

DOI: 10.5846/stxb202007301982

许萌,董潇楠,谢苗苗,王玉,仝德.基于承灾脆弱性与生态系统服务供需匹配的城市空间治理分区.生态学报,2021,41(15):6012-6023.

Xu M, Dong X N, Xie M M, Wang Y, Tong D. Zoning for urban space governance based on the disaster vulnerability and supply-demand match of ecosystem services. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(15): 6012-6023.

基于承灾脆弱性与生态系统服务供需匹配的城市空间治理分区

许 萌¹,董潇楠¹,谢苗苗^{1,2},王 玉³,仝 德^{4,*}

1 中国地质大学(北京),北京 100083

2 自然资源部土地整治重点实验室,北京 100035

3 生态环境部卫星环境应用中心国家环境保护卫星遥感重点实验室,北京 100094

4 北京大学未来城市实验室,深圳 518055

摘要:城市空间普遍面临抵御灾害能力不足的问题。构建承灾脆弱性视角下的城市生态系统服务供需分析框架对提升国土空间抵御灾害的能力具有重要意义。以珠海市为例,选择与提升区域抵御自然灾害能力高度相关的生态系统服务类型,运用 InVEST 模型及遥感信息模型评估生态系统服务供给,构建承灾脆弱性评价模型评估需求,利用供需匹配分析识别亟需治理的风险区。研究表明:(1)珠海市生态系统服务有高供给高需求、高供给低需求、低供给高需求和低供给低需求 4 种供需匹配类型,各项服务供需失衡程度为土壤保持服务>水源涵养服务>台风灾害防护服务;(2)基于供需匹配类型和主导风险类型划分了四大类风险区,高危、中危、低危风险区和安全区面积占比为 29.23%、21.70%、33.06%、16.01%,风险区等级与建设用地面积占比之间存在较好的对应关系;(3)根据风险区类别提出了多项风险综合治理区、双项风险复合治理区、主导风险专项治理区 3 种治理策略分区。生态系统服务供需匹配分析通过识别承灾脆弱性与承灾能力不匹配的热点区域,为区域/城市国土空间治理和增强国土空间抵御灾害的能力提供参考。

关键词:城市空间治理;承灾脆弱性;生态系统服务;供需匹配;珠海市

Zoning for urban space governance based on the disaster vulnerability and supply-demand match of ecosystem services

XU Meng¹, DONG Xiaonan¹, XIE Miaomiao^{1,2}, WANG Yu³, TONG De^{4,*}

1 China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China

2 Key Lab of Land Consolidation, Ministry of Land and Resources, Beijing 100035, China

3 State Key Lab of Remote Sensing for Environmental Protection Satellites, Satellite Environmental Application Center, Ministry of Ecological Environment, Beijing 100094, China

4 Future Cities Lab laboratory, Peking University, Shenzhen 518055, China

Abstract: Urban areas face the problems of insufficient ability to withstand and recover from natural disasters. The purpose of this study is to construct an analysis framework of supply and demand of ecosystem services for identifying the risk zones in urban space governance. A perspective of carrying vulnerability of natural disasters was applied in ecosystem services demand analysis for improving the security level in urban areas. Taking Zhuhai in Guangdong Province, as a case study area, this study selected three ecosystem services, including water conservation service, soil conservation service and typhoon protection service, which play an important role in improving the ability of Zhuhai to resist natural disasters.

基金项目:北京大学(深圳)未来城市实验室铁汉科研开放课题基金(2017);国家自然科学基金项目(41771204)

收稿日期:2020-07-30; **网络出版日期:**2021-05-20

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: tongde@pku.edu.cn

InVEST model and remote sensing image analysis were used to evaluate the supply of ecosystem services. An assessment framework of carrying vulnerability of natural disasters was constructed to assess the demand of ecosystem services. Risk zones were identified by the degree and type of supply-demand mismatch. The results showed that: (1) there were four supply-demand matching types of ecosystem services in Zhuhai: high supply and high demand, high supply and low demand, low supply and high demand, and low supply and low demand. The dominant matching types of the three ecosystem services were all low supply and low demand. The degree of supply-demand mismatch in Zhuhai was soil conservation service > water conservation service > typhoon protection service. (2) Based on supply-demand matching degree and types, four categories of risk zones were classified. The proportions of high-risk zone, medium-risk zone, low-risk zone and safe zone were 29.23%, 21.70%, 33.06%, and 16.01% of the total study areas. According to the land use structure of the risk zones, there was a close relationship between the risk grades and the proportion of construction land. The risk grades were affected by the allocation of ecological, production and living space in the region. (3) The ecological security in high-risk zone was most seriously threatened and should be highly prioritized. According to the categories of high-risk zone, three kinds of governance zoning were proposed: multi-risk comprehensive governance area, double-risk compound governance area and dominant-risk special governance area. This study contributes to a new perspective for improving the match analysis between supply and demand of ecosystem services. By identifying the hot spots where the vulnerability to disasters is high and the capacity to withstand disasters is low, our framework provides a reference for the enhancement of the capacity to resist disasters and the urban territorial space governance.

Key Words: urban space governance; vulnerability to disasters-withstanding; ecosystem services; supply-demand match; Zhuhai

国土空间治理是国家为保障粮食安全、保护生态环境、合理配置国土空间资源的战略要求,是推进生态文明建设,打造美丽家园的重要举措^[1]。城市是国土空间的重要组成部分,作为高密度的人类聚居区,人类安全基本需求的满足在城市国土空间治理层面尤为重要。然而,城市生态环境问题日益凸显,自然灾害、内涝等问题也日益严重,城市防灾减灾基础设施不足,增强国土空间抵御灾害的能力,以人为本推进国土空间治理和优化^[2],营造安心、安全的生产、生活、生态空间应该成为城市治理和空间规划的研究重点^[3]。在降低城市生态系统承受自然灾害威胁的脆弱性时,利用生态系统的调节服务效益更高、恢复力更强^[4]。

生态环境问题的本质是城市化和土地利用变化改变了生态系统的结构和功能^[5-6],同时又因为社会经济要素在空间分布上的差异导致对灾害安全保障的需求存在空间异质性,使部分区域生态本底无法满足生态需求。生态系统服务供需空间匹配作为一种耦合自然生态系统和社会经济系统的方法,能够通过供需方的空间关系识别供需失衡的区域,为利用生态系统服务增强城市抵御自然灾害的能力提供依据^[7-9]。

科学客观地评估生态系统服务需求一直是生态系统服务供需分析研究的重点和难点^[10]。生态系统服务需求是人类社会消耗的或希望获得的生态系统服务数量^[11-13]。以往研究中供给服务的需求主要通过产品的实际使用和消费数据来量化,文化服务需求可从人类对景观的偏好、可达性等方面建立指标进行评估^[14-15]。环境调节服务需求主要是由具体生态过程的物理量来表征,如土壤保持服务的需求量为实际土壤侵蚀量^[16]。另外基于专家知识经验的生态系统服务供需矩阵也广泛应用于需求的量化^[17-18]。上述研究方法从使用、消费或社会偏好等需求的特征来衡量生态系统服务需求,适合于宏观尺度研究区域整体生态系统服务供需平衡状态,研究结果难以为城市区域生态管控和风险治理提供切实可行的依据。城市尺度最基础与紧迫的需求是降低风险和保障居民生命、财产安全,将抵御城市区域潜在或客观存在的灾害风险作为需求,才更能够为城市空间风险治理提供实际有效的支撑。

基于承灾脆弱性的需求评价正契合上述理念。国内外学者将脆弱性看成一种损失程度,承灾脆弱性被定义为在一定的社会经济背景下,区域内的人和物在遭受自然灾害时可能造成的损失程度^[19-21]。基于承灾脆弱性的需求评价将实际、潜在受灾区域的损失程度作为承灾体对生态系统服务的需求程度^[22-23],损失越高则越需要生态系统服务来减缓损失。本文探讨了基于承灾脆弱性评价的生态系统服务供需匹配在城市空间风

险治理中的应用途径。以珠海市为例,选择对提升区域抵御自然灾害能力和恢复力具有重要意义的生态系统服务,构建基于承灾脆弱性评价的生态系统服务供需空间匹配框架,通过供需匹配结果识别对城市整体生态安全有严重威胁的区域,划分城市空间治理类型,为增强国土空间抵御灾害的能力提供实证研究。

1 生态系统服务供需空间匹配

1.1 研究区概况

珠海市位于广东省南部、珠江口西岸(113°03′—114°19′E、21°48′—22°27′N)。全市陆地面积 1711.2 km²,下辖香洲区、金湾区、斗门区 3 个行政区。珠海市属南亚热带季风海洋性气候,气温较高,年平均气温为 22.5℃;气候湿润、降雨充沛,年平均降雨量为 2061.9 mm;珠海市易受南亚热带季候风的影响,灾害性天气主要为台风和暴雨,城市内涝和土壤侵蚀问题日益突出。据此选择水源涵养、土壤保持和台风防护三项服务开展生态系统服务供需匹配研究。

1.2 基于承灾脆弱性的供需匹配框架

承灾脆弱性是区域承灾客体受自然灾害扰动和影响时可能造成的损失程度^[20-21]。居民与城市系统常被考虑为承灾对象。刘毅等^[24]以历史灾害数据为依据,从灾害危险性、承灾体暴露性和损失度三方面选择了成灾面积、受灾人口、直接经济损失和城市化水平等指标,对自然灾害脆弱性进行模拟。根据前人研究经验,本文基于历史灾害数据来建立承灾脆弱性评价指标体系,从灾害频度和灾害损失两方面选取评价指标。灾害频度指灾害的易发性;灾害损失包括灾害经济损失和人口暴露度,主要考虑城市经济建设和居民承受的损失,在同等灾害易发情况下,城市经济建设水平越高、人口分布越密集,造成的损失可能性越高。承灾脆弱性越高,对生态系统服务预防及降低灾害损失的需求越高。

灾害频度用灾害历史数据确定的灾害易发地点及影响规模来表征;经济建设程度从城市建设角度反映灾害对城市系统造成的损失;人口数量和分布决定了区域人口的暴露度,能够表征在灾害影响下居民遭受的潜在损失程度(图 1)。具体指标如下:水浸黑点、地质灾害(隐患)点和台风路径的历史数据代表三类生态系统服务所对应的自然灾害的易发性;地质灾害经济损失数据、不透水比例表征灾害经济损失;动态人口密度表征受灾区域人口暴露度(图 1)。各指标间有显著关联的场合,且权重作用不明显,因此采用乘法合成来综合各项指标。

评价生态系统服务供给所需数据:2018 年土地利用/覆被数据采用中国科学院 1:10 万比例尺数据库中 30 m×30 m 的数据产品;DEM 和遥感影像数据来自地理空间数据云(<http://www.gscloud.cn/>);气象数据来自于中国气象数据网(<http://data.cma.cn/>);土壤数据由第二次全国土壤普查资料获得。需求所需数据:水浸黑点由珠海市住房和城乡建设局和实地调研获得;地质灾害点(包括滑坡、潜在滑坡、崩塌以及潜在崩塌)由珠海市自然资源局(<http://zrzyj.zhuhai.gov.cn/>)获取、实地调研验证;全国台风路径数据来源于中国天气台风网(<http://typhoon.weather.com.cn/>);人口密度由中国移动提供的 2016 年 4 月某一无节日周的手机信令数据获取,相较基于行政区划的人口密度更能反映人口的真实分布。栅格数据均采用 30 m 分辨率,WGS84 投影坐标;InVEST 模型水源涵养服务的评估原理是基于流域尺度水文过程上的,因此,生态系统服务的供给和需求评价均选用统一的流域尺度,流域由 DEM 数据经 ArcGIS 中的水文分析提取得到;在乡镇、街道尺度上分析供需匹配结果及风险分区结果,以便于为城市空间治理提供建议。

1.3 生态系统服务供需评估

1.3.1 水源涵养服务

水源涵养功能包括截留降水,涵蓄土壤水分和调节径流等,对可能发生的降水淤积、雪洪内涝等造成人类损失的水文现象具有预防和减缓作用。研究城市的水源涵养服务的供需情况,能为城市内涝的缓解和治理提供参考。本文运用 InVEST 模型中产水量模块得到产水量^[25],再经系数修正后得到水源涵养服务的供给量^[26],计算原理如下。

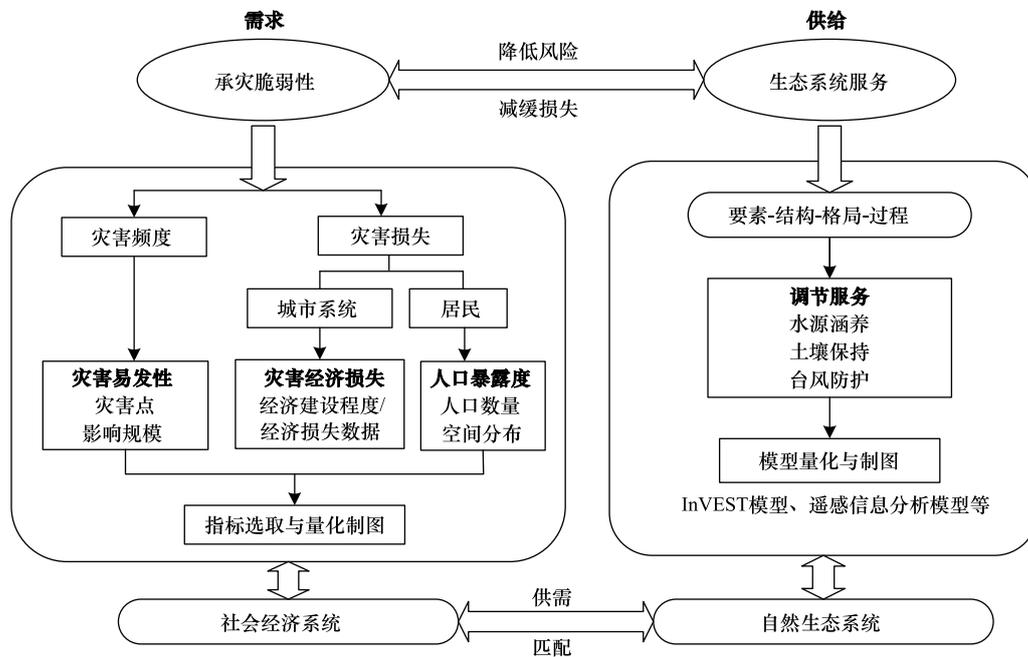


图1 基于承灾脆弱性评价的生态系统服务供需空间匹配理论框架

Fig.1 Theoretical framework of spatial matching between ecosystem services supply and demand based on vulnerability disasters-withstanding assessment

$$Y_{x,j} = \left(1 - \frac{AET_{x,j}}{P_x}\right) \times P_x \tag{1}$$

$$R = \text{Min}\left(1, \frac{249}{V_e}\right) \times \text{Min}\left(1, \frac{0.9 \times IT}{3}\right) \times \text{Min}\left(1, \frac{K}{300}\right) \times Y \tag{2}$$

式中, $Y_{x,j}$ 为 x 栅格 j 类土地利用/覆被类型的产水量; $AET_{x,j}$ 为 x 栅格 j 类土地利用/覆被类型的年实际蒸散量; P_x 为 x 栅格的年降水量。 R 为多年平均水源涵养量(mm); IT 为地形指数; K 为土壤饱和导水率(cm/d); V_e 为流速系数; Y 为产水量。

构建内涝灾害脆弱性指标体系来评价水源涵养服务的需求。内涝灾害易发性由 50 处常年易发内涝的水浸黑点表征, 包含 18 条路段、32 个道路交叉口, 对水浸黑点设置缓冲区并赋 2 倍权重表示内涝灾害的影响范围和易发性。内涝灾害带来的损失主要与城市经济建设程度和人口密度相关, 经济建设程度由线性光谱混合模型(LSMM)获得的不透水比例表征^[27]; 人口暴露度由人口密度表征。借助指数函数来消除不透水比例波动较小的特征, 在不影响整体分布趋势的前提下将局部波动特征强化, 对波动较大的人口密度取对数弱化局部剧烈波动特征(公式 3)。

$$X = A \times e^B \times \log_{10} C \tag{3}$$

式中, X 为水源涵养服务需求; A 为水浸黑点缓冲区; B 为不透水比例; C 为人口密度。

1.3.2 土壤保持服务

土壤保持服务反映了生态系统防止土壤侵蚀、储留保持泥沙的能力。珠海市降雨频繁, 多山地丘陵, 易发生土壤侵蚀造成的崩塌、滑坡等灾害。探究区域的土壤保持能力对缓解和预防土壤侵蚀引发的地质灾害具有重要的意义。本文用 InVEST 模型的泥沙输移比模块评估土壤保持服务的供给量^[28], 模型计算的原理如下。

$$SEDRET = R \times K \times LS \times (1 - C \times P) + (1 - SDR) \times R \times K \times LS \times C \times P \tag{4}$$

式中, SEDRET 为土壤保持量, 即土壤保持服务供给量; R 为降雨侵蚀力因子; K 为土壤可蚀性因子; LS 为地形因子; C 为覆盖管理因子; P 为水土保持措施因子; SDR 为泥沙输移比。

地质灾害的发生直接导致土壤受到严重侵蚀,构建地质灾害脆弱性指标体系评价土壤保持服务的需求。地质灾害易发性由地质灾害报告和实地调研得到的 177 个地质灾害(隐患)点来表征。地质灾害经济损失数据包括直接经济损失和威胁资产,将带有经济损失数据属性的地质灾害点进行反距离权重插值得到研究区整体的地质灾害经济损失;人口密度表征灾害影响下居民遭受的潜在损失程度。对人口密度取对数,保持分布趋势、弱化局部剧烈波动特征(公式 5)。

$$X = A \times \log_{10} B \quad (5)$$

式中, X 为土壤保持服务需求; A 为灾害经济损失; B 为人口密度。

1.3.3 台风防护服务

生态系统对台风灾害的防护来源于植被的固土能力和林木的防风效应,多年健康稳定生长的林木区、防护林通过改变气流结构、减低气流动能达到降低台风风速的作用,同时植物根系固持土壤的能力可以减缓台风造成的雨水冲刷^[29-30]。因此,本文用植被生长稳定程度代表台风防护服务的供给能力,采用改进的像元二分模型对 2009、2018 年的遥感影像处理提取植被覆盖度,将植被覆盖度在 70%—100% 的区域划分为高覆盖区^[31],定义 2009、2018 两年共同的高覆盖区为植被生长稳定区,即台风防护服务的供给区,台风防护服务的供给量用高覆盖区的累加植被覆盖度表示。

构建台风灾害脆弱性指标体系来评价台风防护服务的需求。台风灾害易发性由 1990—2014 年的全国台风路径数据处理得到的台风受灾频率来表征,以台风路径为线要素设置 100 公里(台风十级风圈的影响半径)的缓冲区,将缓冲区与研究区叠加,每一次的台风影响赋值为 1,1990—2014 年累加得到不同区域的台风受灾频率。台风灾害带来的损失主要与城市经济建设程度和人口暴露度相关,经济建设程度用不透水比例表征^[27],人口暴露度由人口密度表征。由于台风受灾频率和不透水比例波动幅度小,对其取指数强化局部波动特征,同时保持整体分布趋势;对人口密度取对数弱化局部剧烈波动特征(公式 6)。

$$X = e^{A+B} \times \log_{10} C \quad (6)$$

式中, X 为台风防护服务需求; A 为台风受灾频率; B 为不透水比例; C 为人口密度。

1.4 生态系统服务供需空间匹配

本研究生态系统服务的供需匹配聚焦于空间匹配,并非绝对物理量匹配,根据自然断点法将生态系统服务的供给、需求的测算结果进行空间分级,分析空间分布上的相对关系。生态系统服务的供给与需求属不同量纲,采用 Z-score 法将 3 种生态系统服务的供给和需求标准化,消除量纲的影响,将标准化后的结果基于象限分布^[32-34],定义 I、II、III、IV 象限依次为高供给高需求(H-H)、低供给高需求(L-H)、低供给低需求(L-L)和高供给低需求(H-L)四种供需匹配状态。生态系统服务供给和需求的 Z-score 标准化公式为:

$$x = \frac{x_i - \bar{x}}{s} \quad (7)$$

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (8)$$

$$s = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (9)$$

式中, x 为生态系统服务供给和需求的标准化值; x_i 为第 i 个单元的供给量、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。

2 风险区类别及城市空间治理分区

生态系统服务供需空间匹配状况的差异造成不同区域承担的主导风险、受损程度和应对措施有所差别。本文借助三项生态系统服务供需匹配结果,划分出不同等级和类型的风险区,根据风险区类别提出针对性的治理策略分区。

风险区类别的划分综合考虑了主导风险类型和数量,以及供需匹配程度。根据三种服务对应的灾害类型确定了内涝、地质灾害、台风灾害 3 种风险类型;根据供需空间匹配的四种类型将风险区定义为高危(L-H)、中危(H-H)、低危(L-L)、安全(H-L)4 种等级;本研究定义每个流域的风险区类别由流域内风险等级最高的风险决定,最终确定了高危风险区、中危风险区、低危风险区、生态安全区四大类风险区,在四大类风险区基础上又详细划分了 18 个包括单项灾害、双项灾害、综合灾害的风险区子类(图 2)。根据风险区类别为空间治理提供时序安排和策略分区,高危风险区中生态安全受到的威胁最大,将其作为优先治理的区域,并按照主导风险类型划分了三种治理分区,分别为多项风险综合治理区、双项风险复合治理区、主导风险专项治理区,可为治理策略的制定提供依据。

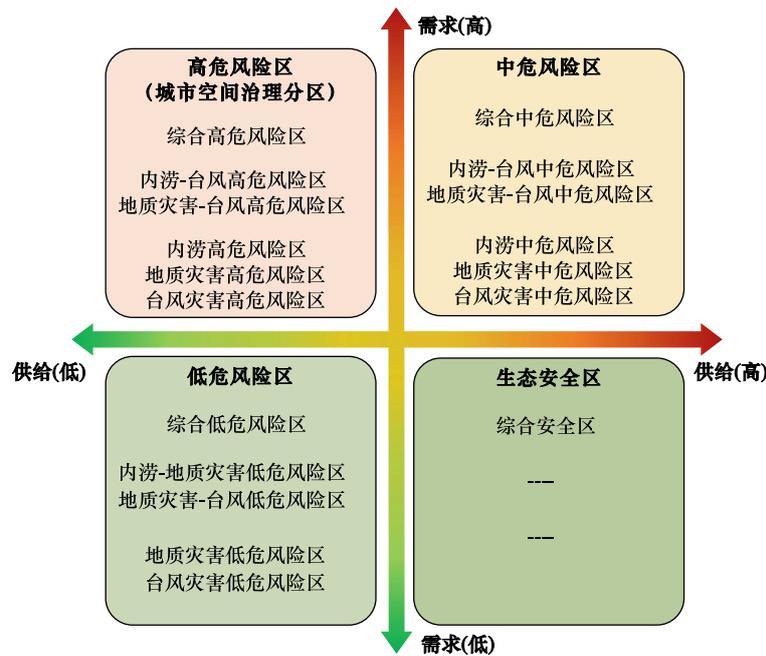


图 2 风险区类别

Fig.2 Categories of risk zones

3 结果分析

3.1 生态系统服务供需匹配空间分异

生态系统服务供需匹配空间分异反映不同区域生态本底与生态需求之间的矛盾。低供给高需求是首要关注的生态系统服务供给不足区,多分布于人口密集、内部缺少绿色基础设施的区域。全市有 17.09%的流域水源涵养服务供给不足,多分布于人口密集的市区;23.53%的流域的土壤保持服务供给不足,主要分布于城镇化发展较快的井岸镇、红旗镇、白蕉镇、平沙镇和香洲区部分街道;21.08%的流域台风防护服务供给不足,多位于白蕉镇、井岸镇、红旗镇、平沙镇和香洲区大部分街道(图 3)。

高供给高需求类型是生态系统对社会经济系统的需求有较好回应的区域,大多兼顾了经济发展和生态环境保护,建设开发程度和人口聚集度比较高,同时区内森林公园、风景区、水域等提供了较高的生态系统服务。如图 3 所示,水源涵养服务高供给高需求区主要位于经济建设较发达的香洲区,占比 19.37%;10.59%的流域属于土壤保持服务高供给高需求,多分布于南水镇、乾务镇、南屏镇和湾仔、翠香街道;台风防护服务高供给高需求区占比 20.73%,主要分布在经济发达的香洲区和斗门区的乾务镇。

低供给低需求和高供给低需求多位于城镇化较缓慢、人口密度较低的区域,其中高供给低需求地区往往是区域生态屏障,发挥着维持区域生态安全的重要作用。水源涵养、土壤保持、台风防护高供给低需求区占比

分别为 26.77%、27.64%、21.74%，主要分布在斗门镇、乾务镇、南水镇、三灶镇、横琴镇和唐家湾镇。低供给低需求类型分布最广，水源涵养、土壤保持和台风防护低供给低需求区分别占 36.77%、38.24% 和 36.45%，多分布在斗门区与金湾区的部分地区(图 3)。

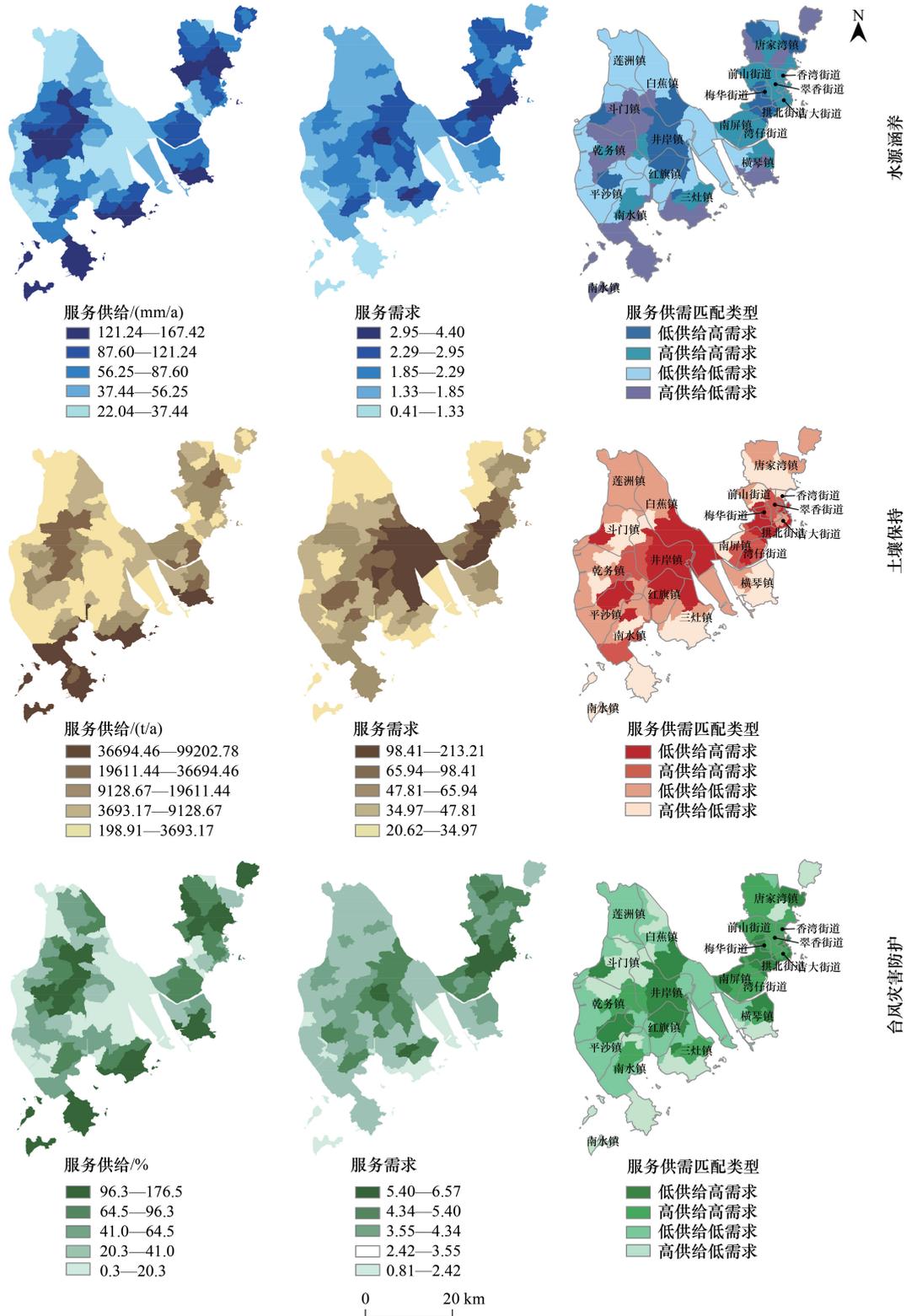


图 3 珠海市生态系统服务供需空间匹配图

Fig.3 Spatial matching diagram of ecosystem services supply and demand

3.2 风险分区

风险区表示在特定的生态系统服务供给和需求状况下,灾害发生时容易受到威胁的区域,分析各等级风险区的数量结构、分布状况和土地利用结构可为治理策略提供依据(图4、图5)。

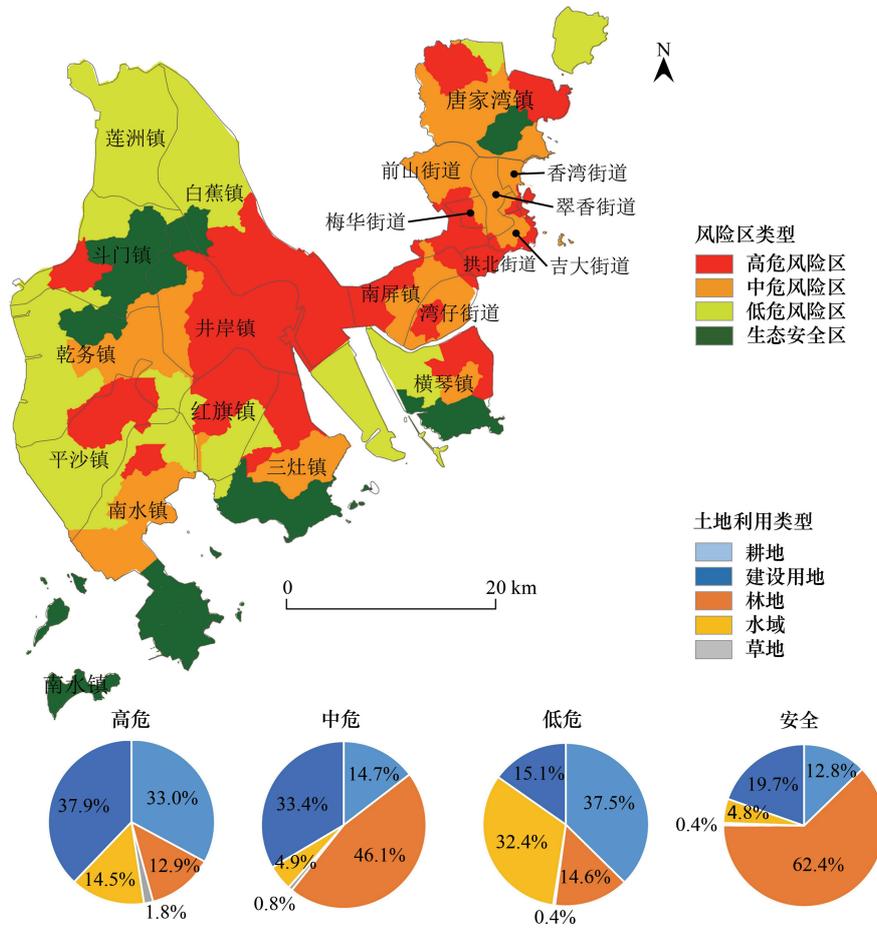


图4 风险区类型及其土地利用结构

Fig.4 Risk zone types and land use structures

各级风险区包含综合灾害、双灾害和单灾害的风险区子类。高危风险区占全市总流域的 29.23%,其中综合高危风险区占 14.2%,双灾害高危风险区占 4.08%,单灾害高危风险区占 10.95%。中危风险区占全市总流域的 21.7%,其中综合中危风险区、双灾害中危风险、单灾害中危风险区分别占总流域的 5.18%、11.15%、5.37%。低危风险区占全市总流域的 33.06%,其中综合、双灾害、单灾害低危风险区分别占 26.02%、3.31%、3.73%。生态安全区占全市总流域的 16.01%。

高危风险区主要位于白蕉镇、井岸镇、红旗镇、平沙镇、三灶镇和香洲区的唐家湾镇、横琴镇东北部及市区部分街道。中危风险区多位于香洲区的南屏镇、唐家湾镇及部分街道,三灶镇中部、南水镇北部、乾务镇与井岸镇相接壤的区域。低危风险区分布范围最广,多位于斗门区和金湾区。生态安全区主要位于斗门镇、乾务镇、南水镇、三灶镇和横琴镇南部。

风险区类型与建设用地比例高度关联,风险等级越高建设用地占比越大,生态用地总体占比小(图4)。高危风险区中建设用地面积占总面积 37.9%,占比最高,其次是耕地。中危风险区中林地占 46.1%,占比最高,建设用地、耕地分别占 33.4%和 14.7%,生态用地与生产生活用地相对协调。低危风险区分布有大面积耕地、滩涂,城镇发展较缓慢,耕地占总面积的 37.5%,水域面积占 32.4%,林地、建设用地分别占 14.6%、15.1%,区域整体生态需求和生态供给不高。安全区中林地分布最广,占总面积的 62.4%,该区域人口稀疏,生态需求

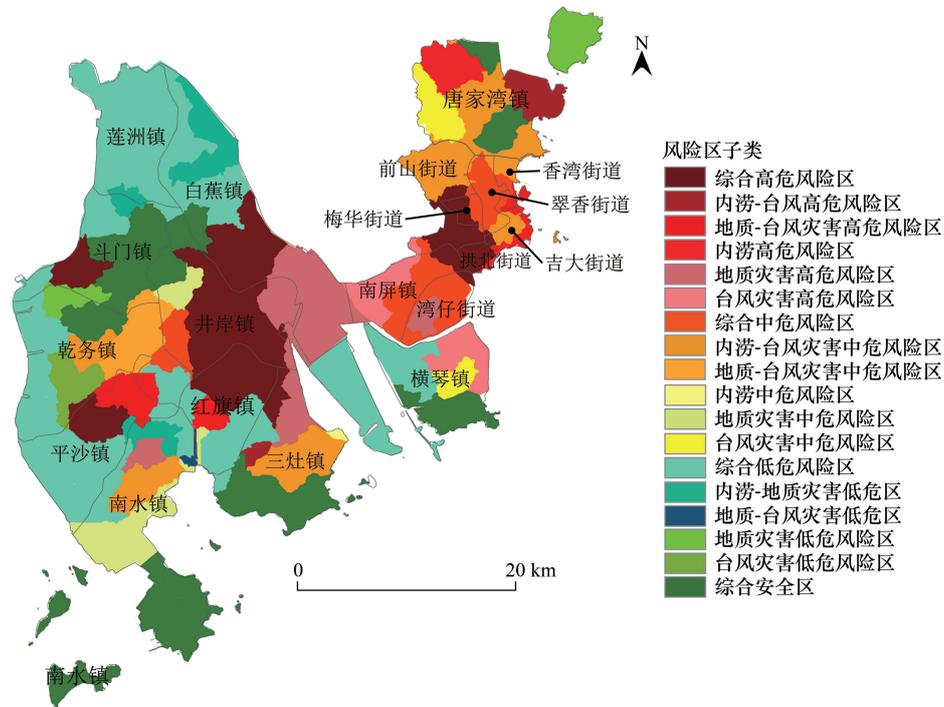


图5 风险区子类

Fig.5 Risk zone subcategories

较低,分布着众多自然山体,生态用地分布较广,生态系统服务供给潜力高。

3.3 城市空间治理分区及其策略

珠海市生态系统服务高的区域主要在经济发展较缓慢、林地分布广的地区,但值得关注的是香洲区城镇化快、人口聚集度高,但由于周围分布着森林公园、风景区,生态系统服务供给尚可满足需求,提供了兼顾经济发展与生态系统保护的模板,是城市可持续发展的重要途径。生态系统服务状况较差的区域多位于斗门区、金湾区,由于耕地、滩涂分布较广,生态系统结构单一,因此实施滩涂地改造整治、提升耕地质量,打造生态效益高的集约化农田对提升城市整体生态系统服务状况具有重要意义。针对珠海市生态安全威胁严重的高危风险区划分了三大类治理策略分区(图6)。

多项风险综合治理区主要位于斗门镇、平沙镇、白蕉镇、井岸镇、红旗镇以及前山、梅华、拱北街道。这些地区城镇发展快,生态系统服务难以满足需求,规划治理应注重生态用地的营造,增强区域的生态本底;未来应重视城市副中心的建设,疏散老城区职能,缓解生态压力;优化城镇绿色基础设施,注重构建生态安全格局,提高景观连通性;同时借鉴应用海绵城市的设计理念,增强城市适应环境变化和应对自然灾害的弹性。

双项风险复合治理区包括地质-台风灾害复合治理区和内涝-台风灾害复合治理区。地质-台风灾害复合治理区位于红旗镇中部、平沙镇北部和吉大街道,这些区域容易受到台风暴雨引发的崩塌、滑坡等威胁,建议在现有绿地基础上,调整植被的种类和群落结构,建设兼顾景观与防护功能的绿地系统;同时重视对脆弱裸露生态的修复,提升区域土壤保持和生态防护能力。内涝-台风灾害复合治理区位于唐家湾镇的东部,这些区域应注重城市道路防护绿地和海岸防护绿线的建设与优化^[35];整治修复裸露的废弃地,加强对河流水系、湿地的保护,增强水域生态功能,提升区域整体防洪排涝能力。

主导风险专项治理区包括内涝、地质灾害、台风灾害专项治理区。内涝专项治理区位于唐家湾镇西北部,这些地区可以合理设置下凹式绿地和蓄水池,提高地面的蓄滞水能力;改善下垫面条件,减小地面径流系数,提高地面渗水能力;优化改造景观水体的结构设计,充分发挥其储蓄雨水的作用。地质灾害专项治理区主要位于白蕉镇南部、三灶镇北部和湾仔街道,这些地区应该重视山体植被的维护,提高水土保持能力;排查山坡

本文生态系统服务的供需匹配聚焦于空间匹配,并非绝对物理量匹配,未来要在注重生态系统服务供需内在一致性的基础上,进一步探究统一的供需评价指标;同时重视生态系统服务流动和传递机制研究,解决高供给区的生态系统服务如何惠及到其他地区的问题。此外,本文着重关注生态风险威胁最高的高危风险区,为其划分治理区并提供策略建议,但并不意味着其他类型的风险区就无需治理,后续研究要关注不同层级的风险区,因地制宜优化城市生态用地的配置,从生态可持续的角度提升城市抵御自然灾害的韧性。

致谢:北京大学深圳研究生院李贵才教授对研究思路、调研协调给予帮助,珠海市住房和城乡建设局帮助资料收集,北京大学景观生态与土地利用研究组提供部分基础数据,特此致谢。

参考文献 (References):

- [1] 陈磊, 姜海. 从土地资源优势区配置到主体功能区管理: 一个国土空间治理的逻辑框架. 中国土地科学, 2019, 33(6): 10-17.
- [2] 樊杰. 我国空间治理体系现代化在“十九大”后的新态势. 中国科学院院刊, 2017, 32(4): 396-404.
- [3] 李国平. 均衡紧凑网络型国土空间规划——日本的实践及其启示. 资源科学, 2019, 41(9): 1610-1618.
- [4] Mabon L. Enhancing post-disaster resilience by ‘building back greener’: evaluating the contribution of nature-based solutions to recovery planning in Futaba County, Fukushima Prefecture, Japan. *Landscape and Urban Planning*, 2019, 187: 105-118.
- [5] 郑华, 欧阳志云, 赵同谦, 李振新, 徐卫华. 人类活动对生态系统服务功能的影响. 自然资源学报, 2003, 18(1): 118-126.
- [6] 傅伯杰, 周国逸, 白永飞, 宋长春, 刘纪元, 张惠远, 吕一河, 郑华, 谢高地. 中国主要陆地生态系统服务功能与生态安全. 地球科学进展, 2009, 24(6): 571-576.
- [7] 翟天林, 王静, 金志丰, 祁元. 长江经济带生态系统服务供需格局变化与关联性分析. 生态学报, 2019, 39(15): 5414-5424.
- [8] Wei H J, Fan W G, Wang X C, Lu N C, Dong X B, Zhao Y N, Ya X J, Zhao Y F. Integrating supply and social demand in ecosystem services assessment: a review. *Ecosystem Services*, 2017, 25: 15-27.
- [9] Tao Y, Wang H N, Ou W X, Guo J. A land-cover-based approach to assessing ecosystem services supply and demand dynamics in the rapidly urbanizing Yangtze River Delta region. *Land Use Policy*, 2018, 72: 250-258.
- [10] 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.
- [11] Lorilla R S, Kalogirou S, Poirazidis K, Kefalas G. Identifying spatial mismatches between the supply and demand of ecosystem services to achieve a sustainable management regime in the Ionian Islands (Western Greece). *Land Use Policy*, 2019, 88: 104171.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] 石忆邵, 史东辉. 洞庭湖生态经济区生态服务供需平衡研究. 地理研究, 2018, 37(9): 1714-1723.
- [15] 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.
- [16] Wang L J, Zheng H, Wen Z, Liu L, Robinson B E, Li R N, Li C, Kong L Q. Ecosystem service synergies/trade-offs informing the supply-demand match of ecosystem services: framework and application. *Ecosystem Services*, 2019, 37: 100939.
- [17] Burkhard B, Kroll F, Nedkov S, Müller F. Mapping ecosystem service supply, demand and budgets. *Ecological Indicators*, 2012, 21: 17-29.
- [18] 管青春, 郝晋珉, 许月卿, 任国平, 康蕾. 基于生态系统服务供需关系的农业生态管理分区. 资源科学, 2019, 41(7): 1359-1373.
- [19] United Nation Department of Humanitarian Affairs. Internationally agreed glossary of basic terms related to disaster management. Geneva: DNA/93/36, 1992.
- [20] Dai F C, Lee C F, Ngai Y Y. Landslide risk assessment and management: an overview. *Engineering Geology*, 2002, 64(1): 65-87.
- [21] 刘艳辉, 张振兴, 苏永超. 地质灾害承灾载体脆弱性评价方法研究. 工程地质学报, 2018, 26(5): 1121-1130.
- [22] 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.
- [23] Shen J, Du S Q, Huang Q X, Yin J, Zhang M, Wen J H, Gao J. Mapping the city-scale supply and demand of ecosystem flood regulation services—A case study in Shanghai. *Ecological Indicators*, 2019, 106: 105544.
- [24] 刘毅, 黄建毅, 马丽. 基于 DEA 模型的我国自然灾害区域脆弱性评价. 地理研究, 2010, 29(7): 1153-1162.

- [25] 王玉纯, 赵军, 付杰文, 魏伟. 石羊河流域水源涵养功能定量评估及空间差异. 生态学报, 2018, 38(13): 4637-4648.
- [26] 余新晓, 周彬, 吕锡芝, 杨之歌. 基于 InVEST 模型的北京山区森林水源涵养功能评估. 林业科学, 2012, 48(10): 1-5.
- [27] 李二森, 张保明, 宋丽华, 余文杰, 唐德瑾. 线性混合模型的光谱解混算法综述. 测绘科学, 2011, 36(5): 42-44.
- [28] Sharp R, Tallis H T, Ricketts T, Guerry A D, Wood S A, Chapin-Kramer R, Nelson E, Ennaanay D, Wolny S, Olwero N, Vigerstol K, Pennington D, Mendoza G, Aukema J, Foster J, Forrest J, Cameron D, Arkema K, Lonsdorf E, Kennedy C, Verutes G, Kim C K, Guannel G, Papefus M, Toft J, Marsik M, Bernhardt J, Griffin R, Gowinski K, Chaumont N, Perelman A, Lacayo M, Mandle L, Hamel P, Vogl A L, Rogers L, Bierbower W. InVEST 3.2.0 user's guide. Stanford University, University of Minnesota, The Nature Conservancy, World Wildlife Fund, 2015.
- [29] 刘浪. 地面植被以及地形对台风发生发展的影响. 北京农业, 2011, (36): 141-142.
- [30] 罗金环, 谢明东. 热带滨海城市防护林结构优化配置研究——以海南省三亚市为例. 热带林业, 2011, 39(3): 46-50.
- [31] 杨瑞瑞, 易桂花, 张廷斌, 李景吉, 别小娟, 夏杰, 申一林. 2000-2015 年若尔盖地区植被覆盖度变化及气候因子驱动分析. 草业科学, 2018, 35(12): 2822-2835.
- [32] 谢余初, 张素欣, 林冰, 赵银军, 胡宝清. 基于生态系统服务供需关系的广西县域国土生态修复空间分区. 自然资源学报, 2020, 35(1): 217-229.
- [33] 王萌辉, 白中科, 董潇楠. 基于生态系统服务供需的陕西省土地整治空间分区. 中国土地科学, 2018, 32(11): 73-80.
- [34] 彭建, 杨昉, 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.
- [35] 郁培义, 唐宪, 刘俊, 曾德华, 何书奋, 孙洁. 三亚城区防台风防护绿地规划初探. 热带林业, 2014, 42(4): 46-50.