北部湾典型海岛生态系统服务价值空间异质性对比研究

田义超[1,2,3], 黄远林[1], 张　强[1], 陶　进[1], 张亚丽[1], 黄　鹄[2], 梁铭忠[2], 周国清[3]

(1. 北部湾大学 资源与环境学院, 广西 钦州 535011; 2. 北部湾大学 海洋地理信息资源开发利用重点实验室, 广西 钦州 535011; 3. 桂林理工大学 广西空间信息与测绘重点实验室, 广西 桂林 541004)

摘要: 基于北部湾海域典型海岛高分 1 号数据, 借助于 CART 决策树方法, 获取了广西北部湾两个典型海岛的景观格局数据, 并采用生态系统服务价值计量模型、空间自相关模型及地统计学中的变异函数模型对其生态系统服务价值进行了空间异质性分析。结果表明: 团和岛单位面积生态系统服务价值是七星岛的 1.08 倍, 但其变异系数低于七星岛; 七星岛由于其地质背景为泥沙岛, 景观格局受到人类活动以及自然环境的强烈干扰, 趋向于复杂化和破碎化; 而团和岛由于所处的外部环境以及自身的地质特征, 景观格局呈现出整体斑块化分布状态; 团和岛的景观格局主要受到结构性因素的控制, 而七星岛则以随机性因素控制为主, 选用变程和 Moran's 指数来表征其复杂化和破碎化, 来决定其优先开发时序, 可对前者进行适当开发, 而对后者适当进行生态保护; 对受到结构性因素影响的岛屿在进行开发时, 时序的识别选用变程和 Moran's 指数来表征, 若变程和 Moran's 指数越小, 说明海岛整体的景观分布格局趋向于复杂化和破碎化, 反之生态系统较好, 可进行优先开发。同时本文构建了北部湾海岛生态系统异质性评估与自然资源管理框架, 并提出了海岛管理的建议与对策。

关键词: 景观格局; 生态系统服务; 空间异质性; 对比研究; 广西北部湾典型海岛

中图分类号: X196　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-3096(2019)02-0060-09

DOI: 10.11759/hykx20180610001

海岛作为我国发展海洋经济不可缺少的一部分, 既是保护海洋环境、维护生态平衡的重要的平台, 也是保障国防安全的战略前沿[1]。近年来, 随着人类活动的加剧, 海岛生态系统受到外界的干扰程度越来越大。不同海岛所处的自然环境和外部环境存在着显著的差异, 导致不同海岛生态系统服务能力各不相同, 因此, 如何采用科学合理的评估方法对海岛的生态系统进行定量化研究, 以便更有效地实现海岛的可持续利用与管理, 可为海岛的开发、利用与规划提供科学依据。

目前国内外众多学者对生态系统服务进行了科学的评估, 已成为生态学、环境科学以及地理学研究的重点和热点内容[2-3]。1997 年, Costanza 等[2]学者对全球生态系统服务进行了全面、系统的评估, 这些成果为生态系统服务的定量化研究奠定了基础。国内众多学者采用此方法对中国陆域生态系统开展了大量的研究, 涉及的尺度包括行政区、自然保护区以及流域等[4-5]。在海岛价值量评估方面, 国内学者分别从能值、机会成本法、替代工程法、影子评估法等[6-7]视角对其价值量进行了评估。但是, 由于海岛是一个独立的生态系统, 内部生态系统的景观格局变化具有空间异质性, 从整体上研究海岛生态系统价值量很难揭示海岛内部生境的细微差别。因此, 加强对海岛生态系统服务价值的异质性研究就显得格外重要。

海岛植被景观异质性作为海岛生态系统健康的表现形式之一, 如何定量识别具有海洋和陆地的双重特性的海岛景观异质性过程是海岛生态学研究的基础。广西北部湾海岛按照地质地貌类型大致上可

收稿日期: 2018-06-10; 修回日期: 2018-09-01

基金项目: 广西自然科学基金联合资助培育项目(2018JJA150135, 41401644); 广西创新驱动发展专项(AA18118038); 广西教育厅基金资助项目(ZD2014138); 广西北部湾海洋生物多样性养护重点实验项目(2015ZB07); 广西海洋生态院士工作站能力建设项目(AD17129046)

[Foundation: Joint funds of Guangxi Natural Science Foundation, No.2018 JJA150135, No.41401644; Guangxi innovative Development, No.AA18118038; The Scientific Research Fundation of the Education Department of Guangxi, No.ZD2014138; Guangxi Key Laboratory of Beibu Gulf Marine Biodiversity Conservation, No.2015ZB07; Guangxi "Marine Ecological Environment" Academician Workstaion Capacity Construction, No. AD17129046]

作者简介: 田义超(1986-), 男, 陕西西安人, 博士, 工程师, 主要从事资源环境遥感及海岸带生态环境监测的相关研究, 电话: 18377799860, E-mail: tianyichao1314@yeah.net; 黄远林, 通信作者, 湖南龙山人, 博士, 副教授, 主要从事资源环境遥感与 GIS 的相关研究, E-mail: huangyuanlin@yeah.net

以划分为基岩岛和泥沙岛两个大类，这两种地质结构所构成的海岛景观格局存在着显著的差异，研究不同地质背景下不同海岛生态系统服务对于了解海岛生态环境变化具有重要的意义。鉴于以生态系统服务价值作为海岛自然资源管理与决策的理念还未全面建立，相应的评价方法还不完善等问题，本研究基于分类与回归树方法[8]对不同地貌类型下典型海岛的景观格局进行解译，尝试性的将地统计学的理论与方法引入到海岛异质性研究中，并对典型海岛的生态系统价值量进行了研究，以期为广西北部湾地区海岛自然资源管理、生态系统优化提供理论和方法上的借鉴。

1 研究区概况

本文的两个典型海岛(图 1)位于东经 107°29′~110°20′，北纬 20°58′~22°50′，地处广西壮族自治区南部沿海城市——钦州市和合浦县。气候类型属于南亚热带季风气候，处在著名的亚洲东南部季风区内，太阳幅射强，季风环流明显。年均气温 21.7℃，年均降水量 1 658 mm，年总日照时数在 1 400~1 950 h，平均值 1 673 h。团和岛位于钦州市茅尾海的西部地区，该岛植被覆盖类型繁多，属于有居民基岩海岛、岛岸线长度为 12 832 m。七星岛位于合浦沙岗镇南流江出海口，属于典型的沙泥岛，因形似北斗七星座而名，岸线长度 11 201.6 m。

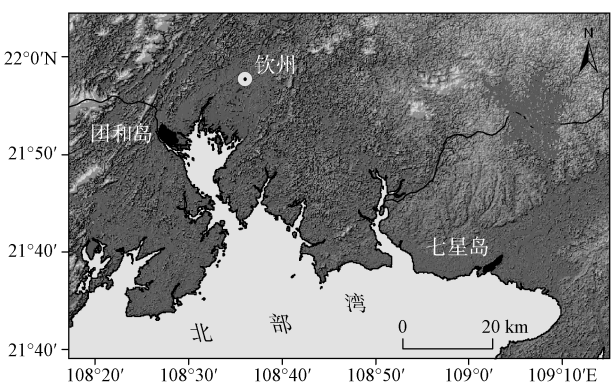

图 1 广西北部湾两个典型岛屿团和岛和七星岛的地理位置

Fig.1 Location of two typical islands in Thuanhe and Seven Star island in Beibu Gulf of Guangxi

2 数据来源与研究方法

2.1 数据来源

选用高分 1 号影像为数据源，基于分类与回归树 CART(Classification and Regression Trees)方法[8]对海岛的景观进行解译，采用《第二次全国土地调查技术规程》将其划分为耕地、林地、草地、建设用地、养殖水面、水体和田埂 7 类，为了解典型海岛景观及其生境状况，课题组先后对两个海岛的地质地貌及其外部环境进行了野外实地勘察，考察时通过手持GPS记录典型样本及其相应经纬度的景观类型，并对典型海岛的景观进行了拍照处理，以便后期使用该照片和野外观测数据对高分数据进行判读和验证。

2.2 价值计量模型

谢高地等学者依据 Costanza 等[2]的研究成果提出了中国生态系统服务价值当量表[9]，本文参考当量表的制定方法、标准和规范[10]，依据钦州市的实际情况对海岛生态系统价值当量系数进行修正：钦州市 2010—2018 年粮食的总产量为 109.93 万 t，粮食种植面积为 21 8291 hm^2，可推算出粮食的平均产量为 5 036.02 kg/hm^2，粮食平均收购价格为 1.23 元/kg，再考虑没有人力投入的自然生态系统提供的经济价值是现有单位面积农田提供的食物生产服务经济价值的 1/7[10]。可以算出 1 个当量因子的价值量为 884.90 元，利用单位面积生态系统服务价值当量表[10]可知不同景观类型的生态价值系数(表 1)。

2.3 空间自相关分析

空间自相关分析是用来分析空间变量的分布是否具有聚集特性，可通过空间自相关系数来进行度量，常用的指数为 Moran’s I 指数[11]。本文在对海岛价值量总体变化趋势描述时采用全局 Moran’s I 指数[11]，而对海岛价值量的局部空间自相关特性描述时则采用 LISA 指数[11]。

2.4 空间异质性

生态系统服务价值空间异质性研究所选采用的方法为半方差函数，它被定义为生态系统服务价值和其增量平方的数学期望[11]。价值量空间化时所选尺度为 60 m×60 m，半变异函数的方向为 S-W、N-S、NE-SW 及 NW-SE 四个方向。

3 结果与分析

3.1 总体特征

由表 2 可知，团和岛生态系统服务的总价值、最小值、最大值以及单位面积的价值量均大于七星岛，其中团和岛的单位价值量为 1.30 元/m^2，而七星岛为

1.20 元/m^2，前者是后者的 1.08 倍。七星岛的变异系数是团和岛的 1.03 倍，说明七星岛价值量的离散程度较高，这可能与七星岛属于泥沙岛，物质构成以冲积物为主，地势低平，景观格局易受到自然及人为条件的干扰，而团和岛则为基岩岛，地势起伏明显，岩石坚硬，景观格局相对稳定。

表 1　不同土地利用类型的生态系统服务价值系数[元/(hm^2·a)]
Tab. 1　The coefficient value of different land use types in the island [RMB/(hm^2·a)]

项目	耕地	林地	草地	建设用地	养殖水面	水体	田埂
气体调节	442.5	3 097.2	707.9	—	263.56	0	0
气候调节	787.6	2 389.2	796.4	—	1 064.57	407.1	169.8
水源涵养	530.9	2 831.7	707.9	—	9 699.96	18 034.3	7 524.3
土壤形成保护	1292	3 451.1	1725.6	—	211.88	8.8	3.7
废物处理	1451.2	1 159.2	1159.2	—	7 674.18	16 087.5	6 712
生物多样性维持	964.5	2 884.8	964.5	—	1 772.56	2 203.4	919.3
食物生产	884.9	88.5	265.5	—	273.89	88.5	36.9
原材料生产	88.5	2 300.7	44.2	—	180.87	8.8	3.7
休闲娱乐	8.8	1 132.7	35.4	—	2 294.5	3 840.5	1 602.3
合计	6 450.9	19 335.1	6 406.6	—	23 435.97	40 678.9	16 972

表 2　北部湾不同海岛生态系统服务价值总体特征
Tab. 2　Overall characteristics of ecosystem service value in different islands in Beibu Gulf

海岛	最小值/元	最大值/元	单位价值/(元/m^2)	单位价值倍数	变异系数	变异系数倍数	总价值/万元
团和岛	2.58	14 643.00	**1.30**	1.08	**1.87**	1.00	1 088.06
七星岛	2.56	8 433.00	**1.20**	1.00	**1.92**	1.03	437.50

3.2　异质性特征

3.2.1　各向同性特征

由变异函数表 3 可知，团和岛价值量的最佳拟合函数模型为球状模型(R^2=0.941，RSS=7.36×10^{-11})，而七星岛为指数模型(R^2=0.987, RSS=5.28×10^{-10})，因此在海岛价值量空间插值模型选择时，团和岛为球状模型，而七星岛为指数模型。

不同海岛的价值量拟合模型的 R^2 分别为 0.941 和 0.981，表明七星岛的指数模型拟合效果更好。块金值 C_0 表示半变异函数中变量纯随机性部分，文中团和岛的 C_0 显著小于七星岛，表明前者的随机性小于后者，说明团和岛的景观格局比七星岛稳定，这与团和岛的基质类型为基岩物质，而七星岛的基质为泥沙岛有一定关系；$C_0/(C_0+C)$表示随机因素占总变异程度的比重，反映变量的空间相关性大小[11]，团和岛的价值量 $C_0/(C_0+C)$为 0.246，属于强度空间自相关，而七星岛的 $C_0/(C_0+C)$值达到 0.449，说明七星岛的价值量为中等空间自相关。

表 3　北部湾不同海岛生态服务价值变异函数拟合模型参数
Tab. 3　Model parameters of isotropic variogram for ecosystem service value in different islands in Beibu Gulf

海岛	拟合模型	块金值(C_0)	基台值(C_0+C)	变程 a	块金值/基台值(C_0/(C_0+C))	R^2	RSS
团和岛	线性模型	4 223 765.21	6 769 891.69	2 148.60	0.376	0.693	3.80×10^{-12}
	球状模型	**1 500 000.00**	**6 094 000.00**	**852.00**	**0.246**	**0.941**	**7.36×10^{-11}**
	指数模型	2 570 000.00	6 029 000.00	866.00	0.574	0.903	1.20×10^{-12}
	高斯模型	3 004 000.00	6 009 000.00	687.62	0.500	0.896	1.28×10^{-12}
七星岛	线性模型	4 154 307.06	5 453 120.06	2 311.74	0.238	0.538	1.91×10^{-12}
	球状模型	50 000.00	4 940 000.00	226.00	0.990	0.660	1.41×10^{-12}
	指数模型	**2 303 000.00**	**5 124 000.00**	**807.00**	**0.449**	**0.987**	**5.28×10^{-10}**
	高斯模型	610 000.00	4 947 000.00	195.72	0.877	0.675	1.35×10^{-12}

3.2.2 各向异性特征

由各向异性拟合参数可知，不同海岛价值量在四个方向上的拟合模型均不相同。团和岛价值量在0°和45°方向上均为指数模型，而其余方向分别为线性模型和高斯模型，其变程介于7 017~13 250 m；七星岛的价值量在0°和90°方向上均为指数模型，而另外两个方向(45°和135°)分别为球状模型和高斯模型，其变程介于19 140~41 790 m。由于七星岛的变程显著大于团和岛，表明七星岛的价值量空间自相关程度小于团和岛。由价值量的 $C_0/(C_0+C)$可知，团和岛的空间自相关程度(0.261~0.314)大于七星岛(0.311~0.353)，说明两个海岛价值量在不同的方向上都呈现出中度空间自相关。

3.2.3 生态价值空间分布特征

由图 2 可知，团和岛单位价值量介于 8.44~11 240.01 元，而七星岛单位价值量介于 1 565.49~8 034.26 元，其平均值低于团和岛。团和岛价值量高值区分布于海岛的东北部及南部，单位价值量几乎超过 10 000 元，而低值区则主要集中在海岛的北部及北部向东南部的过渡地区，其值介于 10~15 元。七星岛的价值量高值区分布于海岛的西南部，单位价值量介于 7 000~8 000 之间，而低值区域则主要集中在海岛的中心地带和边缘道路地带，其值为1 600 元左右。

表 4 北部湾不同海岛生态服务价值各向异性理论模型及相关参数

Tab. 4 Anisotropic theoretical models and parameters of ecosystem service value in different islands in Beibu Gulf

海岛	角度/°	模型类型	块金值(C_0)	基台值(C_0+C)	变程 a	块金值/基台值 (C_0/C_0+C)	R^2	RSS
团和岛	0	指数模型	3 900 000.00	14 079 839.98	7 017.00	0.277	0.694	3.96×10^{-13}
	45	指数模型	4 040 000.00	14 629 839.98	13 250.00	0.276	0.674	4.08×10^{-13}
	90	线性模型	4 060 000.00	15 539 839.98	9 739.00	0.261	0.673	4.09×10^{-13}
	135	高斯模型	4 670 000.00	14 849 839.98	7 993.41	0.314	0.542	4.95×10^{-13}
七星岛	0	指数模型	4 177 000.00	13 411 509.72	19 140.00	0.311	0.451	5.39×10^{-13}
	45	球状模型	4 160 000.00	12 531 509.71	25 440.00	0.332	0.453	5.37×10^{-13}
	90	指数模型	4 056 000.00	12 427 509.72	41 790.00	0.326	0.472	5.25×10^{-13}
	135	高斯模型	4 575 000.00	12 946 509.72	15 003.02	0.353	0.311	6.04×10^{-13}

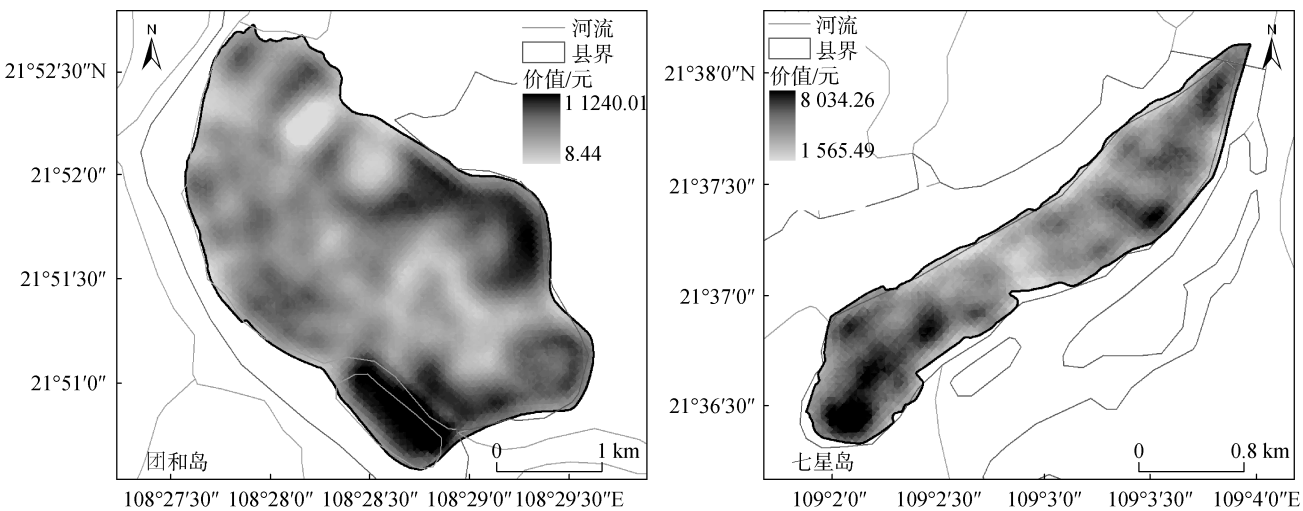

图 2 广西北部湾两个典型海岛团和岛和七星岛的生态服务价值 Kriging 插值

Fig. 2 Kriging of ecosystem service value in two typical islands in Thuanhe and Seven Star island in Beibu Gulf of Guangxi

3.3 空间自相关特征

3.3.1 全局空间自相关

为揭示不同海岛价值量的尺度效应，本文将海岛划分为 60 m×60 m、120 m×120 m 和 180 m×180 m 三个尺度。由团和岛价值量的 Moran's 指数(图 3)可知，其值整体上以大于 0 为主，局部地区如在 800~

1 200 m 的范围内小于 0，说明团和岛价值量在空间上表现出一定的聚集性。七星岛价值量的 Moran's 指数随着距离的增大呈现出正负交互状态，变化的阈值范围集中在 900 m，在 900 m 尺度之前表现出聚集性，而在该尺度之后则表现出随机特性。就不同尺度上的空间自相关性来说，团和岛价值量的 Moran's 指数随着尺度的增加，在空间上呈现出集中分布情况，生态系统服务价值之间的差异性减少，而趋同性增加；七星岛价值量的 Moran's 指数随着尺度的增加，在空间上呈现出减少趋势，说明七星岛的价值量之间的差异性增加，趋同性减少，这两种差异与两个典型岛屿的基质(基岩岛和泥沙岛)有着一定的关系。

3.3.2 局部空间自相关

两个海岛价值量的 Moran 散点(图 4)主要集中在第一象限和第三象限，第二象限和第四象限散点分布较少，说明两个海岛价值量局部 Moran 散点具有显著的正相关特性，价值量相近的格网在空间上呈现出集聚分布状态。团和岛价值量的 Moran's 指数显著高于七星岛，表明团和岛价值量的聚集化程度高于七星岛。

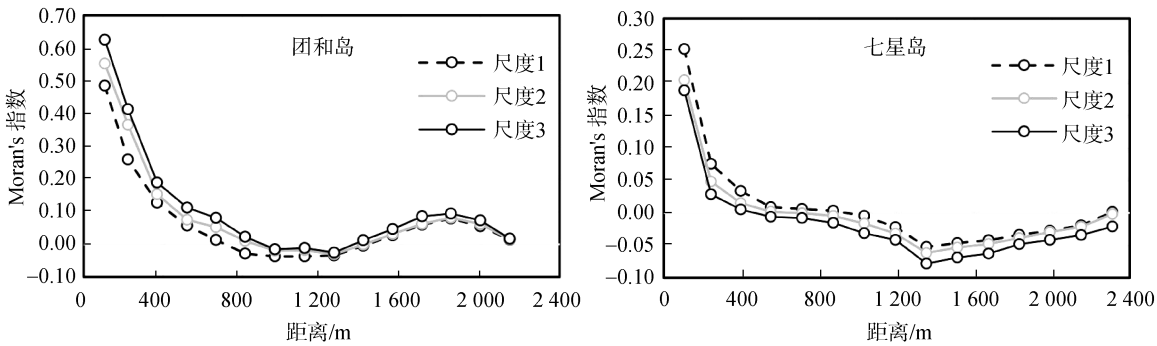

图 3 广西北部湾两个典型岛屿团和岛和七星岛的空间自相关的尺度效应

Fig. 3 Spatial autocorrelation scales of ecosystem services in two typical islands in Thuanhe and Seven Star island in Beibu Gulf of Guangxi

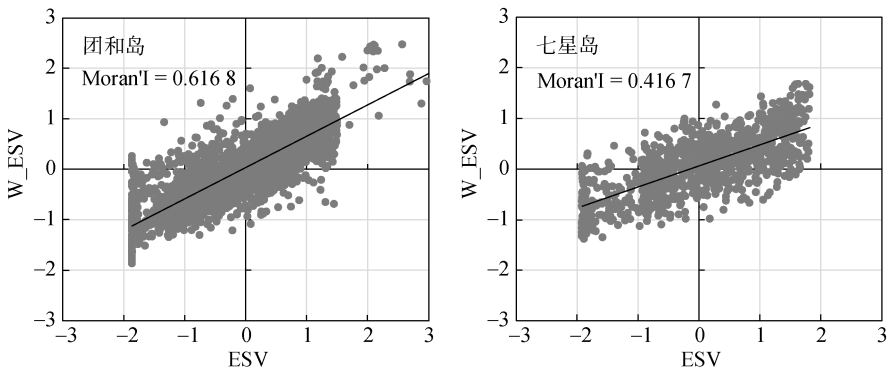

图 4 广西北部湾两个典型岛屿团和岛和七星岛的生态系统服务价值 Moran 散点图

Fig. 4 Moran scatter plot of ecosystem service value in two typical islands in Thuanhe and Seven Star island in Beibu Gulf of Guangxi

由图 5 可知，团和岛价值量以低低聚集为主，主要分布在岛屿的北部以及北部向东南部的过渡地带，前者通过了 0.001 的显著水平，而后者通过 0.01 的显著性水平，该区域海岛景观以大面积的建设用地、道路以及耕地斑块为主，导致该类地区价值量以低低为主，而高高聚集区主要集中在海岛东北部以及南部，东北部地区的价值量达到显著性水平为 0.01 的格网较多，南部地区则达到 P=0.001 的显著性水平较多，该类地区的景观格局主要以养殖水面和水体为主，价值量高高聚集主要与水域和养殖水面的水源涵养能力有关。七星岛价值量以高高聚集为主，主要集中在岛屿的西南及东北部，前者通过了 0.001 的显著性水平，而后者通过 0.01 的显著性水平，该部分区域价值量高高分布也是受到养殖水面的影响，而低值区则位于海岛的外围区域，该区主要受到外围道路以及建设用地的影响，且大部分区域未通过显著性检验。

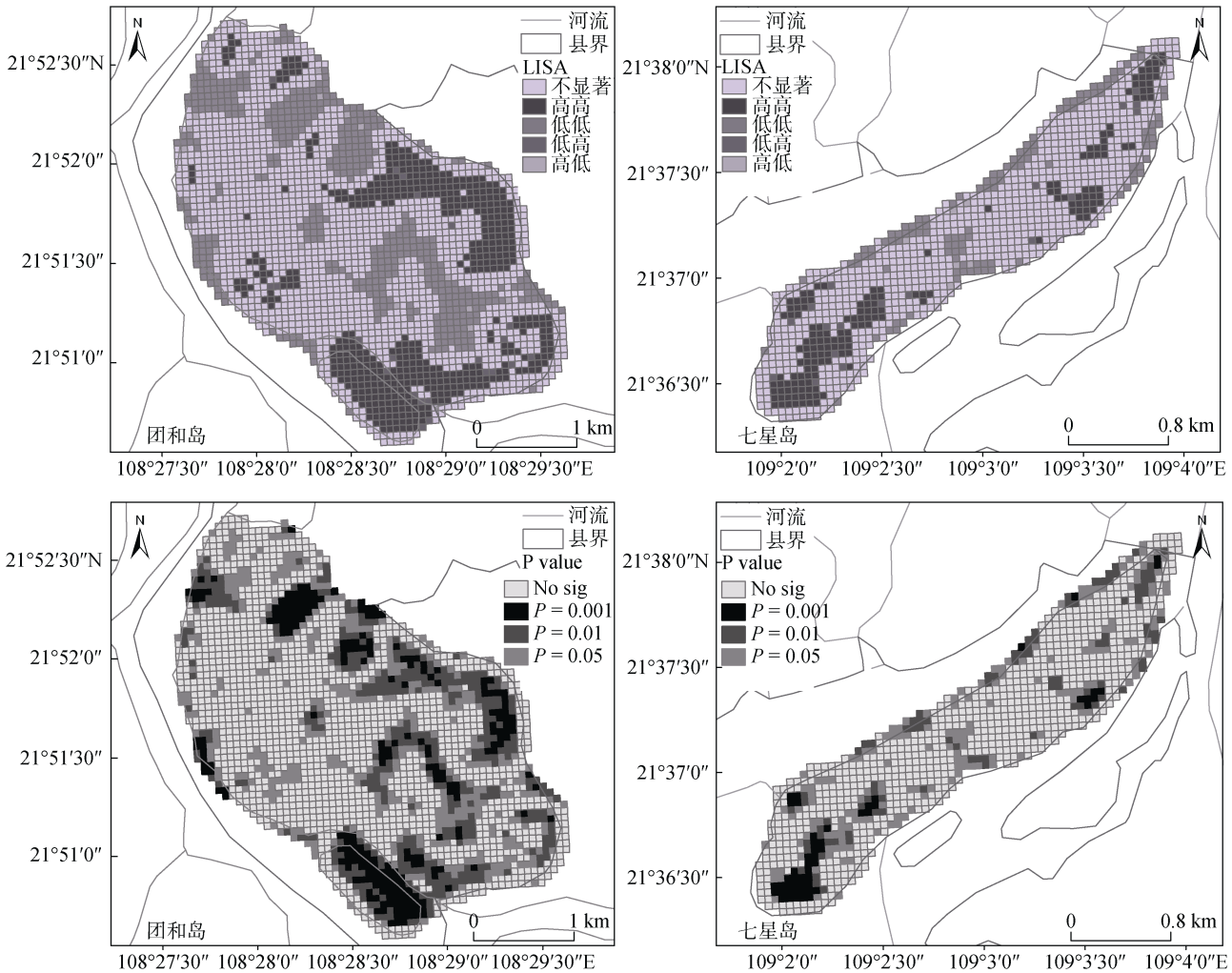

图 5　广西北部湾两个典型岛屿团和岛和七星岛的生态系统服务价值 LISA 聚集与显著性水平

Fig. 5　The LISA cluster and significance level graphs of ecosystem services value in two typical islands in Thuanhe and Seven Star island in Beibu Gulf of Guangxi

4　讨论

4.1　空间异质性

文中典型海岛空间异质性主要由变差函数的参数所决定，块金值反映了随机部分的空间异质性，该值越大，随机性因素影响越大[12]。七星岛的最佳拟合模型为指数模型，块金系数显著大于团和岛(0.449>0.246)，表明七星岛的景观格局主要受到随机因素的影响，使得人为干扰海岛景观增强，这与欧朝蓉等[13]关于人类活动干扰景观格局的作用保持一致。余小璐等[14]的研究表明，由于南流江流域下游人为排污等人为活动使原生海岛生态系统风险增大，这与黎树式[15]关于南流江流域入海口暴雨灾害对海岛生态格局产生显著影响的观点相符。团和岛的最佳拟合模型为球状模型，且块金系数明显小于七星岛，表明团和岛主要受到结构性因素的控制，该因素为地质地貌条件，由于团和岛属于典型的基岩岛，且位于茅尾海半封闭内海中，由于受到海水的削弱作用其生境呈现稳定状态，孙辰琢[16]认为茅尾海在现代海洋动力和沿岸河流动力的共同作用下，地形自岸向海倾斜，内湾潮间浅滩宽阔，该地貌保护了湾内岛屿免受自然灾害的影响。

团和岛价值量的 Moran’s 指数以大于 0 为主，且随着尺度的增加而增加，其值在全局范围内倾向于集中分布，说明该岛景观呈趋同趋势，这与基岩岛景观格局的稳定性有关。七星岛的价值量在全局范围内呈现负的空间自相关，这与该岛所具有的泥沙地貌及人为干扰导致景观格局破碎有关。七星岛的

Moran's 指数随着距离的增大呈现出正负交互状态，变化的阈值为 900 m，说明价值量的空间自相关性与尺度密切相关，也可能与数据的滤波特性和 Moran 'I 系数对距离的非线性特征有关[12]。

4.2 不确定性分析

目前海岛价值量评估尚未形成一整套完备的评价理论与指标体系，多数模型由于参数确定不同，其价值评估结果存在显著差异，即便是相同的生态系统，其评价结论可能存在着显著差异[17]。由于海岛自身存在着特殊的生境，土壤、气候及地质地貌各异，这使得海岛植被生物量有别于大陆，一般来说生物量越大，服务功能越强，因此未来在海岛价值量指标选择时，可依据典型海岛的净初级生产力大小对海岛的当量表进行修正，这是本研究今后的研究重点。

4.3 应用前景

国内众多学者针对海岛的生态脆弱性和生态承载力进行了相关研究，如池源等[18]以我国北方庙岛群岛为例，构建了一套能够反映陆海双重特征的海岛生态系统承载力评估模型，该模型由于指标体系众多而未得到有效推广。本文着重从海岛的地质地貌背景入手，对其不同海岛的景观格局尺度效应及其变化阈值进行分析，重点剖析海岛所处的外部环境，对其识别则借助变程或块金系数，找出海岛中结构性因素(地质地貌、土壤类型和景观类型)和非结构性因素(自然灾害以及人类活动)所占的比重，以此确定景观的稳定性，以期为海岛开发利用，开发时序以及开发的程度提供定量化方法。

4.4 海岛管理评估框架

北部湾海岛空间狭小，生态系统极为脆弱，保护和利用矛盾突出，未来可从岛群生态系统的异质性角度出发，探索出不同岛群合理开发与保护的先后时序模式。通过本文提出的异质性评价方法计算不同岛群中随机因素和结构性因素所占的份额，据此可对岛群进行分类，对受到人类活动影响剧烈的海岛适当进行生态保护，加强海岛自然资源管理，而对受到结构性因素的海岛适当进行开发，开发时序的识别则选用变程以及 Moran's 指数，若变程和 Moran's 指数越小，说明海岛景观格局趋向于复杂化和破碎化，生态系统较脆弱，通过构建一套定量化甄别海岛开发与管理的技术流程，可为广西北部湾海岛自然资源管理、生态系统优化提供理论和方法的上的借鉴。

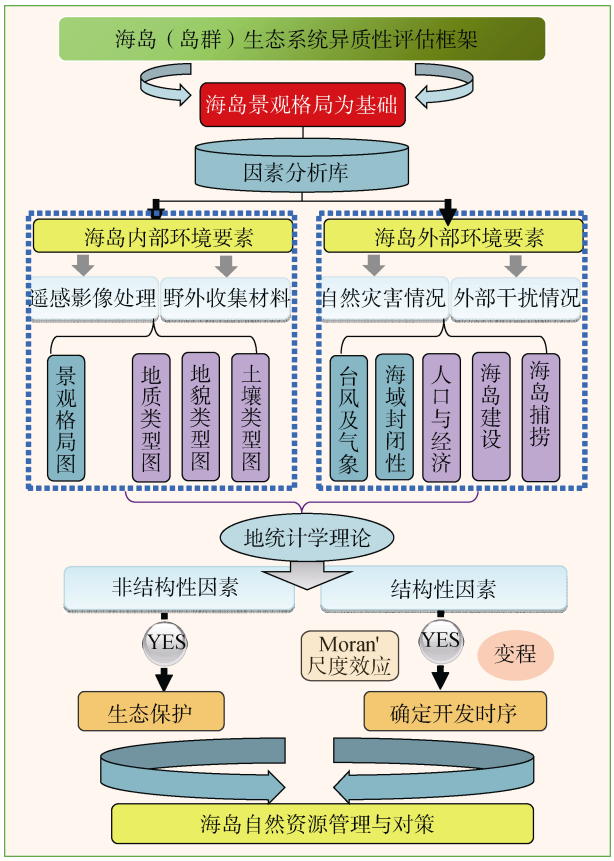

图 6 海岛生态系统异质性评估与自然资源管理框架

Fig. 6 The framework of heterogeneity assessment and natural resource management in an island ecosystem

5 结论

(1) 团和岛的单位面积生态系统服务价值为 1.30 元/m^2，而七星岛为 1.20 元/m^2，前者约为后者的 1.08 倍，但后者变异系数高于前者。

(2) 七星岛和团和岛的最佳拟合模型分别为指数模型和球状模型，其块金系数分别为 45.50%和 24.60%，表明前者主要受到随机性因素控制，而后者受到结构性因素控制，对受到随机性因素的七星岛适当进行生态保护，而对受到结构的团和岛适当开发。

(3) 团和岛价值量的 Moran's 指数在空间上呈聚集性特征，而七星岛价值量存在着 900 m 的显著阈值。团和岛价值量 Moran's 指数随着尺度的增加而增加，在空间上呈现出集中分布状态；而七星岛生态系统服务价值的 Moran's 指数随着尺度的增加而减少，在空间上呈现出分散趋势。

(4) 对受到结构性因素影响的岛屿在时序的识

别时选用变程和 Moran's 指数，其值越小，则景观格局趋向于复杂化和破碎化，生态系统较脆弱，反之，生态系统较好，可进行优先开发。

参考文献:

[1] 任海, 李萍, 周厚诚, 等. 海岛退化生态系统的恢复[J]. 生态科学, 2001, 20(1): 60-64.
Ren Hai, Li Ping, Zhou Houcheng, et al. The restoration of degraded island ecosystems[J]. Ecologic Science, 2001, 20(1): 60-64.

[2] Costanza R, d'Arge R, De Groot R, et al. The value of the world's ecosystem services and nature capital[J]. Nature, 1997, 387: 253-260.

[3] Daily G C, Söderqvist T, Aniyar S, et al. Ecology. The value of nature and the nature of value[J]. Science, 2000, 289(5478): 395-396.

[4] 孙慧兰, 李卫红, 陈亚鹏, 等. 新疆伊犁河流域生态服务价值对土地利用变化的响应[J]. 生态学报, 2010, 30(4): 887-894.
Sun Huilan, Li Weihong, Chen Yapeng, et al. Response of ecological services value to land use change in the Ili River Basin, Xinjiang, China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2010, 30(4): 887-894.

[5] 朱文泉, 张锦水, 潘耀忠, 等. 中国陆地生态系统生态资产测量及其动态变化分析[J]. 应用生态学报, 2007, 18(3): 586-594.
Zhu Wenquan, Zhang Jinshui, Pan Yaozhong, et al. Measurement and dynamic analysis of ecological capital of terrestrial ecosystem in China[J]. Chinese Journal ofApplied Ecology, 2007, 18(3): 586-594.

[6] 赵晟, 李梦娜, 吴常文. 舟山海域生态系统服务能值价值评估[J]. 生态学报, 2015, 35(3): 678-685.
Zhao Sheng, Li Mengna, Wu Changwen. Emergy valuation of ecosystem services in the Zhoushan marine area[J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(3): 678-685.

[7] 欧阳志云, 赵同谦, 赵景柱, 等. 海南岛生态系统生态调节功能及其生态经济价值研究[J]. 应用生态学报, 2004, 15(8): 1395-1402.
Ouyang Zhiyun, Zhao Tongqian, Zhao Jingzhu, et al. Ecological regulation services of Hainan Island ecosystem and their valuation[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2004, 15(8): 1395-1402.

[8] Manno A. CART: Classification and regression trees[J]. Wiley Interdisciplinary Reviews Data Mining & Knowledge Discovery, 2011, 1(1): 14-23.

[9] 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[J]. 自然资源学报, 2008, 23(5): 911-919.
Xie Gaodi, Zhen Lin, Lu Chunxia, et al. Expert knowledge based valuation method of ecosystem services in China[J]. Journal of Natural Resources, 2008, 23(5): 911-919.

[10] 胡和兵, 刘红玉, 郝敬锋, 等. 城市化对流域生态系统服务价值空间异质性的影响——以南京市九乡河流域为例[J]. 自然资源学报, 2011, 26(10): 1715-1725.
Hu Hebing, Liu Hongyu, Hao Dingfeng, et al. Effects of urbanization on the spatial heterogeneity of watershed ecosystem services value: A case study of Jiuxiang River watershed in Nanjing City[J]. Journal of Natural Resources, 2011, 26(10): 1715-1725.

[11] 邱炳文, 王钦敏, 陈崇成, 等. 福建省土地利用多尺度空间自相关分析[J]. 自然资源学报, 2007, 22(2): 311-320.
Qiu Bingwen, Wang Qinmin, Chen Chongcheng, et al. Spatial autocorrelation analysis of multi-scale land use in Fujian Province[J]. Journal of Natural Resources, 2007, 22(2): 311-320.

[12] Chen Y F, Yu F M. Scale-dependent spatial heterogeneity of vegetation in Mu Us sandy land, a semi-arid area of China[J]. Plant Ecology, 2002, 162(1): 135-142.

[13] 欧朝蓉, 朱清科, 孙永玉. 元谋干热河谷景观生态安全时空变化[J]. 中国水土保持科学, 2018, 16(1): 131-140.
Ou Zhaorong, Zhuqingke, Sun Yongyu. Temporal and spatial variation of landscape ecological security in Yuanmou Dry-hot Valley.[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2018, 16(1): 131-140.

[14] 余小璐. 南流江流域生态系统健康评价[D]. 南宁: 广西师范学院, 2015.
Yu Xiaolu. Ecosystem health assessment of Nan Liu River Basin[D]. Nanning: Guangxi Teachers Education University, 2015.

[15] 黎树式. 南亚热带独流入海河流水沙变化过程研究[D]. 上海: 华东师范大学, 2017.
Li Shushi. Variations in water and sediment process of unbranched river of the southern subtropical China: a case study of Nanliu River[D]. Shanghai: East China Normal University, 2017.

[16] 孙辰琛 茅尾海海水环境质量响应人为活动变化的研究[D]. 南宁: 广西师范学院, 2012.
Sun Chenchen. Research on the response of marine water quality to human activities in Maowei Sea[D]. Nanning: Guangxi Teachers Education University, 2012.

[17] 隋玉正, 李淑娟, 张绪良, 等. 围填海造陆引起的海岛周围海域海洋生态系统服务价值损失——以浙江省洞头县为例[J]. 海洋科学, 2013, 37(9): 90-96.
Sui Yuzheng, Li Shujuan, Zhang Xuliang, et al. Appraisal on the value loss of marine ecosystem services about island reclamation: a case study of Dongtou[J]. Marine Sciences, 2013, 37(9): 90-96.

[18] 池源, 石洪华, 孙景宽, 等. 城镇化背景下海岛资源环境承载力评估[J]. 自然资源学报, 2017, 32(8): 1374-1384.

Chi Yuan, Shi Honghua, Sun Jingkuan, et al. Evaluation on island resources and environment carrying capacity under the background of urbanization[J]. Journal of Natural Resources, 2017, 32(8): 1374-1384.

A comparative study of spatial heterogeneity of ecosystem service value in typical islands in Beibu Gulf

TIAN Yi-chao[1, 2, 3], HUANG Yuan-lin[1], ZHANG Qiang[1], TAO Jin[1], ZHANG Ya-li[1], HUANG Hu[2], LIANG Ming-zhong[2], ZHOU Guo-qing[3]

(1. College of Resources and Environment, Beibu Gulf University, Qinzhou 535011, China; 2. Key Laboratory of Marine geographic information resources development and utilization in the Beibu Gulf, Beibu Gulf University, Qinzhou 535011, China; 3. Guangxi Key Laboratory for Geospatial Informatics and Geomatics Engineering, Guilin University of Technology, Guilin 541004, China)

Received: Jun. 10, 2018
Key words: landscape pattern; ecological service value; spatial heterogeneity; comparative study; the typical islands in Beibu Gulf

Abstract: Based on remote sensing data of two typical islands in Beibu Gulf, the landscape pattern data of islands were obtained using the CART decision tree method. Accordingly, the ecological system service value measurement model, the spatial autocorrelation model, and the variation function model were used for determining the spatial heterogeneity of the ecosystem service value. The per unit ecosystem service value in Thuanhe island was approximately 1.08 times higher than that in Seven Star island; however, the coefficient of variation in Thuanhe island was lower than that in Seven Star island. Because of its geological background of mud and sand Island, the landscape pattern of Seven Star island was strongly disturbed by human activities and natural environment, and its pattern tended to be complicated and fragmented, whereas the landscape pattern of Thuanhe island exhibited an entire patch due to its external environment and its own geological characteristics. The landscape pattern of Thuanhe island was primarily regulated by structural factors, whereas the Seven Star island was dominated by random factors. Therefore, Thuanhe island, which is regulated by structural factors, should be properly developed, and the Seven Star island, which is strongly influenced by nonstructural factors, should be appropriately protected. In the development of islands affected by structural factors, the identification of time series is characterized by range and Moran's index. A smaller range and Moran's index indicate more complexity and fragmentation. Otherwise, if the ecosystem were better, priority could be given to development. Finally, this paper constructs a framework for evaluating the island ecosystem heterogeneity and management of natural resources and suggests some countermeasures for island management.

(本文编辑: 康亦兼)