

基于斑块尺度的资源环境承载力测算与国土空间优化策略

——以厦门市为例

李 渊 严泽幸 刘嘉伟

Measurement of Resource and Environment Bearing Capacity and Optimization Strategy for Territorial Space Based on Patch Scale: A Case Study of Xiamen City

LI Yuan¹, YAN Zexing¹, LIU Jiawei²

(1. School of Architecture and Civil Engineering, Xiamen University, Xiamen 361005, China ;
2. Xiamen Urban Planning and Design Institute, Xiamen 361005, China)

Abstract The spatial pattern characteristics of resource and environment bearing capacity are of great significance for optimizing the development and utilization of territorial space. At present, the researches on the spatial distribution pattern of resource and environment bearing capacity are mostly based on an evaluation unit in the macro regional scale of the country, province or city, and the statistical data of various administrative divisions in measuring. To certain extent, remote sensing technology has remedied for the deficiency in visualization of statistical data in urban scale space. By using the remote sensing technology and the basic theory and method of ecological footprint, this paper takes the city proper of Xiamen as the research area, and analyzes the spatial measurement and pattern of ecological bearing capacity of Xiamen city from the perspective of land use patch unit scale, before putting forward corresponding territorial spatial optimization strategy. The results show that the per capita resource and environment bearing capacity of Xiamen was 0.172 gha/cap, the spatial

作者简介

李渊、严泽幸，厦门大学建筑与土木工程学院；
刘嘉伟，厦门市城市规划设计研究院。

摘 要 资源环境承载力空间格局特征对优化国土空间开发利用具有重要意义。当前对资源环境承载力空间分布格局的研究多以国家、省市等宏观区域尺度作为评价单元，且大多依托各行政区划的统计数据进行测算，遥感技术在一定程度上弥补了统计数据在城市尺度空间可视化上的不足。本文利用遥感技术与生态足迹的基本理论和方法，以厦门市域为研究区域，从土地利用斑块单元尺度对厦门市的资源环境承载力进行空间测度与格局分析，并提出相应的国土空间优化策略。结果表明：厦门市人均资源环境承载力为 0.172gha/cap，资源环境承载力供给的空间分布不均，整体分布格局与土地利用类型的地理分布特征具有一定的相似性；厦门市人均生态足迹为 1.555gha/cap，供给远小于需求量，生态系统处于生态赤字状态；从斑块单元的国土提升和街镇单元的人口调控两方面提出针对性的国土空间优化策略，将厦门各街镇单元划分为优先提升区、优化引导区和保护控制区。

关键词 遥感；斑块尺度；生态足迹；资源环境承载力；国土空间规划

1 引言

党的十八大将优化国土空间开发格局提升为生态文明建设的首要任务（樊杰等，2013），资源环境承载力作为推进生态文明建设的重要基础性内容，其合理测算与空间格局特征为优化国土空间的开发和利用提供了科学基础及

distribution of supply of resource and environment carrying capacity was uneven, and there is certain similarity between the overall distribution pattern and the geographical distribution characteristics of land use categories. The per capita ecological footprint of Xiamen was 1.555 gha/cap, and the supply was far lagged behind the demand, meaning that the ecosystem was in a state of ecological deficit. From two aspects of land promotion in patch unit and population regulation and control at street-town unit, this paper puts forward the targeted optimization strategy for territorial space, and divides each street-town unit of Xiamen into three zones: upgrade zone with priority, optimization guiding zone, and protection control zone.

Keywords remote sensing; patch scale; ecological footprint; resource and environment bearing capacity; territorial space planning

可靠依据。十九大报告进一步指出，加快生态文明体制改革，建设美丽中国，设立国有自然资源资产管理和自然生态监管机构，统一行使所有国土空间用途管制和生态保护修复职责，构建国土空间开发保护制度。2018年3月，自然资源部成立，负责建立空间规划体系并监督实施。2018年5月，全国生态环境保护大会指出，建立统一的空间规划体系和协调有序的国土开发保护格局。2018年6月，习近平总书记在中共中央政治局第六次集体学习时强调，“国土是生态文明建设的空间载体。要按照人口资源环境相均衡、经济社会生态效益相统一的原则，整体谋划国土空间开发，科学布局生产空间、生活空间、生态空间，给自然留下更多修复空间。”优化国土空间布局是落实生态文明建设的重要举措，资源环境承载力是优化国土空间开发格局不可或缺的重要依据（高吉喜、陈圣宾，2014）。

当前国内外具备代表性的资源环境承载力评估方法主要包括考虑了生态系统供给和人类消费关系的生态足迹法（Rees, 1996）、净初级生产力法（NPP）（李金海，2001）、供需平衡法（王中根、夏军，1999）；体现多要素综合分析的综合指标评价法，包括单因素评价法、指标体系法（朱一中等，2005）和状态空间法（余丹林等，2003）；以及体现系统整体性的系统模型法（王西琴等，2014），如模糊目标规划模型、系统动力学模型、空间决策支持系统等。这些综合研究理论方法的兴起，极大地推动了资源环境承载力研究的量化与模式化（刘文政、朱瑾，2017）。但诸多方法的承载力评价中都存在影响评价质量的技术方法难题，尤其是对水土资源、环境、生态等的单要素承载力评价，而且受限于研究者对模型方法的掌握和方法本身在适用环境、尺度、可比性等方面的不足，因此缺乏普适性。

生态足迹方法从土地利用出发，通过收集社会经济发展数据和资料，建立计算模型，以其较为科学完善的理论基础和精简统一的度量指标以及评价方法的普适性，得到了国内外学者的深入探讨和广泛应用。引入生态足迹的概念也在一定程度上弥补了单因子承载力研究的缺陷（Feng

et al., 2018)。该方法中,生态足迹供给是根据特定区域土地利用状况和土地生态生产力等相关数据计算决定的衍生数据,与特定区域的自然资源禀赋、土地利用的空间分布密切相关,具有明确的空间关联和空间变异的地理特性,这为利用区域土地利用的空间数据和分析生态承载供给并进行空间格局分析奠定了理论基础(Luck et al., 2001; 岳东霞等, 2009)。生态足迹法通过提出生物生产性土地面积的概念,对各种人类消费和自然资源进行了标准化处理,有效表达了支持人类生活所必需的自然资源和土地面积的有限性。该方法相较于其他衡量方法,可操作性和可重复性强,结果可进行横向和纵向对比(Haberl et al., 2001),不失为一种可靠的政策制定辅助工具。

传统的生态足迹法应用多采取土地利用的统计数据计算,由于数据更新的实效性以及统计口径的差异性,使得其计算结果在揭示区域承载能力的空间格局方面存在不足。遥感技术的快速发展使其成为生态学研究空间数据获取和空间问题分析的有效手段,遥感技术已在城市生态安全、人居环境、生态风险评价、生态承载力评价等方面得到较多应用(杜培军等, 2018)。近年来,遥感技术结合GIS技术和生态足迹法应用于承载力的评价研究中,取得了一定的成果(顾康康等, 2014; 岳东霞等, 2011; 赵晶晶等, 2010)。岳东霞等基于生态足迹法,利用GIS空间分析技术,从图斑、县、省三级不同空间尺度对西北地区的生态承载力进行了分析(岳东霞等, 2009)。林聪等结合遥感产品,利用基于格网的生态足迹法对长江三角洲核心区城市群进行了空间格局分析(林聪等, 2018)。张晓彤等基于MODIS数据对中亚地区的生态承载力进行评价(张晓彤等, 2018)。任保卫以三沙湾无居民海岛为例,构建了资源环境承载能力监测与预警的评价指标体系并进行了评价分析(任保卫, 2018)。其中,利用生态足迹进行承载力空间分布或时空格局的研究多以国家、省市等宏观区域尺度作为评价单元,且大多受限于行政区划(林聪等, 2018; 鹿瑶等, 2018; 张晓彤等, 2018)。究其原因,主要是由于生态足迹方法依靠的生产性土地面积、资源消费量等数据多依托行政区划统计获取,而遥感技术提取的各地类斑块具有空间属性,能在一定程度上弥补统计数据在小尺度空间可视化上的不足。另外,对土地利用功能进行管制是构建有序空间结构的有效方式和主体内容,特别是对市场机制容易忽视的自然保护区、开敞绿色空间、文化遗产地等大斑块区域的严格管制更为重要。同时,应当考虑空间管制具有的层次性,这不仅是由于不同空间尺度土地利用功能不同,也是由于政府层级划分后的事权分割。斑块是景观格局的基本组成单元,是指不同于周围背景的、相对均质的非线性区域,许多空间格局和生态过程都由斑块和斑块动态所决定(傅伯杰等, 2011)。

因此,本文基于遥感技术获取土地利用类型分布,利用生态足迹的基本理论和方法,以厦门市域为研究区域,基于土地利用斑块单元尺度对厦门市的资源环境承载力供需指标进行计算和空间分析。以期量化、空间化表达该地区资源环境承载力状况,实现区域资源环境承载力的空间测度与格局分析,依据测算结果并借助街镇单元的人口数据参考,分别从斑块单元和街镇单元两个小尺度层面提出相应的国土空间优化策略。

2 研究区域与数据来源

厦门市位于福建省东南沿海，台湾海峡西岸中部，是我国改革开放初期设立的四个经济特区之一，我国15个副省级城市之一，五个计划单列市之一。全市陆地总面积1699.39平方千米，海域面积390余平方千米，下辖思明、湖里、集美、海沧、同安、翔安六区，共辖26个街道12个镇。根据厦门市统计局数据，截至2017年年末，全市常住人口401万人，户籍人口231.03万人。

本研究主要采用遥感影像数据、生物资源产量数据、能源消费量数据、均衡因子、产量因子、常住人口统计数据及基础地理边界矢量数据等。其中，遥感影像为Landsat8 OLI数据，拍摄时间为2018年3月11日，影像级别为L1T，空间分辨率为30米，数据下载于地理空间数据云网站(<http://www.gscloud.cn/>)；生物资源产量数据与能源消费量数据来自《厦门统计年鉴(2018)》，生物资源项目包含农产品、动物产品、林产品和水产品等，能源消费项目包括原煤、焦炭和汽油等，各类农作物、水产的世界单产数据来源于联合国粮食及农业组织(FAO)的网站(<http://www.fao.org/>)；均衡因子和产量因子取值采用全球足迹网络网站(<https://www.footprintnetwork.org>)中国国家足迹账户

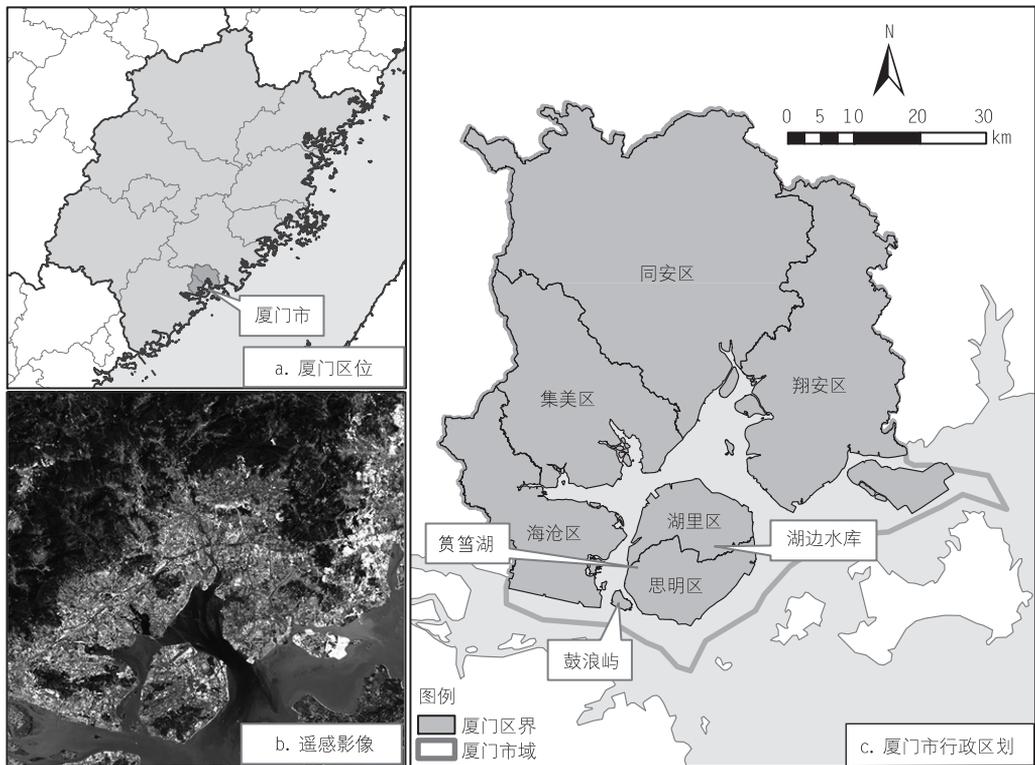


图1 厦门市区位示意与遥感影像

方法论文涉及的 2018 年数据；常住人口数据和矢量边界数据均来自厦门市城市规划设计研究院，其中街镇单元数据包括下辖街道、镇、农场、水库等共 49 个空间单元。

3 研究方法

3.1 土地利用类型划分

本文采用监督分类结合目视解译对研究区的遥感影像数据进行土地利用分类，从而获得实际的生物生产性土地面积。首先，对 2018 年 Landsat8 OLI 遥感影像通过坐标转换、几何校正、裁剪等预处理步骤，得到研究区的遥感影像；其次，参照生态足迹模型的生物生产土地分类并采用中国科学院资源环境科学数据中心的分类标准，将土地利用数据划分为六种主要类型：耕地、草地、林地、建设用地、水域和未利用地，其中，化石能源用地是人类应该留出用于 CO₂ 吸收的土地，但在实际中人类并未留出该类土地，因此该类土地仅在生态足迹的需求计算中考虑，未利用土地仅在生态足迹供给计算中考虑；最后，利用遥感影像处理软件 ENVI 对遥感影像进行监督分类，并结合国土土地利用数据进行人机交互解译，获得厦门市土地利用类型图，同时建立属性数据库。通过谷歌地球高分辨率卫星影像选择真实样本进行抽样验证，土地利用数据分类总体精度可达 90% 以上。

3.2 生态足迹法

20 世纪 90 年代，Rees (1992) 提出并与 Wackernagel 等人 (Wackernagel and Galli, 2007; Wackernagel et al., 1999) 一同完善了生态足迹评价方法，指出特定区域的生态足迹供给是指该区域在一定时期内（通常为 1 年）实际生产人类所需的生物资源和吸纳人类废弃物的所有可用的生物生产土地与水域面积的总和，也视为生态系统的承载力阈值，体现了自然资源的可再生能力，是人类赖以生存的物质基础。生态足迹方法的核心思想是通过比较一个地区的生态足迹需求和供给的差距，来判断该地区可持续发展的状况。可以说，生态足迹方法不仅反映了人类对地球环境的影响和压力，揭示了地球系统对人类的承载能力，同时也体现了地球生态环境的可持续发展机制。生态足迹方法将“公顷”（ha）这一土地面积单位转换成基于全球平均生产力的生物生产土地面积单位[简称“全球公顷”（gha）]，并利用这一均衡后的生物物理指标定量地指示区域资源环境承载力，实现了不同地区、不同类型土地资源环境承载力的可加性和可比性。这一理论为研究不同类型土地资源环境承载力的转换机制提供了理论基础。

3.2.1 生物生产性土地

生物生产即生态生产，指生态系统中生物从外界环境吸收用以维持其生命循环所需的物质及能量，并转变为新物质，从而完成物质和能量的积聚，是自然资源生产自然收入的根本。在生态足迹测算时，

各类资源与能源消费项目均折算为耕地、林地、草地、水域、建筑用地和化石能源用地六种类型生物生产土地，未利用土地被认为是生物生产力为0的土地类型（张志强等，2001）。

3.2.2 均衡因子与产量因子

由于这六类土地类型的生态生产力存在差异，若将这些具备不同生态生产力的面积转变为具备同一生态生产力的面积，需要在各类生物生产面积之前乘以一个均衡因子，即权重，来转为统一的和可相比的生物生产面积。均衡因子是全球某种生物生产土地类型的平均生态生产力与全球各种生物生产性土地的平均生产力的比值。处理之后的面积就是具备全球平均生态生产力且能够加和的世界平均生物生产面积（张志强等，2001）。由于同种生物生产性土地的生产力在不同地区和国家不尽相同，所以不同地区和国家同种生物生产能力不能直接进行比较。产量因子为一个地区或国家的特定土地的平均生产力与世界同类土地的平均生产力的比值。将每种生物生产性土地面积乘上产量因子，即可转变为世界平均生态生产水平的生物生产土地面积。产量因子不但是地区的管理水平和技术在各类土地生产上的综合反映，也是温度、气候、土壤、降雨等自然条件综合影响的结果，所以每一个国家的产量因子在每一年应该是不相同的（杜加强等，2009）。未利用地因生产力极低，其产量因子和均衡因子均赋值为0（表1）。

表1 均衡因子与产量因子

	耕地	林地	草地	建设用地	水域	未利用地
均衡因子	2.52	1.29	0.46	2.52	0.37	0
产量因子	2.18	1.18	0.81	2.18	1.27	0

3.2.3 资源环境承载力计算方法

资源环境的承载能力，是自然系统调节能力的真实表现，是在生态系统构造、功能不受影响的前提下，生态系统对外界干预（尤其是人类活动干预）的承受能力。本文资源环境承载力的计算采用生态足迹方法中生态承载供给模型，公式为：

$$EC = N \sum (a_j \times r_j \times y_j)$$

式中： EC 是区域生态足迹总供给； a_j 是人均实际占有的第 j 类生物生产性土地面积； r_j 是均衡因子； y_j 是产量因子。

生态足迹总供给的测算，依据世界环境与发展委员会（WCED）的“我们共同的未来”号召的，预留12%的生物生产土地面积来保护生物多样性（保护地球其余3000万个物种），所以计算资源环境承载力还需扣除12%的面积（张志强等，2001）。

3.2.4 生态足迹计算方法

生态足迹指支撑一定地区的人口而需要的生产性土地和水域的面积，以及吸纳同样人口所生成的

废物而需要的土地总和。任何特定人口的生态足迹是生产这些人口所消耗的资源及吸收他们生成的废弃物所需的生物生产土地总面积。公式为：

$$EF = N \times ef = N \times \sum r_j \times a_i = N \times \sum r_j \left(\frac{C_i}{Y_i} \right)$$

式中： EF 是总生态足迹； ef 是人均生态足迹； N 是人口数； i 是消费项目类别； j 是生物生产面积类别； r_j 是各种土地类型的均衡因子； a_i 是 i 种消费项目所代表土地类型均衡前人均生态足迹分量； C_i 是 i 种消费项目年人均消费量； Y_i 是第 i 种消费项目全球年平均产量。

资源环境承载力是从供给角度出发计算的自然资源所能供给的生物生产土地面积。生态足迹是从需求角度出发计算的人类利用自然资源满足一定人口的消费活动所需的生物生产土地面积。生态赤字/盈余是综合考虑需求与供给水平，通过判断供给是否满足需求来判断一个区域的资源利用模式是否是可持续的，生态系统是否处于超负荷状态。公式为：

$$ED = EC - EF$$

如果 $ED < 0$ ，那么生态赤字，表明该区域生态系统的发展是不可持续的；反之，则为生态盈余，表明该区域生态系统的发展是可持续的。

3.3 斑块尺度的资源环境承载力测算

在 ArcGIS 软件平台中，首先，将遥感影像监督分类获得的土地利用类型图属性表与生态足迹的均衡因子和产量因子相关联；其次，基于土地利用类型图的每个斑块单元，按照上述公式进行资源环境承载力的计算，获得每个斑块单元的资源环境承载力计算结果；最后，将计算结果利用自然间断点法分为从低到高五类，从而得到斑块尺度的厦门资源环境承载力供给空间分布图，用以表示资源环境承载力在斑块尺度上的区域空间差异。

4 结果与分析

4.1 区域资源环境承载力空间格局

从图 2 厦门市生态系统六种土地利用类型的分布格局来看，建设用地占据了厦门市范围内的大面积土地，占行政区总面积的一半以上，而且分布广泛，主要分布于厦门岛、海沧区南部与东北部、集美区、同安区南部，在岛外基本呈现沿海分布的“马鞍形”，体现了厦门港口城市的湾区特征。林地与耕地生态系统面积次之，林地主要分布于厦门北部山区，以同安区北部为主。耕地多零散分布于建设用地与林地之间，主要分布在翔安区和同安区东侧。厦门为沿海城市，水域生态系统分布特征明显，主要为围绕厦门岛的海域以及多处水库、湖泊等。未利用地分布零散，呈斑块状，多分布于翔安区。

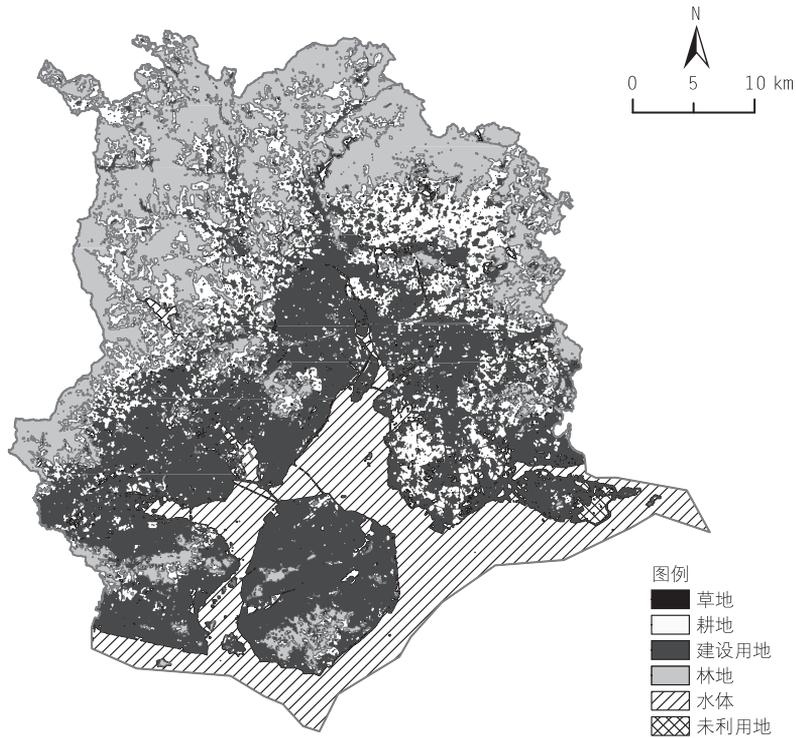


图2 厦门市土地利用类型示意

利用足迹供给模型计算厦门地区资源环境承载力供给及相关指标, 结果见表 2。厦门资源环境承载力总供给为 689 239.66 全球公顷, 人均资源环境承载力为 0.172 全球公顷/人, 表示生态系统可以为每人提供 0.17 公顷的生物生产土地面积。首先, 水域人均资源环境承载力占据的比重最大, 说明水域生态系统在厦门的资源环境承载力供给中占有重要地位, 体现了厦门作为典型的沿海城市的特征。其次为耕地生态系统, 同样占据较大比重, 说明耕地是资源环境承载力供给的重要生物生产用地。林地的人均资源环境承载力排第三位, 比重最小的是草地生态系统, 厦门的草地面积也相对较少。

表2 资源环境承载力计算结果

	土地面积 (ha)	人均土地面积 (ha/人)	均衡因子	产量因子	资源环境 承载力 (gha)	人均资源 环境承载力 (gha/cap)
耕地	36 779.054	0.009 172	2.52	2.18	202 049.41	0.050
林地	67 335.682	0.016 792	1.29	1.18	102 498.37	0.026

续表

	土地面积 (ha)	人均土地面积 (ha/人)	均衡因子	产量因子	资源环境 承载力 (gha)	人均资源 环境承载力 (gha/cap)
草地	15 760.8	0.000 004	0.46	0.81	5.87	0.000
水域	62 770.514	0.015 653	2.52	2.18	344 836.10	0.086
建设用地	84 805.063	0.021 148	0.37	1.27	39 849.90	0.010
未利用地	2 002.730 4	0.000 499	0	0	0.00	0.000
合计	253 708.8	0.063 269	—	—	689 239.66	0.172

注：资源环境承载力的单位为“全球公顷”即“gha”（global hectare），它与土地面积公顷（hectare）不同，1全球公顷体现了全球平均生产力水平下1公顷土地利用面积。gha/cap为全球公顷/人。

由图3可以看出，厦门市资源环境承载力供给的空间分布不均，整体资源环境承载力分布格局与土地利用类型分布的地理特征具有一定的相似性，具体表现为南部海域的整体资源环境承载力最高，

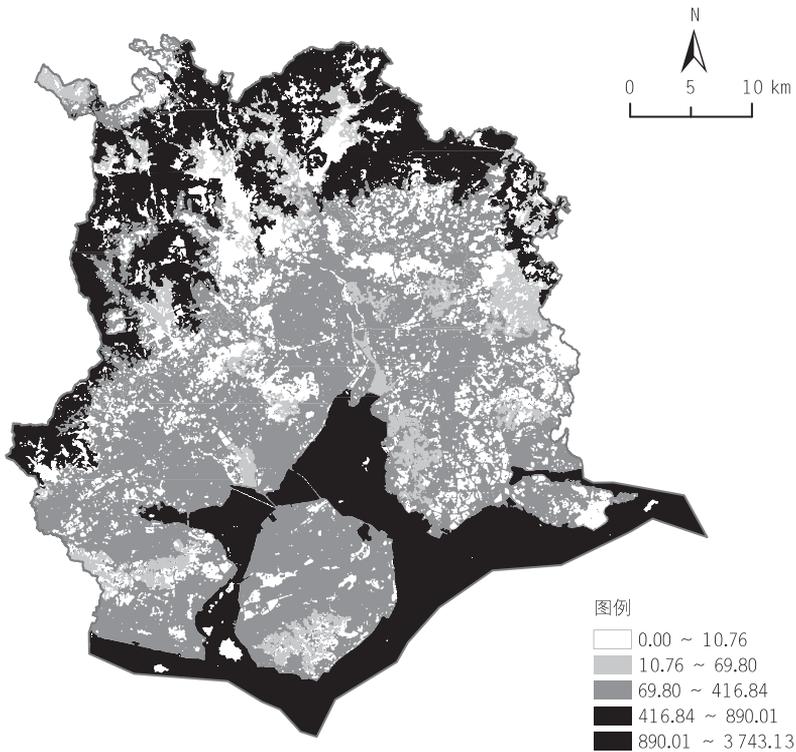


图3 斑块尺度资源环境承载力供给空间分布示意

说明海洋生态系统具有较高的稳定性；其次为厦门北部林地，具有较高的资源环境承载力，森林也具有较高的生态稳定性；建设用地和北部的大部分耕地区域具有中等的资源环境承载力；位于城区建设用地内部的林地、水域以及翔安区、同安区南部的耕地区域具有相对较低的资源环境承载力，说明受到城市建成环境人类活动的影响，原本具有较高生态调节能力的林地和水体的资源环境承载力降低；厦门岛内部分林地和筲箕湖、湖边水库，岛外同安区中北部的部分林地、耕地和翔安区东南部耕地、未利用地，以及鼓浪屿等周边岛屿，具有最低的资源环境承载力，体现出该类型地类环境的生态脆弱性。

4.2 区域生态足迹

表3为生物资源消费账户。能源消费转变为化石燃料生产地面积时，使用世界上单位化石燃料生产土地面积的平均发热量为标准，将当地能源所消耗的热量折算成一定的化石燃料土地面积，得到表4所示能源消费账户。依据生态足迹测算方法，测算厦门市生态足迹的需求结果，计算结果如表5所示。

表3 2017年生物资源消费账户

生物资源账户		全球平均产量 (kg/ha)	生物量 (t)	生产土地类型
农产品	谷类	2 744	19 759	耕地
	豆类	1 856	462	耕地
	薯类	12 607	15 051	耕地
	油料	1 856	7 113	耕地
	蔬菜	18 000	522 918	耕地
	糖类	4 893	1 396	耕地
林产品	油菜籽	1 600	8	林地
	水果	3 500	15 975	林地
	木材	1.99	28 599	林地
动物产品	猪肉	74	42 322	草地
	牛肉	33	779	草地
	羊肉	33	88	草地
	禽蛋	400	4 111	草地
	奶类	502	792	草地
水产品	各类水产品	29	44 402	水域

注：木材消费量单位为 m^3 ，木材全球平均产量单位为 m^3/ha 。

表 4 2017 年能源消费账户

能源账户	全球平均能源足迹 (GJ/ha)	折算系数 (GJ/t)	消费量	生产土地类型
原煤	55	20.93	3 307 536t	化石能源用地
天然气	93	38.98	34 575 万 m ³	化石能源用地
汽油	93	43.12	16 886t	化石能源用地
柴油	93	42.71	37 549t	化石能源用地
燃料油	71	50.20	8 465t	化石能源用地
热力	1 000	29.34	6 028 800 百万 kJ	建设用地
电力	1 000	11.84	981 390 万 kW · h	建设用地

注: 天然气消费量单位为万 m³, 天然气密度为 0.717 4kg/m³; 热力消费量单位为百万 kJ; 电力消费量单位为万 kW · h, 1kW · h=3 600 000J。

表 5 生态足迹需求结果

	均衡前生态足迹 (ha)	均衡前人均生态足迹 (ha/人)	均衡因子	总生态足迹 (gha)	人均生态足迹 (gha/cap)
耕地	41 812.33	0.010	2.52	105 367.07	0.025
林地	33 168.29	0.008	1.29	42 787.09	0.010
草地	610 046.84	0.152	0.46	280 621.55	0.070
水域	1 531 103.45	0.382	2.52	3 858 380.69	0.963
建设用地	188 504.65	0.047	0.37	69 746.72	0.017
化石能源用地	1 393 690.33	0.348	1.35	1 881 481.95	0.470
合计	3 798 325.89	0.947	—	6 238 385.07	1.555

计算得到厦门总生态足迹 6 238 385.07 全球公顷, 人均生态足迹面积为 1.555 全球公顷/人, 即厦门市每人需要 1.555 公顷的土地面积进行生产。从生态足迹构成来看, 水域、化石能源用地所占比例最大, 分别占总需求量的 61.90%和 30.21%, 草地、耕地、建设用地、林地生态足迹占比较小。说明厦门对水域生态系统的需求量大, 体现了沿海城市水产品消费占重要地位以及对海洋生产的依赖性。人口对化石燃料用地的需求次之, 而对草地、耕地、建设用地的需求不高。

4.3 供需平衡分析

当前厦门市生态足迹总供给为 689 239.66 全球公顷, 总需求为 6 238 385.07 全球公顷, 供给远小于需求量, $ED < 0$, 生态预算为赤字。说明 2017 年厦门地区总人口对自然资源的消耗已经超出了生态

系统承载能力的阈值，在不考虑相关消费品输出与输入的情况下，该地区资源利用模式处于不可持续发展状态。如图4所示，从各单项生产性土地提供的供给（人均资源环境承载力）和需求（人均生态足迹）情况分析，生物生产性土地类型中的耕地和林地的资源环境承载力均大于生态足迹，保持生态盈余，说明当前厦门耕地面积在不考虑粮食输出输入的情况下能够满足本地人口的消费需求。厦门森林覆盖率达40%以上，反映了厦门在积极创建国家森林城市的生态保护中取得实质性的成效。其他类型的生物生产性土地，如草地、水域和建设用地，均处于供小于求的生态赤字状态。其中，水域的生态赤字最大，且远远高于草地与建设用地，一方面反映了对辖区内水域的过度开发利用；另一方面，由于海洋具有开放性，所以代表水域生物资源消费的各类水产品的生产不一定均来自于厦门辖区内的海域，但水域的生态安全需得到格外关注。建设用地处于生态赤字状态，反映了厦门近年来的城镇化快速发展给生态环境造成了一定的压力。

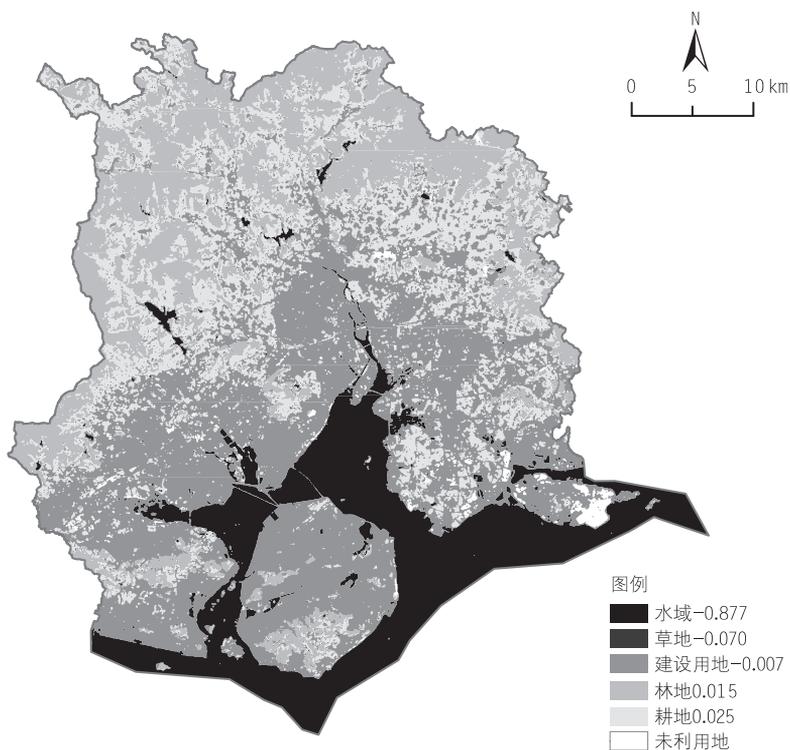


图4 各土地类型生态盈余/赤字状况示意

5 国土空间优化策略

5.1 斑块单元国土质量提升

依据厦门资源环境承载力在斑块单元呈现的空间分异特征，提出针对性的国土空间格局优化策略（图 5）。厦门岛周边的海岛均呈现了最低的资源环境承载力，以鼓浪屿为代表的文化遗产景观以及其他生态岛屿需要得到格外重视与保护，对其的开发利用应当追求高品质、高效率、低能耗，最大程度减少单位经济产生的环境压力。同样，研究区内湖泊和水库资源环境承载力最低，其多为重要的饮用水源地，必须严格控制该类水域及周边的生产建设活动，同时建立一定的管制与保育机制，保持水土、涵养水源，全面提升生态质量。资源环境承载力相对较高的林地地区，主要经济活动以农场经营生产与以天竺山和莲花国家森林公园为代表的旅游活动为主，十九大明确指出，要建立以国家公园为

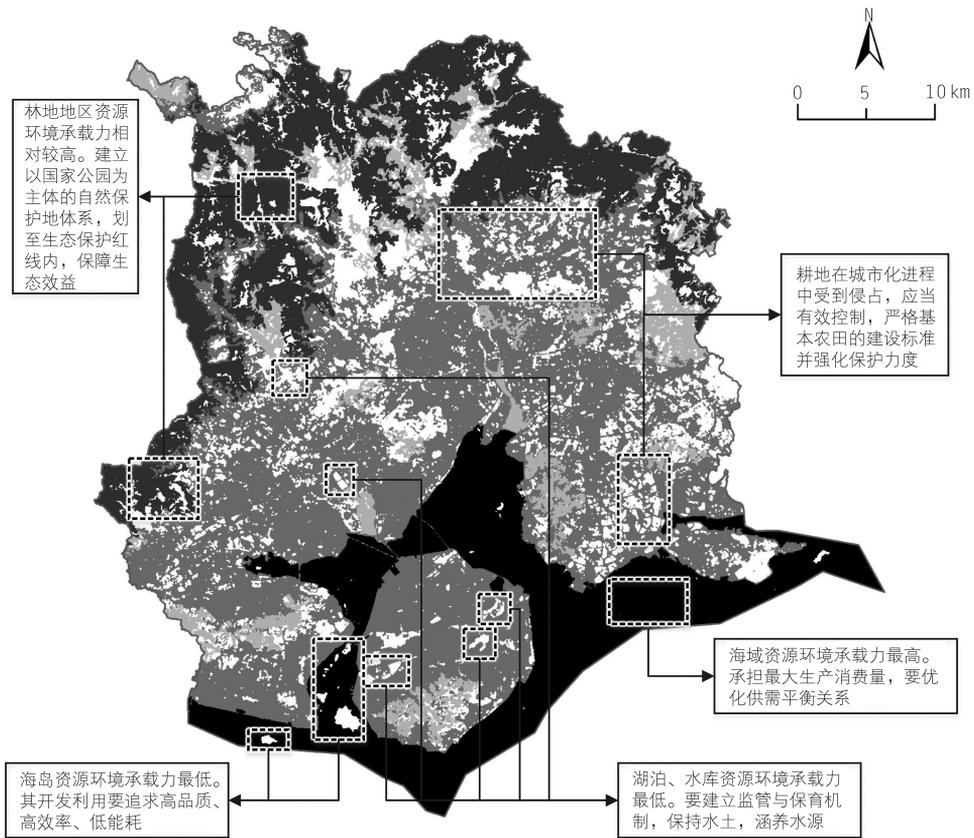


图 5 典型斑块单元国土空间质量提升策略示意

主体的自然保护地体系,作为重要的生态功能区,要将主体林地划定在生态保护红线内,保障生态效益。厦门海域提供了最高的资源环境承载能力,同时也对应承担了最大的生产消费量,需要进一步优化供给与消费之间的平衡关系。

耕地生态系统往往在城市化进程中不断被侵占,造成耕地的严重流失,而且从土地自身属性看来,耕地资源环境承载力绝对值较大,对整体承载力的贡献大,厦门市北部和东部有耕地生态系统集中分布,是提高整体资源环境承载力的重点潜力区域。因此通过控制城镇建设对耕地生态系统的侵占是有效提高耕地资源环境承载力供给的主要手段,要严格基本农田的建设标准并强化保护力度,原则上城乡建设区以外的耕地都应当得到最大限度的保护。

国土空间规划必须根据资源环境承载力的大小来调节区域内资源开发的强度和环境治理的广度与深度,要求规划内容与承载力大小相契合、相适应。斑块单元的国土质量提升策略打破了行政区划的壁垒,避免了资源环境自然分区的机械割裂,有助于实现区域的均衡协调发展。

5.2 街镇单元人口调控

按厦门市街镇单元分别计算其资源环境承载力,借助各街道的人口分布数据,通过比较各街道现状常住人口数量和资源环境承载力的大小,针对性地对厦门各街镇尺度面对的承载压力状况进行判别。理论上讲,资源环境承载力与人口数量有直接的关系,对一些人口数量多,且资源环境承载力低的地区应当优先进行调控。“十二五”规划纲要提出对人口密集、开发强度偏高、资源环境负荷过重的部分城市化地区要优化开发,对资源环境承载能力较强、集聚人口和经济条件较好的城市化地区要重点开发。因此,本文将资源环境承载力低于均值,同时人口数量高于均值的街镇选作优先调控单元,通过对其制定适合的政策引导进行有序科学的人口疏解,缓解区域承载压力。

由图6可知,思明区与湖里区资源环境承载力普遍较低,其中,思明区嘉莲街道、开元街道、莲前街道和筓筓街道以及湖里区全域,均处于高人口数量、低资源环境承载力的状态,基本反映了厦门岛内作为主要生产生活场所的高密度人居现象。岛外仅有海沧区新阳街道,集美区侨英街道、杏滨街道、杏林街道,同安区西柯镇和祥平街道人口数量较高,且资源环境承载力较低,这些区域均为主要的城镇人口聚居处,翔安区没有具有人口数量多,但承载力低特征的街镇,反映了翔安区各街镇面临的生态压力较小,具备进一步发展的潜力。因此,要统筹人口分布、经济布局、国土利用,引导人口和经济向适宜开发的区域集聚。进一步实现跨岛发展,通过各类产业、货运港口、行政中心向岛外的逐步迁移,带动人口向岛外各区域流动,缓解厦门本岛的资源环境承载压力,依据各街镇发展的不同阶段,根据城市的结构、功能状况以及驱动因素,采取相应的措施来调整各街镇经济发展活动的方式、强度和速度,以引导区域人口的流动。如图7所示,可按照资源环境承载力和常住人口的数量与其各自均值的大小关系,将厦门各街道划分为三类区域,针对其不同情况,可将资源环境承载力低且人口数量高的区域定义为优先提升区,对该类区域进行优先提升,科学有序疏解人口,缓解承载压力;将

资源环境承载力高且人口数也高、资源环境承载力低且人口数也低的区域定义为优化引导区,进一步优化现状人口规模,合理引导布局;将资源环境承载力高且人口数量低的区域定义为保护控制区,该类区域面临的生态压力相对较小,且多位于北部林地、耕地集中区,应当更强调对其的生态保护价值。

人口规模的承载往往精细化程度高,涉及单元尺度小,政策操作性强,依据资源环境承载力评价结果对地区人口数量进行有机疏散,将人口与承载能力相匹配,有助于促进人地关系协调发展。

6 结论与讨论

本文依托遥感技术,利用生态足迹的基本理论和方法,对厦门市域的土地利用斑块单元尺度的资源环境承载力进行了定量评价,改善了城市尺度区域利用统计数据计算资源环境承载力在空间分异表达和空间格局分析中的不足,并提出针对性的国土优化策略。研究结果如下。

(1) 厦门市人均资源环境承载力为 0.172 全球公顷/人。水域生态系统人均资源环境承载力占据的比重最大,其次为耕地,林地的人均资源环境承载力排第三位,比重最小的是建设用地和草地生态系统。

(2) 厦门市资源环境承载力供给的空间分布不均,整体资源环境承载力分布格局与土地利用类型分布的地理特征具有一定的相似性。其中南部海域的资源环境承载力最高,其次为厦门北部林地,建设用地和北部的大部分耕地区域具有中等的资源环境承载力,同安区南部的耕地区域具有相对较低的资源环境承载力,湖泊、水库以及周边岛屿等具有最低的资源环境承载力。

(3) 厦门市人均生态足迹面积为 1.555 全球公顷/人,供给远小于需求量,出现生态赤字,在不考虑相关消费品输出输入的情况下,厦门资源利用模式处于不可持续发展状态。需要采取针对性措施提升区域整体生态质量。

(4) 资源环境承载力空间分异结果可作为国土空间优化提升方略的重要依据。分别从斑块单元的国土质量提升和街镇单元的人口调控两方面提出针对性的国土空间格局优化策略,并依据资源环境承载力和常住人口数量的关系将厦门各街镇单元划分为优先提升区、优化引导区和保护控制区。

斑块尺度的资源环境承载力测算是指导国土空间规划优化实施的有效手段。资源环境承载力已成为国家规划与区域发展的科学基础和核心指标之一。国土空间规划是各级区域发展战略的空间部署,其体系构建以生态保育格局、人口集聚格局、经济发展格局为重要内容,都将资源环境承载力作为基础依据。资源环境承载力研究旨在通过解释自然和经济社会发展演变规律,客观认识和评价自然资源环境开发利用条件,协调国土空间开发结构和总体布局,从而构筑合理的人地关系,实现人与自然和谐发展。其科学性与可持续发展理念一脉相承,其应用性与国家战略紧密契合(刘天科、周璞,2018)。未来,需要充分利用现代地学技术手段,完善承载力定量评价方法(封志明、李鹏,2018),依托遥感技术的国土空间格局研究将成为大势所趋。首先,依据多时相遥感数据可以实现资源环境承载力的

动态监测分析与趋势预测预警,可用于指引未来区域发展功能完善和国土空间开发目标设定;其次,遥感识别了耕地、水域、海岛等承载主体的短板要素,以“短板思维”明晰区域发展制约因素,依据各本底要素的评价结果对国土空间划定分类保护原则;此外,依托遥感便于实现区域承载力在斑块尺度的空间分异表达,针对重点区域采取相应有效措施,依据承载力评价阈值弹性,合理进行开发规模、强度和人口数量的控制。斑块尺度的资源环境承载力探索有助于实现国土空间规划精细化实施需求。总之,承载能力在斑块尺度的拓展研究与持续影响,将在完善政府空间治理体系、统筹国土空间合理配置中发挥越来越重要的作用。

基于生态足迹法的资源环境承载力研究还存在诸多不足,如全球平均生产力的相对性和评价方法的静态性,以及对经济、社会因素和要素流动性的忽略均会导致结果的缺陷,需要在未来研究中进一步完善。但斑块尺度的资源环境承载力评价客观准确地分析厦门市域及内部资源环境承载力的空间分布状态。遥感技术集成 GIS 空间分析的资源环境承载力评价方法定量地计算了区域资源环境承载力的供给值差异,快速准确地表达区域资源环境承载力空间信息,为未来进一步的深化探索提供了条件。

致谢

国家自然科学基金面上项目“基于行为分析的景区人流模拟与空间优化——GPS 与问卷结合的研究”(41671141);福建省自然科学基金项目“游客景点选择行为导向的景区服务设施布局方法”(2015J01226);厦门大学中央高校基本科研业务费资助项目“地图空间—认知空间—行为空间的作用机理及景区优化方法”(20720170046);厦门市科技局项目“面向三维环境和大数据的旅游心理容量测算方法与规划设计平台”(3502Z20183005)。

参考文献

- [1] FENG Z, SUN T, YANG Y, et al. The progress of resources and environment carrying capacity: From single-factor carrying capacity research to comprehensive research[J]. Journal of Resources and Ecology, 2018, 9(2): 125-134.
- [2] HABERL H, ERB K, KRAUSMANN F. How to calculate and interpret ecological footprints for long periods of time: The case of Austria 1926-1995[J]. Ecological Economics, 2001, 38(1): 25-45.
- [3] LUCK M A, JENERETTE G D, WU J, et al. The urban funnel model and the spatially heterogeneous ecological footprint[J]. Ecosystems, 2001, 4(8): 782-796.
- [4] REES W E. Revisiting carrying capacity: Area-based indicators of sustainability[J]. Population & Environment, 1996, 17(3): 195-215.
- [5] REES W E. Ecological footprints and appropriated carrying capacity: What urban economics leaves out[J].

- Focus, 1992, 6(2): 121-130.
- [6] WACKERNAGEL M, GALLI A. An overview on ecological footprint and sustainable development: A chat with Mathis Wackernagel[J]. International Journal of Ecodynamics, 2007, 2(1): 1-9.
- [7] WACKERNAGEL M, ONISTO L, BELLO P, et al. National natural capital accounting with the ecological footprint concept[J]. Ecological Economics, 1999, 29(3): 375-390.
- [8] 杜加强, 滕彦国, 王金生. 生态足迹计算过程中的某些细节处理研究[J]. 地域研究与开发, 2009, 28(2): 99-103+107.
- [9] 杜培军, 白旭宇, 罗洁琼, 等. 城市遥感研究进展[J]. 南京信息工程大学学报(自然科学版), 2018, 10(1): 16-29.
- [10] 樊杰, 周侃, 陈东. 生态文明建设中优化国土空间开发格局的经济地理学研究创新与应用实践[J]. 经济地理, 2013, 33(1): 1-8.
- [11] 封志明, 李鹏. 承载力概念的源起与发展: 基于资源环境视角的讨论[J]. 自然资源学报, 2018, 33(9): 1475-1489.
- [12] 傅伯杰, 陈立顶, 马克明, 等. 景观生态学原理及应用[M]. 2版. 北京: 科学出版社, 2011.
- [13] 高吉喜, 陈圣宾. 依据生态承载力 优化国土空间开发格局[J]. 环境保护, 2014, 42(24): 12-18.
- [14] 顾康康, 储金龙, 汪勇政. 基于遥感的煤炭型矿业城市土地利用与生态承载力时空变化分析[J]. 生态学报, 2014, 34(20): 5714-5720.
- [15] 李金海. 区域生态承载力与可持续发展[J]. 中国人口·资源与环境, 2001, 11(3): 76-78.
- [16] 林聪, 李小磊, 杨楠, 等. 遥感产品支持的城市群生态足迹空间格局研究——以长江三角洲核心区城市群为例[J]. 地理与地理信息科学, 2018, 34(3): 20-25+130.
- [17] 刘天科, 周璞. 加强资源环境承载力研究应用 科学引导国土空间开发和保护[N]. 中国自然资源报, 2018-10-10(5).
- [18] 刘文政, 朱瑾. 资源环境承载力研究进展: 基于地理学综合研究的视角[J]. 中国人口·资源与环境, 2017, 27(6): 75-86.
- [19] 鹿瑶, 李效顺, 蒋冬梅, 等. 区域生态足迹盈亏测算及其空间特征——以江苏省为例[J]. 生态学报, 2018, 38(23): 1-9.
- [20] 任保卫. 无居民海岛资源环境承载力监测与预警评价试点研究——以三沙湾为例[J]. 海洋环境科学, 2018, 37(4): 545-551.
- [21] 王西琴, 高伟, 曾勇. 基于 SD 模型的水生态承载力模拟优化与例证[J]. 系统工程理论与实践, 2014, 34(5): 1352-1360.
- [22] 王中根, 夏军. 区域生态环境承载力的量化方法研究[J]. 长江职工大学学报, 1999(4): 9-12.
- [23] 余丹林, 毛汉英, 高群. 状态空间衡量区域承载状况初探——以环渤海地区为例[J]. 地理研究, 2003, 22(2): 201-210.
- [24] 岳东霞, 杜军, 刘俊艳, 等. 基于 RS 和转移矩阵的泾河流域生态承载力时空动态评价[J]. 生态学报, 2011, 31(9): 2550-2558.
- [25] 岳东霞, 马金辉, 巩杰, 等. 中国西北地区基于 GIS 的生态承载力定量评价与空间格局[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2009, 45(6): 68-75.
- [26] 张晓彤, 谭衢霖, 董晓峰, 等. MODIS 卫星数据中亚地区生态承载力评价应用[J]. 遥感信息, 2018, 33(4): 55-63.

- [27] 张志强, 徐中民, 程国栋, 等. 中国西部 12 省(区市)的生态足迹[J]. 地理学报, 2001, 16(5): 598-609.
- [28] 赵晶晶, 李晓松, 郭重阳, 等. 基于生态足迹分析的义乌市生态承载力评价[J]. 城市规划, 2010, 34(11): 40-46.
- [29] 朱一中, 夏军, 王纲胜. 张掖地区水资源承载力多目标情景决策[J]. 地理研究, 2005, 24(5): 732-740.

[欢迎引用]

李渊, 严泽幸, 刘嘉伟. 基于斑块尺度的资源环境承载力测算与国土空间优化策略——以厦门市为例[J]. 城市与区域规划研究, 2019, 11(1): 105-123.

LI Y, YAN Z X, LIU J W. Measurement of resource and environment bearing capacity and optimization strategy for territorial space based on patch scale: A case study of Xiamen city[J]. Journal of Urban and Regional Planning, 2019, 11(1): 105-123.