

DOI: 10.5846/stxb201804020746

董潇楠, 谢苗苗, 张覃雅, 王萌辉, 郭雪莹. 承灾脆弱性视角下的生态系统服务需求评估及供需空间匹配. 生态学报, 2018, 38(18): - .  
Dong X N, Xie M M, Zhang Q Y, Wang M H, Guo X Y. Ecosystem services demand assessment regarding disaster vulnerability and supply-demand spatial matching. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(18): - .

# 承灾脆弱性视角下的生态系统服务需求评估及供需空间匹配

董潇楠<sup>1</sup>, 谢苗苗<sup>1,2,\*</sup>, 张覃雅<sup>1</sup>, 王萌辉<sup>1</sup>, 郭雪莹<sup>1</sup>

1 中国地质大学(北京), 北京 100083

2 国土资源部土地整治重点实验室, 北京 100035

**摘要:** 生态系统服务供需空间分布格局及匹配关系是生态系统服务领域的热点问题。将生态系统服务聚焦于增强城市系统承受自然灾害的能力和恢复力功能上, 引入承灾脆弱性表征生态系统服务需求。选择首批经济特区之一的珠海市为案例研究区, 土壤保持服务为供需分析的对象, 利用承灾脆弱性评价城市系统及居民的服务需求并刻画需求的时空异质性, 采用基于“3S 技术”的 InVEST 模型定量评估服务供给潜力, 从流域与镇、街道两种尺度分析生态系统服务供需匹配状况, 以为为市级土地利用管理、景观格局优化及城市经济建设提供建议。研究表明, 根据供需空间匹配状况, 珠海市包含高供给高需求、低供给高需求、低供给低需求与高供给低需求四种供需匹配类型。珠海市土壤保持服务供需空间错位状况较为严重, 人口密集的城镇区域需求极高但供给严重缺乏, 部分生态源地的高供给无法惠及周边区域人口; 兼顾经济建设与生态保护的高供给高需求地区仅占全域面积的 8.7%; 以农业导向且经济发展缓慢的低供给低需求地区分布较广。是对生态系统服务供给与需求的时空异质性刻画及供需空间匹配的重要尝试, 为城市建设和生态管理提供参考。

**关键词:** 生态系统服务; 需求; 空间异质性; 承灾脆弱性; 供需空间匹配

## Ecosystem services demand assessment regarding disaster vulnerability and supply-demand spatial matching

DONG Xiaonan<sup>1</sup>, XIE Miaomiao<sup>1,2,\*</sup>, ZHANG Qinya<sup>1</sup>, WANG Menghui<sup>1</sup>, GUO Xueying<sup>1</sup>

1 School of Land Science and Technology, China University of Geosciences, Beijing 100083, China

2 Ministry of Land and Resources Key Laboratory of Land Remediation, Beijing 100035, China

**Abstract:** The spatial distribution pattern and matching relationship of ecosystem service supply and demand are fundamental issues in the field of ecosystem services. Focusing on ecosystem services to enhance the ability of urban systems to withstand natural disasters and resilience functions, this paper introduced vulnerability to disaster-withstanding to evaluate the ecosystem service demand. Zhuhai City, one of the first special economic zones, was selected as the case study area. Soil conservation service was the focus of the supply and demand analysis. Vulnerability to disaster-withstanding was used to evaluate the demand of urban systems and residents and represented the spatial heterogeneity of demand. The InVEST model based on “3S technology” was used to quantitatively assess the supply potential. The matching state of ecosystem service supply and demand was analyzed on both watershed and town-street scales to provide suggestions for municipal land use management, landscape optimization, and urban economic construction. The results showed that according to the spatial matching of supply and demand, Zhuhai included high supply and high demand, low supply and

基金项目: 国家自然科学基金(41771204, 41641008), 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2652015414)

收稿日期: 2018-04-02; 修订日期: 2018-07-04

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: xiemiaomiao@cugb.edu.cn

high demand, low supply and low demand, and high supply and low demand. The spatial misalignment of supply and demand of soil conservation services in Zhuhai was considered relatively serious. The demand of densely populated urban areas was extremely high, but there was a serious lack of supply, whereas the high supply of some ecological sources could not benefit the population of surrounding areas. High supply and high demand areas, taking account of economic construction and ecological protection, only accounted for 8.7%. Low supply and low demand areas were widely distributed, which were agriculture-oriented with slow economies. This study was an important attempt to describe the spatial heterogeneity of ecosystem service supply and demand and spatially match supply and demand, which provides a reference to urban construction and ecological management.

**Key Words:** ecosystem service; demand; spatial heterogeneity; vulnerability to disaster-withstanding; spatial matching of supply and demand

生态系统服务是生态系统或生态过程所形成及所维持的人类赖以生存的自然环境条件和效用<sup>[1-2]</sup>,其供给与需求的特征及空间匹配状况反映了环境资源的配置及生态系统服务对经济发展的促进与制约作用,有助于生态系统有效管理及自然资源合理配置,对实现生态安全和社会经济可持续发展具有重要推动作用,已成为生态系统服务研究领域的热点<sup>[3]</sup>。主观专家经验与客观社会经济指标相结合的方法是目前研究中需求评估的常用方法,如需求影响因素空间叠置法<sup>[4-6]</sup>、基于专家经验的评价矩阵法<sup>[7-10]</sup>、社会经济指标综合评价法<sup>[11-12]</sup>及承灾脆弱性评价法<sup>[13-14]</sup>,分别应用于全球尺度下农作物生产对气候调节服务的需求评估<sup>[15]</sup>、城乡交错带生态系统服务供需分析<sup>[16]</sup>、省域生态系统服务供需分析及绿地系统规划<sup>[11]</sup>、洪灾情景下洪水调节服务供需分析<sup>[17]</sup>等案例,其中的难点在于对人类需求的评估与空间异质性刻画<sup>[18-19]</sup>。

利用承灾脆弱性表征生态系统服务需求的研究方法关注生态系统服务中减缓灾害损失这一功能,该功能是人类活动密集区最为基础的服务需求。洪水调节和沿海保护服务是承灾脆弱性评估服务需求常用的两种类型,Nedkov 等<sup>[17]</sup>将易受洪灾破坏的城市、农业地区与洪泛平原地区相交得到不同程度的洪水调节服务需求区域;Stürck 等<sup>[20]</sup>将同一个流域内的下游 GDP 损失与能够提供洪水调节服务的上游地区相关联表征洪水调节服务需求;Liquete 等<sup>[21]</sup>通过人口密度、基础设施、人工地面、主要文化遗址四种变量确定沿海保护服务的需求区域。上述三个案例基于区域、流域和城市单元刻画需求的异质性,适用于大、中尺度的城市、欧洲大陆、欧洲沿海地区。复杂城市地域的生态系统服务尚需结合人口动态分布与灾害导致的真实损失进行内部需求异质性的客观评估。

广东省珠海市多次被评为宜居城市,但近几年快速发展过程中面临的诸如水土流失、滑坡、崩塌等生态环境问题日益严峻,迫切需要借助生态系统服务供需匹配空间异质性分析为城市建设与生态管理提供依据。土壤保持是生态系统提供的重要调节服务之一,在区域侵蚀控制以及生态安全维持方面具有不可替代的作用<sup>[22]</sup>。复杂城市地域的土壤保持服务主要作用于减少灾害对城市居民生命安全和经济社会系统的损害。因此本文选择珠海市为案例研究区,土壤保持服务为供需分析研究对象,利用承灾脆弱性评价城市系统及居民对土壤保持服务的需求并刻画其空间异质性;结合 InVEST 模型的土壤保持服务供给潜力评估,从流域与镇、街道两种尺度分析生态系统服务供需匹配状况,探究流域尺度下的生态系统服务供需与土地利用结构和景观格局的关联,以期为市级土地利用管理、景观格局优化及城市经济建设提供建议。

## 1 研究区概况

珠海市位于广东省中南部,地处珠江口西岸,磨刀门、鸡啼门、虎跳门、崖门之水汇流入海处,乃珠江三角洲中心城市之一。地处 21°48′—22°27′N,113°03′—114°19′E 之间。东与香港、深圳市隔海相望,南与澳门相连,西邻新会、台山市,北与中山市接壤。全市海陆总面积 7653 km<sup>2</sup>,其中陆地面积 1711.2 km<sup>2</sup>,占总面积的 22.36%。设有香洲区、金湾区、斗门区 3 个行政区,香洲区辖狮山、湾仔、拱北、吉大、香湾、梅华、前山、翠香 8

个街道和南屏镇;斗门区辖井岸、白蕉、斗门、乾务、莲洲 5 个镇;金湾区辖三灶、红旗 2 个镇(图 1)。

珠海市坐落于沿海的山脉和丘陵高地之间,地貌类型多样,包括山地、丘陵、三角洲平原、滨海沉积平原。珠海市共有大小河流 170 条,形成了山、水、林、海相互交融的人居大环境。

珠海市属亚热带季风气候区,多年平均气温为 22.4℃;陆地的平均多年降雨量为 2042 mm,呈现由南向北递减的地区分布特征;由于受热带气旋影响,珠海市各地多发暴雨,短历时降雨强度大,沿海地区尤为突出,土壤侵蚀隐患较为严重。

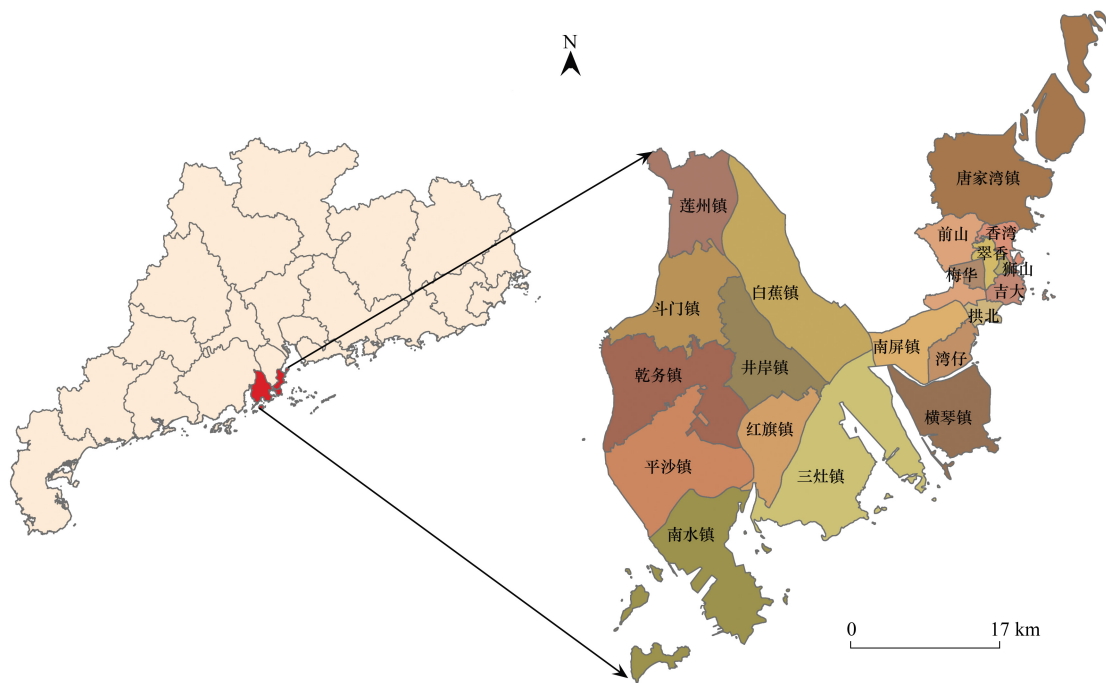


图 1 珠海市地理位置与行政辖区

Fig.1 The geolocation and administrative district of Zhuhai

## 2 研究方法

### 2.1 供需空间匹配原理概述

本文构建了基于承灾脆弱性评价的生态系统服务需求分析及其供需空间匹配理论框架(图 2)。

生态系统服务供给是指在给定的时间和区域范围内生态系统提供的能够被人实际利用的自然资源和服务。本研究采用 InVEST 模型对生态系统服务的供给潜力进行空间表达和定量评估。该模型基于 3S 技术,能够体现生态系统服务的空间异质性特征,并且评估结果能为管理者的决策和规划提供关键有效信息<sup>[23]</sup>。

生态系统服务需求是指被人类社会消耗(能够获得的)或者希望获得的生态系统服务数量<sup>[24]</sup>。基于承灾脆弱性视角,将城市系统与居民作为承灾体,脆弱性程度高表明对生态系统服务的需求程度高。市域尺度的脆弱性程度受到灾害易发性与胁迫、人口数量与空间分布等因素的影响。本文将利用灾害(隐患)点数据获取灾害易发区域与损失,结合手机基站手机信令数据获得动态人口的分布<sup>[25-26]</sup>,考虑因人口密度造成的灾害损失程度。

从流域尺度与镇、街道尺度分析供需匹配状况,流域尺度侧重于分析供需匹配类型,街道尺度旨在通过各辖区供需比分析为城市管理提供建议。首先对供给与需求进行 z-score 标准化,将标准化的结果划分供需匹配类型:高供给高需求、低供给高需求、低供给低需求以及高供给低需求。其中低供给高需求说明生态系统服务的功能在空间上无法满足居民需求;高供给低需求说明部分生态源地的高供给无法惠及周边区域的人口;高供给高需求说明生态保护与经济发展相协调;低供给低需求表明生态系统服务较低,但可满足现有较低经

济发展水平。再对各镇、街道供给与需求进行离差标准化,分析各辖区供需比,从而为城市管理提供建议。

## 2.2 土壤保持服务供给潜力评估

采用 InVEST 模型的泥沙输移比例模型 (SDR) 评估土壤保持服务供给潜力。模型的输入数据包括土地利用/覆被、DEM、降雨侵蚀力因子、土壤可蚀性因子、植被覆盖与管理因子、水土保持措施因子、流域图等。本文根据地理空间数据云 DEM 数据,利用 ArcGIS 的水文分析,将珠海市分为 98 个子流域;土地利用/覆被为 2015 年 30 m 空间分辨率的土地覆被数据,来源于中国科学院 1:10 万比例尺土地利用数据库<sup>[27]</sup>,包括一级六类二级十九类,一级类型有耕地、林地、草地、水域、建设用地以及未利用地;累年降雨数据来源于中国气象数据共享服务网;土壤数据来源于第二次全国土壤普查数据,采用的土壤分类系统主要为 FAO-90;通过查阅相关研究资料与文献<sup>[22,28-30]</sup>获得各土地利用/覆被类型的植被覆盖与管理因子、水土保持措施因子。

## 2.3 土壤保持服务需求核算

本文采用承灾脆弱性评价方法刻画土壤保持服务需求的时空异质性。综合考虑致灾程度和人口密度两方面因素。首先,以全市的灾害损失量代表致灾程度。通过实地调查和地质灾害报告搜集 177 个地质灾害(隐患)点(包括滑坡、潜在滑坡、崩塌以及潜在崩塌)。采取信息熵的方法,根据灾害点的直接经济损失和威胁资产两项指标的离散程度和贡献信息量大小确定熵权各自为 0.5,加权计算得到灾害点的损失。由于地形、坡度与地质灾害(隐患)点的分布与损失无明显相关性,因此忽略不计。考虑距离因素,利用反距离权重将灾害点的损失扩展到市域,灾害点以外其他地区的损失表达了生态系统为防止灾害发生必须付出的代价;利用手机基站大数据,获取珠海市 2016 年 4 月某一节日周的手机信令数据,求得珠海市的人口动态分布作为人口密度。由于人口密度指标波动较大,因而借助统计学中取对数的方法,在不影响整体分布趋势的前提下,将局部剧烈波动特征弱化后代入计算,以便于后续分析。

$$X = A \times \log_{10} B \quad (1)$$

式中, $X$  代表土壤保持需求; $A$  代表灾害损失量; $B$  代表人口密度

## 2.4 土壤保持服务供需匹配

基于上述土壤保持服务供给、需求评估方法,对所求得的供给量、需求量进行 z-score 标准化与离差标准化。将 z-score 标准化的结果划分象限进行供需匹配,以 x 轴表示标准化的供给量、以 y 轴表示标准化的需求量,划分出 4 个象限:I、II、III、IV 依次代表高供给高需求、低供给高需求、低供给低需求、高供给低需求 4 种供需匹配类型。

土壤保持服务供给量、需求量的 z-score 标准化方法为:

$$x = \frac{x_i - \bar{x}}{s} \quad (2)$$

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (3)$$

$$s = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (4)$$

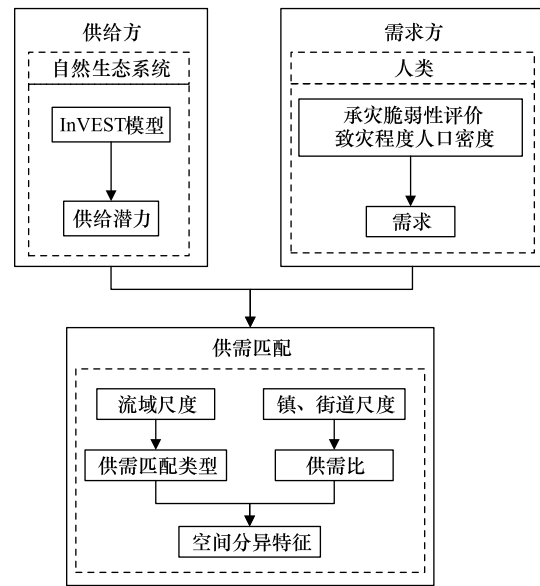


图2 基于承灾脆弱性评价的生态系统服务供需空间匹配理论框架

Fig.2 Theoretical framework of the match between ecosystem services supply and demand based on vulnerability to disaster-withstanding assessment

式中,  $x$  为标准化后的土壤保持服务供给量、需求量;  $x_i$  为第  $i$  个单元的土壤保持服务供给量、需求量;  $\bar{x}$  为全市平均值,  $s$  为全市标准差,  $n$  为评价单元的总数。

土壤保持服务供给量、需求量的离差标准化方法为:

$$x = \frac{x_i - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}} \quad (5)$$

式中,  $x$  为标准化后的土壤保持服务供给量、需求量;  $x_i$  为第  $i$  个单元的土壤保持服务供给量、需求量;  $x_{\max}$  为全市最大值,  $x_{\min}$  为全市最小值。

### 3 结果与分析

#### 3.1 土壤保持服务供给空间分异

运行 InVEST 模型, 计算得到流域尺度的土壤保持量, 按自然断点法将土壤保持量从大到小分为高供给、较高供给、中供给、较低供给与低供给 5 级(图 3)。为了分析土地利用类型与景观格局对供给潜力的影响, 本文分别计算了 5 种级别中的土地利用结构(表 1)与斑块密度(图 4)。各级别的土地利用结构差距较大(表 1), 低供给的土地利用类型主要为水域, 其面积占 39.45%, 而林地面积仅占 7.69%; 较低供给的土地利用类型主要为耕地, 其面积占 30.45%, 其次为 28.75% 的建设用地; 高供给和较高供给的土地利用类型主要为林地, 其面积各占 66.11% 和 49.81%, 建设用地面积仅占 20% 左右。斑块密度反映了景观的破碎化程度, 高供给区域对应较低的破碎化程度。图 4 表明低供给的斑块密度较大, 从高供给到低供给斑块密度逐步增加, 景观格局的破碎化程度逐渐增加, 人类活动对景观的干扰程度加大。

综合可知, 土壤保持量低的地区土地利用类型复杂, 其中耕地、水域及建设用地分布广, 林地分布非常少; 斑块较为破碎, 人类活动对景观干扰较大。土壤保持量高的地区, 林地分布最广且斑块破碎度低, 受人类活动干扰度较小。

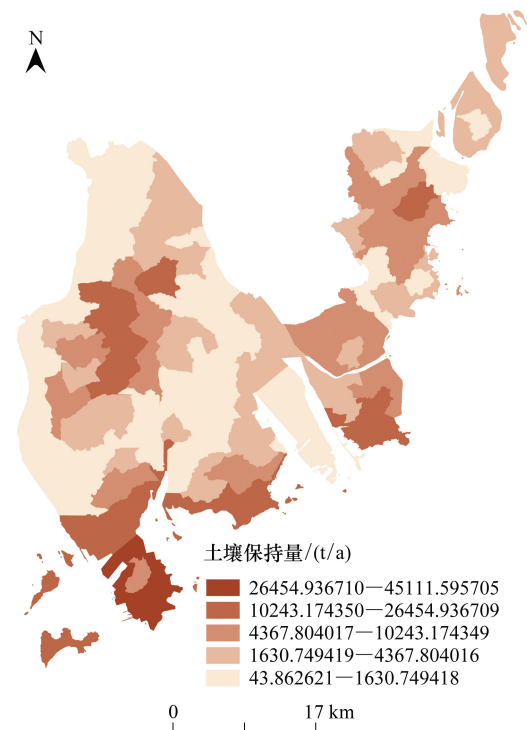


图 3 土壤保持量  
Fig.3 Soil retention

表 1 各供给等级土地利用结构(%)

Table 1 Land use structure of supple grade

供给等级 Supply grade	耕地 Arable land	林地 Forest	草地 Grassland	水域 Water area	建设用地 Construction land	未利用地 Unused land
高供给 High supply	1.24	66.11	1.13	10.61	20.91	0.00
较高供给 Little high supply	11.82	49.81	0.14	17.36	20.87	0.00
中供给 Medium supply	18.27	45.66	1.20	6.90	27.76	0.21
较低供给 Little low supply	30.45	23.58	0.47	16.75	28.75	0.00
低供给 Low supply	34.05	7.69	0.05	39.45	18.35	0.41

#### 3.2 土壤保持服务需求空间分异

由于地质灾害易发区域与胁迫的空间异质性, 珠海市灾害损失的空间分异特征明显(图 5)。例如, 斗门

区白藤街道附近的灾害点虽少,但由于工业分布集中受威胁资产数额较大,灾害损失巨大。板障山、凤凰山东侧灾害点分布密集,但直接经济损失与威胁资产均较小,因此灾害损失较小。

由于市内自然地理条件与经济发展差异,珠海市人口密度空间分异显著(图6),整体上东部人口高于西部,各区中心的人口高于周边。其中香洲主城区、斗门区中心井岸镇与金湾区中心红旗镇的人口密度非常大,大部分超过了3000人/(日·0.25 km<sup>2</sup>)。

按自然断点法将土壤保持服务需求从高到低分为高需求、较高需求、中需求、较低需求与低需求5级(图7)。对比图5、6、7可知,尽管需求高低值分布由灾害损失量、人口密度共同决定,但需求分布格局与人口密度分布最为接近。高需求主要分布于井岸镇、红旗镇、湾仔与拱北等地区。一方面由于山体附近集中的崩塌与滑坡造成一定的灾害损失;另一方面由于这些地区承担综合性服务职能,重点发展第三产业,居住用地、商业用地、公共管理与公共服务用地分布广,人口密度大。

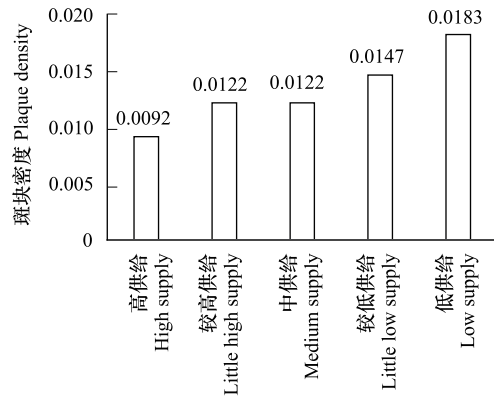


图4 各供给等级景观斑块密度  
Fig.4 Plaque density of supple grade

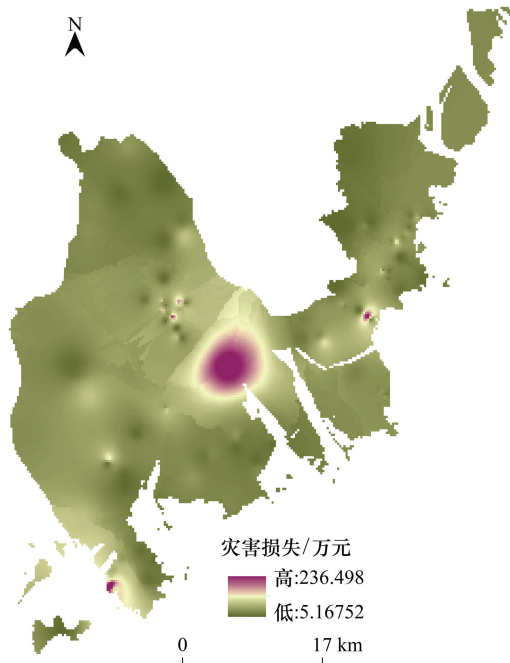


图5 地质灾害损失  
Fig.5 Geological hazard loss

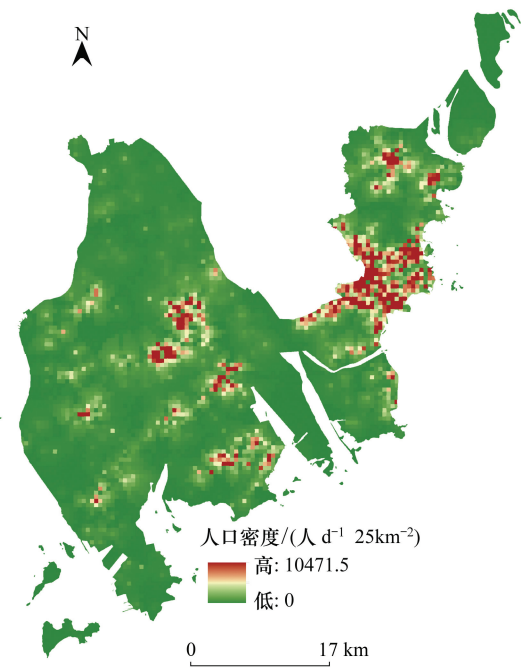


图6 人口密度  
Fig.6 Population density

### 3.3 流域尺度的供需匹配空间分异

基于象限分布,根据供需匹配空间分异状况,全市98个流域可被划分为高供给高需求、低供给高需求、低供给低需求与高供给低需求4种供需匹配类型(图8)。结果表明,珠海市的供需匹配类型主要为供需不平衡的低供给高需求和高供给低需求;其次是低供给低需求;高供给高需求最少。为了分析土地利用类型与景观格局对供需匹配状况的影响,本文分别计算了4种类型的土地利用结构(表2)和6种景观格局指数(表3)。不同供需匹配类型的土地利用结构和景观格局指数的差距较大。

### 3.3.1 各供需匹配类型的土地利用结构特征

林地能够提供最大的土壤保持服务,其面积在 4 种供需匹配类型中的占比顺序是:高供给低需求>高供给高需求>低供给低需求>低供给高需求。高供给区域(包括低需求和高需求)的土地利用类型主要是林地,其面积分别占 47.98%、43.76%;低供给区域耕地面积均大于 30%,水域面积均大于 20%,远高于另两类。其中低供给低需求的土地利用类型主要是耕地与水域;低供给高需求的土地利用类型主要是建设用地,其面积占 34.39%。而低供给低需求的建设用地面积仅占 15.54%(表 2)。

### 3.3.2 各供需匹配类型的景观格局特征

斑块密度反映了景观的破碎化程度<sup>[31]</sup>,低供给高需求的斑块密度最高,说明景观格局的破碎化程度较高,人类活动频繁;景观优势度代表某种景观占优势地位的程度,景观聚集度代表某种景观的分布的聚集程度。低供给高需求和低供给低需求的景观优势度和景观聚集度明显大于另两类,说明景观类型中某种景观占优势地位且分布比较聚集;平均分维数代表斑块的自相似程度,平均分维数越小说明形状越不规则,从一定程度上反映了人类活动对斑块的影响程度。高供给高需求与低供给低需求的平均分维数高于另两类,说明景观形状更规则(表 3)。

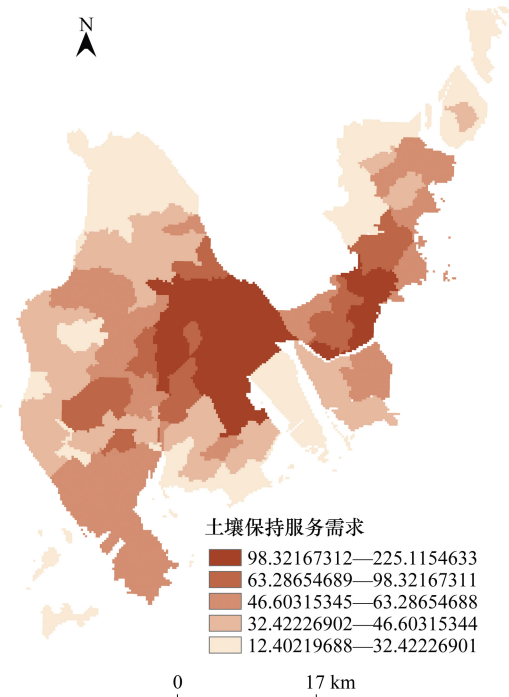


图 7 土壤保持服务需求

Fig.7 The demand of soil retention

表 2 供需匹配类型的土地利用结构

Table 2 Land use structure of type of match between supply and demand

土地类型 Land type	高供给高需求		低供给高需求		低供给低需求		高供给低需求	
	High supply and high demand		Low supply and high demand		Low supply and low demand		High supply and low demand	
	面积/hm <sup>2</sup> Area	百分比/% Percentage	面积/hm <sup>2</sup> Area	百分比/% Percentage	面积/hm <sup>2</sup> Area	百分比/% Percentage	面积/hm <sup>2</sup> Area	百分比/% Percentage
耕地 Arable land	3192.93	23.48	12103.29	31.27	18819.99	33.26	6447.51	13.74
林地 Forest	5950.35	43.76	4049.64	10.46	9039.15	15.97	22520.34	47.98
草地 Grassland	39.60	0.29	30.60	0.08	144.90	0.26	435.69	0.93
水域 Water area	1422.27	10.46	9208.71	23.79	19541.25	34.53	6360.57	13.55
建设用地 Construction land	2993.22	22.01	13309.74	34.39	8795.52	15.54	11106.45	23.66
未利用地 Unused land	0	0	0	0	245.61	0.43	65.97	0.14
总和 Total	13598.37	1	38701.98	1	56586.42	1	46936.53	1

表 3 供需匹配类型的景观格局指数

Table 3 Landscape pattern index of type of match between supply and demand

供需匹配类型 Type of match between supply and demand	景观面积 Landscape area	斑块数量 Plaque quantity	斑块密度 Plaque density	景观优势度 Landscape dominance	景观聚集度 Landscape concentration	平均斑块分维数 Average fractal dimension
高供给高需求 High supply and high demand	13737.69	17	0.0104	4.8441	99.2115	1.0708
低供给高需求 Low supply and high demand	39011.94	12	0.0287	15.2727	99.4747	1.0588
低供给低需求 Low supply and low demand	61601.76	25	0.0153	11.1664	99.2795	1.0684
高供给低需求 High supply and low demand	49434.75	47	0.0073	7.8348	99.1384	1.0519

综上所述,各土地利用类型能够提供土壤保持服务的大小依次为:林地、耕地、水域、建设用地(由于珠海市域内的草地和未利用地面积极少,因此本文不讨论其提供的服务)。高供给地区通常有广阔的林地分布,斑块破碎度低,连通性高;高需求地区通常有大面积集中连片的建设用地,斑块破碎且形状不规则。

#### 4 镇、街道辖区供需匹配分异及对策

由于基于流域的城市管理困难,为加强自然生态系统与社会经济系统的联系,使生态系统服务有益于城市建设,定位出行政单元上的供需不匹配的热点地区,本文将镇、街道尺度下的供给和需求离差标准化,以堆叠图的形式显示其供需比(图9),并结合上文对供给、需求和供需匹配状况的分析为市政府一级对整个城市的宏观管理提供建议。

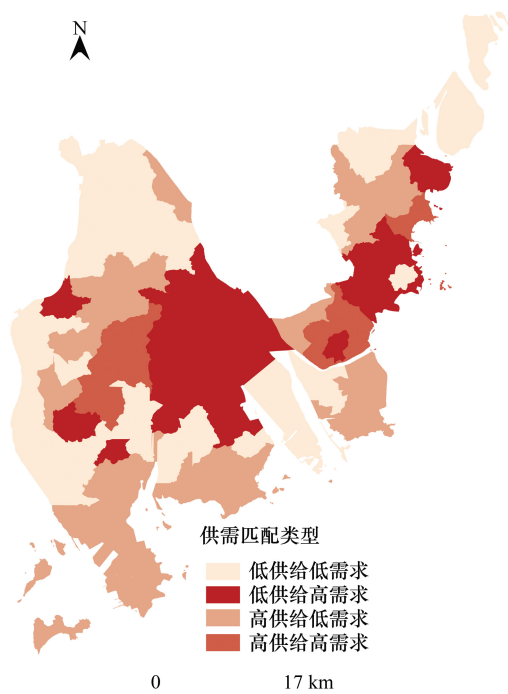


图8 生态系统服务供需匹配类型

Fig.8 The type of match between ecosystem services supply and demand

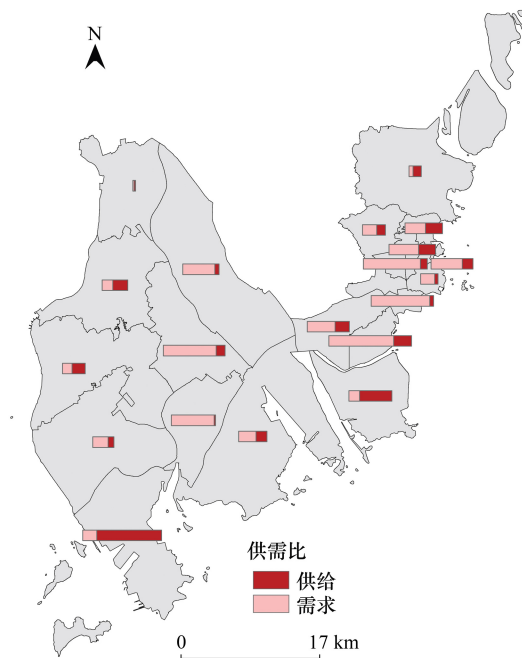


图9 各街道生态系统服务供需比

Fig.9 The ratio of ecosystem services supply and demand of street

##### 4.1 低供给高需求

处于低供给高需求状态的有井岸镇、红旗镇、白蕉镇、南屏镇和湾仔、拱北、吉大、梅华、翠香、狮山街道。这些地区城镇发展快,生态系统服务无法满足人类需求。未来一方面要完善城镇的绿色基础设施,降低斑块破碎度,提高景观连通性,提升土壤保持供给能力;另一方面适度疏散老城区职能,建设新的区中心,降低人口密度,减少土壤保持需求。例如湾仔、南屏、拱北、吉大可以与低需求的横琴组建新的中心城区,承担全市主要的综合性服务职能,重点发展第三产业。井岸镇、红旗镇可以发展成为新的西部生态中心,发展生产性及生活性服务功能,适度分散中心城区的人口。

##### 4.2 高供给低需求

处于高供给低需求状态的有斗门镇、乾务镇、南水镇和横琴镇,其中南水镇和横琴镇是供给能力最强的地区。这些区域分布着众多自然山体,目前为止尚未快速发展。未来一方面要保持高生态供给的可持续性发展,强化对黄杨山自然保护区、凤凰山区域等生态源地的保护,保障生态系统服务向周边区域的持续输送;另一方面可以通过城镇建设与产业发展吸引人口定居,提高城市居民需求。例如斗门镇、乾务镇、莲州镇可以发



展成为生态型城镇,依托自然资源大力发展生态农业和旅游休闲业;南水镇可以依托港口大力发展制造业、港口产业、休闲产业;在横琴新区开发过程中,应注重自然生态系统保育,发展生态型高新产业与旅游业。

#### 4.3 高供给高需求

处于高供给高需求状态的有前山、香湾街道。目前这些区域的经济发展与生态保护基本协调。未来应充分发挥良好的经济与生态优势,促进生态系统服务向周边区域流动<sup>[11]</sup>。同时调整经济产业结构和人口偏好以改变需求结构。

#### 4.4 低供给低需求

处于低供给低需求状态的有莲山镇、平沙镇、三灶镇和唐家湾镇。这些区域有大面积耕地、滩涂分布,城镇发展较缓慢。未来建设应以生态经济为导向,在完成产业空间重构、保障区域社会经济健康发展的前提下,以城市反哺乡村的形式推进生态空间优化,提高自然生态系统功能。例如唐家湾镇属于高新技术产业开发区,可以重点发展科研、教育;三灶镇可以依托金湾机场建立航空产业园。

### 5 结论与讨论

城市的扩展蔓延和强烈的人类活动明显影响着生态系统服务功能<sup>[32]</sup>。在有限国土空间难以满足日益增长的社会生产、生活、生态需求的背景下,明晰城市化进程下不同区域的生态本底和生态需求差异至关重要<sup>[11]</sup>。本文引入承灾脆弱性评估生态系统服务需求并刻画需求的时空异质性,采用 InVEST 模型评估供给潜力,探究生态系统服务供需匹配状况,为市级土地利用管理、景观格局优化及城市经济建设的宏观管理提供建议。

城市洪涝与台风灾害是威胁珠海市居民安全的重要因素,为建设承灾能力强的恢复型城市,承灾脆弱性评价方法同样适用于水源涵养、台风灾害防护服务在市域尺度上的需求评估。为识别灾害易发区域及量化市域的致灾损失,该方法需要大量数据支撑,而数据搜集存在一定困难。如何精确量化生态系统服务的需求,如何寻找统一的生态系统服务供需评价指标和计算方法使得供需结果具有数量单位上的可比性,仍有待进一步深入探讨。生态系统服务在空间上的流动和传递是对生态系统服务供给与需求关联研究的深化,因此未来将探究生态系统服务在供给方与受益方之间的流动机制及作用,并基于生态系统服务流视角强化区域生态建设的供需均衡。

**致谢:**特此感谢北京大学(深圳)未来城市实验室铁汉科研开放课题,以及仝德副教授为本研究提供部分资料,珠海市住房和城乡建设局在实地调研中的帮助;感谢北京大学彭建副教授、中国农业大学常青副教授与两位匿名评审专家对供需空间匹配方法提出的指导与建议。

#### 参考文献(References):

- [ 1 ] Daily G C. Nature's Services: Societal Dependence on Natural Ecosystems. Washington, DC: Island Press, 1997: 529-530.
- [ 2 ] 王如松, 欧阳志云. 社会-经济-自然复合生态系统与可持续发展. 中国科学院院刊, 2012, 27(3): 337-345.
- [ 3 ] 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.
- [ 4 ] 马琳, 刘浩, 彭建, 吴健生. 生态系统服务供给和需求研究进展. 地理学报, 2017, 72(7): 1277-1289.
- [ 5 ] 王文美, 吴璇, 李洪远. 滨海新区生态系统服务功能供需量化研究. 生态科学, 2013, 32(3): 379-385.
- [ 6 ] Schulp C J E, Lautenbach S, Verburg P H. Quantifying and mapping ecosystem services: demand and supply of pollination in the European Union. Ecological Indicators, 2014, 36: 131-141.
- [ 7 ] 白杨, 王敏, 李晖, 黄沈发, Alatalo J M. 生态系统服务供给与需求的理论与管理方法研究. 生态学报, 2017, 37(17): 5846-5852.
- [ 8 ] Kienast F, Bolliger J, Potschin M, de Groot R S, Verburg P H, Heller I, Wascher D, Haines-Young R. Assessing landscape functions with broad-scale environmental data: insights gained from a prototype development for Europe. Environmental Management, 2009, 44(6): 1099-1120.
- [ 9 ] Sohel M S I, Mukul S A, Burkhard B. Landscape's capacities to supply ecosystem services in Bangladesh: a mapping assessment for Lawachara National Park. Ecosystem Services, 2015, 12: 128-135.

- [10] Burkhard B, Müeller A, Müeller F, Grescho V, Anh Q, Arida G, Bustamante J V, van Chien H, Heong K L, Escalada M, Marquez L, Truong D T, Villareal S, Settele J. Land cover-based ecosystem service assessment of irrigated rice cropping systems in southeast Asia—an explorative study. *Ecosystem Services*, 2015, 14: 76-87.
- [11] 彭建, 杨旸, 谢盼, 刘焱序. 基于生态系统服务供需的广东省绿地生态网络建设分区. *生态学报*, 2017, 37(13): 4562-4572.
- [12] Lautenbach S, Seppelt R, Liebscher J, Dormann C F. Spatial and temporal trends of global pollination benefit. *PLoS One*, 2012, 7(4): e35954.
- [13] Wolff S, Schulp C J E, Verburg P H. Mapping ecosystem services demand: a review of current research and future perspectives. *Ecological Indicators*, 2015, 55: 159-171.
- [14] 严岩, 朱捷缘, 吴钢, 詹云军. 生态系统服务需求、供给和消费研究进展. *生态学报*, 2017, 37(8): 2489-2496.
- [15] Li J H, Jiang H W, Bai Y, Alatalo J M, Li X, Jiang H W, Liu G, Xu J. Indicators for spatial-temporal comparisons of ecosystem service status between regions: a case study of the Taihu River Basin, China. *Ecological Indicators*, 2016, 60: 1008-1016.
- [16] Burkhard B, Kroll F, Nedkov S, Müeller F. Mapping ecosystem service supply, demand and budgets. *Ecological Indicators*, 2012, 21: 17-29.
- [17] Nedkov S, Burkhard B. Flood regulating ecosystem services-mapping supply and demand, in the Etropole municipality, Bulgaria. *Ecological Indicators*, 2012, 21: 67-79.
- [18] Palomo I, Martín-López B, Potschin M, Haines-Young R, Montes C. National Parks, buffer zones and surrounding lands: Mapping ecosystem service flows. *Ecosystem Services*, 2013, 4: 104-116.
- [19] Kroll F, Müller F, Haase D, Fohrer N. Rural-urban gradient analysis of ecosystem services supply and demand dynamics. *Land Use Policy*, 2012, 29(3): 521-535.
- [20] Stürck J, Poortinga A, Verburg P H. Mapping ecosystem services: the supply and demand of flood regulation services in Europe. *Ecological Indicators*, 2014, 38: 198-211.
- [21] Lique C, Zulian G, Delgado I, Stips A, Maes J. Assessment of coastal protection as an ecosystem service in Europe. *Ecological Indicators*, 2013, 30: 205-217.
- [22] 饶恩明, 肖焱, 欧阳志云, 郑华. 海南岛生态系统土壤保持功能空间特征及影响因素. *生态学报*, 2013, 33(3): 746-755.
- [23] 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.
- [24] Villamagna A M, Angermeier P L, Bennett E M. Capacity, pressure, demand, and flow: a conceptual framework for analyzing ecosystem service provision and delivery. *Ecological Complexity*, 2013, 15: 114-121.
- [25] 李祖芬, 于雷, 高永, 吴亦政, 龚大鹏, 宋国华. 基于手机信令定位数据的居民出行时空分布特征提取方法. *交通运输研究*, 2016, 2(1): 51-57.
- [26] 钟炜菁, 王德, 谢栋灿, 晏龙旭. 上海市人口分布与空间活动的动态特征研究——基于手机信令数据的探索. *地理研究*, 2017, 36(5): 972-984.
- [27] 刘纪远, 宁佳, 匡文慧, 徐新良, 张树文, 颜长珍, 李仁东, 吴世新, 胡云锋, 杜国明, 迟文峰, 潘涛, 宁静. 2010-2015年中国土地利用变化的时空格局与新特征. *地理学报*, 2018, 73(5): 789-802.
- [28] 周彬, 余新晓, 陈丽华, 张振明, 吕锡芝, 范敏锐. 基于 InVEST 模型的北京山区土壤侵蚀模拟. *水土保持研究*, 2010, 17(6): 9-13, 19-19.
- [29] 李婷, 刘康, 胡胜, 包玉斌. 基于 InVEST 模型的秦岭山地土壤流失及土壤保持生态效益评价. *长江流域资源与环境*, 2014, 23(9): 1242-1250.
- [30] 陈姗姗, 刘康, 李婷, 袁家根. 基于 InVEST 模型的商洛市水土保持生态服务功能研究. *土壤学报*, 2016, 53(3): 800-807.
- [31] 唐秀美, 刘玉, 刘新卫, 潘瑜春, 吴彦澎, 李虹. 基于格网尺度的区域生态系统服务价值估算与分析. *农业机械学报*, 2017, 48(4): 149-153, 205-205.
- [32] 李锋, 王如松. 城市绿地系统的生态服务功能评价、规划与预测研究——以扬州市为例. *生态学报*, 2003, 23(9): 1929-1936.