

DOI: 10.5846/stxb201802260391

黄智洵,王飞飞,曹文志.耦合生态系统服务供求关系的生态安全格局动态分析——以闽三角城市群为例.生态学报 2018, 38(12): 4327-4340.  
Huang Z X, Wang F F, Cao W Z. Dynamic analysis of an ecological security pattern relying on the relationship between ecosystem service supply and demand: a case study on the Xiamen-Zhangzhou-Quanzhou city cluster. Acta Ecologica Sinica 2018, 38(12): 4327-4340.

## 耦合生态系统服务供求关系的生态安全格局动态分析 ——以闽三角城市群为例

黄智洵,王飞飞,曹文志\*

厦门大学环境与生态学院,厦门 361102

**摘要:** 实现分区管理是缓解城市群生态安全空间差异的有利途径。基于供求理论构建了生态系统服务供求关系动态模型框架,并利用供给与需求的象限区划表征闽三角城市群生态安全格局;在不同的尺度变换上运用价值单量修正模型、INVEST 生境质量模型、景观指数模型、生态韧性模型、熵权法等方法综合测度城市群生态系统服务供求水平,实现生态安全格局的分区化;引入环境库兹涅茨曲线理论解析区域生态安全格局现状和成因;数据分析借助 ArcGIS 可视化表示。研究发现:(1) 闽三角城市群存在 50% 区域属于生态安全高供给失衡区,其中 70% 属漳州市境内;32.14% 属于高需求失衡区,集中于市辖区与沿海地区;17.86% 属于双维度失衡区;未存在单元位于双维度共赢区上。(2) 区域生态系统服务供给颇佳而需求滞后,城市群东南沿海区域与周边区域格局差异明显,供给(需求)呈现由沿海向内陆梯次增(减)的空间分异规律。(3) 城市群尚处于生态安全库兹涅茨曲线的“两难阶段”,同时导致了城市群生态安全格局空间异质性的产生。

**关键词:** 生态安全格局;生态系统服务供求关系;分区管理;INVEST 模型;环境库兹涅茨曲线;闽三角城市群

## Dynamic analysis of an ecological security pattern relying on the relationship between ecosystem service supply and demand: a case study on the Xiamen-Zhangzhou-Quanzhou city cluster

HUANG Zhixun, WANG Feifei, CAO Wenzhi\*

College of the Environment and Ecology, Xiamen University, Xiamen 361102, China

**Abstract:** Zoning management is an effective approach to reducing the spatial difference in city cluster ecological security. Based on the supply and demand theory, this study constructs a framework for a dynamic model of the relationship between ecosystem services supply and demand, and uses this relationship to characterize the ecological security pattern in the Xiamen-Zhangzhou-Quanzhou city cluster. This article evaluates the status of the ecosystem service supply and demand of the city cluster and analyzes the zoning of the ecological security patterns using the InVEST model, landscape quality index, ecological resilience model, and entropy method. This article also analyzes the factors and current status of the ecological security pattern by using the environmental Kuznets curve. The three main findings are as follows: (1) in total, 50% of counties in the city cluster belong to the "high supply imbalance zone" of ecological security, and 70% of these counties are within Zhangzhou City; 32.14% of counties fall into the "high demand imbalance zone" of ecological security, and these counties include districts and coastal areas; 17.86% of counties belong to the zone where both the supply and demand for ecological security are imbalanced; no counties are located in a zone where both the supply and demand for ecological security are balanced. (2) The demand for ecosystem services in the Xiamen-Zhangzhou-Quanzhou city cluster is weak. There are still over 80% of counties below the average level. There is a notable spatial difference between some coastal

基金项目:国家重点研发计划(2016YFC0502901);国家自然科学基金项目(41771500)

收稿日期:2018-02-26; 修订日期:2018-05-08

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: wzcao@xmu.edu.cn

<http://www.ecologica.cn>

counties of Xiamen and Quanzhou and surrounding counties. The overall ecosystem service supply of the city cluster is better, but the difference in ecosystem service supply between the coastal and inland counties is remarkable, and it presents an increasing trend from the coast to inland. Zhangzhou performs quite well, and all counties in Zhangzhou perform above the average level, but Xiamen shows an opposite pattern, and there is a distinct difference between the inland and coastal counties in Quanzhou. (3) From the environmental Kuznets curve of ecological security that we constructed, it can be suggested that the whole region is still in a "dilemma state", where there is great disharmony between the ecological environment and economic development. Meanwhile, the study helps to explain the dislocations in supply and demand, and the spatial difference in the ecological security patterns of the Xiamen-Zhangzhou-Quanzhou city cluster.

**Key Words:** ecological security pattern; ecosystem service supply and demand; zoning management; InVEST model; environmental Kuznets curve; Xiamen-Zhangzhou-Quanzhou city cluster

生态安全是指人类在生态系统中的各种权益不受威胁的状态,是一个多维度共生的复合系统<sup>[1]</sup>。目前国内外关于区域生态安全的研究从评价方法上主要包括综合指数法<sup>[2-3]</sup>、生态承载力法<sup>[4]</sup>、景观生态学法<sup>[5-6]</sup>、生态足迹法<sup>[7]</sup>等,研究框架上大多采用“状态-压力-响应”模型测算区域生态安全<sup>[8-10]</sup>,但研究体系更多趋于静态性特征,无法清晰窥视经济社会系统与生态环境的作用关系,指标体系缺乏动态性;研究尺度上包括流域<sup>[10-11]</sup>、省域<sup>[2]</sup>、城市群<sup>[12-13]</sup>等,但更多是基于单一尺度的研究,无法从多个角度对区域生态安全的空间特征进行完整性的诊断。根据生态安全的系统属性规定,其既要包括经济、环境等多个方面,又需反映各维度间的作用联系<sup>[1]</sup>,而生态系统服务的供求关系恰好可以体现系统内部经济与自然因素的互相作用机制,其基本思想<sup>[14]</sup>与生态安全的内涵和宗旨相契合,因此本研究旨在通过生态系统服务供求关系来表征城市群生态安全格局,突显了指标体系的内部供求变化的动态性特征和优势,改进于以往学者对生态安全研究所使用静态性的指标体系。分别对城市群县域、海域等尺度进行变换分析,探索闽三角城市群生态安全格局的空间差异,找寻内在规律与趋势;并引入环境库兹涅茨曲线识别、评估和解析闽三角城市群生态安全格局现状。旨在为各单元制定差异化的区域发展战略并进行分区针对性管理,以期实现区域一体化、生态一体化、经济一体化的复合生态安全最优化发展目标。因此,本研究在闽三角海湾型城市群扩张加剧、生态空间萎缩的条件下,利用区域生态系统服务供需的空间分异,探讨该海湾型城市群的生态安全格局动态、趋势以及调控策略。

## 1 研究区概况

闽三角城市群是由厦门、泉州、漳州所组成的区域性城市群,毗邻中国台湾,具有“闽南金三角”之称。位于 $116^{\circ}53'21''$ — $119^{\circ}01'38''$ E;  $23^{\circ}33'20''$ — $25^{\circ}56'45''$ N。属于亚热带湿润季风性气候,年均降雨量为1000—1200 mm,年均气温为 $21^{\circ}\text{C}$ 。它包含了29个县市区,总面积为 $25314.39\text{ km}^2$ ,GDP总量超过福建全省的50%;已成为福建乃至中国东部地区最具活力的经济区域之一,同时是大陆台商投资较密集的区域,经济发展与生态环境矛盾日益突出,故生态安全问题研究刻不容缓,如图1所示。

## 2 数据与研究方法

### 2.1 评价指标体系构建

生态系统服务供给是指生态系统在目标时序结点

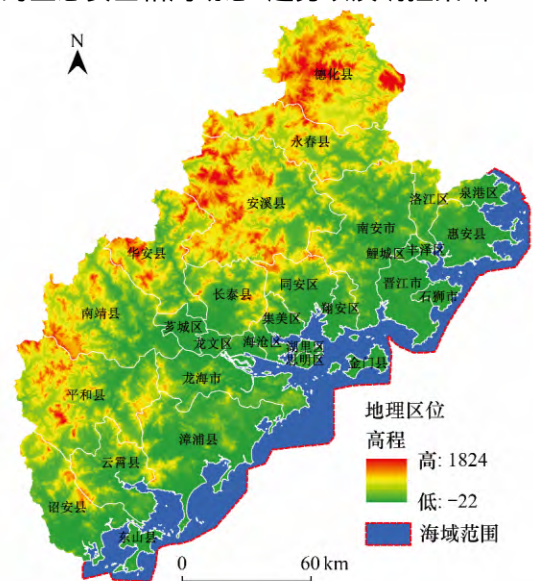


图1 闽三角城市群地理区位

Fig.1 Geographical location of Xiamen-Zhangzhou-Quanzhou city cluster

和研究单元上所能给予服务及产品的能力<sup>[14-15]</sup>。本研究根据“千年生态系统评估”<sup>[16]</sup>中的理论框架将生态系统服务划分为供应型生态系统服务、调节型生态系统服务、文化型生态系统服务和支持型生态系统服务。其中本文利用价值单量法表征前 3 项生态系统服务; 支持型生态系统服务择取生境质量状况、景观格局指数、生态恢复力 3 个必选指标及海洋环境状况 1 个可选指标, 如表 1。生态系统服务需求是指人类所消耗的或是希望取得的生态系统的服务和产品需要<sup>[17]</sup>, 本研究择取社会经济指标中的经济需求、人口需求、土地需求表征。其中经济需求反映区域的经济实力, 也体现了该地区所期望获得生态系统服务的程度; 土地需求表征人类对生态系统服务的消耗强度; 人口需求影响着区域对生态系统服务的总需求量大小。各项指标选取遵循数据的可获得性和代表性原则并进行无量纲化处理, 最终通过熵权法测算生态系统服务供需的综合得分。

表 1 评价指标体系

Table 1 The evaluation index system

目标层 Target layer	一级指标层 First-level index layer	二级指标层 Second-level index layer	三级指标层 Third-level index layer	X	属性 Attribute	
生态系统服务供给 Ecosystem service supply	生态系统服务总价值	供应型生态系统服务价值	食物生产价值	X1	收益性指标	
			原材料生产价值	X2	收益性指标	
	生态系统服务支持	调节型生态系统服务价值	调节型生态系统服务价值	气候调节价值	X3	收益性指标
				气体调节价值	X4	收益性指标
				水源涵养价值	X5	收益性指标
				废物处理价值	X6	收益性指标
				文化型生态系统服务价值	X7	收益性指标
				旅游审美价值	X7	收益性指标
		景观格局指数	生态系统恢复能力	生态韧性	X8	收益性指标
				香农多样性指数	X9	收益性指标
				蔓延性指数	X10	收益性指标
				破碎度指数	X11	成本性指标
	生境质量状况	生境质量状况	香农均度指数	X12	收益性指标	
			景观形状指数	X13	收益性指标	
			生境质量指数	X14	收益性指标	
	海洋自然条件*	海洋自然条件*	海洋气候变化度	X15	成本性指标	
			海洋气溶胶粒子半径	X16	成本性指标	
海洋气溶胶光学厚度			X17	成本性指标		
经济社会发展			经济需求	地均 GDP	X18	收益性指标
				人口需求	X19	收益性指标
	土地需求	X20		收益性指标		
生态系统服务需求 Ecosystem service demand	经济社会发展	经济需求	地均 GDP	X18	收益性指标	
			人口需求	X19	收益性指标	
			土地需求	X20	收益性指标	

\* 海域自然条件指标仅在海域尺度的测算中加入

## 2.2 数据来源

本文的研究时间结点选取 2015 年, 研究单元为闽三角城市群的 28 个县域。2015 年的土地利用数据采用 Landsat TM 遥感影像图目视解译获取, 分辨率为 30 m×30 m, 划分为耕地、林地、草地、水域、建设用地、未利用地 6 个一级地类, 13 个二级地类, 如表 2。

区域生物量数据的获取源自 IPCC(世界气象组织(WMO)及联合国环境规划署(UNEP)于 1988 年联合建立的政府间气候变化专门委员会)发布的 2006 年 IPCC 国家温室气体清单指南。经济社会数据来源于福

建省、厦门市、漳州市、泉州市及各县域统计年鉴。空间矢量数据来源于国家 1:400 万基础地图。海洋环境指标数据来源于美国国家航天局地球观测数据, 山体高程数据来源于由美国太空总署和国防部国家测绘局联合测量的 STRM 数据。

表 2 闽三角土地利用分类体系

Table 2 Land use classification system of Xiamen-Zhangzhou-Quanzhou city cluster

一级地类 Class 1	二级地类 Class 2	一级地类 Class 1	二级地类 Class 2
耕地 Cropland	水田	水域	河流
	旱地		水库
林地 Forest land	有林地	建设用地	滩涂
	灌木林		城镇用地
	疏林地		农村用地
草地 Grassland	高覆盖度草地	未利用地	交通工矿用地
	低覆盖度草地		-

### 2.3 生态系统服务价值评估

本研究使用单量法测算区域生态系统服务价值, 根据 Costanza 在《自然》中对生态系统当量经济价值的核算<sup>[18]</sup>, 并由我国学者谢高地等<sup>[19]</sup>基于中国国情引入到中国本土生态系统服务价值的测算中。进一步本文依托福建省的区域特征、资源特征和生物量存量对其当量进行两次修正, 最终得到符合实情的生态系统服务总价值。

#### 2.3.1 一次修正模型

首先本研究基于福建省的区域特征对中国的单位面积生态系统服务价值当量进行一次修正<sup>[19]</sup>。其中供应型生态系统服务, 可由各单元单位土地面积的农、林、牧、渔产值加以量化, 分别修正耕地、林地、草地、水体的价值当量; 并通过森林覆盖率来修正调节型生态系统服务; 鉴于旅游可间接反映美学价值, 故根据旅游总收入和总人数对文化型生态系统服务价值当量进行修正。

$$n = \frac{a_i}{A_i} \quad (1)$$

式中  $A_i$  为全国均值;  $a_i$  为福建省均值。

通过测算, 供应型生态系统服务中对耕地、林地、草地、水体的修正值分别为 2.146547、5.414788、1.466251587、7.603175; 而调节和文化型生态系统服务的修正值分别为 3.049006、4.94061125。因建设用地和未利用地提供略少的生态系统服务, 故本研究假设建设用地和未利用地所提供的生态系统服务为 0。

#### 2.3.2 二次修正模型

本文采用谢高地对价值当量修正的建议<sup>[19]</sup>, 应用 INVEST 模型<sup>[20-21]</sup>中的固碳和碳封存模型对生态系统服务价值量进行二次修正, 提升测算结果的准确性和真实性, 如表 3。由于数据的缺失, 本文只研究处于陆地上的生物量, 获取了闽三角城市群与全国平均水平的生物量比值, 绘制其修正系数的栅格图像, 如图 2。最后通过图层叠加分析得到修正后的生态系统服务价值总当量, 如图 3。

$$p_{ij} = \left( \frac{b_j}{B} \right) p_i \quad (2)$$

式中  $p_{ij}$  为二次修正系数;  $p_i$  为一次修正后的生态系统服务价值单量;  $b_j$  为  $j$  区生态系统的生物量;  $B$  为中国某一类生态系统单位面积平均生物量<sup>[19]</sup>。

表 3 闽三角单位面积生态系统服务二次修正价值/(元 hm<sup>-1</sup> a<sup>-1</sup>)

Table 3 The twice revision value of ecosystem services

一级分类 First class	二级分类 Second class	耕地 Cropland	林地 Forest land	草地 Grassland	水域 Water body
供应服务 Provisioning services	食物生产	1351.981	1210.084	593.1198	1811.111
	原材料生产	528.3605	10957.98	877.8173	1200.002
调节服务 Regulating services	气体调节	1358.982	8967.665	4402.455	711.4348
	气候调节	1847.882	8455.227	4542.643	2806.595
	水文调节	1468.83	8399.7	4412.076	25679.41
	废物处理	2653.37	3485.056	3831.592	20326.71
文化服务 Cultural services	旅游审美	537.4402	6985.021	4107.287	9826.327

因水域河流的生物量数据缺失,并水域所占面积相对较小,故假设闽三角的水域范围生物量与全国的水域范围生物量相一致,设比值为 1

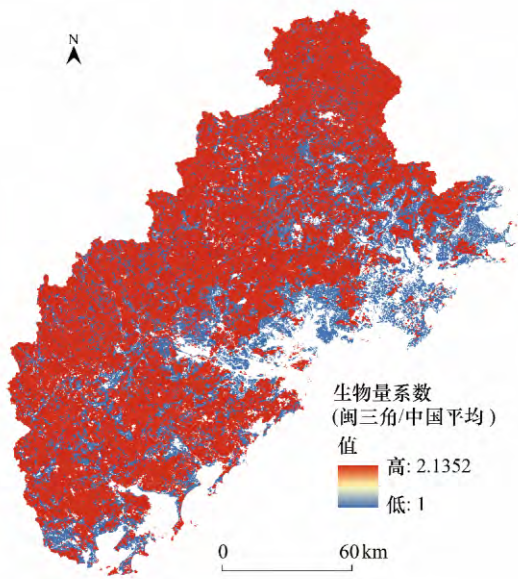


图 2 闽三角生物量系数

Fig.2 The Biomass coefficient on Xiamen-Zhangzhou-Quanzhou city cluster

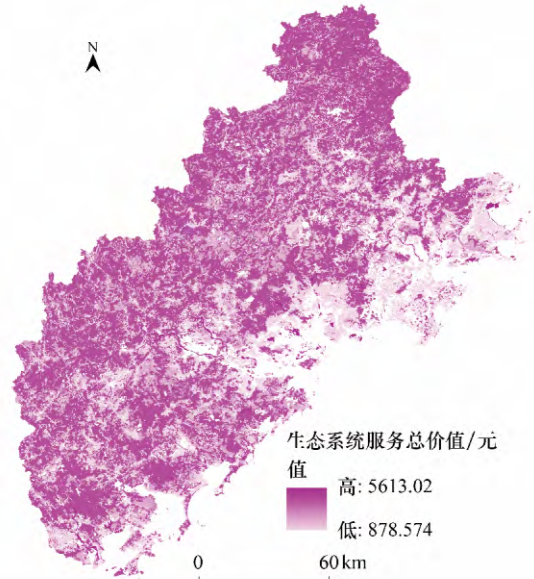


图 3 闽三角生态系统服务总价值

Fig.3 The total value of ecosystem service on Xiamen-Zhangzhou-Quanzhou city cluster

### 2.3.3 生态系统服务总价值区域测算

基于此,由下列公式对闽三角城市群各单元生态系统服务总价值进行赋值:

$$ESV = \sum_{i=1}^n VC_i \times \frac{U_i}{U} \tag{3}$$

式中  $U$  为研究区域总面积,  $U_i$  为第  $i$  类土地利用的面积,  $VC_i$  为第  $i$  类土地利用的单位面积生态系统服务总价值,  $ESV$  为各单元单位面积生态系统服务价值量。

## 2.4 生态系统服务支撑测算方法

### 2.4.1 INVEST 模型生境质量模块

生境质量是指生态系统给予生物繁衍存活所需条件的能力<sup>[22]</sup>。本文通过 INVEST 模型<sup>[20-21]</sup>求得区域生境质量,它由多个因素共同决定,在参数的设定时需确保符合区域特征,本研究参考国内外文献<sup>[23-25]</sup>,尤其是刘智方关于福建省生境质量的测度文献颇具代表性<sup>[22]</sup>,最终根据表 4、表 5 模型参数设置模拟出闽三角城市群生境质量的分布,如图 4。具体公式如下:

<http://www.ecologica.cn>

$$Q_{xj} = H_j \left[ 1 - \left( \frac{D_{xj}^z}{D_{xj}^z + k^z} \right) \right] \quad (4)$$

式中  $Q_{xj}$  表示生境类型  $j$  内元胞  $x$  的生境质量;  $D_{xj}$  表示生境类型  $j$  内元胞  $x$  所受的胁迫程度;  $x$  表征半饱和常数, 一般由模型运行一次取得 ( $D_{xj}$  最大值的  $1/2$ );  $H_j$  表示生态类型  $j$  的生境适应性  $z$  表示标准化常量。

表4 生态胁迫因子属性

Table 4 Attribute of ecological stress factor

胁迫因子 Threat	最大影响距离 Max-distance	权重 Weight	距离递减率 Decay
城镇用地 Urban land	5	0.2	1
农村用地 Rural land	5	0.3	1
交通工矿用地 Traffic and industrial land	10	0.5	1

表5 福建省不同生境类型对不同胁迫因子的敏感度

Table 5 Sensitivity of different habitats to different stress factors in Fujian

土地利用类型 Land use type	生态适应性 Habitat	城镇用地 Urban land	农村用地 Rural land	交通工矿用地 Traffic and industrial land
水田 Paddy land	0.5	0.4	0.4	0.2
旱地 Dry land	0.3	0.4	0.4	0.2
有林地 Woodland	1	0.9	0.8	0.8
灌木林 Shrub	1	0.5	0.5	0.5
疏林地 Sparse woodland	0.7	0.55	0.5	0.3
高覆盖度草地 High-covered grassland	0.6	0.3	0.3	0.6
低覆盖度草地 Low-covered grassland	0.5	0.2	0.3	0.5
河流 River	1	0.9	0.9	0.9
水库 Reservoir	0.9	0.9	0.9	0.8
滩涂 Shoals	0	0	0	0
城镇用地 Urban land	0	0	0	0
农村用地 Rural land	0	0	0	0
交通工矿用地 Traffic and industrial land	0	0	0	0
未利用地 Unused land	0	0	0	0

#### 2.4.2 景观格局指数分析

景观格局指数是表征生态系统受人类的干预程度, 通过测度景观格局的连续性和破碎性及多样性, 来反映生态系统的完整性与受干预程度。本研究遴选了5个具有代表性的景观格局因子利用 Fragstats 4.2 进行测算<sup>[26-27]</sup>, 如表6。本文针对每一个研究单元逐一测度, 获取各个单元景观格局的得分, 赋予其空间属性, 用于综合和比较。

表6 景观格局因子解析

Table 6 Analysis of landscape pattern factor

景观格局因子 Landscape Indices	指标解析 Significance
香农多样性指数 Shannon diversity index	在生态学应用较广, 以信息理论为基础的一种指数, 可映射景观的异质性, 尤其对景观中斑块呈非均匀分布, 或是较为稀少的斑块种类出现时表现颇为敏感
香农均度指数 Shannon evenness index	可表征景观中斑块类型的优势度, 当 SHEI 趋于 0 时, 景观斑块的优势度较高; 当 SHEI 趋于 1 时, 景观分布均衡, 没有特别的优势景观类型
蔓延性指数 Contagious index	是反映景观格局最为关系的参数之一。可表示景观中不同斑块种类的伸展态势或聚集程度
破碎度指数 Fragmentation index	度量景观格局破碎化程度的指标。在一定程度上反映了人类对景观的干扰程度
景观形状指数 Landscape shape index	反映景观的空间冗余度和不规则程度, 且影响着植物生长与生产效率及动物捕食、迁徙诸多生态过程的进行

### 2.4.3 生态韧性模型

生态韧性体现景观的恢复力和生态弹性度,即遭受危害而恢复原样的能力与潜力<sup>[8]</sup>。根据 Peng 关于生态系统服务的研究中得到的生态韧性运算公式及生态韧性得分设定。其中,该研究认为未利用地是比较稳健的结构,不容易被自然灾害和其他外界因素所影响,且自我恢复能力强,故设其系数为 1<sup>[28]</sup>,如表 7。测算公式如下:

$$R = \sum_{i=1}^n A_i \times RC_i \quad (5)$$

式中  $R$  为生态系统空间单元的生态韧性;  $A_i$  为土地利用类型  $i$  的面积;  $RC_i$  为土地利用类型  $i$  的生态韧性系数。

### 2.5 综合评价及象限划分方法

#### 2.5.1 熵权法

本研究应用熵权法对各指标进行综合评价,熵权法源自于热力学原理,因其具有客观赋权、擅长于解决多指标综合决策问题等特点被较好的应用于区域生态安全的综合评估中<sup>[2-3, 29]</sup>。具体步骤为:

首先设定矩阵  $A = (a_{ij})_{p \times q}$ , 其中  $q$  为变量数,  $p$  为单元数;

#### (1) 无量纲化处理

为消除变量单位对结果的影响,将各指标进行无量纲化处理。

针对收益性指标:

$$b_{ij} = \frac{a_{ij} - \min_{1 \leq j \leq p} a_{ij}}{\max_{1 \leq j \leq p} a_{ij} - \min_{1 \leq j \leq p} a_{ij}} \quad (6)$$

针对成本性指标:

$$b_{ij} = \frac{\max_{1 \leq j \leq p} a_{ij} - a_{ij}}{\max_{1 \leq j \leq p} a_{ij} - \min_{1 \leq j \leq p} a_{ij}} \quad (7)$$

#### (2) 计算第 $j$ 个指标的信息熵:

$$H_j = -k \sum_{i=1}^p \frac{b_{ij}}{\sum_{i=1}^p b_{ij}} \ln \frac{b_{ij}}{\sum_{i=1}^p b_{ij}} \quad \text{其中 } k = (\ln p)^{-1} \quad (8)$$

#### (3) 计算第 $j$ 个指标的权重:

$$W_j = \frac{1 - H_j}{q - \sum_{i=1}^q H_j} \quad (9)$$

#### (4) 最终依据权重测算综合值 $C$ :

$$C = \sum_{i=1}^q b_{ij} \times W_j \quad (10)$$

#### 2.5.2 生态系统服务标准化象限划分

将综合测算的生态系统服务供给与需求利用 Z-score 标准化法进行 4 个象限划分,用于更加直观和精确的比较,并在分区管理和精准划分上具有一定的优势。本研究以此分区作为利用生态系统服务供求关系表征

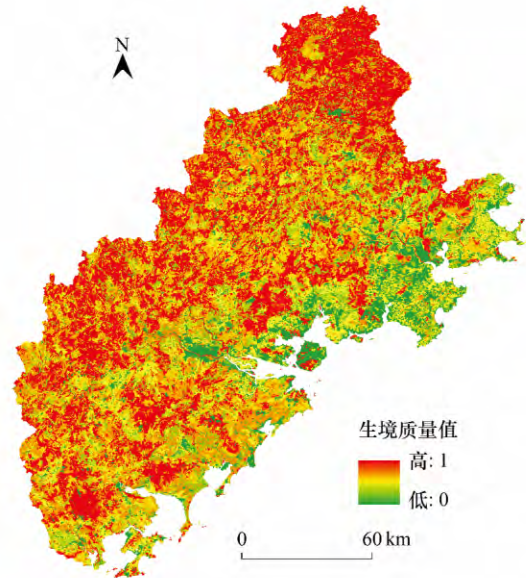


图 4 闽三角生境质量水平

Fig. 4 Habitat quality level on Xiamen-Zhangzhou-Quanzhou city cluster

生态安全格局的标准,即依据生态系统服务供求象限关系指导生态安全分区,由此开展基于区域生态安全空间关系的相关分析和讨论。具体公式为:

$$x = \frac{x_i - x'}{s} \quad (11)$$

$$x' = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (12)$$

$$s = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - x')^2} \quad (13)$$

式中  $x$  表示标准化之后生态系统服务供给与需求得分,  $x_i$  表示第  $i$  个区域的生态系统服务供给与需求得分,  $x'$  为闽三角城市群平均值,  $s$  为城市群标准差,  $n$  为研究单元数。

### 2.5.3 环境库兹涅茨曲线理论

本文借助环境库兹涅茨曲线理论<sup>[30-32]</sup>解释导致闽三角城市群生态安全差异化格局产生的原因。透过网格尺度视角,将闽三角城市群按 3000 m×3000 m 网格划分后的 2774 个研究样本单元加以剖析。环境库兹涅茨曲线理论中指出在城市经济发展的初期经济发展与生态环境的矛盾较大,经济的快速发展将导致自然环境的恶化,两者处于“两难阶段”;当到经济持续增长到达一个拐点后,经济建设将与环境保护协同发展,两者达到理想的“双赢阶段”。

## 3 结果与分析

### 3.1 区域生态安全空间分析

基于闽三角城市群的县域尺度上,采用区域加权平均的方式将各个指标对所在县域进行赋值,并通过熵权法综合评价,得到县域尺度的生态系统服务供求得分。随后通过 ArcGIS 的 JENKS 自然最佳间断点聚类法对生态系统服务供求得分进行分级,按其颜色梯度(由红色向绿色过渡)分为极好、较好、一般、较差、极差 5 个区间,最终可视化表示。

#### 3.1.1 生态系统服务供给

根据图 5 的空间分布情况可知,闽三角城市群生态系统服务供给的空间差异较大,特别是沿海地区与内陆地区的差异颇为明显,形成由沿海向内陆递增的态势,数值波动范围为(-2.0122—1.5962)。出现了以泉州市的德化县、漳州市的华安县和南靖县为代表的内陆高值区。厦门市的湖里区和泉州市沿海的鲤城区、丰泽区、晋江市和石狮市形成了生态系统服务供给的低值组团。并呈现出由闽三角城市群西北端向东南侧地区梯次逐级锐减的“圆弧形”环状结构。从区域内部来看,厦门市的生态系统服务供给不佳,大部分区域处于供给水平一般及以下;泉州市的区域分异尤为明显,展现由内陆向沿海梯次递减的趋势,两极化象限较为严重;漳州市供给水平颇为平稳,区域差异较小且大多数地区处于一般及以上水平,沿海与内陆的空间差异不大。

#### 3.1.2 生态系统服务需求

通过图 6 的可视化结果可知,闽三角城市群大多数地区的生态系统服务需求水平不足,尤其存在 11 个县域的生态系统服务需求处于“极差”的水平,且一般及以下水平的县域占总数的 82.14%,数值波动范围为(-0.7067—2.9183)。但厦门市岛内的湖里区和思明区,与泉州市沿海的鲤城区、丰泽区和石狮市呈现出与其他地区截然相反的态势,其生态系统服务需求处于较好及以上的水平。局部来看,厦门市岛内与岛外生态系统服务需求差异明显;泉州市只在沿海的石狮市、丰泽区及鲤城区呈现出需求的较高水平;漳州市全境皆处于生态系统服务需求一般及以下水平。

#### 3.1.3 生态系统服务供求关系构建与象限划分

基于上文分析结果,为进一步探究闽三角城市群生态安全格局,构建了生态系统服务的供求关系图谱,将其归纳至四级象限图中,如图 7 所示。大多数区域被划分至第二象限(低供给-高需求)和第四象限(高供给-



低需求) 中, 两极化空间差异较为明显。特别是, 闽三角城市群中未有单元被划分至第一象限( 高供给-高需求), 而存在 1/2 的县域处于第四象限的范围中, 仍有 5 个单元属于第三象限( 低供给-低需求) 的范畴, 面临着生态系统服务供给与需求双重滞后的窘境。第二象限中主要包含了厦、漳、泉三市的市辖区和沿海城市, 可见沿海地区 and 市辖区的城市扩张迅猛, 经济社会发展颇佳, 与周边经济相对滞后的区域形成鲜明对比, 随之带来的是生态环境负荷增加, 污染加剧, 导致生态系统服务供给不足。

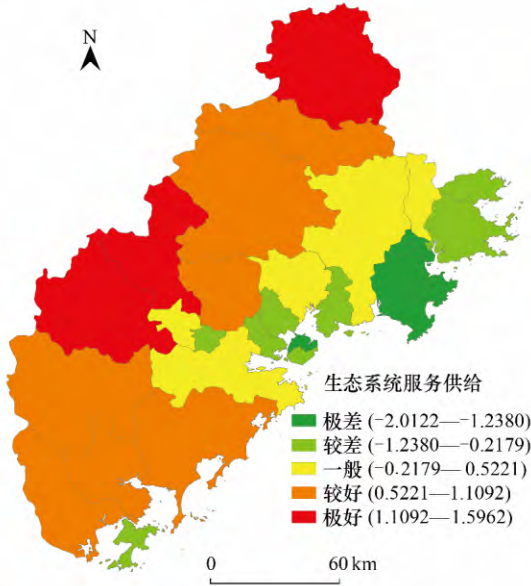


图 5 生态系统服务供给空间分异

Fig.5 The spatial differentiation of ecosystem services supply

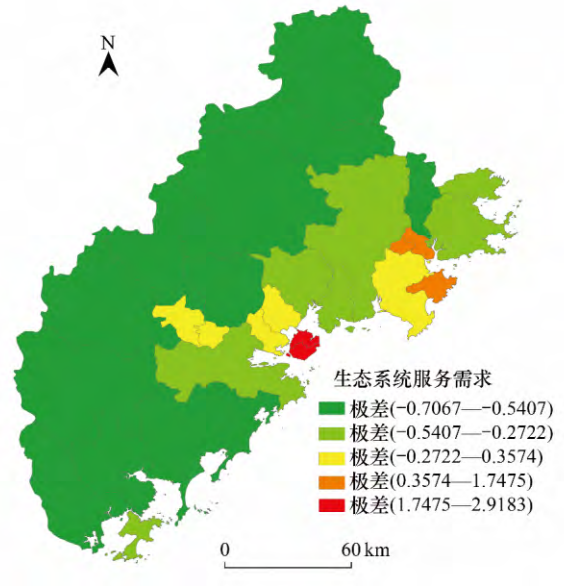


图 6 生态系统服务需求空间分异

Fig.6 The spatial differentiation of ecosystem services demand

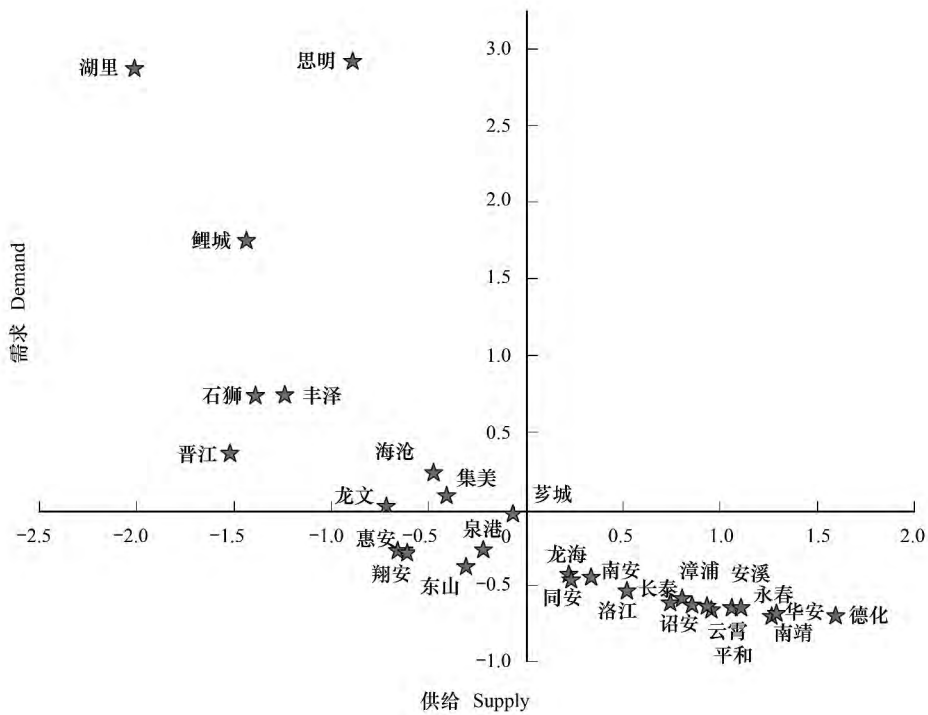


图 7 闽三角城市群生态系统服务供求关系象限划分

Fig.7 The quadrant division of the relationship between ecosystem services supply and demand on Xiamen-Zhangzhou-Quanzhou city cluster

### 3.1.4 生态安全格局分区管理

因闽三角城市群生态系统服务空间差异巨大,亟需实行分区管理,应对差异化格局。深入的,通过已构建的生态系统服务供求关系表征闽三角城市群生态安全格局现状并进行合理分区,将其按象限属性分为:双维度共赢区(高供给-高需求)、高需求失衡区(低供给-高需求)、双维度失衡区(低供给-低需求)、高供给失衡区(高供给-低需求)。由表7中所示,没有县域位于双维度共赢区中,处于生态安全高需求失衡区的单元大多数属于厦门市和泉州市的沿海地区及市辖区,漳州市唯有龙文区列入其中,而存在超过70%的区域处于生态安全高供给失衡区,可见漳州市的区域特点即是具有良好的生态本底禀赋,而经济社会发展较为滞后;泉州市的两级分化较为严重,3个分区均有相当数目的单元入驻,整体空间差异较大;厦门市内位于生态安全高需求失衡区的单元居多,与其门户城市的独特性质和沿海经济特区的建设密不可分。透过图8可视化分析后得到闽三角城市群生态安全格局分类空间分布。依托福建省良好的生态本底,大多内陆区域展示出了较高的生态系统服务供给水平;而与之相反,呈现东部沿海地区供给水平较低的特点;厦门、泉州、漳州分别存在1—2处生态安全格局的双维度失衡区,无论经济社会还是生态环境保护均相对滞后发展,应引起当地政府和利益相关者的高度重视。因此需发挥漳州市与泉州市内陆地区富足的农业资源与林地资源特点,推动经济转型发展,开展休闲农业、观光林业等经济新增长点,促进第一产业与第三产业的融合发展;在保证经济发展的同时将其对环境的影响降至最低,拉动区域生态系统服务需求端的净提升。与此同时还应注意因人类畜禽养殖对九龙江和晋江两大水系造成面源污染等环境威胁。

表7 闽三角城市群生态安全分区

Table7 Ecological security zoning on Xiamen-Zhangzhou-Quanzhou city cluster

生态安全格局 Ecological security pattern	县域 County	所属地级市 City	生态安全格局 Ecological security pattern	县域 County	所属地级市 City
高需求失衡区 (低供给-高需求) High demand imbalance zone (low supply-high demand)	晋江市	泉州市	高供给失衡区 (高供给-低需求) High supply imbalance zone (high supply-low demand)	安溪县	泉州市
	石狮市	泉州市		德化县	泉州市
	海沧区	厦门市		南安市	泉州市
	湖里区	厦门市		永春县	泉州市
	集美区	厦门市		长泰县	漳州市
	思明区	厦门市		华安县	漳州市
	龙文区	漳州市		龙海市	漳州市
	鲤城区	泉州市		南靖县	漳州市
	丰泽区	泉州市		平和县	漳州市
双维度失衡区 (低供给-低需求) Double-way imbalance zone (low supply-low demand)	芗城区	漳州市		漳浦县	漳州市
	东山县	漳州市		诏安县	漳州市
	惠安县	泉州市		云霄县	漳州市
	翔安区	厦门市		同安区	厦门市
	泉港区	泉州市		洛江区	泉州市

### 3.2 基于库兹涅茨曲线的生态安全格局成因解析

本研究进一步引入环境库兹涅茨曲线理论解释造成生态安全差异化格局的原因与发展规律。依托生态系统服务供求关系的内涵,发现了其遵循着环境库兹涅茨曲线理论规律。故由图9中所示,曲线拐点已经出现,但各研究单元大多数处于曲线拐点的左侧,即闽三角城市群中大部分区域仍处于生态安全的“两难阶段”,并离拐点较远,经济发展与环境保育的矛盾较大。因为存在着此消彼长的关系,故区域间两极化的生态安全格局产生,大多数单元分列生态安全的高供给失衡区和高需求失衡区,且由内陆按梯次均匀向沿海变化的结论均得到了一定程度的解释。而为实现城市群生态安全一体化发展的目标,全域应不断的向“双赢阶段”迈进,在经济发展的同时,环境状况得到了保障,近年来的一些高新技术和清洁能源的使用可能会促进双赢格局的实现,同样如何实现这一转变将成为今后学者热议的话题和研究的重点。

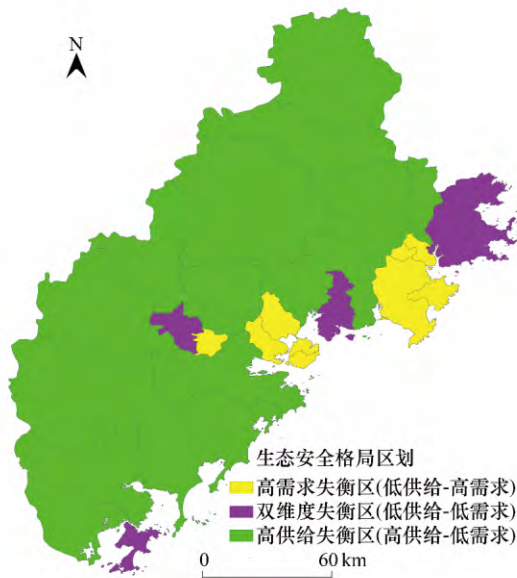


图 8 闽三角城市群生态安全格局

Fig. 8 The ecological security pattern on Xiamen-Zhangzhou-Quanzhou city cluster

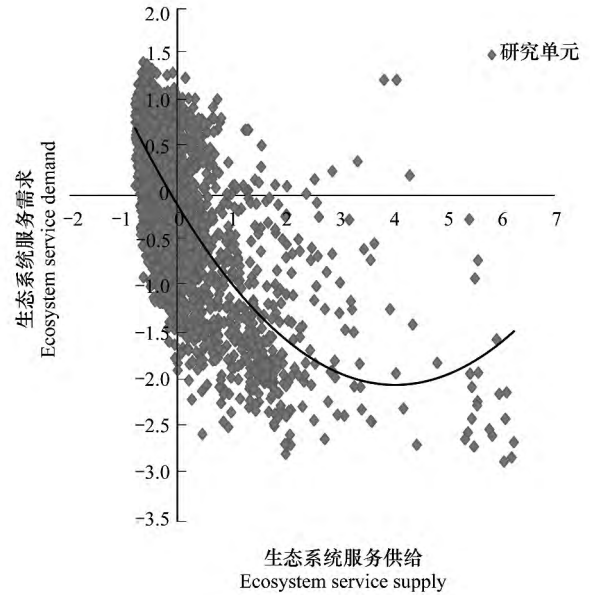


图 9 生态安全格局库兹涅茨曲线

Fig. 9 Kuznets curve of the ecological security pattern

### 3.3 海域生态安全格局分析

因闽三角城市群的地理位置特殊, 具有海湾型城市群的特点, 故针对 17 个港口县域加入海洋环境状况变量进行生态安全格局的测算, 首先对海洋气候变异程度(相较于常年 2000—2010 年的变异度)、海洋气溶胶光学厚度和海洋气溶胶粒子半径 3 个海洋环境因素进行插值分析, 并通过熵权法综合评价, 得出各城市海洋环境状况及排名, 如图 10—11 表 8。

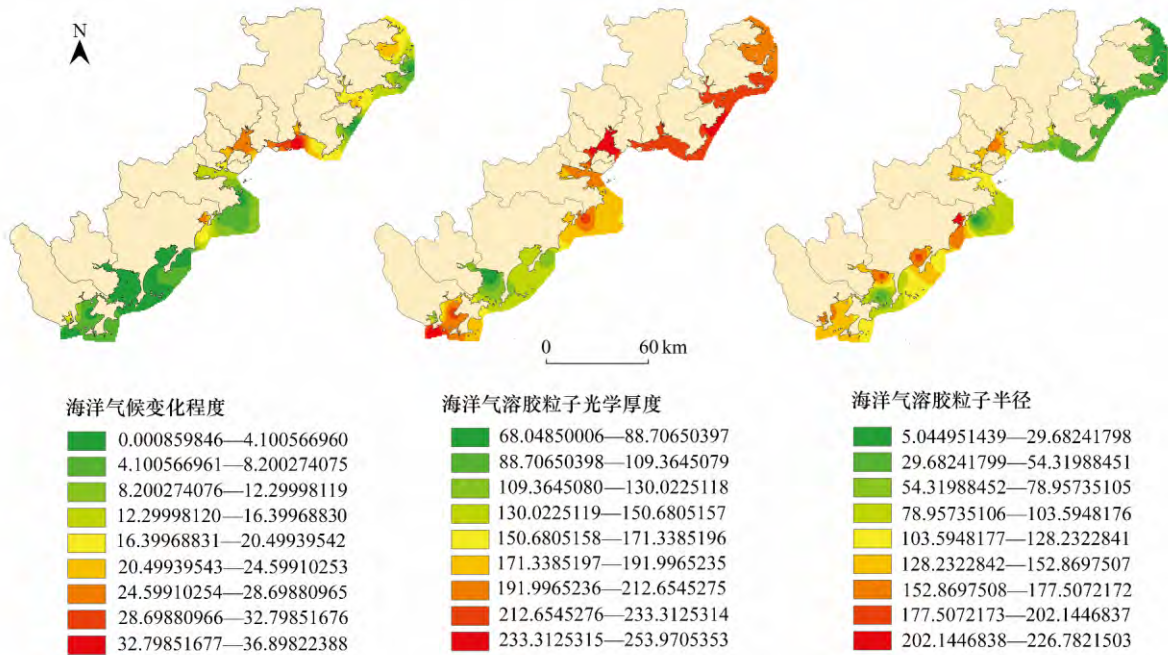


图 10 海域自然条件各指标插值

Fig. 10 The interpolation of natural conditions of sea area

表 8 所辖海域环境状况综合

Table 8 The score of the environmental conditions in the marine area under its jurisdiction

排名 Rank	海域所属 Marine	得分 Score	排名 Rank	海域所属 Marine	得分 Score
1	云霄海域	0.6265	10	诏安海域	0.3778
2	惠安海域	0.5823	11	南安海域	0.3585
3	泉港海域	0.5768	12	思明海域	0.3417
4	石狮海域	0.5481	13	海沧海域	0.3116
5	漳浦海域	0.5429	14	翔安海域	0.1735
6	龙海海域	0.5281	15	湖里海域	0.1372
7	丰泽海域	0.5241	16	集美海域	0.0999
8	晋江海域	0.4988	17	同安海域	0.0585
9	东山海域	0.4792			

分析获知闽三角城市群的海域环境状态,从数据分析中可直观得出各县域所辖海域环境状态空间差异明显,且厦门市所辖海域的环境状态不容乐观,厦门各区均依次列于海域状况排名的尾列;而云霄海域、惠安海域及泉港海域位列前三。并将海洋环境状况指标加入到生态系统服务供给侧的指标系统中,进一步剖析港口城市生态安全的分区特点。

介入海域环境状况指标后,图 12 中漳州市的东山县和泉州市的泉港区的生态安全分区变化较为明显,已由生态安全的双维度失衡区变换为了高供给失衡区,良好的海域环境状况对于促进生态系统服务供给水平的提升做出了一定贡献。同时本文认为闽三角城市群具备海湾型特征,处理好山海关系是关键,即解决海岸带与内陆山地之间的生态系统服务供需错位的矛盾,尤其亟需加强海岸带及沿海滩涂、湿地的综合治理,共促城市群生态安全的协同发展。

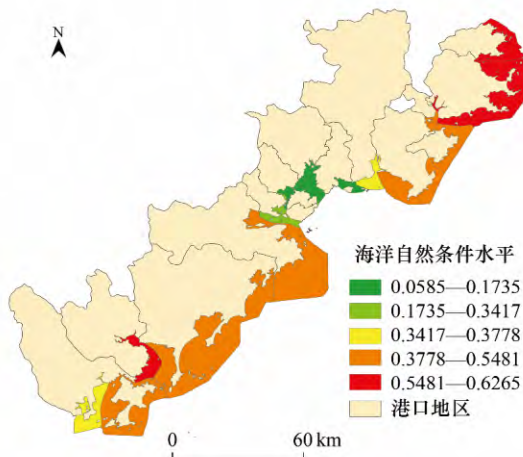


图 11 港口城市所辖海域自然条件状况

Fig.11 The condition of natural conditions in the marine area of the coastal cities

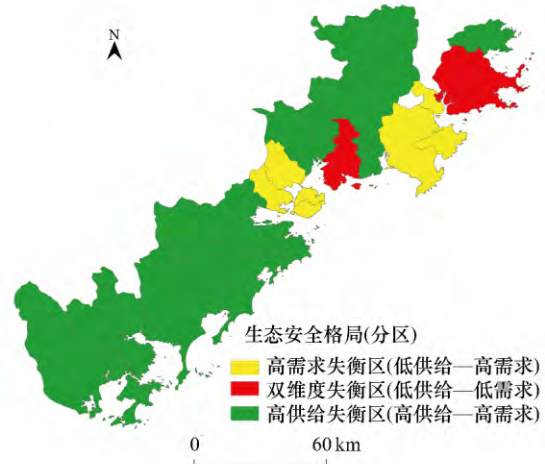


图 12 港口城市生态安全格局

Fig.12 The ecological security pattern of coastal cities

#### 4 结论与讨论

本研究厘清了闽三角城市群生态安全格局的空间差异特征,并对于不同发展阶段的地区实现了区域划分,为当地政府及机构差异化管理策略的制定进行针对性指导,有利于推进城市群区域一体化协同发展,缩小空间差异,走向“共赢化”发展的城市群生态安全新阶段。鉴于较多有关生态系统服务的文献中对生态系统

支持服务的研究不够深入或较为笼统<sup>[33-34]</sup>, 而其服务本身为整个生态系统运行和维持起着重要的支撑作用, 具有较为深远的研究意义。故本研究使用更多的维度和计算细致考量了生态系统支持服务的内容。本文提炼了主要的研究发现: (1) 通过分区探析, 闽三角城市群尚有 50% 的区域属于生态安全高供给失衡区, 其中漳州市所辖县域占总数的 70%; 存在 32.14% 的区域处于高需求失衡区中, 大多厦门、泉州的市辖区和沿海单元组成; 但仍存在 5 个单元属于双维度失衡区; 且没有县域坐落于双维度共赢区中。(2) 闽三角城市群生态系统服务需求整体不佳, 存在 82.14% 的县域需求水平处于一般及以下程度, 尤其包含 39.29% 的地区属于“极差”水平; 厦门岛内和泉州部分沿海部分地区与其他区域形成明显相异的格局。(3) 城市群整体生态系统服务供给水平较好, 但沿海与内陆空间差异较大, 并呈现出由沿海到内陆梯次递增的“圆弧形”结构特点; 漳州市内县域生态系统服务供给颇佳, 均处于一般及以上水平, 且空间差异较小, 而厦门市则呈现截然相反的格局; 泉州市中内陆与沿海单元形成明显的差异化格局。(4) 闽三角城市群较多数单元处于环境库兹涅茨曲线拐点的左侧, 可判断整体上区域仍处于生态环境与经济发展相矛盾的“两难阶段”, 而这也同时导致了城市群生态系统供给与需求的错位和生态安全格局空间差异的产生。(5) 厦门市所辖海域的环境状况相对较差; 海洋自然条件因素一定程度上有利于区域生态系统服务供给的提升。

根据本研究的重要发现, 针对城市群中不同分区单元提出以下差异化的管理路径: (1) 处于生态安全高需求失衡区的单元, 可增加区域的流动性, 采用产业升级和转型策略, 依托先进的科学技术和人才优势带动周边区域经济发展, 缓解自身人口和土地压力; 并可投入更多的资金用于环境治理与生态保护中, 消除差异化格局。(2) 对于生态安全高供给失衡区的单元, 可凭借良好的生态环境景观与条件开展系列生态旅游活动, 赋予新兴绿色产业、绿色能源和绿色都市理念的建设方针, 加大政府间的生态补偿机制的实行和额度分配, 吸纳更多优质劳动力和优势资源进行城市需求端的建设。(3) 针对处于生态安全双维度失衡区的单元, 需发挥城市群中增长极的带动作用, 以厦门岛内及晋江、石狮二市为代表的经济社会增长极和以安溪、德化等县为代表的生态环境增长极, 加大技术与人才流通, 辐射于处于经济腹地和生态腹地的部分单元开展相关建设工作, 缓和区域差异化格局。

#### 参考文献(References):

- [1] 秦晓楠, 卢小丽. 沿海城市生态安全作用机理及系统仿真研究. 中国人口·资源与环境, 2014, 24(2): 60-68.
- [2] 张玉泽, 任建兰, 刘凯, 程钰. 山东省生态安全预警测度及时空格局. 经济地理, 2015, 35(11): 166-171, 189-189.
- [3] 徐成龙, 程钰, 任建兰. 黄河三角洲地区生态安全预警测度及时空格局. 经济地理, 2014, 34(3): 149-155.
- [4] 朱玉林, 李明杰, 顾荣华. 基于压力-状态-响应模型的长株潭城市群生态承载力安全预警研究. 长江流域资源与环境, 2017, 26(12): 2057-2064.
- [5] 杨青生, 乔纪纲, 艾彬. 快速城市化地区景观生态安全时空演化过程分析——以东莞市为例. 生态学报, 2013, 33(4): 1230-1239.
- [6] 俞孔坚, 王思思, 李迪华, 李春波. 北京市生态安全格局及城市增长预测. 生态学报, 2009, 29(3): 1189-1204.
- [7] Chu X, Deng X Z, Jin G, Wang Z, Li Z H. Ecological security assessment based on ecological footprint approach in Beijing-Tianjin-Hebei region, China. Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C, 2017, 101: 43-51.
- [8] Yu G M, Yu Q W, Hu L M, Zhang S, Fu T T, Zhou X, He X L, Liu Y A, Wang S, Jia H H. Ecosystem health assessment based on analysis of a land use database. Applied Geography, 2013, 44: 154-164.
- [9] 王耕, 苏柏灵, 王嘉丽, 朱正如. 基于 GIS 的沿海地区生态安全时空测度与演变——以大连市瓦房店为例. 生态学报, 2015, 35(3): 670-677.
- [10] 解雪峰, 吴涛, 肖翠, 蒋国俊, 边华菁, 马勇, 陈建华. 基于 PSR 模型的东阳江流域生态安全评价. 资源科学, 2014, 36(8): 1702-1711.
- [11] Bhandari B S, Grant M. Analysis of livelihood security: a case study in the Kali-Khola watershed of Nepal. Journal of Environmental Management, 2007, 85(1): 17-26.
- [12] 陈利顶, 周伟奇, 韩立建, 孙然好. 京津冀城市群地区生态安全格局构建与保障对策. 生态学报, 2016, 36(22): 7125-7129.
- [13] 黄国和, 安春江, 范玉瑞, 徐琳瑜, 李永平, 蔡宴朋, 李延峰, 李锋. 珠江三角洲城市群生态安全保障技术研究. 生态学报, 2016, 36(22): 7119-7124.
- [14] Burkhard B, Kroll F, Nedkov S, Müller F. Mapping ecosystem service supply, demand and budgets. Ecological Indicators, 2012, 21: 17-29.

- [15] 肖玉, 谢高地, 鲁春霞, 徐洁. 基于供需关系的生态系统服务空间流动研究进展. *生态学报*, 2016, 36(10): 3096-3102.
- [16] Carpenter S R, Mooney H A, Agard J, Capistrano D, DeFries R S, Díaz S, Dietz T, Duraiappah A K, Oteng-Yeboah A, Pereira H M, Perrings C, Reid W V, Sarukhan J, Scholes R J, Whyte A. Science for managing ecosystem services: beyond the millennium ecosystem assessment. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2009, 106(5): 1305-1312.
- [17] Villamagna A M, Angermeier P L, Bennett E M. Capacity, pressure, demand, and flow: conceptual framework for analyzing ecosystem service provision and delivery. *Ecological Complexity*, 2013, 15: 114-121.
- [18] 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.
- [19] 谢高地, 甄霖, 鲁春霞, 肖玉, 陈操. 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.
- [20] Tallis H T, Ricketts T, Nelson E, Ennaanay D, Wolny S, Olwero N, Vigerstol K, Pennington D, Mendoza G, Aukema J, Foster J, Forrester J, Cameron D, Arkema K, Lonsdorf E, Kennedy C. InVEST 1.004 Beta User's Guide. The Natural Capital Project. Stanford, CA: Stanford University, 2010.
- [21] Nelson E, Mendoza G, Regetz J, Polasky S, Tallis H, Cameron D R, Chan K M A, Daily G C, Goldstein J, Kareiva P M, Lonsdorf E, Naidoo R, Ricketts T H, Shaw M R. Modeling multiple ecosystem services, biodiversity conservation, commodity production, and tradeoffs at landscape scales. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2009, 7(1): 4-11.
- [22] 刘智方, 唐立娜, 邱全毅, 肖黎姝, 许通, 杨丽. 基于土地利用变化的福建省生境质量时空变化研究. *生态学报*, 2017, 37(13): 4538-4548.
- [23] Stys B, Ricketts C. Mapping Threats to Florida Freshwater Habitats. Florida: Conserve Wildlife Tag Grant Program Final Report, 2008.
- [24] Foresman K R. Small mammal use of modified culverts on the Lolo South Project of Western Montana—an update // Irwin C L, Garrett P, McDermott K P, eds. *Proceeding of the 2003 International Conference on Ecology and Transportation*. Raleigh, NC: North Carolina State University, 2003: 342-343.
- [25] 包玉斌, 刘康, 李婷, 胡胜. 基于 InVEST 模型的土地利用变化对生境的影响——以陕西省黄河湿地自然保护区为例. *干旱区研究*, 2015, 32(3): 622-629.
- [26] Saura S, Torné J. Conefor Sensinode 2.2: a software package for quantifying the importance of habitat patches for landscape connectivity. *Environmental Modelling & Software*, 2009, 24(1): 135-139.
- [27] Xie Y C, Yu M, Bai Y F, Xing X R. Ecological analysis of an emerging urban landscape pattern—desakota: a case study in Suzhou, China. *Landscape Ecology*, 2006, 21(8): 1297-1309.
- [28] Peng J, Liu Y X, Wu J S, Lv H L, Hu X X. Linking ecosystem services and landscape patterns to assess urban ecosystem health: case study in Shenzhen City, China. *Landscape and Urban Planning*, 2015, 143: 56-68.
- [29] Han B L, Liu H X, Wang R S. Urban ecological security assessment for cities in the Beijing-Tianjin-Hebei metropolitan region based on fuzzy and entropy methods. *Ecological Modelling*, 2015, 318(1): 217-225.
- [30] Kuznets S. Economic growth and income inequality. *The American Economic Review*, 1955, 45(1): 1-28.
- [31] 李慧明, 卜欣欣. 环境与经济如何双赢——环境库兹涅茨曲线引发的思考. *南开学报*, 2003, (1): 58-64.
- [32] 虞依娜, 陈丽丽. 中国环境库兹涅茨曲线研究进展. *生态环境学报*, 2012, 21(12): 2018-2023.
- [33] 魏慧, 赵文武, 张骁, 王新志. 基于土地利用变化的区域生态系统服务价值评价——以山东省德州市为例. *生态学报*, 2017, 37(11): 3830-3839.
- [34] 刘祗坤, 吴全, 苏根成. 土地利用类型变化与生态系统服务价值分析——以赤峰市农牧交错带为例. *中国农业资源与区划*, 2015, 36(3): 56-61.