

基于 InVEST 模型和电路理论的生态安全格局识别 ——以青海省海南藏族自治州为例

赵隆莲^{1,2}, 曹广超^{1,2,3}, 闫欣^{1,2}, 苏万峰^{1,2}, 咸庆玲^{1,2}

(1.青海师范大学地理科学学院 青海省自然地理与环境过程重点实验室, 青海 西宁 810008; 2.青藏高原地表过程与生态保育教育部重点实验室, 青海 西宁 810008; 3.青海师范大学青海省人民政府—北京师范大学高原科学与可持续发展研究院, 青海 西宁 810008)

摘要: [目的] 识别青海省海南藏族自治州关键生态廊道、生态节点和障碍点, 刻画海南州的生态安全格局, 为该地区生态环境保护和可持续发展提供科学参考和借鉴。[方法] 以黄河源头重要水源涵养区青海省海南藏族自治州(海南州)为研究对象, 基于 InVEST 模型和电路理论方法, 刻画以源地—阻力面—廊道为框架的海南州生态安全格局。[结果] ①海南州生态系统服务总体较好, 主要以极重要和高度重要服务为主; ②研究区内生态源地面积约 5 463 km², 占研究区总面积的 12.0%, 斑块分布较为零散, 集中分布在海南州南部、东部和青海湖南岸; 识别生态廊道共 55 条, 总长度为 1 963 km, 其中关键廊道 22 条, 廊道分布呈现南部、东部密集, 西部稀疏的分布格局; 共识别生态夹点 37 个, 生态障碍点 32 个, 主要分布在共和县和贵德县中部; ③通过整合生态源地、生态廊道和生态夹点、障碍点区域, 构建生态安全格局。[结论] 研究区西部未来应重视生境的保护和修复, 提升海南州生态系统的整体连通性。

关键词: InVEST 模型; 生态系统服务; 电路理论; 生态安全格局; 海南藏族自治州(海南州)

文献标识码: B

文章编号: 1000-288X(2025)01-0137-10

中图分类号: X321, X171.1

文献参数: 赵隆莲, 曹广超, 闫欣, 等. 基于 InVEST 模型和电路理论的生态安全格局识别[J]. 水土保持通报, 2025, 45(1): 137-146. Zhao Longlian, Cao Guangchao, Yan Xin, et al. Ecological security pattern identification based on InVEST model and circuit theory [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2025, 45(1): 137-146. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2025.01.015; CSTR: 32312.14.stbctb.2025.01.015.

Ecological security pattern identification based on InVEST model and circuit theory

—A case study at Hainan Zang Autonomous Prefecture, Qinghai Province

Zhao Longlian^{1,2}, Cao Guangchao^{1,2,3}, Yan Xin^{1,2}, Su Wanfeng^{1,2}, Xian Qingling^{1,2}

(1. Key Laboratory of Physical Geography and Environmental Processes of

Qinghai Province, College of Geographical Sciences, Qinghai Normal University, Xining,

Qinghai 810008, China; 2. Key Laboratory of Surface Processes and Ecological Conservation on the

Tibetan Plateau, Ministry of Education, Xining, Qinghai 810008, China; 3. Academy of Plateau Science and Sustainability People's Government of Qinghai Province & Beijing Normal University, Xining, Qinghai 810008, China)

Abstract: [Objective] The key ecological corridors, ecological nodes, and obstacle points in the Hainan Zang Autonomous Prefecture, Qinghai Province was identified, and the ecological security pattern of the Hainan Prefecture was described in order to provide a reference for its ecological environmental protection and sustainable development. [Methods] The ecological security pattern of the Hainan Prefecture was described using the InVEST model and circuit theory method based on the source-resistance surface-corridor framework. The Hainan Zang Autonomous Prefecture (Hainan Prefecture) in the Qinghai Province, an

收稿日期: 2024-09-04

修回日期: 2024-10-08

采用日期: 2024-10-09

资助项目: 青海省重大科技专项“青海省碳达峰碳中和关键技术研发和示范区建设”(2021-SF-A7-1); 青海自然地理与环境过程重点实验室(2020-ZJ-Y06)

第一作者: 赵隆莲(1999—), 女(汉族), 青海省格尔木市人, 硕士研究生, 研究方向为遥感与地理信息系统应用。Email: zhaolonglian0921@163.com。

通信作者: 曹广超(1971—), 男(汉族), 山东省兰陵县人, 博士, 教授, 主要从事青藏高原地区环境变化与地理信息系统应用研究。Email: cao-guangchao@qhnu.edu.cn。

important water conservation area at the headwaters of the Yellow River, was the research object. [Results]

① Ecosystem services in the Hainan Prefecture were generally good and mainly included very important and highly important services. ② The ecological source area in this study was approximately 5 463 km², accounting for 12.0% of the total study area. Scattered patches were mainly distributed in the south and east of the Hainan Prefecture and at the southern bank of the Qinghai Lake. A total of 55 ecological corridors were identified, with a total length of 1 963 km, including 22 key corridors, with a dense distribution pattern in the south and east and sparse distribution in the west. A total of 37 ecological pinch points and 32 ecological obstacle points were identified, which were mainly distributed in the central parts of Gonghe and Guide County. ③ The ecological source, corridor, pinch point, and obstacle point areas were combined to form an ecological security pattern. [Conclusion] Future endeavors should focus on the protection and restoration of habitats in the western part of the study area, strengthening the service capacity of the ecological source area at the southern, eastern, and southern banks of the Qinghai Lake to improve the overall connectivity of the ecosystem in the Hainan Prefecture.

Keywords: InVEST model; ecosystem services; circuit theory; ecological security pattern; Hainan Zang Autonomous Prefecture (Hainan Prefecture)

随着我国社会经济快速发展,城市化进程不断加快,生态环境面临巨大压力。人类对自然资源的无序开发与利用引发了诸多生态环境问题,如生物栖息地破碎化、生物多样性丧失、生态系统服务水平下降等问题,使区域失衡日益严重,生态安全面临威胁^[1-2]。生态安全格局(ESP, ecological security pattern)作为一种基本的生态系统管理模式,在改善环境质量,提高生态系统服务功能等方面起到重要作用,对于保障区域生态安全、推动健康可持续发展具有重要意义^[3]。

生态安全格局是指在维护生态安全过程中,由关键功能的点、局部和空间关系构成的空间格局,与景观生态安全格局不同的是,生态安全格局更关注在大尺度上研究包括人类社会和经济活动在内的多样干扰因素,而不仅仅局限于单一景观内部的运行机制^[4]。早期的生态安全格局侧重于自然生态系统,主要围绕某一特定的生态要素展开^[5];随着社会经济问题与生态环境矛盾日益凸显,研究重点逐渐转向自然生态系统与社会经济耦合的协同格局的研究态势^[6]。目前,生态安全格局研究逐渐趋于成熟,基本形成以“源地识别—阻力面构建—廊道提取”为主的研究范式^[7]。其中,生态源地是生态流向外扩散的起始点,当前多数研究利用直接识别法^[8]、空间形态学分析(MSPA)^[9]、生态敏感性等^[10]方法识别生态源地。这类方法多直接提取自然保护区或生态质量较好的区域作为生态源地,往往忽略了生态系统中不同生态系统服务或生态要素之间的相互作用,而基于InVEST模型的多情境评估,通过识别生态系统服务的重要性来确定生态源地,是一种科学有效的解决方案。生态阻力面是构建生态廊道的基础,已有研究将生态阻力面基于土地利用直接赋值,然后采用不透水

表面指数和夜间灯光数据修正阻力值,未考虑相同土地利用类型内的空间异质性以及地形因素影响,综合考虑不同土地利用类型和海拔、坡度等因素的方法有效提高了生态阻力面设置的合理性和准确性。生态廊道是生态源地之间的生态流和能量流迁移、交流的桥梁,最小累积阻力模型(MCR)^[11]成为生态廊道识别的主要方法,然而MCR模型难以捕捉物种的随机运动特性,不能进一步分析生态廊道的宽度和生态节点^[12]。电路理论方法将生态流动视为一个电流运动过程,电路中的节点和支路可以与生态系统中的关键生态节点和生态走廊相类比,利用网络分析方法评估不同节点在生态安全格局中的重要性和连接性,能够准确识别关键生态廊道,还可以确定某些生态过程的关键生态节点^[13],从而提供详细的空间信息,弥补了现有模型在反映信息交换方面的局限性,为识别生态节点和障碍点提供了科学基础。

青海省海南藏族自治州(以下简称“海南州”)是国家生态安全战略格局“两屏三带”的重要组成部分,位于三江源生态保护区和青海湖自然保护区,具有重要的生态地位^[14]。其次,海南州拥有我国首个千万千瓦级太阳能发电基地和国内最好的干热岩资源,也是全国唯一的生态畜牧业可持续发展试验区,文化旅游产业、畜牧业和清洁能源的发展为主。随着全球气候变化、产业开发和鼠虫危害等原因,海南州正面临湿地资源减少,草地生态系统质量降低、水土流失加剧以及沙漠化面积扩大等问题^[15-16]。因此,基于海南州生态本底特征,选择典型生态系统服务功能来识别生态源地,采用电路理论模型识别关键生态廊道和生态节点、障碍点,刻画海南州的生态安全格局,以期结果为海南州生态环境保护和可持续发展议程创新示

范区建设提供科学参考和借鉴。

1 研究区与研究方法

1.1 研究区概况

青海省海南藏族自治州(34°38′—37°10′N, 98°55′—101°50′E)位于青藏高原东北部,青海湖之南,境内平均海拔 3 200 m^[17]。包括共和、贵德、贵南、同德、兴海 5 县以及龙羊峡行委,总面积为 44 500 km²,占青海省国土总面积的 6.18%,境内地形以山地为主,四周环山,盆地居中,高原丘陵和河谷台地相间其中,地势起伏较大。全州平均海拔在 3 200 m 以上,属于高原大陆性气候区,全州年均气温在 -4~7 °C 之间,年平均降水量为 250~450 mm,主要降水差异集中在 5—9 月^[18]。

1.2 数据来源

(1) 遥感数据。中国土地利用现状遥感监测数据,来源于中国科学院地理科学与资源研究所(<http://www.resdc.cn/>),空间分辨率为 100 m;MODIS 13Q1 的 NDVI 数据,空间分辨率 250 m,时间分辨率 16 d,从美国国家航空航天局网站获取(<http://www.nasa.gov/>);SRTM 海拔数据,空间分辨率为 90 m,来源于地理空间数据云平台(<https://www.gscloud.cn/>)。

(2) 气象数据。1901—2022 年中国 1 km 分辨率逐月平均气温、降水量、潜在蒸散发数据,来源于国家地球系统科学数据中心(http://www.geodata.cn)。中国气象要素日站点观测数据集日照时数数据,来源于资源环境科学数据平台(<https://www.resdc.cn/>),月太阳总辐射量由日照时数计算,并在 ArcGIS 中插值得到。

(3) 植被土壤数据。植被根系深度数据来源于中国 100 m 基岩根系深度数据^[19]。土壤数据来源于国家冰川冻土沙漠科学数据中心(http://www.ncdc.ac.cn)的世界土壤数据库,使用的指标有土壤砂粒含量、土壤粉粒含量、土壤黏粒含量、土壤有机质含量。所有数据均投影为 WGS_1984_UTM_Zone_47N,分辨率均重采样为 100 m。

1.3 研究方法

根据俞孔坚^[4]提出的“源地识别—阻力面构建—廊道提取”的研究范式,分 3 步识别海南州生态安全格局:①对海南州典型生态系统服务进行评估,叠加典型生态系统服务,将生态系统服务极重要性区域识别为生态源地;②综合自然因素和人为因素设置基本阻力面;③运用电路理论方法识别生态廊道、生态夹点和生态障碍点要素。

1.3.1 生态源地识别 生态源地是提供重要生态系统服务或发挥重要辐射功能的重要斑块,通过评估生态系统服务功能的空间差异,可以识别出重要的生态斑块。海南州区域内地表蒸发量大,降水和地表径流不断减少,植被覆盖度低;同时由于区域内海拔落差较大,地势起伏不平,易发生风力、水力侵蚀。因此,根据海南州生态本底特征,选择典型的生态系统服务功能,即产水量、土壤保持、生境质量、碳储量功能进行评价。采用模糊隶属度函数对 4 项生态系统服务进行标准化处理,通过栅格叠加,得到综合生态系统服务格局,利用自然断点法将其划分为 5 个重要性等级,提取综合生态系统服务最高等级区域,最高等级区是重要的栖息地,兼并提供特定的、重要的生态系统服务,将面积小于 10 km²且分布零散的斑块从生态源地中剔除。

(1) 产水服务(InVEST-水量平衡方程^[20])

$$Y_{xj} = \left(1 - \frac{AET_{xj}}{P_x}\right) \times P_x \quad (1)$$

$$\frac{AET_{xj}}{P_x} = \frac{1 + \omega_x R_{xj}}{1 + \omega_x R_{xj} + \frac{1}{R_{xj}}} \quad (2)$$

$$\bar{\omega}_x = Z \frac{A\bar{\omega}C_x}{P_x} \quad (3)$$

$$R_{xj} = \frac{k_{xj} ET_{0x}}{P_x} \quad (4)$$

式中: Y_{xj} 为栅格单元 x 中土地覆被类型 j 的年产水量; AET_{xj} 为第 j 土地利用类型栅格 x 的实际蒸散; P_x 为栅格单元 x 的降水量; $\bar{\omega}_x$ 为修正植被可利用水量与降水量的比值; R_{xj} 为 Budyko 干燥指数; Z 为 Zhang 系数; $A\bar{\omega}C_x$ 栅格单元 x 的土壤有效含水量; K_{xj} 表为栅格单元 x 的中土地覆被类型 j 的植被系数; ET_0 为参考作物蒸散;土层深度数据基于中国 100 m 基岩根系深度数据计算;植被可利用含水量由世界土壤数据库土壤质地和土壤有机质含量数据计算得到;生物物理表包括 LULC 编码、植物蒸散系数(K_{ij})和根系深度,参考文献[20]进行设置。

(2) 土壤保持服务(InVEST-改进的土壤流失方程 ULSE^[21])。

$$USLE = R \cdot K \cdot LS \cdot C \cdot P \quad (5)$$

$$RKLS = R \cdot K \cdot LS, \quad SD = RKLS - USLE \quad (6)$$

式中:RKLS 是潜在土壤流失量; K 是土壤可侵蚀性因子,单位为 $(t \cdot hm^2 \cdot h)/(hm^2 \cdot MJ \cdot mm)$; R 是降雨侵蚀力因子,本研究参考《生产建设项目土壤流失量测算导则 SL773—2018》,选择 R 因子的计算公式为:

$$R_n = 0.053 \times P_n^{1.655} \quad (7)$$

式中: P_n 为年降水侵蚀力, 单位为 $\text{MJ} \cdot \text{mm}/(\text{hm}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{a})$; LS 是坡长坡度因子; $USLE$ 是实际土壤流失量; C 为植被覆盖因子; P 为水土保持因子, 参考文献[21]进行设置。

(3) 生境质量服务(InVEST-生物多样性模型^[22])。

$$Q_{xj} = H_j \left[1 - \left(\frac{D_{xj}^z}{D_{xj}^z + k^2} \right) \right] \quad (8)$$

式中: Q_{xj} 为 j 类生境类型中栅格 x 的生境质量, 取值范围为 $[0, 1]$, 值越接近 1, 表示该区域生境质量越高; H_j 为生境适宜性; z 为归一化常量; k 为半饱和参数; D_{xj} 为生境退化度, 表示生境的退化程度; 参考对威胁因子最大影响距离、种类权重以及衰退相关性系数进行设置^[23]; 生境类型对威胁因子敏感度参考文献^[22-23]确定。

(4) 碳储量服务(CASA-NPP 估算^[24])。

$$\text{NPP}(x, t) = \text{APRA}(x, t) \times \varepsilon(x, t) \quad (9)$$

$$\text{APRA}(x, t) = S(x, t) \times \text{FPAR}(x, t) \times 0.5 \quad (10)$$

式中: x 表示空间位置; t 表示时间段; S 表示太阳总辐射量($\text{MJ}/\text{m}^2/\text{月}$); FPAR 表示植物吸收的光合有效辐射在总光合有效辐射中所占比例, 常数 0.5 表

示太阳总辐射中用于光合作用的比例。 $\varepsilon(x, t)$ 为栅格 x 上的植被在 t 时段内植被所吸收的光和有效辐射, Potter 等^[25]认为在理想条件下, 植被具有最大的光能利用率; ε 为 $0.389 \text{ g}/\text{MJ}$; 静态参数配置中 NDVI_{\min} 和 SR_{\max} , 在 ENVI 软件中通过土地利用类型数据和 NDVI 数据计算得到。

1.3.2 阻力面构建 阻力面体现了生物迁移所遇到的障碍, Knappen 等^[26]最早提出最小累积阻力模型(MCR), 后经俞孔坚等^[4]学者不断进行改善。参照已有研究, 选取土地利用类型、高程、坡度、距道路距离、NDVI 等阻力因子, 阻力系数越大表明生态用地扩张阻力越大, 耗费成本越高, 阻力分级标准参考相关研究, 并采用层次分析法(AHP)确定各个因子权重, 构建生态阻力面(表 1)。计算公式为:

$$\text{MCR} = f_{\min} \sum_{q=n}^{p=m} D_{pq} R_p \quad (11)$$

式中: MCR 表示从源地某一点到其他点的最小累积阻力值。 D_{pq} 为从源地 q 到其他某一源地时受到阻力因子 p 影响的空间距离; R_p 为选取的因子 p 对源地的阻力值, $p=m, q=n$ 分别表示栅格中源地经过的单元距离之和与累积阻力的总值。

表 1 生态源地扩张阻力因子分级及权重

Table 1 Classification and weight of resistance factors to expansion of ecological source areas

| 阻力因子 | 生态源地扩张阻力分级 | | | | | 权重 |
|----------|------------|-------------|-------------|-------------|--------|------|
| | 1 级 | 2 级 | 3 级 | 4 级 | 5 级 | |
| 土地利用类型 | 林地、水体 | 耕地 | 草地 | 未利用地 | 城镇用地 | 0.25 |
| 高程/m | <3 000 | 3 000~3 400 | 3 400~3 800 | 3 800~4 200 | >4 200 | 0.16 |
| 坡度/(°) | 0~6 | 6~13 | 13~22 | 22~33 | >33 | 0.14 |
| 距道路距离/km | 1~0.5 | 0.5~0.3 | 0.3~0.2 | 0.2~0.1 | 0.1~0 | 0.12 |
| NDVI | 0.8~1.0 | 0.6~0.8 | 0.4~0.6 | 0.2~0.4 | 0~0.2 | 0.35 |

1.3.3 生态廊道、夹点及障碍点识别 生态廊道作为生态源地之间信息传递的最佳路径, 对维护生态系统功能体系的空间完整性起着关键作用。电路理论的原理是: 通过模拟电子在电路中的随机游走特性来研究物种个体或基因流在整个景观中的迁移和扩散过程, 在这个模型中, 物种个体或基因流被类比为电子, 而景观被视为一个电导表面, 对于那些有利于物种迁移扩散的景观类型, 赋予较低的电阻值; 相反, 阻碍物种迁移的景观类型则具有较高的电阻值^[27]。利用 Linkage Mapper 工具插件和 Circuitscape 软件为基底对提取的生态源地和阻力面对研究区中的关键生态廊道和潜在生态廊道进行识别。

在此基础上, Linkage Mapper 工具中的 Pinch point Mapper 工具通过依次连接不同的生态节点(源地), 通向其他节点并输入电流值进行迭代运算, 所有

电流都通过的节点被称为“夹点”, 这些节点是物种繁衍和扩散的重要基地, 影响着整体的迁移路径和效率, 是关键性区域, 因此要进行重点保护。

生态障碍点是指生态源地之间的物质流和能量流之间受到较大阻碍的区域, 通过计算清除障碍点后电流值恢复的大小来识别障碍点区域, 本研究基于 Circuitscape 生成的研究区电流差异, 利用 Barrier Mapper 模块, 选择“maximum”模式迭代运算, 将搜索路径步长设置为 500, 最大搜索距离为 1000, 用改善分值大小表示生态“障碍点”在源地间生态流动的阻碍程度^[28]。其计算公式为:

$$\text{IS} = \frac{\text{LCD} - \text{LCD}_1}{D} \quad (12)$$

式中: IS 表示改善分值; LCD 表示障碍带你原始最小成本距离; LCD_1 表示障碍点移除后最小成本距

离; D 表示移动搜索窗口搜索半径。

2 结果与分析

2.1 生态系统服务评估

根据青海省水资源公报显示,2000,2010 和 2020 年海南州天然年径流量分别为 50,90 和 111 mm,与本研究通过 InVEST 模型计算得出(图 1),2000 年(57 mm),2010 年(102 mm),2020 年(117 mm)的结果相近。海南州 2000—2020 年土壤保持均值为 85 t/hm^2 ,生境质量均值为 0.66 这与马嘉豪^[29]2000—2018 年海南州土壤保持均值(81 t/hm^2)、生境质量均值为(0.69)结果相当。碳储量结果直接与 MODIS 产品进行比较,MOD17A3 产品,2000 年为 $167 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$,2010 年为 $213 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$,2020 年为 $238 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$,刘旻霞^[30]对海南州碳储量的研究,2000 年为 $127 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$,2010 年为 $181 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$,上述研究结果与本研究较为一致。从时间维度来看,海南州的产水量服务逐年增加,2000,2010 和 2020 年均值分别为 57,102,117 mm。从空间分布格局来看,产水量呈现中部向南递增的分布规律,由于南部天然森林覆盖密集,能够有效拦截降水流失,且农作物需水量大,南部林区的产水量普遍高于东部的农耕区,增加趋势也最为明显。研究区中部共和盆地由于季节性降雨集中,光照强度大且蒸腾作用剧烈,植被需要通过大量的浅层细根获得降雨,导致其产水量值偏低^[31]。土壤保持服务 3 a 均值为 81 t/hm^2 ,2000 年为最小值 62 t/hm^2 ,2020 年为最大值 103 t/hm^2 ,增加幅度为 39%,其逐年增加的趋势与邓得玲^[32]的研究结论一致。空间分布上,呈现“南、东高,腹地低”的特点,共和盆地、贵南县中部区域土壤保持量较低,可能是因为该地区以栗钙土和棕钙土为主,土壤中砂粒含量较高^[33]。南部同德县、兴海县和东部贵妃线植被覆盖度高,具有良好的水土截留作用,土壤保持功能较强。海南州 3 a 生境质量服务均值都在 0.69 以上,表明海南州生态系统整体现状良好。高值区分布在同德县、兴海县、共和县和贵南县,与胡西武等^[34]对青海省生态友好等级识别较高质量区和中等质量区的研究结果一致,土地利用类型以林地、草地和水域等生态用地为主,生态环境质量较高。低值区主要集中在共和盆地区域,其土壤质地较差,沙漠化程度较高,容易发生变化和胁迫影响,从而影响生物多样性。2000,2010 和 2020 年碳储量服务均值分别为 122,193 和 $233 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ 。空间分布趋势与产水量服务一致,高值区主要分布在研究区南部,该地区土地覆被多为山区林地和高原草甸,属于人类活动干扰

较少的生态地区,由于退耕还林政策,区域内植被覆盖度有所提高,碳储量也显著提高;研究区中部土地利用类型以荒漠化土地为主、研究区西部,受地形因素的限制,海拔高开发能力弱,因此碳储量较小。

2.2 生态安全格局识别

2.2.1 生态源地识别 基于生态系统服务重要性,共识别 27 个生态源地,面积为 $5\,463 \text{ km}^2$,占研究区总面积的 12%。贵南县和贵德县有 10 个生态源地,面积为 $1\,793 \text{ km}^2$,占源地面积的 33%,同德县和兴海县有 7 个生态源地,面积为 $3\,228 \text{ km}^2$,占源地面积的 59%,兴海县和同德县源地数量少,但斑块面积较大,景观连通性较好,生态功能连续性较为完整;共和县有 10 个生态源地,面积为 442 km^2 ,占源地面积的 8%,共和县生态源地数量多,但斑块面积小且连接度低,北部源地与南部源地斑块间距离过大,不利于物种迁徙过程中能量和物质交换,生物多样性易受威胁。

2.2.2 阻力面识别 从图 2 可知,共和盆地和兴海县西部,是主要的高阻力值分布区,共和盆地位于青海三江源土地沙化程度最严重的地区,生态系统脆弱。兴海县西部,海拔在 3 000 m 以上,植被生长条件差,生态系统服务值低;同时,受道路、建设用地和人类活动的影响,对生态系统中的各类生物在生态源之间的能量流动和物种迁移造成较大的阻碍。低阻力值地区与生态源地分布区域较为类似,多为林地、高覆盖草地等,说明此类土地利用类型中生态系统功能较完整,生物信息流动较通畅。

2.2.3 生态廊道、生态“夹点”和“障碍点”识别 利用 Linkage Mapper 工具处理得到 55 条生态廊道(图 3),总长度为 1 963 km,通过成本加权距离与最小成本路径之比,评估生态廊道连通性分级,比值越小,则表明该廊道的连通性越强。最终得到 22 条关键生态廊道,22 条重要生态廊道,11 条一般生态廊道。重要廊道总长度最长,约为 1 185 km,比例为 60%;一般廊道数量最少,约为 400 km,比例为 20%,关键生态廊主要连接斑块面积较大的生态源地,连通性强,在廊道的生态功能方面起着重要作用,中部关键廊道主要连接青海湖南岸与兴海县中南部的生态源地,其他关键廊道主要分布在南部山区林地和植被覆盖度较高地区密集分布,避开了西部与中部的大面积未利用地,主要经过区域景观状况较好阻力低,能够较好的保障物种的有序扩散,在西部和中部高阻力区域内,没有关键廊道分布。剔除掉部分冗余夹点,共识别“生态夹点”37 个,总面积约为 937.5 km^2 ,在生态保护中应视为优先保护区域,生态夹点集中分布在北部和东部。

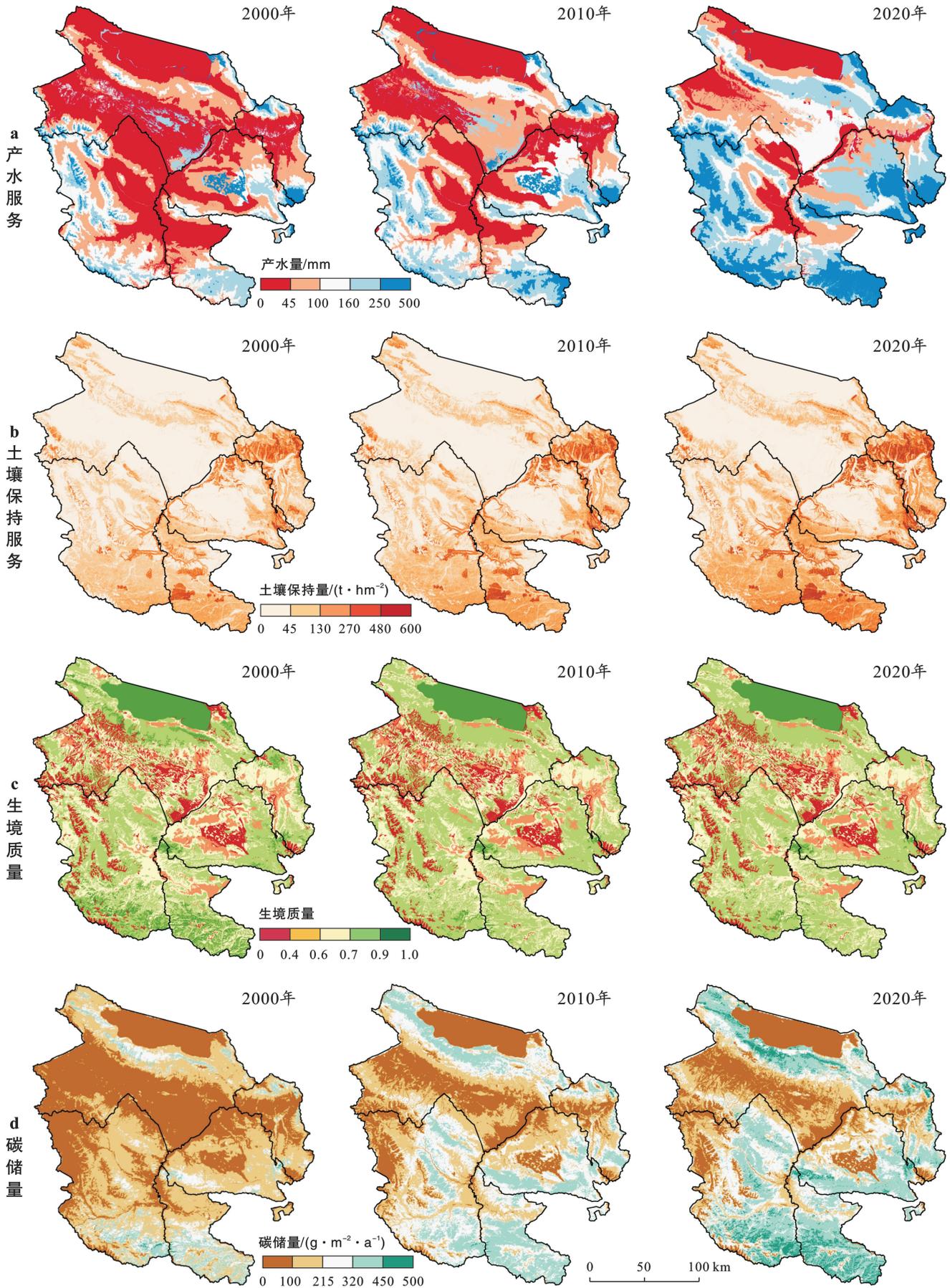


图 1 海南州生态系统服务时空分布

Fig.1 Spatial distribution of ecosystem services in Hainan Prefecture

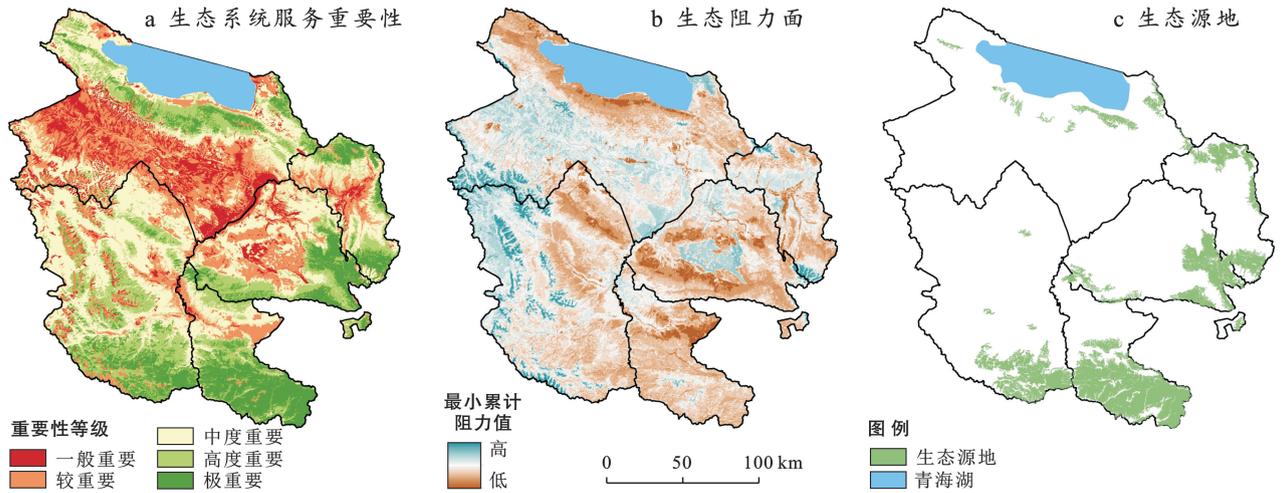


图 2 海南州生态系统服务重要性、生态阻力面、生态源地分布

Fig.2 Spatial distribution of ecosystem service importance, ecological resistance surface and ecological source areas in Hainan Prefecture

“夹点”的土地利用类型为林地、耕地、草地和河流,“夹点”是确保生态廊道连通性和生态功能有效发挥的关键。共识别“生态障碍点”32 个,总面积约为 791.5 km²,主要分布在共和县,该地区土地由于土地荒漠化、草地沙化和退化,生态功能减弱,生态廊道狭窄,实际处于断裂状态,阻碍了生态源地之间连通性

的区域,因此,该地区生态障碍点数多,重点提升该区域内的生态环境质量,有效降低生态阻力将能够极大地改善生态源地之间的景观流通性。此外,在提取的过程中发现生态障碍点部分与生态夹点重合现象,表明该区域存在阻碍能量流动的要素,通过有限开展生态修复可以进一步提高源地之间的连通性。

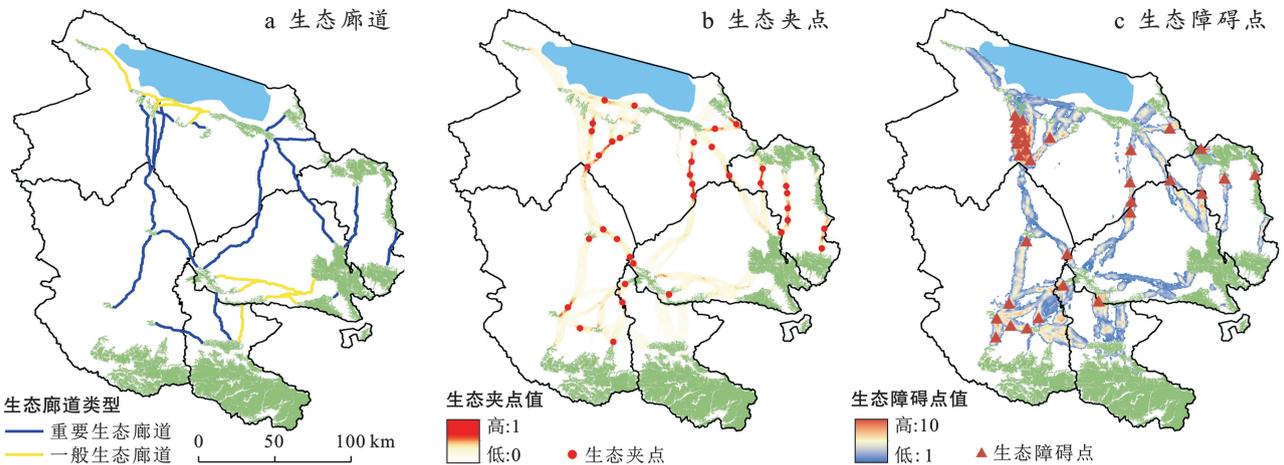


图 3 海南州生态廊道、生态夹点和生态障碍点的空间分布

Fig.3 Spatial distribution of ecological corridors, ecological pinch points and ecological obstacle points in Hainan Prefecture

3 讨论

海南州生态系统服务功能总体上较好,但其西部缺乏生态源地和生态廊道,生物多样性丧失、生境较为破碎等问题值得重点关注。2000—2020 年,共和县北部,兴海县、同德县和贵德县南部的产水和碳储量服务不断增加,也是生态系统服务的极重要性区域。该地区丰富的森林资源和山地气候为该地区提供了重要的发育条件,发挥了重要的生物多样性、水源涵养、碳固存等生态系统服务功能;而兴海县鄂拉山地区、青海湖南岸、龙羊峡、阿尼直亥山地区,由于

海拔和复杂地形,低生境质量的斑块破碎化严重且具有集聚性,生态系统服务功能较弱,与已有的研究^[35]结论一致。

根据本研究识别出的生态安全格局和海南藏族自治州可持续发展规划(2020—2030 年)(以下简称规划)中的“三带三滩十沟”进行分析(图 4)。其中“三带”与本研究识别出的成片生态廊道和生态源地的分布较为一致,是生态网络安全格局的核心区域,区域内的土壤保持、产水量和碳储量功能突出。结合区域内自然保护地和国家公园的保护和管控措施,不断提高生态源地服务能力,促进生物多样性保护,优

化栖息地结构,保障区域内景观的连通性和完整性。“三滩”与本研究中缺少生态源地,拥有大量“生态障碍点”的区域相吻合,由于干旱少雨,风力侵蚀严重,土地沙漠化严重,生态本底脆弱,该区域以恢复区域生态环境质量为首要,通过种植适宜的沙地植被、设置生态围栏和沙障工程措施等,逐步改善沙地环境,增强生态系统的稳定性和抗干扰能力。对于廊道上的障碍点,例如共和县、兴海县和贵德县中部的障碍点区域,应主动对“生态障碍点”进行修复,通过种植耐旱植物等,如柠条、沙棘等固沙植物,结合草方格固沙技术,减少风沙对土地的侵蚀,并有效控制沙化扩展,改善其生态环境质量,恢复生态廊道功能,提高生态网络的连通性。“十沟流域”作为黄河流域的重要分支,主要以综合生态流域治理为主,以减少水土流失、风沙危害,同时应促进生态廊道与水域廊道相结合,形成蓝绿的生态网络体系,增加植被覆盖、物种多样性及水源涵养能力,以改善生态环境。最后,缺乏生态源地和廊道的西部区域,包括共和县南部和兴海县北部地区,高海拔山地,其主要以畜牧业为主,应因地制宜实施划区禁牧、轮牧、休牧制度,禁止过度放牧、开垦草地,遏制土地沙化,增加生态源地和生态廊道的数量,扩大廊道的覆盖范围、增强廊道之间的连通性,来改善生物迁徙和基因交流的通道,进一步提高生态系统的稳定性和抵御外界干扰的能力。



图 4 海南州生态安全格局

Fig.4 Ecological security pattern in Hainan Prefecture

在本研究中生态源地的识别着重考虑了土地利用类型和斑块的内部差异性,通过生态廊道的电流值识别出具有空间属性的“生态廊道”、“生态夹点”和“生态障碍点”等要素,打破了最小成本路径方法下生态廊道的均一化限制和冗余性,有效区分出生态安全格局中的重要生态安全要素,使县域生态修复规划更为具体。但本研究也存在一定的不足,河流作为一种重要的生态廊道类型,尚未对其进行独立分析,仅与规划中的“十沟流域”进行了讨论,未来的工作中还需要对河流生态廊道进行细分化研究。

4 结论

(1) 海南州整体生态环境较好,2000—2020 年产水服务、土壤保持服务、生境质量和碳储量服务呈现增加趋势,高值区主要集中在海南州南部、东部和青海湖南岸。

(2) 研究区识别出 27 个生态源地,与现有自然保护区和实际情况基本吻合,识别生态廊道 55 条,生态夹点 37 处,主要分布在研究区南部、东部和青海湖南岸,主要由林地、耕地和高覆盖草地组成,对维持区域生态安全意义重大。

(3) 海南州西部生态本底较差,缺少生态源地,没有形成高效的格网状的生态网络,网络闭合度低,应重视破碎化生境的保护与修复。基于本研究识别的生态安全格局和海南州规划,未来生态保护和修复工作以增加西部生态源地服务能力,强化南部、东部和青海湖南岸的生态源地服务能力,加强海南州生态廊道的连通性,以及恢复区域生态本底质量为主体思路,促进海南州生态环境保护和可持续发展议程创新示范区建设。

参考文献 (References)

- [1] 毛诚瑞,代力民,齐麟,等.基于生态系统服务的流域生态安全格局构建:以辽宁省辽河流域为例[J].生态学报,2020,40(18):6486-6494.
Mao Chengrui, Dai Limin, Qi Lin, et al. Constructing ecological security pattern based on ecosystem services: A case study in Liaohe River basin, Liaoning Province, China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2020,40(18):6486-6494.
- [2] 应凌霄,孔令桥,肖懿,等.生态安全及其评价方法研究进展[J].生态学报,2022,42(5):1679-1692.
Ying Lingxiao, Kong Lingqiao, Xiao Yi, et al. The research progress and prospect of ecological security and its assessing approaches [J]. Acta Ecologica Sinica, 2022,42(5):1679-1692.
- [3] Peng Jian, Yang Yang, Liu Yanxu, et al. Linking ecosystem services and circuit theory to identify ecological security patterns [J]. Science of the Total Environment,

- 2018,644:781-790.
- [4] 俞孔坚,李迪华,段铁武.生物多样性保护的景观规划途径[J].生物多样性,1998,6(3):205.
Yu Kongjian, Li Dihua, Duan Tiewu. Landscape approaches in biodiversity conservation [J]. Biodiversity Science, 1998, 6(3): 205.
- [5] 叶鑫,邹长新,刘国华,等.生态安全格局研究的主要内容与进展[J].生态学报,2018,38(10):3382-3392.
Ye Xin, Zou Changxin, Liu Guohua, et al. Main research contents and advances in the ecological security pattern [J]. Acta Ecologica Sinica, 2018,38(10):3382-3392.
- [6] 彭建,赵会娟,刘焱序,等.区域生态安全格局构建研究进展与展望[J].地理研究,2017,36(3):407-419.
Peng Jian, Zhao Huijuan, Liu Yanxu, et al. Research progress and prospect on regional ecological security pattern construction [J]. Geographical Research, 2017,36(3):407-419.
- [7] 陈昕,彭建,刘焱序,等.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[J].地理研究,2017,36(3):471-484.
Chen Xin, Peng Jian, Liu Yanxu, et al. Constructing ecological security patterns in Yunfu City based on the framework of importance-sensitivity-connectivity [J]. Geographical Research, 2017,36(3):471-484.
- [8] 李晖,易娜,姚文璟,等.基于景观安全格局的香格里拉县生态用地规划[J].生态学报,2011,31(20):5928-5936.
Li Hui, Yi Na, Yao Wenjing, et al. Shangri-La county ecological land use planning based on landscape security pattern [J]. Acta Ecologica Sinica, 2011,31(20):5928-5936.
- [9] 李倩瑜,唐立娜,邱全毅,等.基于形态学空间格局分析和最小累积阻力模型的城市生态安全格局构建:以厦门市为例[J].生态学报,2024,44(6):2284-2294.
Li Qianyu, Tang Lina, Qiu Quanyi, et al. Construction of urban ecological security pattern based on MSPA and MCR Model: A case study of Xiamen [J]. Acta Ecologica Sinica, 2024,44(6):2284-2294.
- [10] 曹玉红,曹卫东,吴威,等.基于自然生态约束空间差异的区域生态安全格局构建[J].水土保持通报,2008,28(1):106-109.
Cao Yuhong, Cao Weidong, Wu Wei, et al. Constructing regional ecological security pattern based on the spatial difference of eco-environmental restriction [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2008,28(1): 106-109.
- [11] 黄木易,岳文泽,冯少茹,等.基于 MCR 模型的大别山核心区生态安全格局异质性及优化[J].自然资源学报,2019,34(4):771-784.
Huang Muyi, Yue Wenzhe, Feng Shaoru, et al. Analysis of spatial heterogeneity of ecological security based on MCR model and ecological pattern optimization in the Yuexi County of the Dabie Mountain Area [J]. Journal of Natural Resources, 2019,34(4):771-784.
- [12] 包玉斌,王耀宗,路锋,等.六盘山区国土空间生态安全格局构建与分区优化[J].干旱区研究,2023,40(7):1172-1183.
Bao Yubin, Wang Yaozong, Lu Feng, et al. Construction of an ecological security pattern and zoning optimization for territorial space in the Liupan Mountain Area [J]. Arid Zone Research, 2023,40(7):1172-1183.
- [13] 易浪,孙颖,尹少华,等.生态安全格局构建:概念、框架与展望[J].生态环境学报,2022,31(4):845-856.
Yi Lang, Sun Ying, Yin Shaohua, et al. Construction of ecological security pattern: Concept, framework and prospect [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2022,31(4):845-856.
- [14] 周睿,钟林生,刘家明,等.中国国家公园体系构建方法研究:以自然保护区为例[J].资源科学,2016,38(4):577-587.
Zhou Rui, Zhong Linsheng, Liu Jiaming, et al. Establishing a National Park category system in China [J]. Resources Science, 2016,38(4):577-587.
- [15] 李姣.水土流失视角下的青海省海南藏族自治州生态安全评价[D].陕西 西安:陕西师范大学,2013.
Li jiao. Ecological security assessment of Hainan Tibetan Autonomous Prefecture in Qinghai Province from the perspective of soil erosion [D]. Xi'an, Shaanxi: Shaanxi Normal University, 2013.
- [16] 李应业,李加洛,赵恒和,等.海南州气候变化对生态环境的影响及对策研究[J].青海环境,2005,15(4):139-143.
Li Yingye, Li Jialuo, Zhao Henghe, et al. Effects of the climate changes on ecological environment and study on the countermeasures in Hainan Prefecture [J]. Journal of Qinghai Environment, 2005,15(4):139-143.
- [17] 许建业.海南州青稞生产现状及技术应用[J].西藏农业科技,2011,33(1):14-15.
Xu Jianye. Highland barley production and technique application in Hainan Prefecture of Qinghai Province [J]. Tibet Journal of Agricultural Sciences, 2011, 33(1):14-15.
- [18] 许正福,颜亮东,马扶林,等.青海省海南地区近 30 年 ≥ 0 °C 积温变化趋势分析[J].草业科学,2011,28(11):1924-1928.
Xu Zhengfu, Yan Liangdong, Ma Fulin, et al. Analysis of tendency on ≥ 0 °C accumulated temperature during last 30 years in Hainan area of Qinghai Province [J]. Pratacultural Science, 2011,28(11):1924-1928.
- [19] 颜发鹏, Shanguan Wei, Zhang Jing, et al. Depth-to-bedrock map of China at a spatial resolution of 100 meters [J]. Scientific Data, 2020,7(1):2.

- [20] 潘韬,吴绍洪,戴尔阜,等.基于 InVEST 模型的三江源区生态系统水源供给服务时空变化[J].应用生态学报, 2013,24(1):183-189.
Pan Tao, Wu Shaohong, Dai Erfu, et al. Spatiotemporal variation of water source supply service in three rivers source area of China based on InVEST model [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2013,24(1):183-189.
- [21] 闻亮.基于 InVEST 模型的三江源生态系统土壤保持功能评估[D].北京:首都师范大学,2012.
Wen Liang. Evaluation of soil conservation function in the Sanjiangyuan ecosystem based on the InVEST model [D]. Beijing: Capital Normal University, 2012.
- [22] 王宏杰.基于 InVEST 的三江源生境质量评价[J].价值工程,2016,35(12):66-70.
Wang Hongjie. Evaluation of the ecological quality for Sanjiangyuan based on InVEST [J]. Value Engineering, 2016,35(12):66-70.
- [23] 严莉,曹广超,康利刚,等.基于 InVEST 模型的共和县生境质量时空变化及驱动因素[J].干旱区研究,2024, 41(2):314-325.
Yan Li, Cao Guangchao, Kang Ligang, et al. Analysis of spatial and temporal changes in habitat quality and driving factors in Gonghe County using the InVEST model [J]. Arid Zone Research, 2024,41(2):314-325.
- [24] 朱文泉,陈云浩,潘耀忠,等.基于 GIS 和 RS 的中国植被光利用率估算[J].武汉大学学报(信息科学版), 2004,29(8):694-698.
Zhu Wenquan, Chen Yunhao, Pan Yaozhong, et al. Estimation of light utilization efficiency of vegetation in China based on GIS and RS [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2004,29(8):694-698.
- [25] Potter C S, Randerson J T, Field C B, et al. Terrestrial ecosystem production: A process model based on global satellite and surface data [J]. Global Biogeochemical Cycles, 1993,7(4):811-841.
- [26] Knaapen J P, Scheffer M, Harms B. Estimating habitat isolation in landscape planning [J]. Landscape and Urban Planning, 1992,23(1):1-16.
- [27] 刘佳,尹海伟,孔繁花,等.基于电路理论的南京城市绿色基础设施格局优化[J].生态学报,2018,38(12): 4363-4372.
Liu Jia, Yin Haiwei, Kong Fanhua, et al. Structure optimization of circuit theory-based green infrastructure in Nanjing, China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2018,38(12):4363-4372.
- [28] 姜虹,张子墨,徐子涵,等.整合多重生态保护目标的广东省生态安全格局构建[J].生态学报,2022,42(5): 1981-1992.
Jiang Hong, Zhang Zimo, Xu Zihan, et al. Construction of ecological security pattern integrating multiple ecological protection objectives in Guangdong Province [J]. Acta Ecologica Sinica, 2022,42(5):1981-1992.
- [29] 马嘉豪.青藏高原生态系统服务对景观格局变化的响应[D].陕西 西安:长安大学,2023.
Ma Jiahao. The response of ecosystem services to changing landscape patterns on the Qinghai-Tibet Plateau: A case study from eastern Qinghai Province [D]. Xian, Shaanxi: Chang'an University, 2023.
- [30] 刘旻霞,焦骄,潘竟虎,等.青海省植被净初级生产力(NPP)时空格局变化及其驱动因素[J].生态学报, 2020,40(15):5306-5317.
Liu Minxia, Jiao Jiao, Pan Jinghu, et al. Spatial and temporal patterns of planting NPP and its driving factors in Qinghai Province [J]. Acta Ecologica Sinica, 2020,40(15):5306-5317.
- [31] Qingxue L I, Zhiqing J, Tao L, et al. Effects of different plantation types on soil properties after vegetation restoration in an alpine sandy land on the Tibetan Plateau, China [J]. Journal of Arid Land, 2017, 9(2):10.
- [32] 邓得玲,杜敏洁,童立珺.基于生态系统格局及生态系统服务功能变化的青海省生态重要性评估[J].资源环境与工程,2023,37(4):420-429.
Deng Deling, Du Minjie, Tong Lijun. Assessment of ecological importance of Qinghai Province based on changes of ecological pattern and ecosystem services function [J]. Resources Environment & Engineering, 2023,37(4):420-429.
- [33] 王学全,尹书乐,杨占武,等.共和盆地塔拉滩不同类型草地群落组成与土壤特性[J].林业科学研究,2015,28(3):346-351.
Wang Xuequan, Yin Shule, Yang Zhanwu, et al. Community composition and soil properties of different grassland types on the tala shoal in Gonghe Basin [J]. Forest Research, 2015,28(3):346-351.
- [34] 胡西武,何福杰,姚海艳,等.青海省生态友好等级区识别、时空演化与地理探测:基于“三生”空间视角[J].干旱区资源与环境,2024,38(2):39-50.
Hu Xiwu, He Fujie, Yao Haiyan, et al. Identification, spatial-temporalevolution, and geographical exploration of ecofriendly areas in Qinghai Province: A perspective of production livingecological spaces [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2024,38(2):39-50.
- [35] 赖松清,吴阳阳.论国土空间规划体系下海南藏族自治州生态空间管控对策[J].南方农业,2023,17(17): 19-22.
Lai Songqing, Wu Yangyang. Discussion on Ecological Space Control Strategies in Hainan Tibetan Autonomous Prefecture under the land spatial planning system [J]. South China Agriculture, 2023,17(17):19-22.