

DOI: 10.5846/stxb202103220753

姜虹, 张子墨, 徐子涵, 丹宇卓, 叶玉瑶, 李家志, 彭建. 整合多重生态保护目标的广东省生态安全格局构建. 生态学报, 2022, 42(5): 1981-1992.

Jiang H, Zhang Z M, Xu Z H, Dan Y Z, Ye Y Y, Li J Z, Peng J. Construction of ecological security pattern integrating multiple ecological protection objectives in Guangdong Province. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(5): 1981-1992.

整合多重生态保护目标的广东省生态安全格局构建

姜 虹¹, 张子墨², 徐子涵², 丹宇卓¹, 叶玉瑶³, 李家志⁴, 彭 建^{1,2,*}

1 北京大学深圳研究生院城市规划与设计学院, 城市人居环境科学与技术重点实验室, 深圳 518055

2 北京大学城市与环境学院, 地表过程分析与模拟教育部重点实验室, 北京 100871

3 广东省科学院广州地理研究所广东省地理空间信息技术与应用公共实验室, 广州 510070

4 中规院(北京)规划设计有限公司, 北京 100084

摘要:构建生态安全格局是缓解生态保护与经济发展之间的突出矛盾,保障可持续发展的有效空间途径。但目前生态安全格局的构建过于强调综合,简单叠加多种生态系统服务的方法忽视了不同服务间的权衡与协同关系,难以直接支撑不同目标下的生态保护决策。以广东省为例,重点关注生境维持、水源涵养、水质净化、粮食生产、土壤保持、洪水调节、沿海灾害缓解七种重要的生态系统服务,面向生物多样性保育、水资源利用、粮食生产、自然灾害防范等单一生态保护目标分别构建生态安全格局。研究表明,面向生物多样性保育目标的生态安全格局呈“双屏障带”式分布,生态源地主要分布在粤北生态发展区;面向水资源利用目标的水安全格局呈“五江一带”式分布,重点保护区主要位于河湖水库及周边绿地;面向粮食生产目标的生态源地主要分布在广东省东西两翼;面向自然灾害防范目标的生态源地在珠三角、湛江市、汕头市少有分布,集中在粤北生态发展区。基于多种生态系统服务综合重要性判定生态源地,并整合单一生态保护目标下的多重源地,识别综合生态源地共 49536.10 km²,主要分布在珠三角外围和粤北生态发展区。基于最小累积阻力模型和电路模型,识别了总长度 2268.07 km 的生态廊道;夹点共 32 处,主要分布在中山市、珠海市、江门市、惠州市廊道中电流值较大的 12 处狭窄区;障碍点共 44 处,主要分布在广州市、中山市、珠海市、江门市、惠州市的 19 处,覆盖了廊道的大部分面积。整合多重生态保护目标,广东省生态保护修复策略的制定需要高度关注粤北生态发展区的生境质量提升,河湖水库及河岸带、库滨带的水生态安全,湛江市、汕头市的耕地保护和国土综合整治,沿海地区的自然灾害防范,同时积极开展珠三角的生态夹点保护和障碍点修复,重点提升生态廊道的连通性。

关键词:生态安全格局;生物多样性保育;水资源利用;粮食生产;自然灾害防范

Construction of ecological security pattern integrating multiple ecological protection objectives in Guangdong Province

JIANG Hong¹, ZHANG Zimo², XU Zihan², DAN Yuzhuo¹, YE Yuyao³, LI Jiazhi⁴, PENG Jian^{1,2,*}

1 Key Laboratory for Environmental and Urban Sciences, School of Urban Planning and Design, Shenzhen Graduate School, Peking University, Shenzhen 518055, China

2 Laboratory for Earth Surface Processes, Ministry of Education, College of Urban and Environmental Science, Peking University, Beijing 100087, China

3 Guangdong Open Laboratory of Geospatial Information Technology and Application, Guangzhou Institute of Geography, Guangdong Academy of Sciences, Guangzhou 510070, China

4 CAUPD Beijing Planning & Design Consultants co., Ltd, Beijing 100084, China

Abstract: Constructing ecological security pattern is an effectively spatial approach to alleviate the prominent contradiction between ecological protection and economic development to ensure sustainable development. However, the current construction of ecological security pattern emphasizes too much on synthesis. The simple method of superposition of multiple

基金项目:国家自然科学基金项目(41330747)

收稿日期:2021-03-22; 网络出版日期:2021-11-17

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

ecosystem services ignores the trade-offs and synergies among different ecosystem services, so it is difficult to directly support the ecological protection decision-making under different objectives. Taking Guangdong Province as an example, this study focused on seven important ecosystem services, including habitat maintenance, water conservation, water purification, grain production, soil conservation, flood risk mitigation, and coastal disaster mitigation. Ecological security patterns were constructed for single ecological conservation objectives, such as biodiversity conservation, water resource utilization, grain production, and natural disaster prevention. The results showed that the ecological security pattern for biodiversity conservation was distributed in a “double barrier zones” pattern, and the ecological sources were mainly distributed in the ecological development area of Northern Guangdong. The water security pattern for water resource utilization was distributed in the pattern of “five rivers-one belt”, and the key protected areas were mainly located in rivers, lakes, reservoirs and the surrounding green space. Ecological sources for grain production were mainly distributed in the east and west wings of Guangdong Province. Ecological sources for natural disaster prevention were rarely distributed in Pearl River Delta, Zhanjiang and Shantou, but mainly concentrated in the ecological development area of Northern Guangdong. The comprehensively ecological sources with total area of 49536.10 km² were identified by integrating the ecological sources determined based on the comprehensive importance of multiple ecosystem services, and the multiple sources under single ecological protection objectives, which were mainly distributed in the periphery of the Pearl River Delta and the ecological development area of Northern Guangdong. Based on the minimum cumulative resistance model and circuit model, ecological corridors with total length of 2268.07 km were identified, among which were long and narrow in the Pearl River Delta. There were 32 pinch points, mainly distributed in 12 narrows with high current value in the corridors of Zhongshan, Zhuhai, and Jiangmen. There were 44 barriers, mainly distributed in Zhongshan, Zhuhai, Jiangmen and Huizhou, with 19 barriers covering most of the corridors in these cities. For the integration of multiple ecological conservation objectives, several aspects should be focused in the formulation of ecological conservation and restoration strategies in Guangdong Province, including habitat quality improvement in ecological development area of Northern Guangdong, water security of rivers, lakes, reservoirs, riparian zones and reservoir shore zone, the cultivated land protection and comprehensive land control in Zhanjiang and Shantou, natural disaster prevention in coastal area. At the same time, the protection of pinch points and the restoration of barriers should be carried out to enhance the connectivity of the ecological corridors in the Pearl River Delta.

Key Words: ecological security pattern; biodiversity conservation; water resource utilization; grain production; natural disaster prevention

快速的城市化进程影响生态系统的结构、功能和格局,导致日益严重的生态环境问题,威胁区域可持续发展^[1-2]。应对生态系统退化风险和危害,国家提出开展国土空间生态保护修复,以期提升生态系统的质量和稳定性、筑牢生态安全屏障^[3]。生态保护修复的首要工作是明确关键生态要素的合理布局。作为国土空间生态修复规划的重要途径,构建生态安全格局是保障区域生态安全和可持续发展的有效空间措施^[4-5],对于缓解生态保护与经济发展之间的突出矛盾具有重要意义^[6]。

目前,生态安全格局已初步形成了“生态源地-阻力面-生态廊道”的研究范式^[1]。其中,识别源地是构建生态安全格局的关键环节^[5, 7],包括基于自然保护区、风景名胜区分布的用地类型识别方法^[8]和综合指标体系评价方法两类^[9],其中生态系统服务是最常用的评价指标之一^[10]。然而,面向区域生态问题的复杂性,现有研究特别强调综合,但大多通过简单叠加多种生态系统服务重要性来识别生态源地、构建生态安全格局。这种方法过于强调综合而忽视了不同服务间的权衡与协同关系,难以直接支撑面向不同生态保护目标的策略制定,需要整合多重生态保护目标构建综合生态安全格局,以促进生态系统服务的协同,维持生态安全^[6]。尽管 Su 等^[11]面向地质灾害防治、防洪和饮用水保护、大气污染防治、生物多样性保护和农田保护等目标分别构建了生态安全格局,但直接选取潜在地质灾害区域、水系、自然保护区、高质量农田作为源地,缺少对生态系

统服务重要性的量化,难以兼顾多重生态保护目标。同时,由于缺少对不同类型源地的对比,难以为生态要素的空间配置和生态保护修复策略的制定提供直接支撑。因此,国土空间生态保护修复有必要关注多种生态系统服务的权衡与协同关系,整合多重生态保护目标识别生态源地,构建综合生态安全格局,为保护修复决策提供支撑。

作为改革开放的先驱,广东省在过去四十年里经历了快速的社会经济发展与剧烈的生态环境变化。经济发展与生态保护之间的矛盾日益凸显,促使广东省开始重视生态环境问题并采取了一系列措施^[12]。基于自然生态系统结构-功能-过程的级联特征,识别重要生态源地和生态廊道,构建人与自然和谐共生的生态安全格局是均衡经济发展与生态保护的重要途径。因此,本研究重点关注七种重要生态系统服务,面向生物多样性保育、水资源利用、粮食生产、自然灾害防范等单一生态保护目标识别生态源地,基于最小累积阻力模型和电路模型识别生态廊道的走向和范围;进而整合多种生态系统服务重要性和单一生态保护目标下的多功能源地,构建综合生态安全格局,为广东省国土空间生态保护修复提供决策支撑。

1 研究区与数据源

广东省位于我国东南沿海,陆地总面积约 17.98 万 km²(图 1)。全省 21 个地级市在地理空间上可划分为珠三角、粤东、粤西和粤北四大区域^[12]。广东省的主要气候类型为亚热带季风气候,年降水量在 1300—2500 mm 之间^[13]。广东省的快速城市化导致了经济发展水平在空间上的不均衡,珠三角人口密度、城市化水平、经济发展显著优于粤东、粤西、粤北地区。2019 年 7 月,广东省印发了《关于构建“一核一带一区”区域发展新格局促进全省区域协调发展的意见》,要求加快形成“一核一带一区”的区域发展新格局。其中,“一核”为珠三角,是引领全省发展的核心区和主引擎;“一带”为沿海经济带,包括珠三角沿海七市和东西两翼的汕头、汕尾、揭阳、潮州、湛江、茂名、阳江七市;“一区”为粤北生态发展区,是广东省重要的生态屏障,包括韶关、梅州、清远、河源、云浮五市。

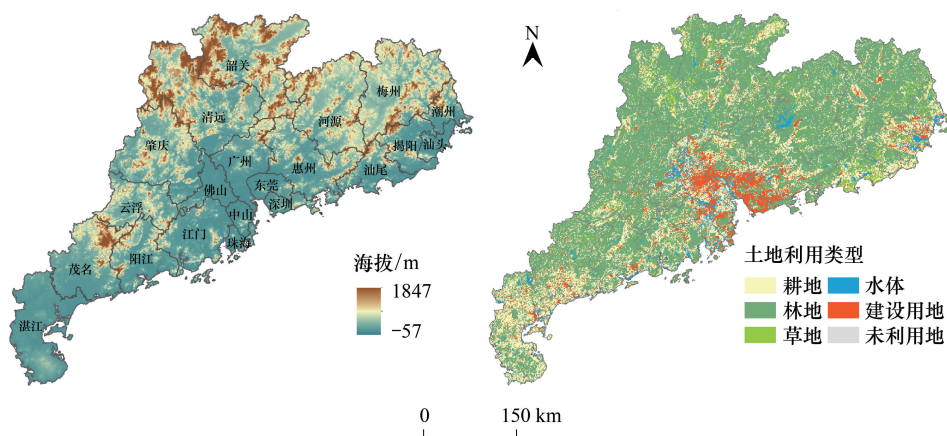


图 1 广东省地理位置与土地利用类型

Fig.1 Location and land use type of Guangdong Province

本研究所用的数据年份为 2018 年。土地利用数据是由中科院资源环境科学与数据中心 (<http://www.resdc.cn/>) 发布的中国土地利用遥感监测数据,空间分辨率为 1 km,在数据预处理环节,将土地利用类型合并为耕地、林地、草地、水体、建设用地、未利用地六类。数字高程模型(Digital Elevation Model, DEM)来自地理空间数据云 (<http://www.gscloud.cn/>)。降水量数据来自中国气象数据网 (<http://data.cma.cn/>)。蒸散量数据是由美国地质调查局提供的 MODIS16A 产品 (<https://www.usgs.gov/>)。土壤组分、厚度数据来自世界土壤数据库(HWSD v1.2, <http://www.fao.org/soils-portal/soil-survey/>)。归一化植被指数(Normalized Difference Vegetation Index, NDVI)数据来自中科院资源环境科学与数据中心 (<http://www.resdc.cn/>)。夜间灯光数据来

自美国国家海洋和大气管理局(<https://www.noaa.gov/>)。统计数据来自《广东省统计年鉴》。

2 研究方法

2.1 生态源地面积阈值确定

生态源地应具有一定的规模,以保证生态功能的稳定发挥^[14]。提取连续分布的林地、草地、水体作为生态斑块,并计算斑块面积。以 2 km² 为初始值、2 km² 为步长,统计面积小于阈值的斑块数量和总面积随阈值的变化,以曲线的拐点作为生态源地的斑块面积阈值。

2.2 生态系统服务评估

生态系统服务是人类从生态系统中获得的惠益^[15],与生态安全和人类福祉密切相关^[16-17],是生态本底的重要表征。广东省快速的城市化进程破坏了自然生境,使生物多样性遭受威胁^[18]。水污染、水体缩减等水生态问题突出,水资源安全面临严峻的挑战^[18]。粮食生产作为生态系统维持人类生存的重要功能^[12],也是生态安全的重要保障。全球气候变化加剧了沿海地区的自然灾害风险,威胁着人居环境的安全^[19-20]。针对广东省自然资源 and 生态环境的本底条件,以及面临的主要生态问题,本研究重点评估生境维持、水源涵养、水质净化、粮食生产、土壤保持、洪水调节、沿海灾害缓解共 7 种生态系统服务(表 1)。

表 1 生态系统服务评估方法

Table 1 Methods of ecosystem services assessment

生态系统服务 Ecosystem services	评估方法 Evaluation method	计算公式 Equation	指标含义 Definition of indicators
生境维持 Habitat maintenance	InVEST 模型 Habitat Quality 模块 ^[21]	$Q_{xy} = H_j \times \left[1 - \left(\frac{D_{xy}^z}{D_{xy}^z + k^z} \right) \right]$	(1) Q_{xy} 为生境维持服务, D_{xy} 为土地利用类型 j 中栅格 x 的生境退化度, k 为半饱和常数, H_j 为土地利用类型 j 的生境适宜度, z 为模型默认参数
水源涵养 Water conservation	水量平衡法 ^[22]	$R = Y_x \times \min(1, 249/V) \times \min(1, 0.9 \times TI/3) \times \min(1, K_{sat}/300)$	(2) R 为水源涵养量, K_{sat} 为土壤的饱和导水率, V 为流速系数, TI 为地形指数, Y_x 为产水量
水质净化 Water purification	InVEST 模型 Nutrient Delivery Ratio 模块 ^[23]	$ALV_x = HSS_x \times pol_x$	(3) ALV_x 为栅格 x 的修正污染负荷值, HSS_x 为栅格 x 的水文敏感度, pol_x 为栅格 x 的污染流出系数
粮食生产 Grain production	粮食产量与 NDVI 间的 显著线性关系 ^[24]	$Grain_{supply} = Grain_{production} \times \frac{NDVI_i}{NDVI_s}$	(4) $Grain_{supply}$ 为粮食生产服务的供给量, $Grain_{production}$ 为某市的粮食总产量, $NDVI_s$ 为该市的最大 NDVI 之和, $NDVI_i$ 为像元 i 的最大 NDVI
土壤保持 Soil conservation	RUSLE 模型 ^[25]	$A = R \times K \times LS \times (1 - C \times P)$	(5) A 为土壤保持量, R 为降雨侵蚀力因子, K 为土壤可蚀性因子, LS 为坡度坡长因子, C 为植被覆盖管理因子, P 为土壤侵蚀控制措施因子
洪水调节 Flood risk mitigation	InVEST 模型 Urban Flood Risk Mitigation 模块 ^[21]	$R = R_i \times P \times Area_i$	(6) R 为径流滞留量, R_i 为径流保留量, P 为暴雨深度, $Area_i$ 为像元面积
沿海灾害缓解 Coastal disaster mitigation	根据坡度、土壤类型、土 地利用、NDVI 四个因素 量化	$TCHMS = (slope \times soiltexture \times landuse \times NDVI)^{1/4}$	(7) $TCHMS$ 为沿海灾害缓解能力, $slope$ 表征坡度因子的减灾作用, $soiltexture$ 表征土壤粒径对风速的降低作用, $landuse$ 表征土地利用类型的减灾能力, $NDVI$ 为归一化植被指数

2.3 景观连通性评估

景观连通性指示了景观对生态流的适宜或阻碍程度,是景观生态过程的重要指标。保持良好的景观连通性是保护生物多样性,维持生态系统稳定的重要条件,是实现生态系统功能与服务的有效保障^[26]。可能连通性指数(PC)被广泛用作景观连通性的评价指标。

$$PC = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n a_i \times a_j \times p_{ij}^*}{A_L^2} \quad (8)$$

式中, n 为栖息地节点的数量; a_i 和 a_j 为栖息地斑块 i 和 j 的面积; A_L 为景观总面积; p_{ij}^* 为斑块 i 和 j 间所有路径中传播可能性最大的路径。 PC 的取值范围为 $[0, 1]$, 数值越大, 景观连通性越好^[27]。

2.4 生态安全格局构建

为解决生态安全格局过于强调综合所导致的源地功能指向不明问题, 分别面向生物多样性保育、水资源利用、粮食生产、自然灾害防范等单一生态保护目标构建生态安全格局。具体而言, 面向生物多样性保育目标, 对生境维持服务与景观连通性归一化求和得到生物多样性保育重要性指数识别生态源地, 构建生态安全格局。面向水资源利用目标, 对水源涵养服务、水质净化服务由高到低分级赋值为 7、5、3、1, 与水体重要性等权重叠加构建水安全格局^[28]。其中, 水体重要性反映了水体及周边用地对水资源利用和水环境保护的重要性。以河湖、水库为中心建立缓冲区, 河湖、水库及其 1 km 缓冲区内赋值为 7, 1—2 km 缓冲区赋值为 5, 2—3 km 缓冲区赋值为 3, 其余区域赋值为 1, 定量表征水体重要性^[28-29]。面向粮食生产目标, 由于土壤和水源对于粮食生产有重要影响^[30-31], 对粮食生产服务、水源涵养服务、土壤保持服务归一化求和, 表征粮食生产的重要性识别生态源地, 构建生态安全格局。面向自然灾害防范目标, 考虑山地水土流失风险^[32]、城市内涝风险^[33]以及沿海灾害风险^[19], 对土壤保持服务、洪水调节服务、沿海灾害缓解服务归一化求和表征自然灾害防范重要性识别生态源地, 构建生态安全格局。整合单一目标下的生态源地, 将重叠部分作为多功能生态源地。对七种生态系统服务归一化求和, 得到生态系统服务重要性指数。将生态系统服务重要性前 30% 的区域与多功能生态源地的并集作为综合生态源地, 构建广东省陆域综合生态安全格局。

建设生态廊道可以有效解决生态源地破碎化的问题, 增强生态源地的连通性, 促进源地间的物种、物质、能量流动, 保障生态功能的稳定发挥^[34]。基于电路模型, 将景观作为导电表面, 通过模拟生态流的随机流动, 识别景观中的潜在生态廊道, 并提取重要的生态夹点和障碍点。景观对生态流的阻碍作用与景观类型、人类活动强度密切相关^[35-36], 首先根据土地利用类型设置初始阻力值, 林地、草地、耕地、湿地、水体、未利用地、建设用地的基本阻力值分别为 1、10、30、50、50、300、500。以夜间灯光强度反映人类活动强度, 修正基本阻力值^[35]。

$$R' = \frac{NLI_i}{NLI_a} \times R \quad (9)$$

式中, R' 为修正后阻力值, NLI_i 为土地利用类型 a 像元 i 的夜间灯光强度, NLI_a 为土地利用类型 a 的平均夜间灯光强度, R 为基本阻力值。

电路模型将生态源地看作电路的节点, 将非生态源地区域视作电路支路中不同阻力的电阻, 通过非生态源地区域的电流高低识别景观中的生态廊道和关键节点^[37-38]。两节点间的电流强度 I 计算为:

$$I = V / R_{\text{eff}} \quad (10)$$

式中, I 为通过导体的电流, V 为通过导体测量的电压, R_{eff} 为有效电阻。有效电阻 R_{eff} 能够反映节点间的空间间隔, 而支路电流值 I 能反映通过该支路阻力截面的生态流量, 可用来预测生态流在相应节点或路径上的移动概率, 进而识别具有较高生态流量的区域, 作为生态廊道。

3 结果分析

3.1 生态源地面积阈值

广东省生态用地分布广泛, 占总面积的 68.78%, 其中林地、草地、水体分别占比 87.04%、6.34%、6.62%, 主要分布在韶关市、清远市、河源市、梅州市、肇庆市。面积小于阈值的生态源地斑块数量和总面积随阈值变化的拐点出现在 26 km² 处, 对应生态斑块数为 3483, 占研究区生态斑块总数的 98.11%; 面积为 6481.99 km², 占

生态斑块总面积的 5.39% (图 2)。以 26 km^2 作为生态源地的面积阈值, 可以去除大部分破碎的小生态用地斑块, 且不会对总面积产生显著影响。

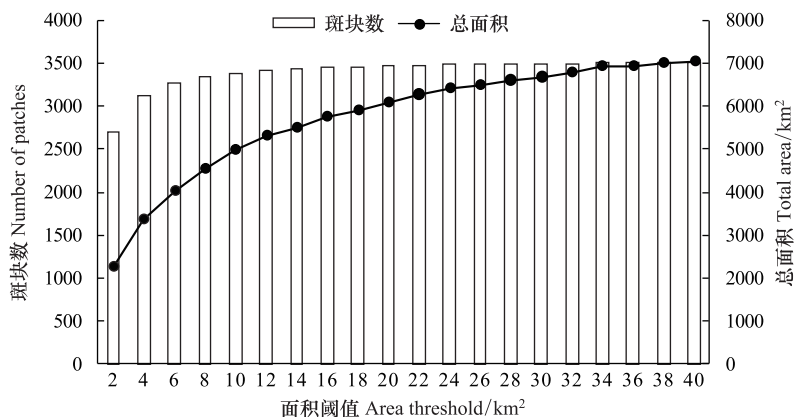


图 2 面积小于阈值的生态斑块数及面积变化

Fig.2 Change of number and total area of ecological patches with area less than the threshold

3.2 生态系统服务空间格局

广东省各类生态系统服务的分布均呈现空间不均衡性, 且不同服务的分布格局差异较大 (图 3)。生境维持服务的高值位于粤北山地, 广泛分布的林地众多为野生生物提供了适宜生境。低值则位于珠三角、湛江市、汕头市, 这是因为珠三角高度城市化导致生态用地面积小且面临较高的生态威胁, 而湛江市和汕头市耕地密布, 生态用地面积小且分布破碎。

水源涵养服务以林地为主要提供主体, 高值位于清远市、湛江市北部、茂名市南部。这些区域降水量大且植被密布, 能涵养大量水源。低值位于珠三角建设用地, 其地表覆被难以有效截留降水。水质净化服务以高植被覆盖度的林地、草地、耕地为主要提供主体, 高值位于河源市与惠州市交界处、清远市、肇庆市, 低值位于高城市开发强度的珠三角, 污染物质的截留和净化能力较弱。

粮食生产服务的高值位于汕头市、揭阳市、茂名市、肇庆市, 粮食单产高。低值位于珠三角, 且耕地面积小, 粮食供给高度依赖其他地区。土壤保持服务的高值位于粤北山地和沿海地区, 高植被覆盖度能有效防止土壤流失, 低值则位于珠三角和湛江市。洪水调节服务的低值位于珠三角, 高不透水面占比导致雨水下渗能力弱, 对洪水灾害的调节能力差。沿海灾害缓解服务的高值位于粤北山地, 高植被覆盖有利于缓解沿海灾害, 低值位于珠三角。

3.3 面向生物多样性保育目标的生态安全格局

综合生境维持服务和景观连通性得到生物多样性保育重要性指数 (图 4)。粤北生态发展区的生态用地大面积连续分布, 连通性高且远离威胁源, 能为多种生物提供稳定的优质生境。东莞市、深圳市、中山市、佛山市的生态用地分散, 受高强度的人类活动影响, 生境质量较差且不稳定。湛江市、汕头市以耕地为主要的土地利用类型, 生态用地的破碎化程度高, 不宜作为重要生境。识别生物多样性保育源地共 5 个, 在空间上连续分布, 总面积 76871.20 km^2 , 占广东省总面积的 43.44% (图 4)。提取生态廊道共 5 条, 总长度 34.36 km , 主要分布在清远市。面向生物多样性保育目标的生态安全格局整体呈“双屏障带”式分布, 包括粤北生态屏障带和珠三角生态屏障带。其中, 位于粤北生态发展区的粤北生态屏障带是全省生物多样性保育的核心区域, 珠三角生态屏障带位于珠三角外围, 是核心经济发展区生物多样性的重要保障。

3.4 面向水资源利用目标的水安全格局

叠加水源涵养服务、水质净化服务和水体重要性, 得到面向水资源利用目标的水安全格局 (图 5)。其中, 重点保护区的保护级别最高, 占广东省总面积的 6.23%, 主要分布在鉴江、北江、东江、西江、韩江、丰江水库、

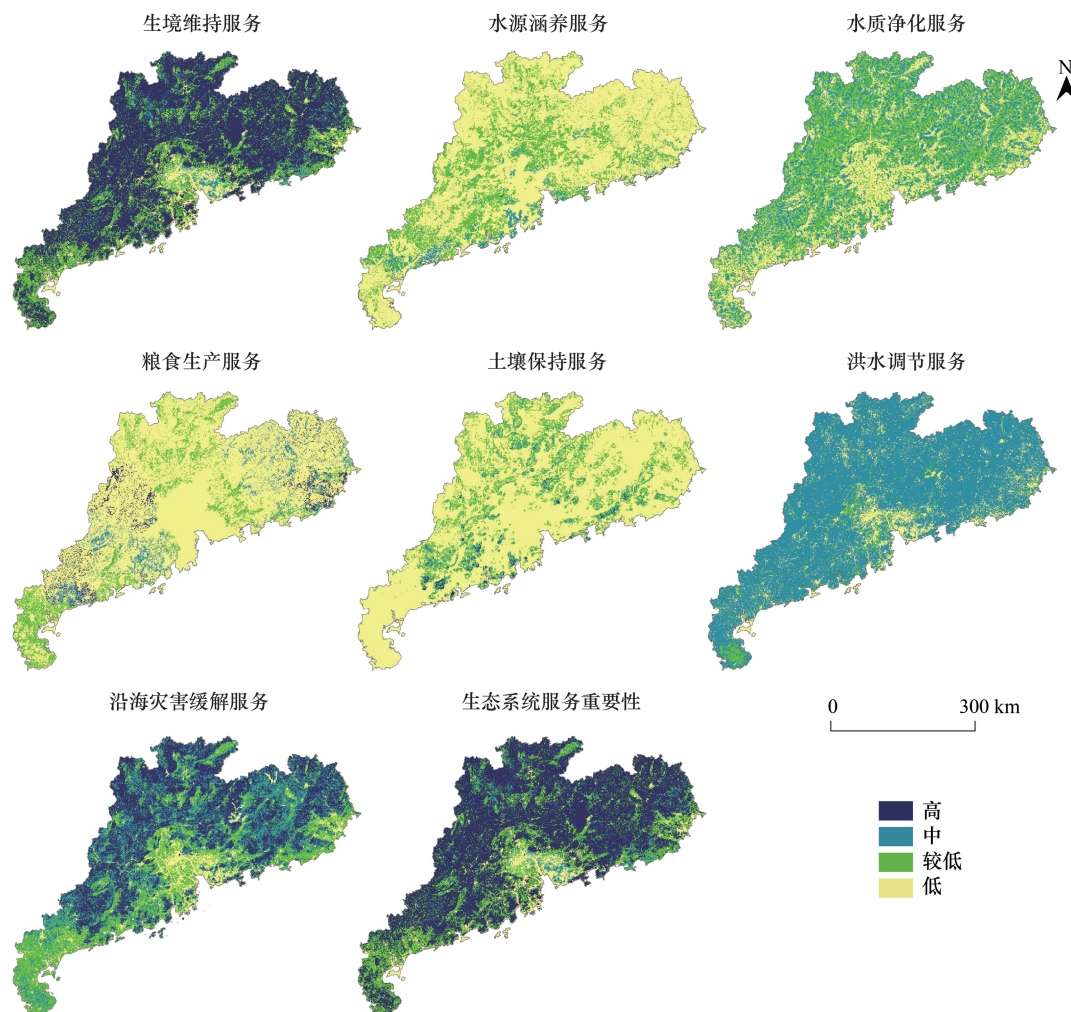


图3 广东省单一生态系统服务供给与生态系统服务重要性

Fig.3 Ecosystem services supply and comprehensive importance in Guangdong Province

高州水库等重要水体及其河岸带、库滨带;控制开发区的保护等级中等,占总面积的 15.34%,主要分布在水体周围的内陆滩涂、林地、草地;弹性开发区面积占比 31.05%,多为林地、建设用地和耕地;适宜开发区面积占比 47.38%,可以进行合理开发。广东省水安全格局整体呈“五江一带”式分布。“五江”包括鉴江、西江、北江、东江、韩江,在区域水生态安全中具有重要地位,其周边的林地、草地是重要的水质净化和水源涵养功能区。“一带”指沿海经济带,充沛的降水和较高的植被覆盖度使其具有较好的水质净化和水源涵养能力。在生态保护修复过程中,要重点关注河网密布的珠江口,避免城市化带来的水质退化与水系结构破坏。

3.5 面向粮食生产目标的生态安全格局

综合粮食生产服务、水源涵养服务和土壤保持服务得到粮食生产重要性指数(图 6)。高值位于茂名市南部、揭阳市、汕头市和湛江市,这些区域的耕地质量好,是维持稳定粮食生产的重要区域,需要重点保护。珠三角耕地面积小,粮食依靠外部供给。共识别了 92 个生态源地,总面积 12605.35 km²,占研究区陆域总面积的 7.12%、耕地总面积的 29.62%。源地高度集中在湛江市、茂名市、揭阳市、汕头市等沿海经济带地区,是广东省粮食安全的重要保障。提取了 214 条生态廊道,总长度 15030.86 km,主要分布在肇庆市、河源市、梅州市,通过连接重要的生态源地来保障耕地生态系统结构和功能的完整性。

3.6 面向自然灾害防范目标的生态安全格局

综合土壤保持服务、洪水调节服务和沿海灾害缓解服务得到自然灾害防范重要性指数,低值位于珠三角,

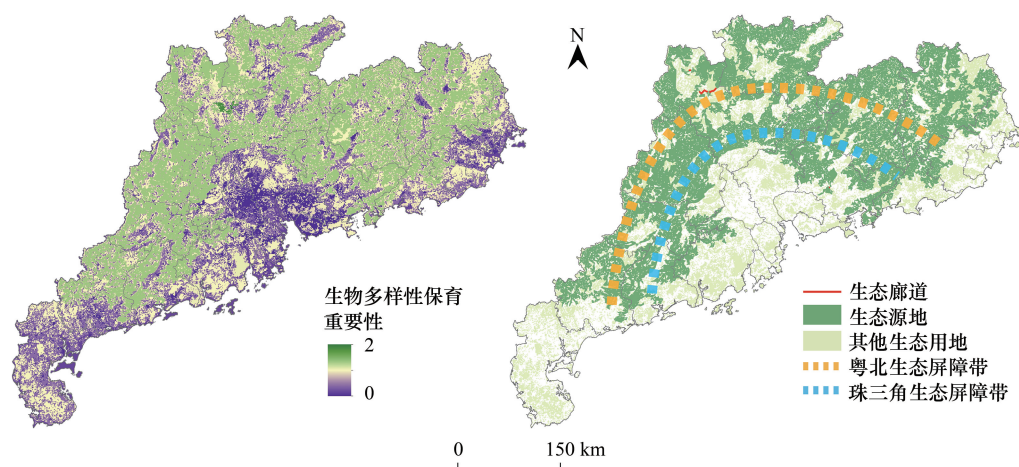


图4 面向生物多样性保育目标的重要性指数与生态安全格局

Fig.4 Importance index and ecological security pattern for biodiversity conservation objective

湛江市、汕头市(图7)。识别了118个生态源地,总面积17829.80 km²,占研究区总面积的10.07%;生态廊道共193条,总长度5009.61 km。生态源地和廊道在珠三角、湛江市、汕头市少有分布,主要集中在粤北生态发展区。湛江市、汕头市生态用地破碎,水土流失问题突出,同时地处沿海,面临较高的沿海灾害风险。珠三角不透水面比例高,抵御洪涝灾害和风暴潮的能力较差。这些区域需要加强风险评估及预警等自然灾害防范能力。

3.7 综合生态安全格局

整合生态系统服务重要性指数和多功能生态源地,识别了99个综合生态源地,总面积49536.10 km²,占研究区总面积的27.97%(图8)。其中,湛江市没有生态源地分布,珠三角与汕头市少有生态源地分布,面临较高的生态风险。韶关市、清远市、肇庆市、河源市的生态源地面积较大,分别为8634 km²、7134 km²、5687 km²、

5112 km²。生态廊道共提取了143条,总长度2268.07 km。其中,河源市与梅州市交界处廊道密集且长度较长。江门市-珠海市-中山市一带、广州市、惠州市的生态廊道较长,分布较离散,生态连通作用不可替代。相较而言,珠三角和茂名市的生态廊道细长,电流值较大;粤北生态发展区的廊道较宽,电流值较小。廊道中狭窄且电流值大的部分电流密度大,是重要的生态夹点,如果移除或破坏会对生态功能造成较大影响,共32处,主要分布在中山市、珠海市、江门市、惠州市廊道中电流值较大的12处狭窄区,要加强保护以避免对廊道连通功能的破坏。生态障碍点是廊道中阻力值大的区域,共44处,主要分布在广州市、中山市、珠海市、江门市、惠州市的19处,覆盖了廊道的大部分面积,需要开展生态修复,提升生态廊道连通性,维护区域生态安全。

4 讨论

生态系统服务间存在着复杂的权衡与协同关系,一种生态系统服务的变化会引起其他服务的变化^[39]。在国土空间生态保护修复中,针对不同生态保护目标采取的措施也可能存在冲突。因此,简单叠加多种生态系统服务识别的生态源地无法兼顾多重生态保护目标。面向不同生态保护目标识别生态源地,进而叠加多功

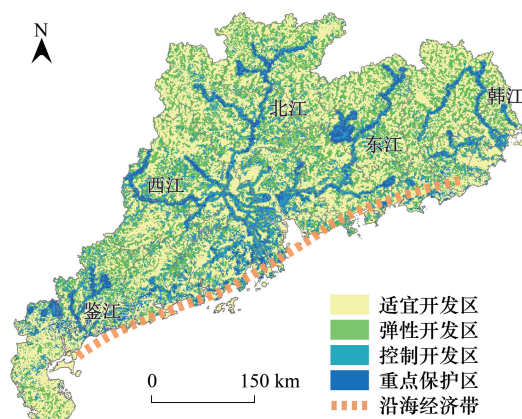


图5 面向水资源利用目标的水安全格局

Fig.5 Water security pattern for water resource utilization objective

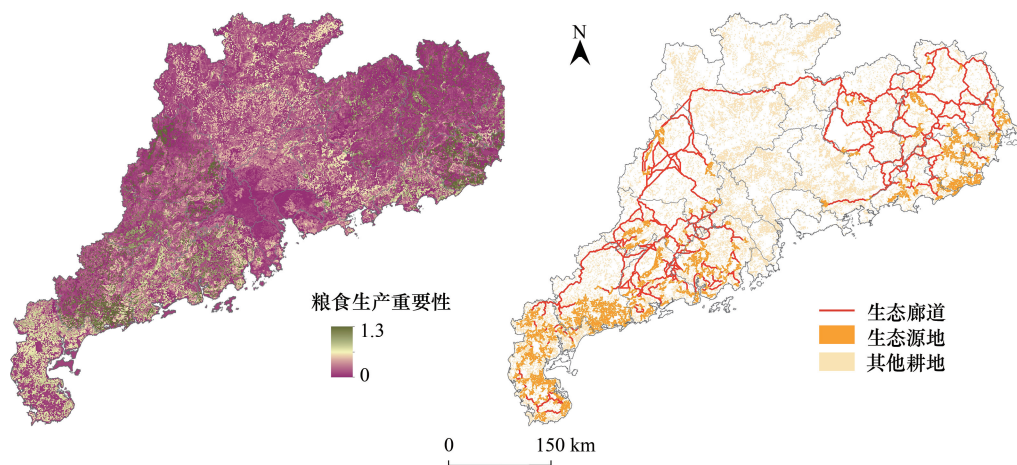


图 6 面向粮食生产目标的重要性指数与生态安全格局

Fig.6 Importance index and ecological security pattern for grain production objective

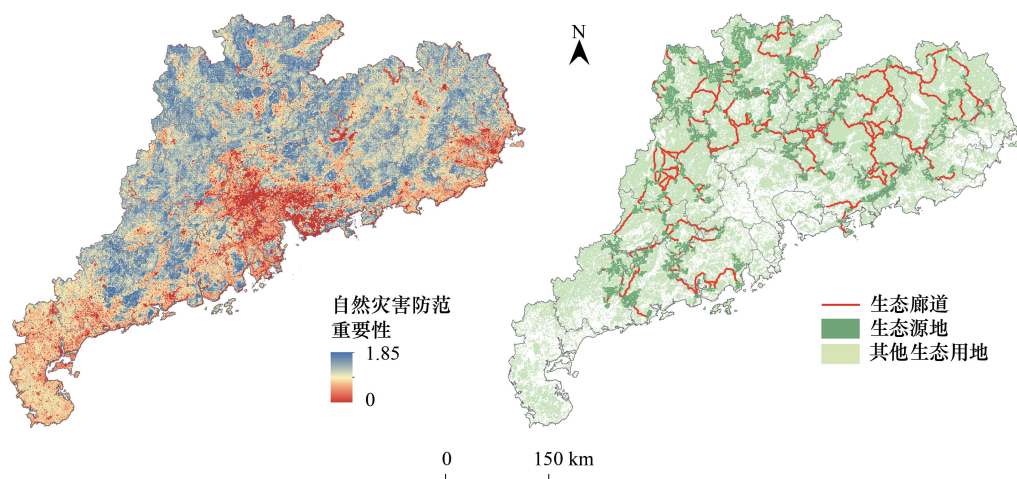


图 7 面向自然灾害防范目标的重要性指数与生态安全格局

Fig.7 Importance index and ecological security pattern for natural disaster prevention objective

能源地,可以促进生态系统服务的协同,明确生态源地的多重效用,实现生态效益最大化。

将综合生态源地以及生物多样性保育源地、水资源利用源地、粮食生产源地、自然灾害防范源地的七种生态系统服务供给水平进行对比(图 9),可以发现:综合生态源地主要分布在粤北生态发展区,能较为均衡地保障多重生态系统服务的供给,但粮食生产服务的供给能力相对较差。生物多样性保育源地、自然灾害防范源地与综合生态源地的服务供给水平较为一致,但生物多样性保育源地的土壤保持服务较差。水资源利用源地与其他类型源地的重合度低,其水源涵养能力显著较高。粮食生产源地主要位于湛江市、汕头市,其粮食生产服务和洪水调节服务供给水平远高于其他类型源地。研究表明,粮食生产服务与水质净化服务和土壤保持服务间均存在显著的权衡关系^[39—40],导致粮食生产源地与其他类型源地的生态系统服务供给水平高度不一致。面向生态保护修复,综合生态安全格局的构建可以兼顾生物多样性保育和自然灾害防范两个目标,但要关注生态源地水源涵养能力的提升,强化水体周边水源涵养区建设与保育。同时,对粮食生产源地的保护需要考虑粮食生产服务与其它生态系统服务间的权衡关系。湛江市耕地分布的破碎化破坏了生境的连通性,也降低了防范自然灾害的能力,需要通过耕地综合整治,引导高质量耕地的合理空间布局。

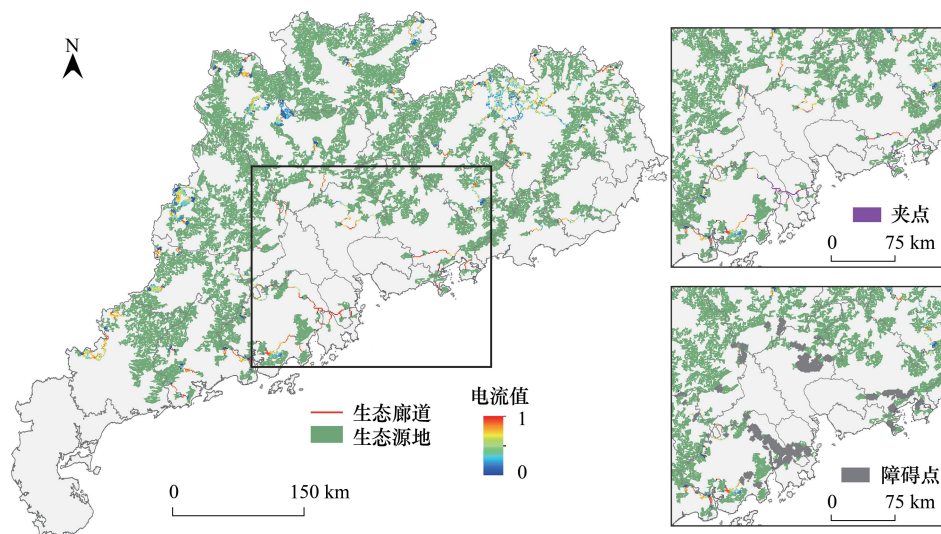


图8 广东省综合生态安全格局

Fig.8 Comprehensive ecological security pattern of Guangdong Province

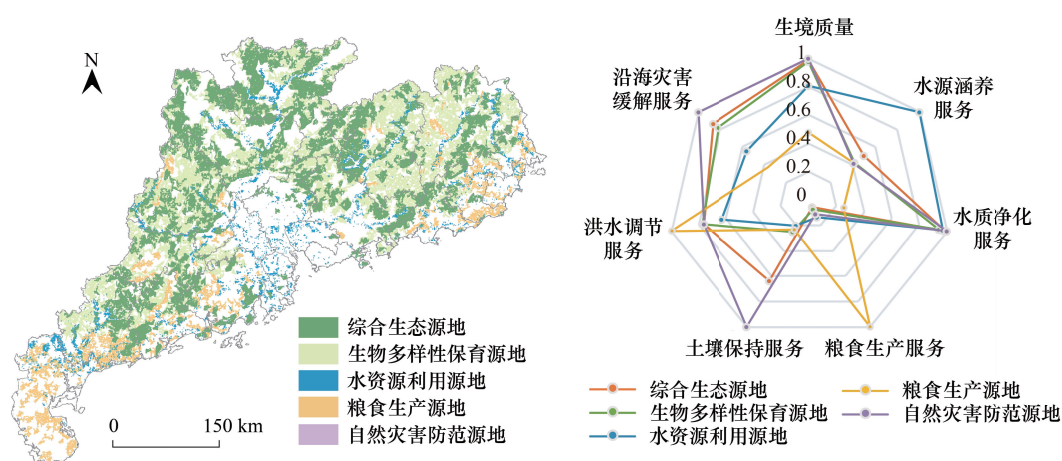


图9 面向多重生态保护目标的生态源地空间格局

Fig.9 Spatial pattern of ecological sources for multiple ecological conservation objectives

整合多重生态保护目标下的生态安全格局构建结果,本研究提出广东省生态保护修复策略:(1)面向生物多样性保育目标,重点保护粤北生态发展区内大面积连续分布的生态用地、沿海地区以红树林为代表的典型滨海湿地,维系全省生态屏障,保护生物多样性。珠三角、湛江市和汕头市生态用地面积小且分布破碎,需重点提升连通性;(2)面向水资源利用目标,应加强保护鉴江、西江、北江、东江、韩江、丰江水库、高州水库等重要水体,强化河岸带与库滨带植被恢复。珠江口河网密度大且城市化水平高,水源涵养和水质净化能力差,需要重点开展污水处理以提升水质,同时加强生态城市建设,提升地表覆被对水源的涵养与净化能力,保障区域用水安全;(3)面向粮食生产目标,应重点关注粤东、粤西的耕地破碎化问题,合理配置耕地与生态用地,协同提升水源涵养和土壤保持能力以保障耕地质量;(4)面向自然灾害防范目标,需要重点关注高风险区的自然灾害防范。例如,珠三角主要防范风暴潮、赤潮等海洋灾害,粤东、粤西地区主要防范风暴潮、灾害性海浪等海洋灾害。这些区域缺少生态源地和廊道,应加强沿海防风林和生态海堤建设,采取雨水滞蓄、海绵城市等措施提升城市防洪排涝能力;(5)面向综合生态保护目标,应重点保护粤北生态发展区的生态源地,同时加强珠

三角、湛江市和汕头市的生态建设。尤其是珠三角地区,生态廊道细长且电流值高,夹点与障碍点密集分布,需要重点保护夹点,修复障碍点,切实提升廊道对生态源地的连通作用,维护区域生态安全保障能力。

5 结论

本研究以广东省为例,提出了整合多重生态保护目标的生态安全格局构建框架,并对比了不同类型的生态源地以提出针对性保护修复策略。研究结果表明,面向生物多样性保育目标的生态安全格局呈“双屏障带”式分布,源地主要分布在粤北生态发展区;面向水资源利用目标的水安全格局呈“五江一带”式分布,重点保护区主要位于河湖水体及周边绿地;面向粮食生产目标的生态源地主要分布在广东省东西两翼;面向自然灾害防范目标的生态源地在珠三角和湛江市、汕头市少有分布,以粤北生态发展区为主;综合生态安全格局兼顾了生物多样性保育和自然灾害防范的目标,源地主要位于珠三角外围和粤北生态发展区。整合多重生态保护目标,广东省生态保护修复策略的制定需要重点关注粤北生态发展区的生境质量提升,现状河湖水体及河岸带、库滨带的水生态安全,湛江市、汕头市的耕地保护和国土综合整治,沿海地区的自然灾害防范,同时开展珠三角的生态夹点保护与障碍点修复,以提升生态廊道的连通性。

需要补充说明的是,现有方法构建的生态安全格局难以提供面向不同目标的生态保护修复策略,本研究应对广东省多种生态问题,构建了面向多个单一目标的生态安全格局,解决了生态源地功能指向不明的问题。但目前粮食生产服务的评估受数据源所限尚无法区分不同类型耕地,有待未来进一步针对性探讨。此外,本研究构建的是陆域生态安全格局,考虑到广东省沿海的地理位置,应进一步落实陆海统筹,关注红树林等沿海湿地生态系统在区域生态安全保障中的重要作用。

参考文献 (References):

- [1] 彭建, 赵会娟, 刘焱序, 吴健生. 区域生态安全格局构建研究进展与展望. 地理研究, 2017, 36(3): 407-419.
- [2] 马克明, 傅伯杰, 黎晓亚, 关文彬. 区域生态安全格局——概念与理论基础. 生态学报, 2004, 24(4): 761-768.
- [3] 苏冲, 董建权, 马志刚, 乔娜, 彭建. 基于生态安全格局的山水林田湖草生态保护修复优先区识别——以四川省华蓥山区为例. 生态学报, 2019, 39(23): 8948-8956.
- [4] 彭建, 李慧蕾, 刘焱序, 胡熠娜, 杨旸. 雄安新区生态安全格局识别与优化策略. 地理学报, 2018, 73(4): 701-710.
- [5] Peng J, Pan Y J, Liu Y X, Zhao H J, Wang Y L. Linking ecological degradation risk to identify ecological security patterns in a rapidly urbanizing landscape. *Habitat International*, 2018, 71: 110-124.
- [6] 叶鑫, 邹长新, 刘国华, 林乃峰, 徐梦佳. 生态安全格局研究的主要内容与进展. 生态学报, 2018, 38(10): 3382-3392.
- [7] 王晓玉, 冯喆, 吴克宁, 林倩. 基于生态安全格局的山水林田湖草生态保护与修复. 生态学报, 2019, 39(23): 8725-8732.
- [8] Vergnes A, Kerbiriou C, Clergeau P. Ecological corridors also operate in an urban matrix: a test case with garden shrews. *Urban Ecosystems*, 2013, 16(3): 511-525.
- [9] 吴健生, 张理卿, 彭建, 冯喆, 刘洪萌, 赫胜彬. 深圳市景观生态安全格局源地综合识别. 生态学报, 2013, 33(13): 4125-4133.
- [10] Fan F F, Liu Y X, Chen J X, Dong J Q. Scenario-based ecological security patterns to indicate landscape sustainability: a case study on the Qinghai-Tibet Plateau. *Landscape Ecology*, 2021, 36(7): 2175-2188, doi: 10.1007/s10980-020-01044-2.
- [11] Su Y X, Chen X Z, Liao J S, Zhang H O, Wang C J, Ye Y Y, Wang Y. Modeling the optimal ecological security pattern for guiding the urban constructed land expansions. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2016, 19: 35-46.
- [12] 陈士银, 宾津佑, 蔡世煜. 基于 ESDA-GIS 的广东省耕地生态承压能力时空特征研究. 水土保持研究, 2021, 28(4): 358-365, 374-374.
- [13] 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.
- [14] Balvanera P, Pfisterer A B, Buchmann N, He J S, Nakashizuka T, Raffaelli D, Schmid B. Quantifying the evidence for biodiversity effects on ecosystem functioning and services. *Ecology Letters*, 2006, 9(10): 1146-1156.
- [15] Toth F L. *Ecosystems and Human Well-being: A Framework for Assessment*. Washington, DC: Island Press, 2003.
- [16] Dong J Q, Peng J, Liu Y X, Qiu S J, Han Y N. Integrating spatial continuous wavelet transform and kernel density estimation to identify ecological corridors in megacities. *Landscape and Urban Planning*, 2020, 199: 103815.
- [17] Peng J, Tian L, Zhang Z M, Zhao Y, Green S M, Quine T A, Liu H Y, Meersmans J. Distinguishing the impacts of land use and climate change on ecosystem services in a karst landscape in China. *Ecosystem Services*, 2020, 46: 101199.

- [18] Liu W, Zhan J Y, Zhao F, Yan H M, Zhang F, Wei X Q. Impacts of urbanization-induced land-use changes on ecosystem services: a case study of the Pearl River Delta Metropolitan Region, China. *Ecological Indicators*, 2019, 98: 228-238.
- [19] Emanuel K. Increasing destructiveness of tropical cyclones over the past 30 years. *Nature*, 2005, 436(7051): 686-688.
- [20] Noy I. Tropical storms; the socio-economics of cyclones. *Nature Climate Change*, 2016, 6(4): 343-345.
- [21] Sharp R, Douglass J, Wolny S, Arkema K, Bernhardt J, Bierbower W, Chaumont N, Denu D, Fisher D, Glowinski K, Griffin R, Guannel G, Guerry A, Johnson J, Hamel P, Kennedy C, Kim C K, Lacayo M, Lonsdorf E, Mandle L, Rogers L, Silver J, Toft J, Verutes G, Vogl A L, Wood S and Wyatt K. InVEST 3.9.0. User's Guide. The Natural Capital Project, Stanford University, University of Minnesota, The Nature Conservancy, World Wildlife Fund, 2020.
- [22] 王保盛, 陈华香, 董政, 祝薇, 邱全毅, 唐立娜. 2030 年闽三角城市群土地利用变化对生态系统水源涵养服务的影响. *生态学报*, 2020, 40(2): 484-498.
- [23] 刘怡娜, 孔令桥, 肖焱, 郑华. 长江流域景观格局与生态系统水质净化服务的关系. *生态学报*, 2019, 39(3): 844-852.
- [24] 赵雪雁, 杜昱璇, 李花, 王伟军. 黄河中游城镇化与生态系统服务耦合关系的时空变化. *自然资源学报*, 2021, 36(1): 131-147.
- [25] 黄麟, 祝萍, 曹巍. 中国退耕还林还草对生态系统服务权衡与协同的影响. *生态学报*, 2021, 41(3): 1178-1188.
- [26] Taylor P D, Fahrig L, Henein K, Merriam G. Connectivity is a vital element of landscape structure. *Oikos*, 1993, 68(3): 571-573.
- [27] 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.
- [28] 彭建, 赵会娟, 刘焱序, 杜悦悦. 区域水安全格局构建——研究进展及概念框架. *生态学报*, 2016, 36(11): 3137-3145.
- [29] 郭羽羽, 李思悦, 刘睿, 张静. 黄河流域多时空尺度土地利用与水质的关系. *湖泊科学*, 2021, 33(3): 737-748.
- [30] Hanjra M A, Qureshi M E. Global water crisis and future food security in an era of climate change. *Food Policy*, 2010, 35(5): 365-377.
- [31] Rojas R V, Achouri M, Maroulis J, Caon L. Healthy soils: a prerequisite for sustainable food security. *Environmental Earth Sciences*, 2016, 75(3): 180.
- [32] 陈德权, 兰泽英, 李玮麒. 基于最小累积阻力模型的广东省陆域生态安全格局构建. *生态与农村环境学报*, 2019, 35(7): 826-835.
- [33] Hirabayashi Y, Mahendran R, Koirala S, Konoshima L, Yamazaki D, Watanabe S, Kim H, Kanae S. Global flood risk under climate change. *Nature Climate Change*, 2013, 3(9): 816-821.
- [34] 陈昕, 彭建, 刘焱序, 杨旸, 李贵才. 基于“重要性—敏感性—连通性”框架的云浮市生态安全格局构建. *地理研究*, 2017, 36(3): 471-484.
- [35] Zhang L Q, Peng J, Liu Y X, Wu J S. Coupling ecosystem services supply and human ecological demand to identify landscape ecological security pattern: a case study in Beijing-Tianjin-Hebei region, China. *Urban Ecosystems*, 2017, 20(3): 701-714.
- [36] Gurrutxaga M, Rubio L, Saura S. Key connectors in protected forest area networks and the impact of highways: a transnational case study from the Cantabrian Range to the Western Alps (SW Europe). *Landscape and Urban Planning*, 2011, 101(4): 310-320.
- [37] Peng J, Yang Y, Liu Y X, Hu Y N, Du Y Y, Meersmans J, Qiu S J. Linking ecosystem services and circuit theory to identify ecological security patterns. *Science of the Total Environment*, 2018, 644: 781-790.
- [38] McRae B H, Beier P. Circuit theory predicts gene flow in plant and animal populations. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2007, 104(50): 19885-19890.
- [39] Chen L, Pei S, Liu X N, Qiao Q, Liu C L. Mapping and analysing tradeoffs, synergies and losses among multiple ecosystem services across a transitional area in Beijing, China. *Ecological Indicators*, 2021, 123: 107329.
- [40] Li Z H, Deng X Z, Jin G, Mohammed A, Arowolo A O. Tradeoffs between agricultural production and ecosystem services: a case study in Zhangye, Northwest China. *Science of the Total Environment*, 2020, 707: 136032.