25°31'N, 109°39'—117°19'E),南临南海(图 2)。研究区的整体地形呈北高南低之势,北依南岭山脉邻接湖南,东有莲花山脉与福建相接,西有云开大山与广西相邻。海拔最高达 1879m,最低处达海平面以下 56m,平均海拔 208m。年均降水量 1560mm,属于亚热带季风气候。

广东省的自然地理环境分异突出^[24-25]。由南向北的热量、水分状况、土壤类型与生物过程都存在明显的纬度地带性分异;即使在同一地带内,地质构造和地势起伏以及土壤亚类与植被亚型分布状况都存在差异;在同一构造地貌单元内,也存在着中、小地貌组合形式成的自然地理分异。省内社会经济差异也尤为明显^[24-25],珠三角城市群 9 市生产总值与东、西两翼及北部山区的地区生产总值存在巨大差异。

2.1.2 数据来源

数据来源包括中国科学院资源环境科学与数据中心(<http://www.resdc.cn/>)及其它政府信息公开文件。中国科学院资源环境科学与数据中心的地理空间数据^[26],包括:①2020 年土地利用矢量数据;②2015 年中国

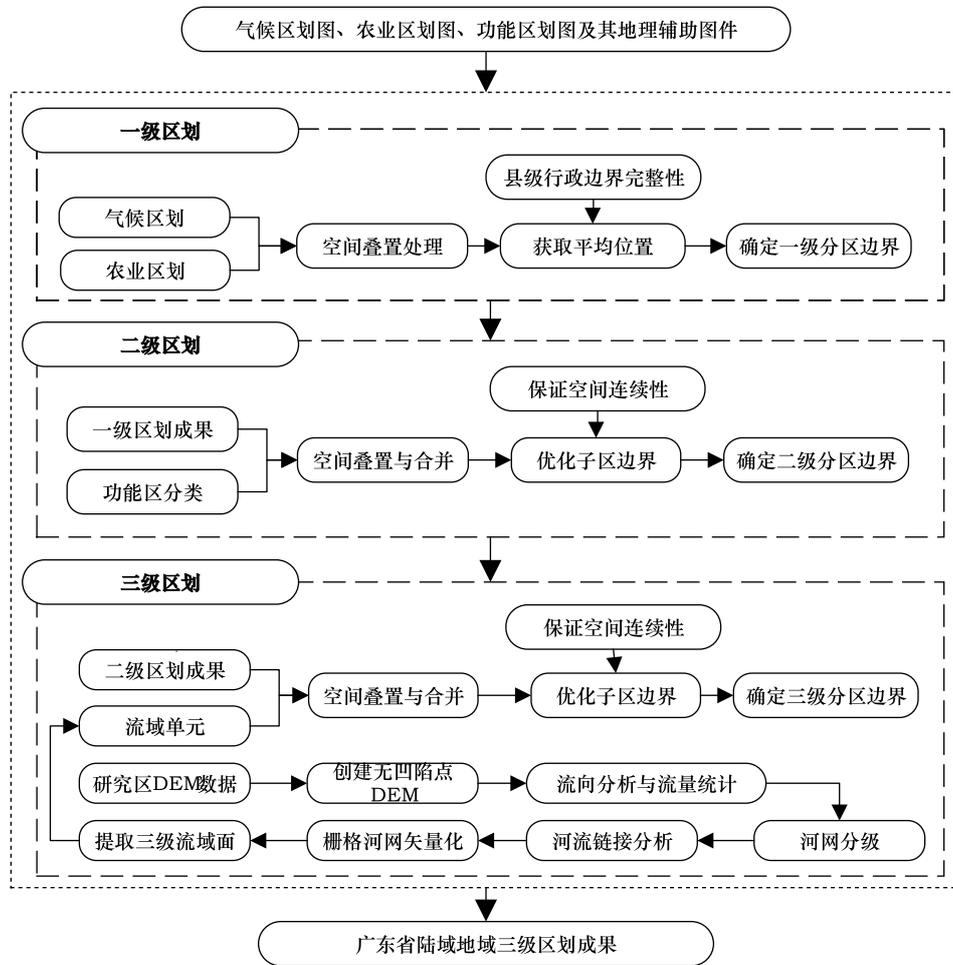


图 1 广东省陆域地域区划流程图

Fig.1 The process of regional division based on ecosystem systems for Guangdong Province

县级行政边界数据;③区划数据:黄秉维先生根据温度带和湿润度的划分的中国农业区划,中国国家气象局于1978年利用用1951—1970年的气候资料编绘的中国气候区划图;④美国奋进号航天飞机的雷达地形测绘SRTM数据:名为中国海拔高度(DEM)空间分布;⑤2015年的中国陆地生态系统服务价值空间分布数据集,该数据集是以全国陆地生态系统类型遥感分类为基础,参考Costanza生态服务价值当量因子法,依据全国NPP、降水量、土壤保持等空间分布数据计算而得。除游憩娱乐和科研教育外,表1中其余10种生态系统服务价值的空间数据都来源于此数据集。

其它公开信息文件包括:中华人民共和国中央人民政府(<http://www.gov.cn/>)国函[2016]161号文件《国务院关于同意新增部分县(市、区、旗)纳入国家重点生态功能区的批复》;广东省人民政府文件(<http://www.gd.gov.cn>)粤府[2012]120号文件《广东省人民政府关于印发广东省主体功能区规划的通知》(http://www.gd.gov.cn/gkmlpt/content/0/146/post_146572.html#7);广东省统计局文件(<http://stats.gd.gov.cn/>):《广东统计年鉴2016年》(http://stats.gd.gov.cn/gdtjnj/content/post_1424895.html);广东省文化与旅游厅文件(<http://whly.gd.gov.cn/>)《广东省A级旅游景区名录(截至2015年12月)》(http://whly.gd.gov.cn/service_newajjq/content/post_2844877.html);中国知网收录年鉴(<https://www.cnki.net/>):《广东社会统计年鉴2016》(<https://navi.cnki.net/knavi/yearbooks/YGDSZ/detail>)。

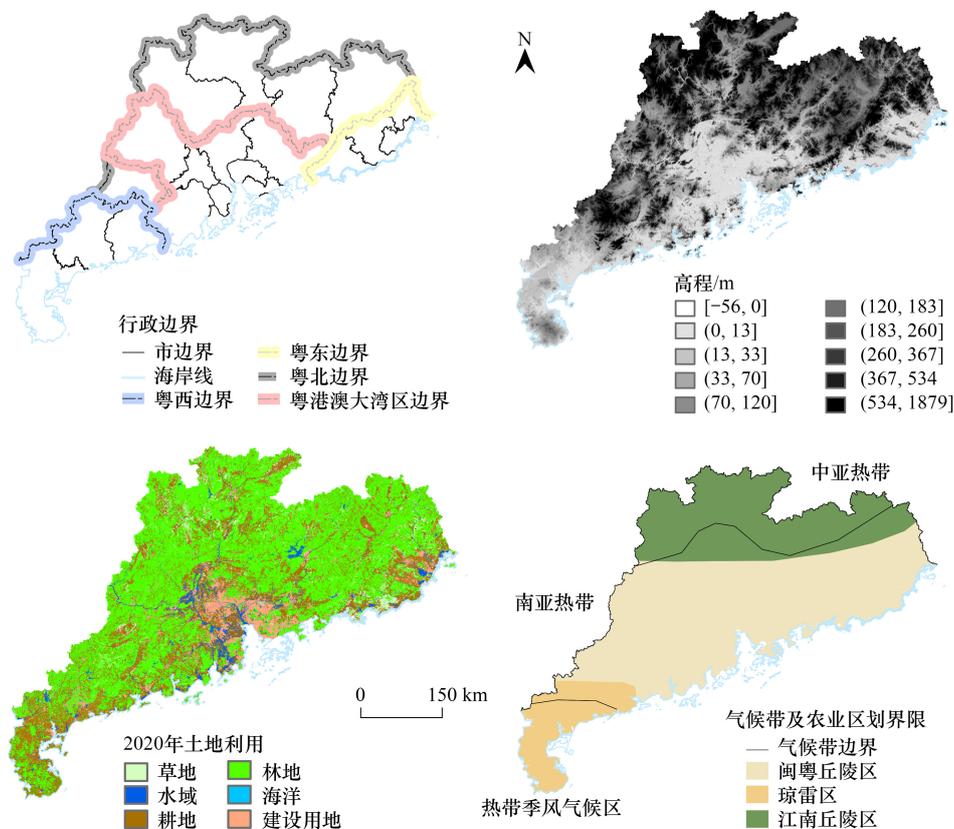


图2 广东省行政边界示意图、高程和土地利用类型图、气候带及农业区划图

Fig.2 Sketch map of the administrative boundary, maps of DEM, land-use type, Climate zone and agricultural zoning for Guangdong province

2.2 生态系统服务价值评价

2.2.1 生态系统服务价值评价指标体系

制定生态系统服务评价指标体系是进行其价值评估的前提与基础。由于生态系统丰富多样,根据不同的应用目的,已形成多种生态系统服务分类体系^[27-31]。考虑到新时代人民美好生活需要由相互作用的物质、社会、心理三个层面构成^[31-32],本研究目的在于揭示省域自然—社会—经济复合生态系统服务的客观特征和辅助于生态管理决策,参考已有研究成果^[29],从物质、社会和心理三个层面,构建生态系统服务评价体系如表1。

进行生态系统服务评价多采用物质量或价值量评价两种方法。其中,生态系统服务的价值量评估方法更为广泛,并大多采用 Costanza 的标准^[28,33],定量研究全球、区域等不同尺度水平的生态系统服务经济价值。中国科学院资源环境科学数据中心便是采用此方法,生成一套中国陆地生态系统服务价值空间分布数据集,对进行中国陆地生态环境研究起到积极的促进作用^[26]。基于表1拟定的12项生态系统服务指数进行生态系统服务评估,前10项指数的数据来源于以上数据中心(2015年中国陆地生态系统服务价值空间分布数据集),仅缺少游憩娱乐和科研教育的评估,下文将分别介绍这两种服务的评价。

2.2.2 游憩娱乐评价与空间表达

游憩娱乐是生态系统给予人类心理满足与精神享受的一种重要服务,其价值量普遍受不同社会经济发展水平、旅游活动需求和支付意愿等影响^[34]。旅行成本法和意愿调查法是目前运用较多的游憩娱乐评价方法,都依赖大量样本和广域范围的调查,不太适用于省域范围的评估。本文改用费用支出法,从可达性和可视性两方面考虑。计算公式如下^[35]:

表 1 基于美好生活需要层次的生态系统服务评价指标体系

Table 1 Ecosystem services classification framework based on hierarchy of needs for better life

层次 Dimension	过程名 Procedure	符号 Symbol	类型 Type
物质供给需要层次 Material supply dimension	生活资料供给	<i>F</i>	食物供给
		<i>Rm</i>	原料生产
		<i>W</i>	水资源
环境和谐需要层次 Environmental harmony dimension	净化缓冲	<i>P</i>	净化环境
		<i>D</i>	生物多样性价值
		<i>C</i>	维持养分循环
		<i>S</i>	土壤维持
		<i>A</i>	气体调节
心理满足需要层次 Psychic gratification dimension	生态调节	<i>H</i>	水文调节
		<i>B</i>	美学景观
		<i>R</i>	游憩娱乐
		<i>E</i>	科研教育

F:食物供给 Food supply; *Rm*:原料生产 Raw material production; *W*:水资源 Water resources supply; *P*:净化环境 Environmental purification; *D*:生物多样性价值 Biological diversity value; *C*:维持养分循环 Maintaining nutrient cycle; *S*:土壤维持 Soil conservation; *A*:气体调节 Air regulation; *H*:水文调节 Hydrological regulation; *B*:美学景观 Beauty; *R*:游憩娱乐 Recreation and tourism; *E*:科研教育 Scientific research and education

$$P_{\text{cap}} = I_i \times l \times T_{\text{cap}} / T_i \quad (1)$$

式中, P_{cap} 为研究区的游憩娱乐价值, I_i 为第 i 年的旅游收入, l 为社会发展阶段系数, T_{cap}/T_i 是总体旅游环境容量 (T_{cap}) 与第 i 年的游客总量 (T_i) 之比, 表示资源稀缺程度。以上模型是从社会经济发展阶段和资源稀缺程度来评价游憩娱乐价值。其中, 利用 Pearl 生长曲线来量化目前社会经济阶段系数, 计算式如下^[36]:

$$l = L \times (1 + ae^{-bt}) - 1 \quad (2)$$

$$t = En^{-1} - 3$$

式中, l 为社会发展阶段系数; L 为 l 的最大取值, 其值在 0—1, 其值为 1 时, 表示目前为极富阶段人们的支付意愿; a 、 b 为取值 1 的常数; e 为自然对数; t 为时间变量, 表示社会经济阶段; 时间变量 t 与表征社会经济发展水平和人民生活水平的恩格尔系数 En 对应。

由于不同级别的景区对于游客的吸引力有别, 故采用均分法分配景点的可达性和可视性价值。可达性价值部分借助 ArcGIS 平台, 根据距离建立多环缓冲区, 再分配旅游收入。运用 ArcGIS 视域模块进行可视性价值评价, 方法是: 基于 DEM 和景点分布图, 根据可见的景点数目, 确定相应权重均匀分配另外的 1/2 旅游收入; 叠加可达性和可视性图层完成游憩娱乐价值的空间分配。

2.2.3 科研教育评价与空间表达

生态系统为人类提供教研的自然本地和基地, 具有不可替代的科研教育价值^[37]。直接成本法、价值当量法等方法被较多地用以科研教育价值的表达。本文采用直接成本法, 由论文产出数量与每篇论文研究经费投入相乘, 再将乘积相加求和得到科研教育的价值。方法是: 借助中国知网高级检索功能, 以“生态”为主题对已刊论文进行检索, 统计全省各行政单元 2015 年期间发表相关论文, 按每篇论文经费成本 9 万元的估算^[38], 得到 2015 年广东省生态系统科研教育价值, 再按论文研究区域进行空间价值的分配。

2.3 Getis-Ord G_i^* 统计模型

利用 Getis-Ord G_i^* 统计模型, 探测各生态系统服务类型的空间聚集特征。该模型是揭示局部要素空间分布相对于总体模式特征的统计模型, 属于局域自相关的空间分析模型。计算公式参见 ArcGIS 帮助文件或文献^[39]。借助 ArcGIS 的热点分析模块 (hot spot analysis), 进行 Getis-Ord G_i^* 统计分析, 软件会自动为每个分析

单元同时计算 G_i^* (z -score)。 G_i^* 值是局部(某分析单元内)要素空间分布相对于总体模式的统计指标,代表着局部要素均值相对于总体均值偏离了多少个标准差。 G_i^* 值越大,表明热点的聚集越紧密; G_i^* 值小于零且越低,表明冷点的聚集越紧密;接近于零,表示不存在明显的空间聚类。与此同时,内置模型会自动完成统计学的显著性检验,输出显著性水平(P -value)0.1、0.05、0.01 对应的 z -score 临界值。

运用 hot spot analysis 模块,基于三级分区单元计算生态系统服务类型的 z -score。某分区单元上某类型服务的 z -score 值越大,表示该单元提供此类服务的能力越强,属于服务的热点地区;反之, z -score 值为负且越小,该单元属于冷点地区;如果 z -score 值接近于零,该单元不存在明显的空间聚集区。

2.4 生态系统服务簇模式识别

地域区划单元都是多种生态系统服务类型的集合,即生态系统服务簇。虽然每个单元的生态系统服务簇都可能不同,但是相邻单元服务簇之间往往具有极大的相似度,进一步进行生态系统服务簇聚类分析,可识别其结构模式。聚类分析是基于数据特征将其分组的方法。其中, K -均值聚类是一种最简单的迭代型聚类方法^[40]。该聚类算法由 Steinhaus 1955 年、Ball and Hall 1965 年、McQueen 1967 年分别在不同的科学研究领域独立提出^[41]。由于该算法简单、高效,已被运用于多学科领域,一直成为广泛的聚类算法之一^[40]。其原理是:以相似性为基础,采用距离作为相似性指标,发现给定数据集中的 k 个类,用聚类中心(该类所有数值的均值)来描述每个类的中心。该算法的实现包括确定聚类数和实现算法两个步骤。

确定聚类数 采用手肘法确定聚类数,其核心思想是:随着聚类数 k 值的增加,样本聚类划分更为精细,各聚类样本的聚合程度就会更高,那么样本数据的聚类误差平方和(SSE)自然会变小。通过计算不同聚类数下所有聚类样本的误差平方和(SSE),绘制 SSE 与聚类数 k 值的关系曲线,曲线拐点位置就是最佳聚类数^[40]。基于所选数据,确定 $k=5$ 为研究区生态系统服务的最佳簇数。

K -均值聚类算法实现 可利用 SPSS 软件的 K -均值聚类工具完成。过程包括:基于最佳聚类数,预选聚类中心→求距离→归类→求新聚类中心→迭代→判定与结束过程,具体如下:

- (1) 预选聚类中心:随机选取 k 初始对象,作为聚类中心;
- (2) 求距离:计算所有要素与聚类中心之间的距离;
- (3) 归类:根据距离大小,将各要素归入与之距离最近的聚类中心,即所有要素被第一次分成 k 组;
- (4) 求新聚类中心:计算各组要素的均值(共 k 个),将这 k 个均值作为下一次迭代计算的新聚类中心;
- (5) 迭代—判定与结束计算:重新回到步骤(2)—(4),此过程一直反复,直到新聚类中心不再发生变化,或者达到预设的迭代次数。

基于以上算法原理,以广东省陆域生态系统三级分区为分析单元,每个单元包括 12 类生态系统服务,共有 408(34×12)个样本数据。将样本数据代入 SPSS 软件,借助 K -means 分析功能输入最佳聚类数 $k=5$ 逐步迭代聚类,最终得到各类别的样本数量即各服务簇内最邻近的生态系统服务区域集合。

3 结果与分析

3.1 广东省陆域区划结果

将研究区分为 3 个自然地带、9 个经济片区和 34 个流域单元区(图 3 和表 2)。3 个自然地带分别是中亚热带江南丘陵地带(I)、南亚热带闽粤丘陵地带(II)和边缘热带琼雷地带(III),分别占广东省总面积 24.0%、65.7%和 10.3%。其中,中亚热带江南丘陵地带被划分为 2 个经济片区,分别为粤北南岭生态功能区(a)和粤北经济片区(b),所占面积比分别是 80.0%和 20.0%;边缘热带琼雷地带被划分为 2 个经济片区(h, J),分别是粤西沿海经济片区和雷州经济片区,面积比例分别是 60.9%和 39.1%;划分单元最多的是南亚热带闽粤丘陵地带,共有 5 个经济片区(c—g),分别是珠三角北部经济片区、西部经济片区、核心经济区、东部经济片区和粤东海峡西岸沿海经济片区,面积比例分别是 16.8%、30.0%、19.9%、25.4%和 7.9%。第三级区划时,再将区域分别划分为 9、20 和 5 个流域单元,各流域单元名称及其面积占比见表 3 所示。

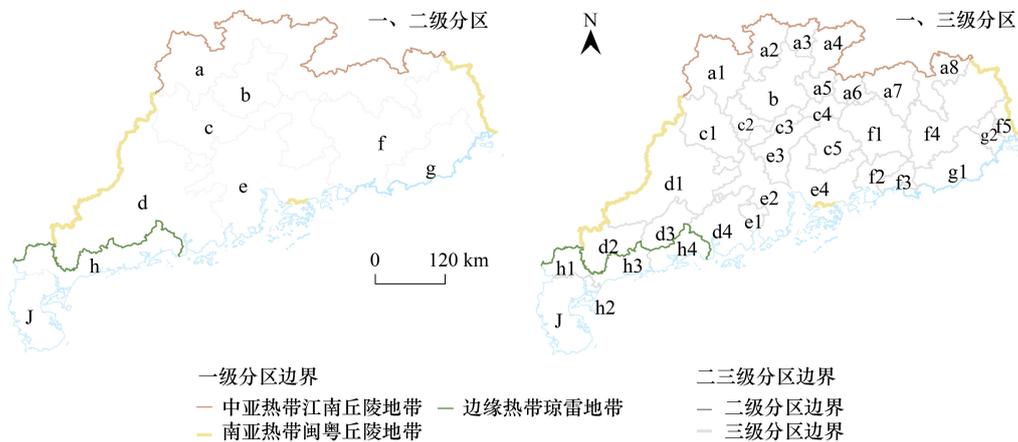


图3 广东省陆域地域区划图

Fig.3 Region Division for Guangdong Province

左图编号 a,b 代表中亚热带江南丘陵地带划分出的 2 个二级子区,c—g 代表南亚热带闽粤丘陵地带划分出的 5 个子区,h,J 为边缘热带琼雷地带划分出的 2 个子区;右图 a1—a8 代表将二级单元 a 再根据三级流域划分出 8 个三级子区,同理 c1—c5,d1—d4,e1—e4,f1—f5,g1—g2 代表二级子区 c—g 单元再划分出的三级子区,个数分别是 5、4、4、5、2,h1—h4 代表二级子区 h 单元再划分出 4 个三级子区,下文由此编码表示各级分区。

表 2 一二级区域区划及其面积百分比

Table 2 First-level and second-level regional division and the area percentage per division

一级分区 First-level region division			二级分区 Second-level region division		
编码 Code	名称 Name	面积百分比/% Area percentage	编码 Code	名称 Name	面积百分比/% Area percentage
I	中亚热带江南丘陵地带	24.0	a	粤北南岭生态功能区	80.0
			b	粤北经济片区	20.0
II	南亚热带闽粤丘陵地带	65.7	c	珠三角北部经济片区	16.8
			d	珠三角西部经济片区	30.0
			e	珠三角核心经济区	19.9
			f	珠三角东部经济片区	25.4
			g	粤东海峡西岸沿海经济片区	7.9
			h	粤西沿海经济片区	60.9
			J	雷州经济片区	39.1
III	边缘热带琼雷地带	10.3			

3.2 广东省陆域生态系统服务价值的空间分布特征

3.2.1 空间分布特征

基于广东省陆域三级分区单元,统计生态系统服务价值均值,计算各均值相对于整个研究区某类型生态系统服务价值的比重;最后基于自然间断点分级法,将生态系统服务价值分为 5 个等级,按照价值从低到高依次编号为等级 1、等级 2、...、等级 5,分别代表价值低值、中低值、中值、中高值和高值共 5 个等级区,绘制图 4。可以看出,研究区生态系统服务空间异质性极为明显,并因服务类型而异。如人类活动强烈的珠江三角洲区域,只有水资源供给、水文调节、游憩娱乐和科研教育以中高值为主,其余 8 个服务都呈现为中低值区核心、中高值区圈层包裹的空间分布模式。

以物质供给需要层次中的生态系统服务为例,食物供给服务高值区主要集中于粤东、粤西两翼沿海平原地区,在袂花江鉴江汇流区(h3)中价值最高约 2688 元/hm²(表 4);原料生产服务在珠三角核心区中的东江珠江汇流区(e4)出现 1383 元/hm²最低值。再如:由于西江、北江和东江流经珠三角境内,新会潭江下游区(e1)

表 3 广东省陆域地域分区

Table 3 Comprehensive division on ecological services of Guangdong Province

一级分区 First-level region division		二级分区 Second-level region division		三级分区 Third-level region division region division				
编码 Code	名称 Name	编码 Code	名称 Name	编码 Code	名称 Name	面积比/% Area percentage		
I	中亚热带江南丘陵地带	a	粤北南岭生态功能区	a1	南岭连江诸河区	19.6		
				a2	南岭武江诸河区	11.1		
				a3	南岭锦江诸河区	5.2		
				a4	南岭浈江诸河区	10.5		
				a5	南岭滙江诸河区	5.1		
				a6	连平北江东江过渡区	5.4		
				a7	河源北部东江汇流区	12.7		
				a8	梅州北部韩江汇流区	10.5		
II	南亚热带闽粤丘陵地带	b	粤北经济片区	b	英德盆地北江汇流区	20.0		
				c	珠三角北部经济片区	c1	绥江北江汇流区	6.3
		c2	滨江北江汇流区			2.3		
		c3	滙江北江汇流区			1.9		
		c4	新丰北江东江过渡区			1.7		
		c5	增江诸河东江汇流区			4.5		
		d1	西江广东段汇流区			15.3		
		d2	鉴江上游区			4.8		
		d3	漠阳江上游区			3.5		
		d4	潭江诸河区	6.5				
		e	珠三角核心经济区	e1	新会潭江下游区	1.2		
				e2	西江北江汇流区	7.2		
				e3	流溪河珠江汇流区	4.2		
				e4	东江珠江汇流区	7.3		
				f1	河源南部东江汇流区	7.0		
		f	珠三角东部经济片区	f2	西枝江东江汇流区	3.0		
				f3	黄江诸河区	1.8		
				f4	韩江中上游汇流区	12.1		
				f5	黄冈河汇流区	1.5		
				g1	沿海漯河榕江练江诸河区	6.4		
III	边缘热带琼雷地带	h	粤西沿海经济片区	g2	韩江下游汇流区	1.6		
				h1	九洲江诸河区	14.7		
				h2	遂溪河诸河区	7.1		
				h3	袂花江鉴江汇流区	18.8		
				h4	漠阳江下游汇流区	20.3		
				J	雷州经济片区	J	雷州台地诸河区	39.1

和西江北江汇流区(e2)等部分珠三角区域,水资源供给服务价值都处于中高值段(等级4和等级5),其中的西江北江汇流区(e2)水资源供给最高价值达到11 288元/hm²。但是,由于喀斯特地貌和农业用地的大量用水需求,滙江北江汇流区(c3)、新丰北江东江过渡区(c4)、漠阳江上游(d3)及下游汇流区(h4)和袂花江鉴江汇流区(h3)出现低值区,单位供给价值达到负值。再如,游憩娱乐服务高值区多分布于经济较发达地区,如珠三角核心经济区(e)、增江诸河东江汇流区(c5)和韩江下游汇流区(g2),中低值区则大致分布于鉴江上游区(d2)、九洲江诸河区(h1)和粤北、粤东北地区。科研教育服务价值则在广深的流溪河珠江汇流区(e3)和东江珠江汇流区(e4)为高值,低值区分布于经济水平较低的粤东潮汕和粤西茂名、阳江部分地区,具体包括:黄冈河汇流区(f5)、鉴江上游区(d2)、袂花江鉴江汇流区(h3)和九洲江诸河区(h1)。

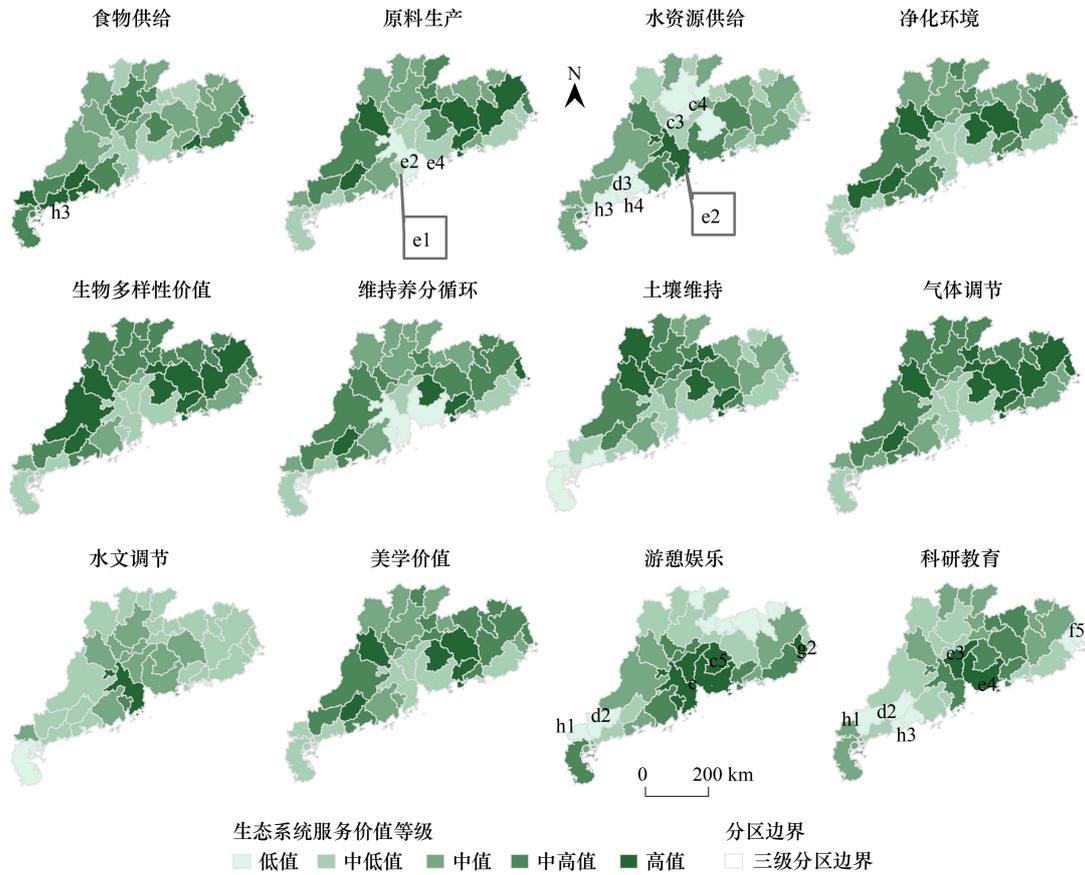


图 4 广东省陆域各类型生态系统服务价值的空间分布

Fig.4 Spatial distribution map of terrestrial ecosystem service value in Guangdong Province

表 4 各三级区划单元的平均生态系统服务价值

Table 4 Average ecosystem services value per third-level region division cell

编码 Code	生态系统服务价值均值 Ecosystem services value/(元/hm ²)											
	<i>F</i>	<i>Rm</i>	<i>W</i>	<i>P</i>	<i>D</i>	<i>C</i>	<i>S</i>	<i>A</i>	<i>H</i>	<i>B</i>	<i>R</i>	<i>E</i>
a1	1670	1926	-1032	5909	7008	675	20469	6706	50724	3136	2811	1
a2	1509	1865	716	5727	6745	635	18509	6358	52146	3028	2798	3
a3	1786	2020	65	5653	6810	684	12876	6658	37816	3034	2593	3
a4	1611	1961	-538	6255	7266	685	13243	6829	46642	3275	2169	6
a5	1980	2072	-1298	6348	7419	740	18630	7193	48729	3344	2016	7
a6	1428	1994	-301	5765	7134	672	20420	6794	38049	3129	819	9
a7	1423	1977	476	6026	7192	663	11271	6705	42979	3215	2120	4
a8	1702	1995	-633	6013	7139	695	9777	6844	41161	3197	2232	4
b	1996	1828	-1660	6088	6697	673	18411	6452	61666	3093	3076	1
c1	1755	2211	1462	7150	8045	743	20935	7431	62585	3672	3732	2
c2	1982	1954	-248	6930	7373	702	23416	6842	73705	3454	6208	4
c3	1990	1641	-2425	5484	6062	632	16359	5945	74445	2813	4668	5
c4	1499	2195	138	6336	7903	733	26630	7444	44220	3482	3119	7
c5	2233	2109	-1651	6896	7664	772	21948	7392	60879	3527	7700	5
d1	1768	2123	1079	6626	7574	715	17016	7091	53226	3449	3369	1
d2	2195	2074	3	6845	7251	735	7629	6994	51747	3358	960	1
d3	2536	2384	-1623	7513	8493	869	16838	8290	47215	3882	2966	1

续表

编码 Code	生态系统服务价值均值 Ecosystem services value/(元/hm ²)											
	<i>F</i>	<i>Rm</i>	<i>W</i>	<i>P</i>	<i>D</i>	<i>C</i>	<i>S</i>	<i>A</i>	<i>H</i>	<i>B</i>	<i>R</i>	<i>E</i>
d4	2059	1762	1686	6262	6277	621	13765	5841	70449	3038	5346	1
e1	1817	1005	3284	6332	4767	406	9577	3742	139115	2670	11901	8
e2	1439	701	11288	5085	3468	288	6218	2596	224419	2027	8567	4
e3	1662	1183	-800	4613	4516	466	13664	4299	82777	2201	7398	20
e4	1383	1092	1648	4249	4115	401	10739	3761	72187	2031	8367	7
f1	1637	2196	4141	7017	8077	736	17261	7443	91027	3657	2899	3
f2	1858	2297	562	6580	7934	772	25101	7617	39735	3537	5445	7
f3	2458	1983	-131	6631	7134	738	19285	6922	50070	3356	3846	5
f4	1711	2186	780	6589	7724	726	14361	7258	41947	3476	3477	1
f5	2935	2134	-989	6650	7020	796	11646	7197	43472	3295	2654	1
g1	2264	1635	167	5064	5226	593	8493	5317	41326	2487	5198	1
g2	2194	1528	-902	6147	5759	581	10742	5371	54979	2868	7514	2
h1	2684	1753	569	4961	4988	643	1604	5458	60193	2370	1761	5
h2	2054	1229	1446	3650	2807	403	522	3152	30527	1450	4124	11
h3	2688	1492	-1500	4072	4100	582	4051	4733	40511	1983	3084	2
h4	2668	1948	-1714	6457	6814	753	9498	6849	54272	3214	3569	1
J	2358	1584	722	4084	4009	532	1411	4402	26456	1952	4635	2

3.2.2 冷热点聚集特征

生态系统服务价值的 G_i^* 指数冷热点聚类分析结果如图 5。广东省生态系统服务价值以没有显著聚类的区域居多,即图中黄色区域成片并且面积占绝对大的比例,面积百分比在 69.9%—89.6%之间(表 5)。按照冷热点聚集分别统计其面积百分比,可进一步发现热点聚集较普遍,如食物供给、水资源、净化环境、土壤维持、水文调节、美学景观、游憩娱乐和科研教育共 8 个类型热点聚集较各自冷点聚集的面积百分比值大。

表 5 生态系统服务价值冷热点聚集类型占区域总面积的百分比/%

Table 5 Area percentage per cold/hot spot to the study area for each ecosystem service

生态系统服务类型 Types of ecosystem services	冷热点聚集模式及统计显著性检验 Cold/hot spot Aggregation mode and test of significance									
	冷点及置信度					聚集不显著	热点及置信度			
	99%	95%	90%	面积占比总和	99%		95%	90%	面积占比总和	
<i>F</i>	—	4.4	—	4.4	89.6	—	6.0	—	6.0	
<i>Rm</i>	5.5	7.0	—	12.5	81.7	5.9	—	—	5.9	
<i>W</i>	—	—	1.1	1.1	89.2	—	—	9.7	9.7	
<i>P</i>	4.8	1.9	—	6.7	76.9	—	—	16.4	16.4	
<i>D</i>	4.8	6.7	2.3	13.7	80.5	5.9	—	—	5.9	
<i>C</i>	5.5	11.0	0.7	17.2	70.5	12.3	—	—	12.3	
<i>S</i>	8.2	3.2	—	11.4	69.9	11.4	1.3	6.0	18.7	
<i>A</i>	6.2	8.3	2.8	17.2	76.9	5.9	—	—	5.9	
<i>H</i>	—	—	—	0.0	87.5	—	—	12.5	12.5	
<i>B</i>	4.8	1.9	6.2	12.9	70.2	16.8	—	—	16.8	
<i>R</i>	—	5.1	6.2	11.3	68.5	2.9	—	17.3	20.2	
<i>E</i>	—	1.1	5.3	6.4	86.1	4.6	—	2.9	7.5	

具体的空间聚类特征因生态系统服务类型而异(表 5)。如:食物供给服务聚类程度较低,聚集不显著区域达 89.6%,仅粤北南岭生态功能区有 4.4%的冷点区域(a5、a6),粤西沿海经济片区(h1、h4)有 6%的热点区

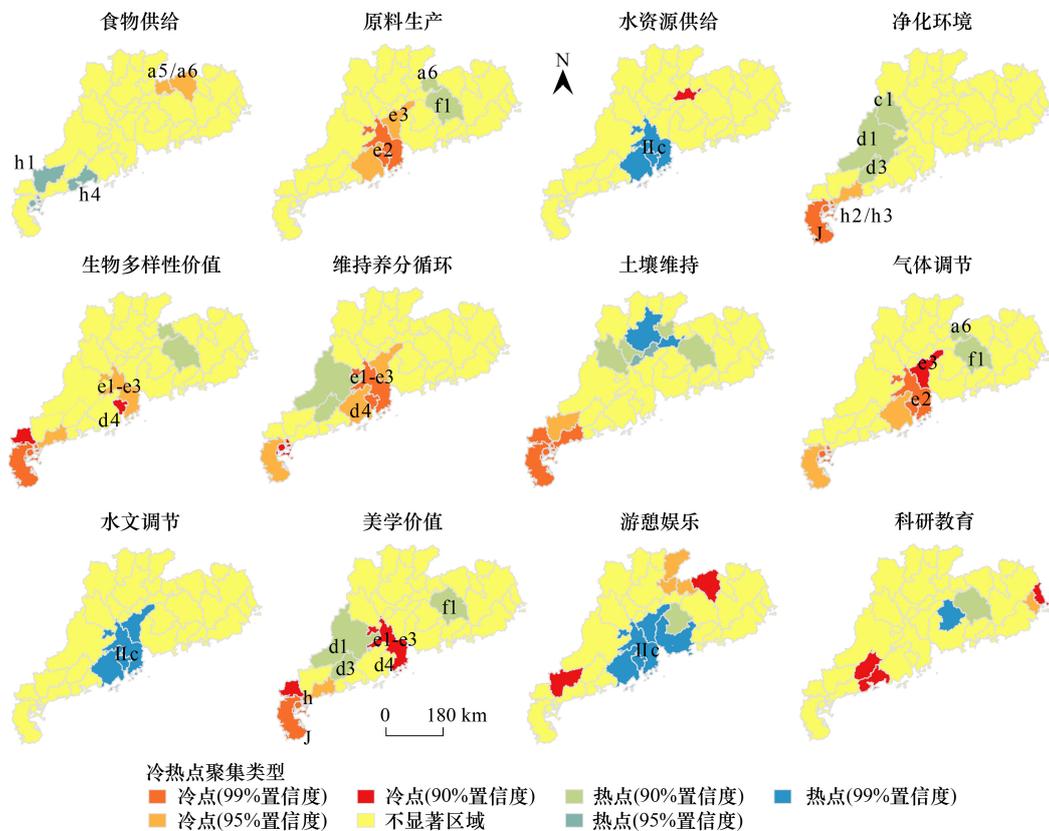


图5 广东省陆域生态系统服务的热点分析图

Fig.5 Hot spot analysis chart of terrestrial ecosystem services in Guangdong Province

域。净化环境服务的热点区主要分布于珠三角西部经济片区(c1、d1、d3),冷区主要分布于雷州半岛及周边沿海地区(J、h2、h3)。美学景观服务类型相对较丰富,拥有珠三角东部和西部经济片区(d1、d3、f1)几个热点聚集区,在雷州和粤西两个经济片区(J、h)形成冷点聚集区。在同一区域范围内,生态系统服务类型之间往往呈现出完全相同或相反的聚集类型。如:原料生产和气体调节在e2、e3和f1、a6三个区域表现出相同的冷热点聚集类型;这两种服务还与生物多样性价值、维持养分循环和美学价值在珠三角部分区域(d4、e1—e3)呈现相似的冷点聚集;然而,却与水资源供给、水文调节和游憩娱乐服务呈现出相反的聚集类型。

3.3 广东省陆域生态系统服务簇模式

3.3.1 生态系统服务簇空间分布模式

采用K-均值聚类方法,识别出5种生态系统服务簇模式:水文调节保护型、水土保持调节型、生态保育公园型、生态宜居和谐型、综合协调供给型。统计各生态系统服务簇的面积及区划单元个数,绘制成图6(各类型服务簇涵盖的市、区和县范围见表6)。生态系统服务簇空间分布模式多呈现南北延伸之势,一级区划单元内的中亚热带江南丘陵带全域为生态保育公园型,边缘热带琼雷地带大部分为综合协调供给型、小部分为水土保持调节型。南亚热带闽粤丘陵地带内生态系统服务簇类型较为齐全,涵盖了所有服务簇模式。生态宜居和谐型、水文调节保护型分布于珠三角核心经济片区东西两侧,珠三角东部经济片区和西部经济片区均以水土保持调节型为主,最西端还有一个综合协调供给型的服务簇单元(涵盖J、h1—h3和d2子区单元)。在二级区划单元内,往往包含一至多类生态系统服务簇,如生态保育公园型中的c1、c4与生态宜居和谐型的c2、c3属于同一个二级单元;同一种生态系统服务簇也会跨越不同的区划单元,如生态保育公园型服务簇同跨a、b、c、f四个二级单元,涵盖15个区划单元。表明受地形、地貌等自然地理环境和土地利用等人类活动的影响,生态系统服务簇呈现空间自相关性、空间聚集特征。

表 6 广东省陆域生态系统服务簇及其分布的市区县范围

Table 6 Identification of terrestrial ecosystem services cluster in Guangdong Province

流域单元分区 Zone code	服务簇类型 Partition type	地级市 Prefecture-level city	区县名称 County
a1	生态保育公园型	清远市	连州市、连山壮族瑶族自治县、连南瑶族自治县、阳山县
a2	生态保育公园型	韶关市	乐昌市、乳源瑶族自治县
a3	生态保育公园型		仁化县
a4	生态保育公园型		南雄市、始兴县
a5	生态保育公园型		翁源县
a6	生态保育公园型	河源市	连平县
a7	生态保育公园型		和平县、龙川县
a8	生态保育公园型	梅州市	蕉岭县、平远县、兴宁市
b	生态保育公园型	韶关市、清远市	韶关市的浈江区、武江区、曲江区, 清远市的英德市
c1	生态保育公园型	肇庆市	怀集县、广宁县
c2	生态宜居和谐型	清远市	清新区
c3	生态宜居和谐型		清城区、佛冈县
c4	生态保育公园型	韶关市	新丰县
c5	生态宜居和谐型	惠州市	龙门县、博罗县
d1	水土保持调节型	肇庆市、云浮市、茂名市	肇庆市的封开县、德庆县、高要市, 云浮市的郁南县、云城区、云安县、罗定市、新兴县, 茂名市的信宜市
d2	综合协调供给型	茂名市	化州市、高州市
d3	水土保持调节型	阳江市	阳春市
d4	水源调节保护型	江门市	恩平市、开平市、台山市、鹤山市
e1	水源调节保护型		新会区
e2	水源调节保护型	广州市、佛山市、江门市、中山市、珠海市、肇庆市	广州市的南沙区, 佛山市三水区、南海区、禅城区、高明区、顺德区, 江门市的蓬江区、江海区, 中山市、珠海市的香洲区、金湾区、斗门区, 肇庆市的端州区、鼎湖区
e3	水源调节保护型	广州市	广州市的从化区、花都区、白云区、越秀区、荔湾区、天河区、黄埔区、海珠区、番禺区
e4	生态宜居和谐型	广州市、东莞市、惠州市、深圳市	广州市的增城区, 东莞市, 惠州市的惠城区、惠阳区, 深圳市的龙岗区、罗湖区、福田区、龙华区、坪山区、光明区、大鹏区、盐田区、宝安区、南山区
f1	生态保育公园型	河源市	东源县、源城区、紫金县
f2	生态保育公园型	惠州市	惠东县
f3	生态保育公园型	汕尾市	海丰县
f4	水土保持调节型	梅州市、揭阳市、汕尾市	梅州市的梅县区、梅江区、大埔县、丰顺县、五华县, 揭阳市的揭西县, 汕尾市的陆河县
f5	水土保持调节型	潮州市	饶平县
g1	水土保持调节型	揭阳市、汕头市、汕尾市	揭阳市的揭东区、榕城区、普宁市、惠来县, 汕头市的潮阳区、濠江区、潮南区、南澳县, 汕尾市的陆丰市
g2	水土保持调节型	潮州市	潮州市的潮安县、湘桥区、潮安县, 汕头市的澄海区、龙湖区
h1	综合协调供给型	湛江市	廉江市
h2	综合协调供给型	湛江市	坡头区、霞山区、麻章区
h3	综合协调供给型	茂名市、湛江市	茂名市的电白区, 湛江市的吴川市
h4	水土保持调节型	阳江市	阳西县、阳东县
J	综合协调供给型	湛江市	遂溪县、雷州市、徐闻县

生态保育公园型是研究区生态系统服务簇的主导模式,其面积高达 37.1%,分布于粤北广大山区及河源、惠州、汕尾等地。区域内地形地貌复杂,多高丘山地,森林面积广大,生态环境较好。其次,水土保持调节型的面积也达 28.5%,分布于粤东、粤西低山高丘以及沿海平原,主要包括韩江流域、漠阳江流域及西江部分流域,拥有台地丘陵、山地、阶地和平原多种地貌类型。余下水文调节保护型、综合协调供给型和生态宜居和谐型 3

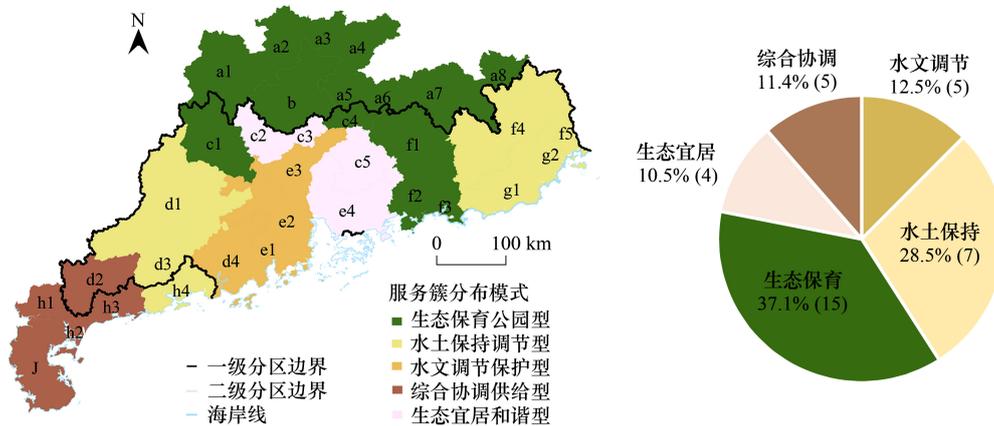


图6 广东省陆域生态系统服务簇空间分布模式图

Fig.6 Spatial distribution patterns of terrestrial ecosystem service clusters in Guangdong Province

左图中符号含义同图3;右图中水文调节 12.5(5)、水土保持 28(7)...等分别表示水文调节保护型、水土保持调节型...等服务簇类型的面积百分比(占总研究区)及其覆盖三级分区单元的个数

种服务簇区域的面积相差不大,面积百分比分别为 12.5%、11.4%和 10.5%。其中,水文调节保护型主要分布在中南部珠江口西部及北部的珠江三角洲地区,以建筑用地和耕地为主要土地利用类型,属于高强度人类活动开发区域。生态宜居和谐型分布于珠江三角洲东部和北部边缘地区,经济也较为发达,以建设用地为主要土地利用类型。综合协调供给型集中于粤西南雷州半岛区域及茂名市、湛江市地区,以山地丘陵为主,沿江沿海平原多农业、畜牧业、养殖业及工业主要用地,土地利用类型以耕地为主,是粤西和北部湾城市群的经济中心。

3.3.2 生态系统服务簇内部结构模式

以生态系统服务簇为单元,分别统计各生态系统服务类型的 z -score 均值,绘制结构模式图 7。生态系统服务簇具有以下结构模式:生态保育公园型以土壤维持和生物多样性的生态服务价值最大, z -score 均值分别为 1.34 和 1.18;原料生产、美学、生物多样性均具有较高的生态服务价值。水文调节保护型中,水文调节和水资源供给生态系统服务的单位面积生态服务价值明显高于其它簇,出现较高水平聚集现象,水文调节服务价值占全省总生态服务价值约 40%,水资源供给价值大幅度高于全省平均水平。

余下的 3 种生态系统服务簇中,水土保持调节型是土壤肥力高、粮食产量高的区域;食物供给的生态服务单位面积 z -score 平均值达到 1.27,是该簇的主导生态服务功能,气体调节、生物多样性等方面单位服务价值约保持为全省平均水平。综合协调供给型的土壤维持单位面积 z -score 平均值相对全省达到 -2.93 的极低水平,而该簇主导食物供给服务单位面积 z -score 平均值达到 1.77 的最高水平。生态宜居和谐型中,游憩娱乐和科研教育单位服务价值达到较高水平,科研教育成为该簇的主导生态服务功能, z -score 平均值达到 1.69 的较高水平;食物供给、原料生产、气体调节、净化环境等生态方面的单位服务价值均保持较低水平,并且出现各类中低值聚类。

4 讨论

4.1 基于地域区划方案的生态系统簇识别与分析的可行性

进行生态系统服务簇模式识别与特征分析,可为有的放矢管理生态系统提供研究支撑,从而提高生态系统管理决策的针对性和工作效率^[42]。确定分析单元是生态系统服务簇模式识别的前提与基础,针对以行政区或规则格网为分析单元可能引起结果的不确定性^[10, 43-45]以及已有的区划方案可能存在片面性等问题^[1, 10],本文综合中国气候区划、农业自然区划和主体功能区划成果,基于三级流域单元对广东省陆域生态

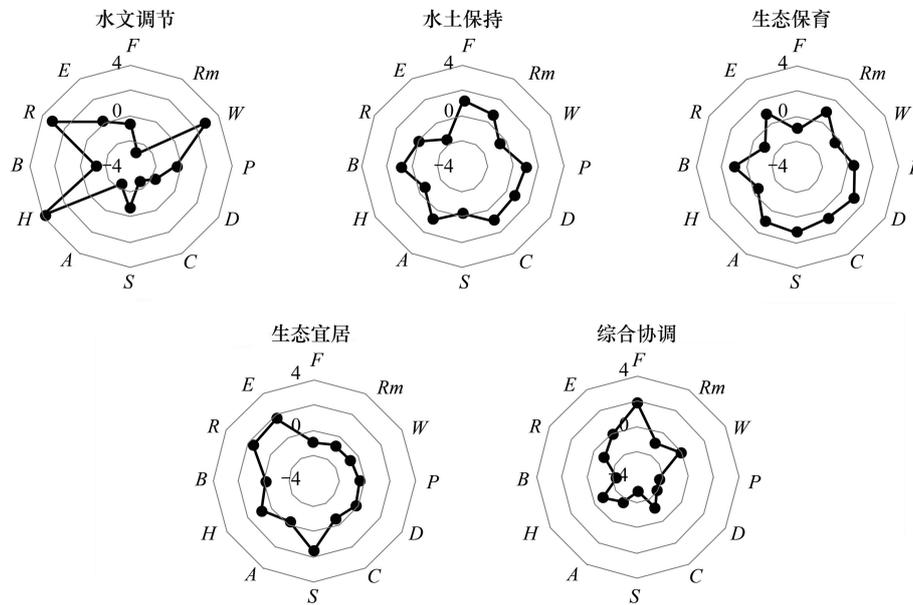


图7 广东省陆域生态系统服务簇结构模式(Z-score)

Fig.7 Z-score per ecosystem service cluster schema diagram in Guangdong Province

F:食物供给 Food supply; Rm:原料生产 Raw material production; W:水资源 Water resources supply; P:净化环境 Environmental purification; D:生物多样性价值 Biological diversity value; C:维持养分循环 Maintaining nutrient cycle; S:土壤维持 Soil conservation; A:气体调节 Air regulation; H:水文调节 Hydrological regulation; B:美学景观 Beauty; R:游憩娱乐 Recreation and tourism; E:科研教育 Scientific research and education; 水文调节、水土保持、生态保育、生态宜居和综合协调分别对应于水文调节保护型、水土保持调节型、生态保育公园型、生态宜居和谐型、综合协调供给型共5种生态系统服务簇

系统进行三级地域划分。其中,气温和降水是深刻影响生态系统结构和功能的重要限制因子,我国划定的主体功能区最直接全面地贯彻了人与自然和谐的生态文明思想^[46-48],流域则是自然—社会—经济复合系统^[1,49],结合气候、农业、主体功能区以及三级流域单元进行的地域区划,是尝试建立一套保持生态系统结构和功能完整单元的区域区划方案。

广东省地形起伏较大,地势四周高中间低,自然地理环境与高强度人类活动的区域差异形成生态系统服务冷热点显著,生态系统服务簇模式的空间异质特征。中南部低地势区域是珠三角城市群和人口密集分布地,区内土地开发利用程度高,人类对生态系统的干扰或破坏突出,环境和谐需要层次服务普遍较低^[50],表现为气体调节、美学价值、维持养分循环等服务呈现冷点聚集区域,生态系统服务簇则为生态宜居和谐和水文调节保护两种模式。由于旅游景区丰富和接待人数较多,心理满足需要层次服务为其优势的生态系统服务类型^[51],如为游憩娱乐服务的热点区。得益于丰富的珠江水系资源和历年构筑的堤围、基塘两种水文调节地貌^[52],珠三角西翼为水资源供给和水文调节服务的热点区。粤北、粤东等广大丘陵地区土地利用以森林、草地为主,为生态保育公园和水土保持调节型生态系统服务簇模式。其中,由于粤北是广东省的重要生态屏障和走廊,生态系统得到较好的保护^[53],这些区域也成为土壤维持、净化环境和维持养分循环等生态系统服务的热点区。随着经济社会发展,雷州半岛等边缘热带区域生态空间被挤压:天然森林植被也经历过巨大变迁,桉树纯林比重过大等问题,产生水土流失加剧、结构性缺水等隐患,深刻影响当地生态环境,使得土壤维持、生物多样性等服务能力低下^[54],生态系统服务簇模式呈现为综合协调供给型。

以上结果表明,基于地域区划方案的生态系统服务簇识别与分析的研究结果较为符合实际,显示该研究方案与思路的合理性。尽管如此,一方面,由于研究数据可得性的问题,本文单独对游憩娱乐和科研教育价值进行评估,计算结果的准确性可能会对服务簇模式识别有一些影响。为减少这种数据一致性和计算准确性的

影响,本文首先将 12 种生态系统服务价值进行归一化处理,可最大程度降低数据对研究结果的影响。另一方面,几种区划边界也存在不完全套合的问题,我们的处理方案是以三级流域单元为准,自下而上对一、二级区划边界进行微调,以最大化保持流域单元和生态系统的完整性,这在一定程度上可能会影响到分区方案的科学性。目前,机器学习(Machine Learning)已被应用于数据挖掘,它是可以利用已知知识解决新问题,广泛用于解决分类、回归和聚类等方法^[55]。如果未来将机器学习运用于区域区划,相信可以较好地解决这一问题,提高生态系统服务簇识别的准确性和科学性。

4.2 基于生态系统服务簇差异化的生态系统管控启示

研究识别出 5 种生态系统服务簇,其所在区域都各具独特的地形和地理特征,承担着不同的生态服务功能。继“一核一带一区”国土空间新格局方案,广东省正贯彻落实“三线一单”生态环境分区管控方案^[56],基于本研究和相关文献成果^[57-64],提出分级分区重点实施生态系统服务簇差异化的生态系统管控措施建议。

主要的两种生态系统服务簇模式——生态保育公园型和水土保持调节型,面积占比高达 65.6%。区域均以丘陵山地地貌为主,森林为其主要土地利用类型,坚持生态优先成为区域可持续发展中的重点任务^[57]。其中,生态保育公园型分布于粤北广大山区及河源、惠州、汕尾等地,是保护和修复生态环境、提供生态产品的重要区域。应在限制开发强度的前提下,营造生态景观,提升生态游憩服务^[58]。水土保持调节型分为东西两部分,需要分级分片进行生态系统管控:对于低山丘陵地区,完善重点生态功能区的生态补偿制度,优化生态条件,进一步发展生态产业^[59]。对于平原沿海地区,注重保护、改良和合理利用水土资源,保土蓄水,营造防护林带^[60]。

余下的三种生态系统服务簇模式——生态宜居和谐型、水文调节保护型和综合协调供给型。该区域是人口密集和经济发达地区,生态保护与经济社会协调发展是其主方向。其中,生态宜居和谐型区域的土地利用类型以建设用地为主,需充分提升生态绿地、水系等生态空间的质量,营造绿色生态城市空间,力争走节约环保、绿色低碳和可持续发展的人地协调新模式^[61]。水文调节保护型位于人类活动开发程度高的区域,可通过三角洲联围治理及河流梯级开发^[62],需持续加强重点流域和河口水污染物的排放控制,完善绿色基础设施,推动生产生活污水处理的提质增效^[63]。综合协调供给型分布于粤西和北部湾城市群的经济中心,区内多农业及工业用地,需建设生态廊道,守住生态红线,全面提升生态系统稳定性^[57,64]。

5 结论

广东省陆域系统具有较高的空间异质性,全域覆盖中亚热带江南丘陵地带、南亚热带闽粤丘陵地带和边缘热带琼雷地带 3 个自然地带,涵盖 9 个经济片区或者 34 个流域单元。区内 12 项典型生态系统服务呈簇出现,共识别出水文调节保护型、水土保持调节型、生态保育公园型、生态宜居和谐型、综合协调供给型 5 种服务簇结构模式,各自具有独特的地形地貌特征,承担着不同的生态服务功能。同类生态系统服务簇在空间上聚集现象较明显,大致以珠三角为核心的对称分布,与各级区划单元边界也有一定程度上的吻合,但仍然表现出跨越行政边界和自然地理分区边界、空间上连贯的特征。生态系统服务簇的差异化与模式识别成果可进一步支撑区域性、差异化的国土空间规划实践。

参考文献(References):

- [1] 苏常红,傅伯杰.景观格局与生态过程的关系及其对生态系统服务的影响.自然杂志,2012,34(5):277-283.
- [2] 申嘉澍,梁泽,刘来保,李德龙,张亚彤,李双成.雄安新区生态系统服务簇权衡与协同.地理研究,2020,39(1):79-91.
- [3] 孙刚,盛连喜,周道玮.生态系统服务及其保护策略.应用生态学报,1999,10(3):365-368.
- [4] 闫晓露,李欣媛,刘澄浩,李佳伟,钟敬秋.生态系统服务簇空间演变轨迹及其社会-生态驱动的地理探测——以大连市为例.生态学报,2022,42(14):5734-5747.
- [5] Cord A F, Bartkowski B, Beckmann M, Dittrich A, Hermans-Neumann K, Kaim A, Lienhoop N, Locher-Krause K, Priess J, Schröter-Schlaack C, Schwarz N, Seppelt R, Strauch M, Václavík T, Volk M. Towards systematic analyses of ecosystem service trade-offs and synergies: main

- concepts, methods and the road ahead. *Ecosystem Services*, 2017, 28: 264-272.
- [6] Kareiva P, Watts S, McDonald R, Boucher T. Domesticated nature: shaping landscapes and ecosystems for human welfare. *Science*, 2007, 316 (5833): 1866-1869.
- [7] 张静. 国内土地生态系统服务价值研究述评. *陕西理工学院学报: 社会科学版*, 2016, 34(3): 84-88, 104.
- [8] 冯兆, 彭建, 吴健生. 基于生态系统服务簇的深圳市生态系统服务时空演变轨迹研究. *生态学报*, 2020, 40(8): 2545-2554.
- [9] 吴健生, 钟晓红, 彭建, 秦维. 基于生态系统服务簇的小尺度区域生态用地功能分类——以重庆两江新区为例. *生态学报*, 2015, 35 (11): 3808-3816.
- [10] 李慧蕾, 彭建, 胡熠娜, 武文欢. 基于生态系统服务簇的内蒙古自治区生态功能分区. *应用生态学报*, 2017, 28(8): 2657-2666.
- [11] 黄秉维. 中国综合自然区划的初步草案. *地理学报*, 1958, 13(4): 348-365.
- [12] 李双成. *生态系统服务地理学*. 北京: 科学出版社, 2014.
- [13] 郑度. 关于地理学的区域性和地域分异研究. *地理研究*, 1998, 17(1): 4-9.
- [14] 刘燕华, 郑度, 葛全胜, 吴绍洪, 张雪芹, 戴尔阜, 张德铨, 杨勤业. 关于开展中国综合区划研究若干问题的认识. *地理研究*, 2005, 24 (3): 321-329.
- [15] 林浩曦, 黄金川, 效存德, 漆潇潇, 陈云谦. 冰冻圈服务综合区划理论与方法. *地理学报*, 2020, 75(3): 631-646.
- [16] 熊善高, 秦昌波, 于雷, 路路, 关杨, 万军, 李新. 基于生态系统服务功能和生态敏感性的生态空间划定研究——以南宁市为例. *生态学报*, 2018, 38(22): 7899-7911.
- [17] 中国科学院《中国自然地理》编辑委员会. *中国自然地理: 总论*. 北京: 科学出版社, 1985: 1-161.
- [18] 丘宝剑. 《中国农业自然区划图表》的一些说明. *河南大学学报: 自然科学版*, 1992, 22(4): 69-73.
- [19] 李宪坡, 袁开国. 关于主体功能区划若干问题的思考. *现代城市研究*, 2007, 22(7): 28-34.
- [20] 樊杰. 中国主体功能区划方案. *地理学报*, 2015, 70(2): 186-201.
- [21] 张凌格, 胡宁科. 内陆河流域生态系统服务研究进展. *陕西师范大学学报: 自然科学版*, 2022, 50(4): 1-12.
- [22] 丘水林, 靳乐山. 生态产品价值实现: 理论基础、基本逻辑与主要模式. *农业经济*, 2021(4): 106-108.
- [23] 郭宗亮, 刘亚楠, 张璐, 冯朝阳, 陈艳梅. 生态系统服务研究进展与展望. *环境工程技术学报*, 2022, 12(3): 928-936.
- [24] 广东省气象局资料室. *广东气候*. 广州: 广东科技出版社, 1987.
- [25] 曾昭璇, 黄伟峰. *广东自然地理*. 广州: 广东人民出版社, 2001.
- [26] 徐新良. *中国陆地生态系统服务价值空间分布数据集*. 中国科学院资源环境科学数据中心数据注册与出版系统, 2018.
- [27] De Groot R S. *Functions of Nature: Evaluation of Nature in Environmental Planning, Management and Decision Making*. Amsterdam Wolters-Noordhoff, 1992: 22-25.
- [28] 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.
- [29] 张彪, 谢高地, 肖玉, 伦飞. 基于人类需求的生态系统服务分类. *中国人口·资源与环境*, 2010, 20(6): 64-67.
- [30] Millennium Ecosystem Assessment (MEA). *Ecosystems and Human Well-Being: A Framework for Assessment*. Report of the Conceptual Framework Working Group of the Millennium Ecosystem Assessment. Washington: Island Press, 2003: 245.
- [31] 尹杰钦, 滕茜茜, 聂川. 新时代人民美好生活需要: 依据、维度及特点. *湖南科技大学学报: 社会科学版*, 2021, 24(1): 166-173.
- [32] 李琰, 李双成, 高阳, 王羊. 连接多层次人类福祉的生态系统服务分类框架. *地理学报*, 2013, 68(8): 1038-1047.
- [33] 李双成, 刘金龙, 张才玉, 赵志强. 生态系统服务研究动态及地理学研究范式. *地理学报*, 2011, 66(12): 1618-1630.
- [34] 吴松, 安裕伦, 马良瑞. 城市化背景下喀斯特流域生态服务价值时空分异特征——以贵阳市南明河流域为例. *长江流域资源与环境*, 2015, 24(9): 1591-1598.
- [35] 胡抚生. 旅游目的地形象对游客推荐意愿、支付意愿的影响研究——以杭州为例[D]. 杭州: 浙江大学, 2009.
- [36] 栗晓玲, 康绍忠, 佟玲. 内陆河流域生态系统服务价值的动态估算方法与应用——以甘肃河西走廊石羊河流域为例. *生态学报*, 2006, 26(6): 2011-2019.
- [37] 周文昌, 张维, 胡兴宜, 付甜, 史玉虎. 湖北省湿地生态系统的服务价值评估. *水土保持通报*, 2021, 41(3): 305-311, 364.
- [38] 刘彩娥. 把论文写在祖国大地上——国内科研论文外流现象分析. *北京工业大学学报: 社会科学版*, 2018, 18(2): 64-72.
- [39] Mitchell A. *The ESRI Guide to GIS Analysis, v.2*. Redlands: ESRI Press, 2005.
- [40] Jain A K. Data clustering: 50 years beyond K-means. *Pattern Recognition Letters*, 2010, 31(8): 651-666.
- [41] 王千, 王成, 冯振元, 叶金凤. K-means 聚类算法研究综述. *电子设计工程*, 2012, 20(7): 21-24.
- [42] 戴尔阜, 王晓莉, 朱建佳, 赵东升. 生态系统服务权衡: 方法、模型与研究框架. *地理研究*, 2016, 35(6): 1005-1016.
- [43] Raudsepp-Hearne C, Peterson G D, Bennett E M. Ecosystem service bundles for analyzing tradeoffs in diverse landscapes. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2010, 107(11): 5242-5247.

- [44] Cao Y, Cao Y, Li G Y, Tian Y H, Fang X Q, Li Y, Tan Y Z. Linking ecosystem services trade-offs, bundles and hotspot identification with cropland management in the coastal Hangzhou Bay area of China. *Land Use Policy*, 2020, 97: 104689.
- [45] 张碧天, 闵庆文, 焦雯珺, 何思源, 刘某承, 杨伦. 生态系统服务权衡研究进展. *生态学报*, 2021, 41(14): 5517-5532.
- [46] 樊杰, 赵艳楠. 面向现代化的中国区域发展格局:科学内涵与战略重点. *经济地理*, 2021, 41(1): 1-9.
- [47] 樊杰, 郭锐. “十四五”时期国土空间治理的科学基础与战略举措. *城市规划学刊*, 2021(3): 15-20.
- [48] 李代超, 卢嘉奇, 谢晓苇, 虞虎, 李元, 吴升. 碳中和视角下基于主体功能区分类约束的国土空间分区优化模拟——以福建省为例. *生态学报*, 2022, 42(24): 10111-10126.
- [49] 袁兴中, 陈鸿飞, 扈玉兴. 国土空间生态修复:理论认知与技术范式. *西部人居环境学刊*, 2020, 35(4): 1-8.
- [50] 周永杰, 易灵, 邝红艳, 何煜然, 杨大勇, 周丽旋. 粤港澳大湾区生态系统演变及其服务价值研究. *环境保护*, 2019, 47(23): 56-60.
- [51] 王甫园, 王开泳, 郑鑫, 林明水. 珠三角城市群生态空间游憩利用扩展格局及影响因素. *生态学报*, 2021, 41(17): 7049-7062.
- [52] 陈彩霞, 叶玉瑶, 黄光庆, 宫清华, 刘旭拢. 粤港澳大湾区基塘多功能性尺度效应及生态修复策略. *生态学报*, 2021, 41(9): 3394-3405.
- [53] 袁少雄, 宫清华, 陈军等. 广东省自然保护区生态网络评价及其生态修复建议. *热带地理*, 2021, 41(2): 431-440.
- [54] 郑洁玮, 杨沅志, 陈传国, 简阳. 基于生态修复目标下的森林经营管理分析——以广东雷州半岛为例. *林业勘查设计*, 2022, 51(5): 12-15.
- [55] 赵雨, 白宇, 员学锋. 基于机器学习的贫困地区识别算法对比——以陕西省为例. *地理科学*, 2022, 42(8): 1421-1432.
- [56] 广东省人民政府. 广东省人民政府关于印发广东省“三线一单”生态环境分区管控方案的通知. *广东省人民政府公报*, 2021(1): 3-13.
- [57] 王浩, 马星, 杜勇. 基于生态系统服务重要性和生态敏感性的广东省生态安全格局构建. *生态学报*, 2021, 41(5): 1705-1715.
- [58] 石宇, 韩蕊, 郭添. 基于地形梯度的南方丘陵山地生态系统服务价值对城市化的空间响应——以粤北地区为例. *生态学报*, 2021, 41(18): 7238-7248.
- [59] 邹璐, 王国权, 刘良源. 次生林封育与森林生态产业研究——以东江源区森林生态产业为例. *江西科学*, 2010, 28(1): 24-27, 50.
- [60] 罗仁泽. 城市海岸带地区空间管制研究——以惠州市为例. *城市建筑*, 2020, 17(12): 40-42.
- [61] 单樑, 周亚琦, 荆万里, 周正. 高密度超大城市的人居环境营造——深圳市宜居家园城市建设探索与实践. 面向高质量发展的空间治理——2020中国城市规划年会论文集(07城市设计). 成都, 2021: 1238-1245.
- [62] 李化雪, 贺新春, 汝向文, 张丽. 珠江三角洲中珠联围供水安全现状及对策研究. *人民珠江*, 2016, 37(1): 34-37.
- [63] 姜海萍, 朱远生, 刘斌, 刘丽诗. 浅析西江干流开展生态调度的必要性. *人民珠江*, 2016, 37(6): 28-31.
- [64] 吴素芳. 粤西沿海经济带高质量发展路径研究——基于SWOT模型. *现代商贸工业*, 2020, 41(6): 6-7.