

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2026.01.030; CSTR:32311.14.rswc.2026.01.030.

谭德明, 李凌波, 林涛. 耦合生态质量与服务的优先生态保护区空间识别研究:以长株潭城市群为例[J]. 水土保持研究, 2026, 33(1):225-236, 247.
Tan Deming, Li Lingbo, Lin Tao. Research on spatial identification of priority ecological reserves by coupling ecological quality and service—a case study of Changsha-Zhuzhou-Xiangtan urban agglomeration[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2026, 33(1):225-236, 247.

耦合生态质量与服务的优先生态保护区空间识别研究

——以长株潭城市群为例

谭德明^{1,3}, 李凌波^{2,3}, 林涛^{2,3}

(1.南华大学 经济管理与法学学院, 湖南 衡阳 421001; 2.南华大学 霖霖建筑与设计艺术学院, 湖南 衡阳 421001; 3.南华大学 碳中和与核能发展创新研究院, 湖南 衡阳 421200)

摘要: [目的] 实施基于生态质量与生态系统服务的生态保护和治理, 保护具有重要生态价值和重要生态功能的地区, 实现生态保护效益最大化。 [方法] 以长株潭城市群23个县级行政单位为研究对象, 利用遥感生态指数(RSEI)代表生态质量(EEQ), 结合生态系统服务综合指数(CES)对长株潭城市群(CZT)县域尺度优先生态保护区(PER)进行划分, 从自然因子与社会因子两方面采用多尺度地理加权回归(MGWR)分析其驱动因素。 [结果] (1) 2003—2023年长株潭城市群RSEI呈波动下降趋势, 优秀区所占比例先由5.70%下降至3.83%, 后上升至4.21%, 直至12.61%, 最后2023年回归5.93%; CES表现为逐期下降, 较差地区的比例由2.12%上升至5.99%, 一般地区的比例由1.77%下降到0.64%, 在空间上表现为中心城区生态环境质量逐渐退化, 非中心城区生态环境质量稳步提升; (2) 提取综合表现前10%, 20%和30%的县域, CES储量主要分布在研究区东侧, EQ储量主要分布在研究区边缘, 综合生态储量主要分布在研究区东侧及西侧中部地区, 均以林地利用类型为主; (3) 在提取PER过程中, 自然因子对生态环境质量与生态系统服务功能的影响较为显著, 但随着社会经济发展, 夜间灯光等社会经济因子对生态的影响逐渐增强。 [结论] 2003—2023年长株潭城市群RSEI与CES均呈下降趋势, Marxan结果建议将至少1 718.42 km²纳入CZT优先生态保护区。

关键词: 生态质量; 生态系统服务; 优先生态保护区; 多尺度地理加权回归

中图分类号: X36

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2026)01-0225-12

Research on spatial identification of priority ecological reserves by coupling ecological quality and service —a case study of Changsha-Zhuzhou-Xiangtan urban agglomeration

Tan Deming^{1,3}, Li Lingbo^{2,3}, Lin Tao^{2,3}

(1.School of Economics, Management and Law, University of South China, Hengyang, Hunan 421001, China;
2.Solux College of Architecture and Design, University of South China, Hengyang, Hunan 421001, China; 3.Institute of
Carbon Neutrality and Nuclear Energy Development Innovation, University of South China, Hengyang, Hunan 421200, China)

Abstract: [Objective] This study aims to achieve ecological protection and restoration based on ecological environmental quality (EEQ) and ecosystem services (ESs), protect areas with significant ecological value and important ecological functions, and maximize the benefits of ecological conservation. [Methods] 23 county-level administrative units in the Changsha-Zhuzhou-Xiangtan urban agglomeration (CZT) were selected as the research objects. The remote sensing ecological index (RSEI) was utilized to represent EEQ, and the comprehensive ecosystem service index (CES) was integrated to delineate county-scale priority ecological reserves (PERs) in CZT. Multiscale geographically weighted regression (MGWR) was applied to analyze the driving factors from both natural and social perspectives. [Results] (1) From 2003 to 2023, the RSEI of the CZT showed a

收稿日期: 2025-03-11

修回日期: 2025-04-13

接受日期: 2025-05-05

资助项目: 国家社科基金后期资助项目(23FGLB011); 湖南省自然科学基金面上项目(2024JJ5328)

第一作者: 谭德明(1976—), 男, 湖南株洲人, 博士, 副研究员, 主要从事环境治理、能源经济与管理等方面的研究。E-mail: 1499686214@qq.com

http://stbcj.paperonice.org

fluctuating downward trend. The proportion of excellent-quality areas first decreased from 5.70% to 3.83%, then increased to 4.21%, peaked at 12.61%, and finally returned to 5.93% in 2023. The CES showed a continuous decreasing trend, with the proportion of poor-quality areas increasing from 2.12% to 5.99%, and average-quality areas decreasing from 1.77% to 0.64%. Spatially, it manifested as a gradual degradation of EEQ in central urban areas, contrasted with steady improvement in non-central urban areas. (2) The top 10%, 20%, and 30% of counties ranked by comprehensive performance were extracted. CES reserves were mainly distributed in the eastern part of the study area, ecological quality (EQ) reserves were mainly located along the edges of the study area, and comprehensive ecological reserves were primarily concentrated in the eastern and central-western parts of the study area, all primarily characterized by forest land use type. (3) During the extraction of PERs, natural factors had a significant impact on EEQ and ESs. However, with ongoing socioeconomic development, the impact of socioeconomic factors such as nighttime light intensity on ecology gradually increased. [Conclusion] Both RSEI and CES in the CZT exhibit declining trends from 2003 to 2023. Based on the Marxan analysis results, it is recommended to designate at least 1 718.42 km² as PERs in the CZT.

Keywords: ecological quality; ecosystem services; priority ecological reserves; multiscale geographically weighted regression

城市群是实现城镇化的主要载体,推动区域经济发展的重要引擎^[1]。在过去几十年经济快速增长的大背景下,经济快速发展与生态文明建设之间的矛盾日渐显现。如何协调好生态环境保护与社会经济发展的平衡至关重要^[2]。党的二十届三中全会指出急需健全生态环境监测评估制度,客观分析和评价生态环境质量。

生态保护和修复工作往往需要投入大量时间与人力,划定优先生态保护区(Priority Ecological Reserve, PER)是一项有效减少成本,优化资源分布的重要策略^[3]。PRE通过科学评估与合理规划,将有限的资源集中于生态系统服务、生物多样性保护等重要区域^[4],通过影响生态系统服务的供给、廊道构建、土地利用优化、价值变化以及政策导向等多个路径,对区域生态服务产生影响^[5]。在资源有限的情况下,通过精准定位和优先保护,实现生态与发展的动态平衡以及最大化生态保护效益。

生态系统服务(Ecosystem Services, ESs)是指自然生态系统通过其结构和功能为人类提供的各种利益和支持功能,可以更全面、更直接地反映生态系统对人类社会的价值和功能的概念^[6],其核心在于将生态系统提供的各种功能、过程和益处与人类福祉联系起来,为优先生态保护区划分提供科学依据^[7]。已有研究大多为ESs的结果分配权重并进行叠加和加权,以获得全面的生态系统服务功能结果来描述PER;或者将各种ESs按一定的比例值,将服务重叠的区域指定为PER。然而,仅考虑ESs来划定PER可能会忽视生态环境质量(Ecological Environmental Quality, EEQ)。导致ESs低但自然条件和生态潜力良好的地区被忽视^[8]。

生态环境质量(EEQ)反映了特定时间或空间内的生态环境健康状况^[9]。目前已有许多研究使用多种变量分析各种规模区域的EEQ。其中单一生态指标,如植被覆盖率,归一化植被指数,初净生产力等常用于评估区域EEQ。但随着研究的深入和技术的发展,单一因子的局限性逐渐显现,研究者开始探索多因子综合评价方法,以更全面地评估生态环境状况。徐涵秋等利用PCA来耦合4个指标绿色、湿度、干燥和热量来评估该地区的生态质量^[10]。它比过去的单一指标更客观可靠,已被广泛应用于各种尺度和地区^[11]。

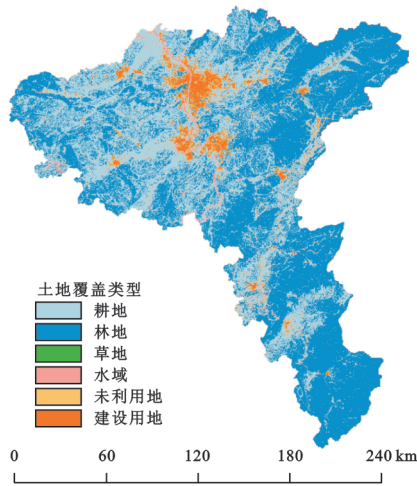
然而,两种评价模型局限于单一视角,缺乏整体性和综合性的考量。生态系统服务可以从资源供需角度对生态质量进行总体评估^[12],但难以刻画生态质量的时空异质性,简化了生态系统层面的特征^[13]。区域生态质量评价是一种以规避生态风险、维护生态系统健康和保障生态服务功能为核心目标的综合性评估体系^[14]。将RSEI作为衡量EEQ的核心指标,并将其与ESs相结合,可以更全面、更准确地评估生态系统的整体状况,确保更科学、合理地描绘PER。

长株潭城市群是典型的“两型社会”(资源节约型、环境友好型)试验区,区域内生态系统类型丰富,但随着不同土地利用类型的转化不断加快,特别是建设用地的不断扩张,环境问题日益突出。目前,对CZT地区的研究多为单一的EEQ或ESs^[15],迫切需要对CZT地区进行全面、完整的评估。作为高强度人类活动与敏感生态系统交织的典型区域,耦合生态质量与生态系统服务研究长株潭城市群生态保护区空间识别,能够揭示城市化与生态质量之间的复杂关系,量化生态系统服务的价值^[16],评估区域生态

风险,为实现区域可持续发展提供科学依据。

研究将RSEI/CES值前30%的区域划定为生态保护核心区,该阈值参考《昆明—蒙特利尔框架》30×30目标,将30%作为生态保护红线阈值的全球目标,前10%~20%的阈值则对应IUCN关键生物多样性区域(Key Biodiversity Areas, KBAs)标准,优先保护不可替代性高的生态系统。

因此,研究旨在:(1)量化2003—2023年CZT地区RSEI和CES的时空分布格局;(2)基于2003—2023年CZT地区RSEI和CES在县域尺度划分PER;(3)探讨影响RSEI和CES的驱动因素。结合CES和EEQ对PER进行圈定,有效识别出生态条件良好的区域,为CZT未来的发展规划和环境保护决策提供重要的理论支持。



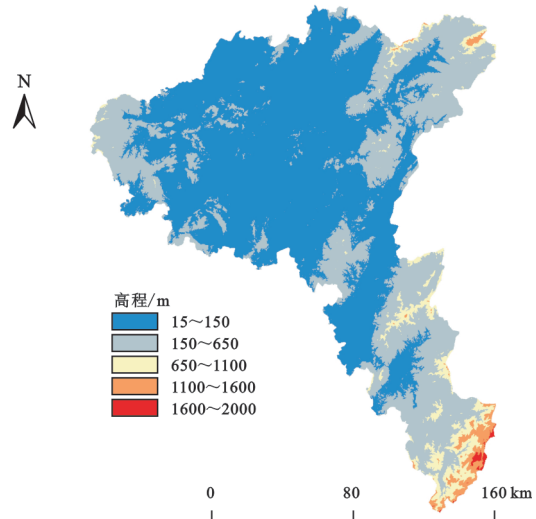
1 研究区域及研究方法

1.1 研究区概况

长株潭城市群(111°59'38"—114°16'08"E, 27°54'36'—28°21'36"N)地处于湖南省中东部,包括长沙、株洲、湘潭三市行政下辖23个县区,总面积2.8万km²,属亚热带季风气候区(图1)。境内地貌包括平原、岗、丘、山地等类型,地形呈丘陵状,导致生态环境敏感性高,抵御自然和人为干扰的能力较弱,城市扩展与生态环境质量之间的矛盾突出,具有一定代表性。

1.2 数据来源及处理

研究数据主要包括2003—2023年MODIS遥感影像数据、土地利用数据、高程数据、气象数据和社会经济数据(表1)。



注:基于标准地图服务系统下载的审图号GS(2024)0650号的标准地图制作,底图未做修改,下同。

图1 研究区概况

Fig. 1 Overview of the study area

(1) RS数据。利用MODIS系列RS图像构建EEQ指数(2003—2023年)的长期序列。选择基于GEE云平台的4个生态分量(NDVI、WET、LST和NDBSI),来自NASA MODIS产品库,作为每年6—9月期间的数据源。NDVI来源于MOD13 A1数据集,LST来源于MOD11 A2数据集,WET和NDBSI来源于MOD09 A1数据集。

(2) 社会经济数据。夜间灯光指数来源于跨传感器校准的全球NPPVIIRS夜间灯光数据的扩展时间序列^[17];人口数据来源于LandScan人口数据集,各种缺失数据采用近年来的数据进行补充。

(3) 气象数据及其他数据。年降水量、年平均气温和潜在蒸散量等均来自相关研究^[18]。高程数据来源于哥白尼30 m分辨率的DEM数据集。土地利用数据来自中国土地覆盖数据集CLCD^[19]。土壤数据来自HWSD。研究中使用的所有TIF格式数据都被

重新采样到1 km像素大小,并均匀投影到Albers_WGS_1984坐标系。

1.3 研究方法

研究分为4个步骤:(1)基于GEE云平台4个生态分量(NDVI、WET、LST和NDBSI)计算2003—2023年CZT地区RSEI指数;(2)计算2003—2023年CZT地区产水量(Water Yield, WY)、水土保持(Soil Conservation, SC)、碳储存(Carbon Storage, CS)、生境质量(Habitat Quality, HQ)4个功能指数,并在此基础上进行归一化处理计算出CES;(3)根据2003—2023年CZT中各县的RSEI和CES指数分别提取前10%、20%和30%的县,统计其用地类型,并通过Marxan模型分析上述结果识别生态保护区范围;(4)利用多尺度地理加权回归(Multiscale Geographically Weighted Regression, MGWR)模型识别CZT地区生态质量时空演变的驱动因素。

以最低成本实现生物多样性保护目标,即在满足特定保护目标的前提下,以最低成本选择区域^[21]。其核心技术原理是通过模拟退火算法,结合目标函数和多种参数调节,高效地找到满足保护目标的最小成本解决方案,其基本运算函数如下:

$$\text{Score} = \sum_{\text{PUs}} \text{Cost} + \text{BLM} \sum_{\text{PUs}} \text{Boundary} + \sum_{\text{Convalue}} \text{SPF} \times \text{Penalty} \quad (4)$$

式中:Cost表示成本;BLM用于调节边界长度;FPF用于惩罚未满足目标的保护特征。

研究利用2003年、2008年、2013年、2018年和2023年CZT的RSEI和CES时空分布图。在县范围内,该研究根据RSEI和CES提取前10%、20%和30%的县。将5a内出现3次以上的县划分为3种类型的PER值;仅RSEI高的地区为EEQ保护区(EQR),仅CES高的地区为ESs保护区(ESR),高CES和高RSEI的地区为综合生态保护区(IER)。选取IER前30%区域作为现有保护体系,并利用Marxan模型识别出最终的最优保护生态区与优先保护生态区。

1.3.4 MGWR 多尺度地理加权将地理加权回归(Geographically Weighted Regression, GWR)和多尺度分析相结合,解决了传统地理加权回归模型在空间尺度假设上的局限性^[22]。通过引入带宽选择机制,使每个变量在不同空间尺度上具有独立的带宽,从而更好地捕捉变量之间的空间异质性和尺度依赖性,提高模型的解释力和适应性^[23]。具体公式如下:

$$Y_i = \beta_0(u_i, v_i) + \sum_{j=1}^k \beta_{bwj}(u_i, v_i) X_{ij} + \epsilon_i \quad (5)$$

式中: (u_i, v_i) 表示位于*i*的中心坐标; Y_i 表示位于*i*的RSEI或CES; $\beta_{bwj}(u_i, v_i)$ 是第*j*个自变量在位置 (u_i, v_i) 处的回归系数,使用特定带宽*bwj*拟合; $\beta_0(u_i, v_i)$ 和 ϵ_i 分别是模型在*i*处的截距项和误差项。

研究选择几个已被证明影响EEQ^[24]和ESs^[25]的潜在因素。其中包括4个环境因子:年均降水(X_1)、年均气温(X_2)、高程(X_3)、土壤(X_4);以及3个社会因素:夜间灯光指数(X_5)、人口数量(X_6)和不透水面面积(X_7),利用这些因素来确定PER的CES和RSEI驱动因素。

2 结果与分析

2.1 CZT地区EEQ的时空变化

RSEI是通过2003—2023年生态指标的主成分分析得出,结果见表3。在20年间,第一主成分(PC1)的平均贡献率为77.36%,表明其对生态指标具有强大的解释能力,代表大部分信息,PC1适合于评价CZT的

生态环境质量。在PC1中,NDVI和湿度指标的特征值始终显示正值,表明它们对RSEI有积极影响。相反,NDBSI和LST指标的特征值始终显示负值,表明其对RSEI有负面影响,这与实际情况相符。各年生态指标的平均特征值大小顺序为NDVI>NDBSI>LST>WET,表明对生态环境质量的影响顺序为绿色>干度>热度>湿度。此外,干、热的绝对平均值之和始终大于绿、湿的绝对平均值,表明在长株潭城市群地区,干、热的抑制作用大于绿、湿的促进作用。

2003—2023年CZT地区RSEI时空分布如图2所示。EEQ较差的地区主要集中在CZT的中部和西南部,包括长株潭城市群中心、攸县与茶陵县西部部分地区。这些地区主要是建设用地,植被覆盖率低。EEQ较高的地区主要分布在CZT四周,以林地和耕地为主。2003—2023年优秀区所占比例先由5.70%下降至3.83%,后上升至4.21%直至12.61%,最后2023年回归5.93%。一般地区比例从2.07%上升到4.15%,较差地区比例从0.28%上升到0.54%。总体而言,CZT的EEQ呈下降趋势,RSEI呈波动下降趋势,在空间上表现为中心城区生态环境质量逐渐退化,非中心城区生态环境质量稳步提升。

2.2 CZT地区ESs的时空变化

ESs结果表明(表4),从2003—2023年CZT的WY和SC先增加后减少,再增加,WS和CS呈稳定下降趋势。与2003年相比,2023年WY年均额增长38.80%,SC增长43.52%,CS下降3.6%。HQ则逐年下降0.1左右。

图3显示了2003—2023年CZT的CES分布状态。结果表明:ESs条件较好的地区主要分布在CZT的西部和南部边缘,其中浏阳、攸县和炎陵边界地区以及醴陵、涠口中部的ESs条件常年较好;同时,CZT的茶陵、湘乡ESs条件较好,且有进一步改善的趋势。2018—2023年长株潭都市圈范围及周边环境质量下降较为明显。ESs状况较差的地区主要集中在中部,主要为开福区、天心区以及雨花区。雨花区ESs状况较差的地区最广,主要为建设用地。ESs状况较好的地区以林地和耕地为主,与RSEI的时空分布相似。

从2003—2023年CES的等级状况来看,CZT地区CES等级最好的区域所占面积份额相当小,大部分为中等和良好等级。较差地区的比例由2.12%上升至5.99%,一般地区的比例由1.77%下降到0.64%,中等地区与良好地区的比例稳定在84.30%与9.46%左右。优秀地区占比逐渐减少,CZT生地区CES整体生态系统状况有所下降。

表 3 遥感生态指数主成分分析结果
Table 3 Principal component analysis results of remote sensing ecological indices

年份	PCA	NDVI	WET	NDBSI	LST	特征值	贡献率/%
2003	PCA1	0.545	0.300	-0.585	-0.52	0.012	74.38
	PCA2	-0.080	0.507	-0.459	0.725	0.002	14.91
	PCA3	0.716	-0.534	-0.007	0.449	0.001	10.17
	PCA4	0.429	0.605	0.669	0.047	0.000	0.55
2008	PCA1	0.581	0.296	-0.591	-0.475	0.01	69.67
	PCA2	-0.323	0.682	-0.404	0.497	0.003	17.47
	PCA3	0.607	-0.294	-0.134	0.726	0.002	12.26
	PCA4	0.412	0.600	0.685	0.025	0.000	0.59
2013	PCA1	0.609	0.225	-0.552	-0.524	0.014	81.23
	PCA2	0.169	0.333	-0.449	0.812	0.002	11.62
	PCA3	0.670	-0.659	0.228	0.256	0.001	6.83
	PCA4	0.390	0.636	0.665	0.025	0.000	0.31
2018	PCA1	0.611	0.253	-0.566	-0.492	0.016	83.05
	PCA2	0.251	0.221	-0.380	0.863	0.002	9.80
	PCA3	0.673	-0.649	0.334	0.118	0.001	6.80
	PCA4	0.333	0.682	0.651	0.015	0.000	0.35
2023	PCA1	0.566	0.244	-0.569	-0.545	0.014	79.06
	PCA2	0.327	0.171	-0.403	0.837	0.002	13.03
	PCA3	0.686	-0.62	0.377	0.040	0.001	7.50
	PCA4	0.32	0.725	0.609	0.021	0.000	0.40

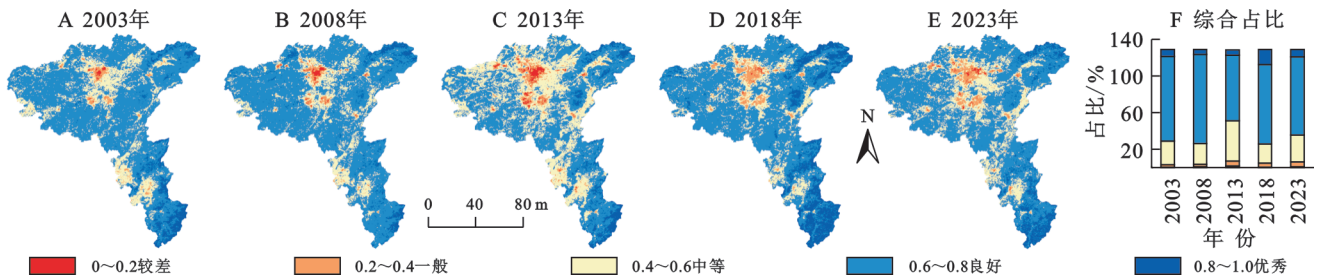


图 2 CZT 地区 RSEI 空间分布及各年不同等级所占比例
Fig. 2 Spatial distribution of RSEI in CZT and proportion of different grades in each year

表 4 2003—2023 年 CZT 产水量、碳储量、水土保持、生境质量年均产出

Table 4 Average annual outputs of water yield, carbon storage, soil and water conservation, and habitat quality in CZT (2003—2023)

年份	产水量/ mm	碳储量/ (t·hm ⁻²)	水土保持/ (t·hm ⁻²)	生境质量
2003	625.85	5.60	163.72	0.535
2008	817.31	5.54	214.86	0.525
2013	727.69	5.45	191.6	0.510
2018	907.11	5.41	245.52	0.502
2023	868.69	5.40	234.97	0.500

2.3 PER 的测定

图 4 显示了 CZT 地区 PER 值的空间格局,根据

不同县的数量占比划定。EQR 主要分布在 CZT 四周边缘,集中在东部与西南部。这些地区有广阔的林地和农田耕地,经济相对欠发达,生态环境管理良好。ESR 主要分布在 CZT 的东部一侧,包括长沙东侧与株洲东侧。北侧以林地为主,人为干扰较少,下游有部分水域,自然条件较好,经济发展水平欠佳但 ESs 较高。IER 主要分布在东侧与西北侧,以林地与耕地为主。这些地区生态环境良好,EEQ 和 ESs 较高。其中,2018 年 RSEI 状况最好,2003 年 CES 状况最好,2023 年两者数值均较低。图 4D 显示了这些初步划定的 PER 中主要土地利用类型的比例。EQR 以林地和耕地为主,其中林地和耕地占 70% 以上。

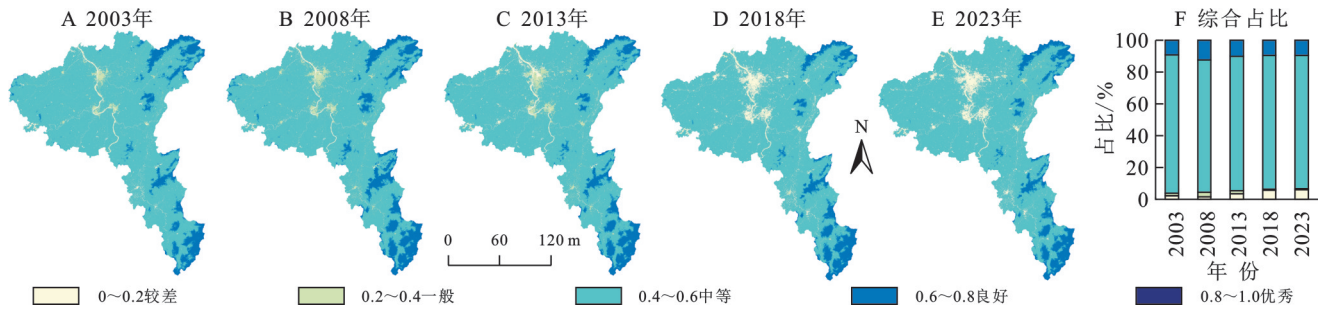


图 3 CZT地区CES空间分布及各年不同等级所占比例
Fig. 3 Spatial distribution of CES in CZT and proportion of different grades in each year

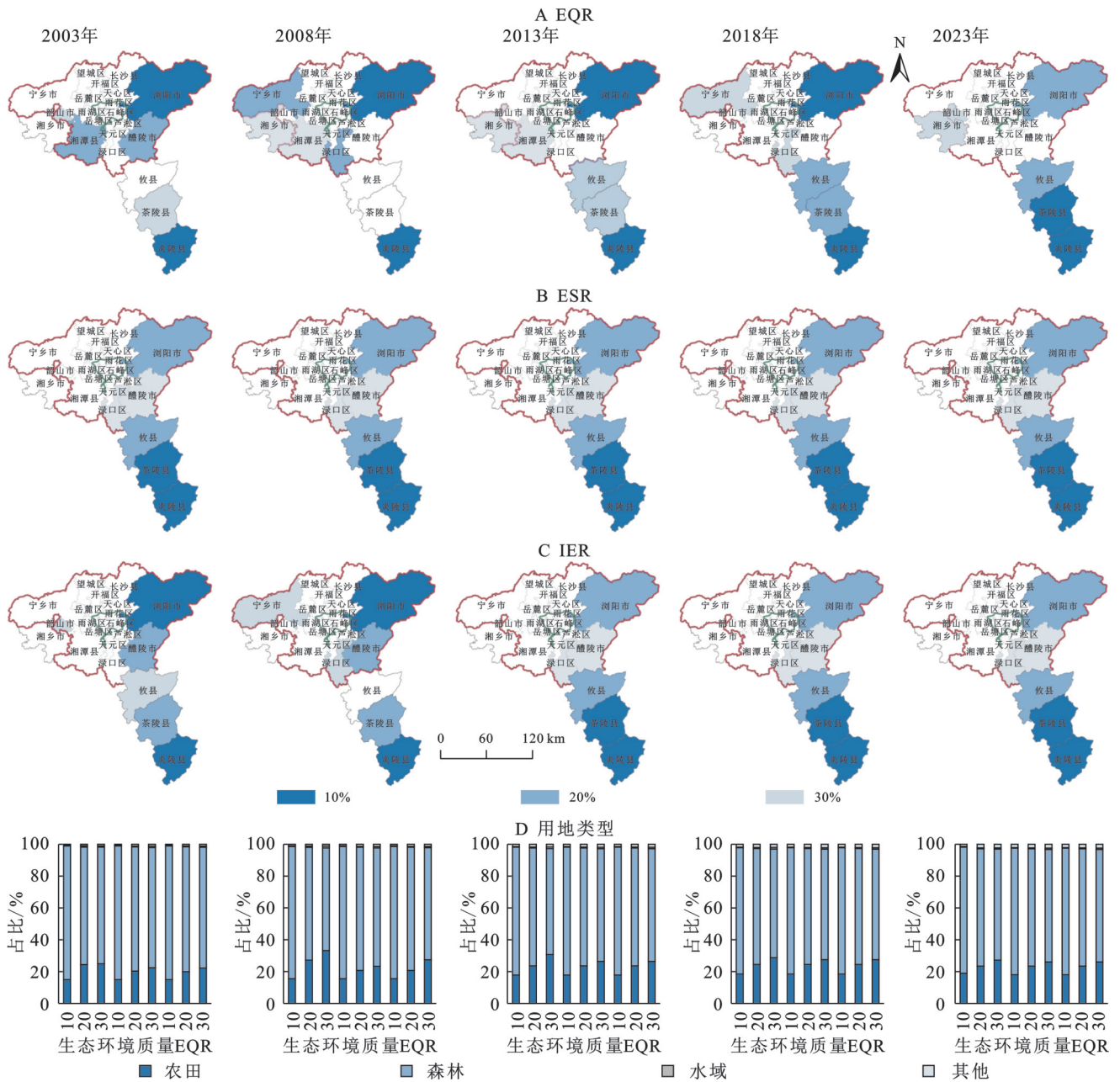


图 4 CZT基于RSEI和CES在10%、20%、30%县域尺度优先生态保护区空间分布以及各类优先生态保护区主要土地利用类型占比

Fig. 4 Spatial distribution of priority ecological reserves in CZT based on RSEI and CES at county scales of 10%, 20%, 30%, and proportion of land use types in different types of priority ecological reserves

此外,随着县数阈值的升高,耕地占比逐渐增加。林地同样占ESR的75%以上,林地比例降低。

IER由70%的林地和耕地组成。以植被类型为主的地区EEQ和ESs较好(表5)。

表 5 2023 年生态保护区土地利用类型面积占比状况
Table 5 Area proportion of land use types in ecological reserves in 2023

种类	农田	林地	水域	其他
EQR 10%	17.99	79.57	0.37	2.06
EQR 20%	23.42	73.73	0.57	2.27
EQR 30%	30.69	66.20	0.87	2.24
ESR 10%	17.99	79.57	0.37	2.06
ESR 20%	23.42	73.73	0.57	2.27
ESR 30%	26.27	70.69	0.85	2.43
IER 10%	17.99	79.57	0.37	2.06
IER 20%	23.42	73.73	0.57	2.27
IER 30%	26.27	70.69	0.85	2.43

注: EQR 表示生态环境质量储备; ESR 表示生态系统服务保护区; IER 表示综合生态保护区

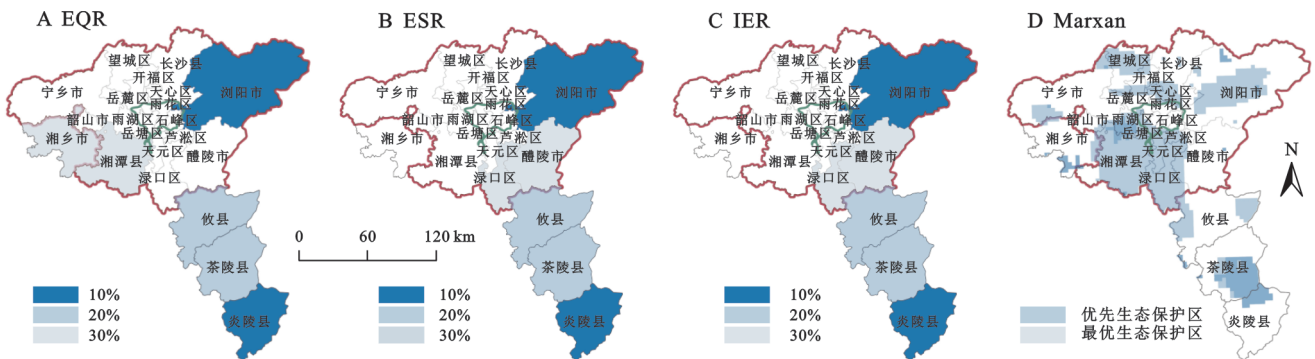


图 5 EQR, ESR, IER, Marxan 优先生态保护区的空间格局

Fig. 5 Spatial patterns of EQR, ESR, IER, and Marxan priority ecological reserves

2.4 PER 的驱动因子

2.4.1 影响 RSEI 的驱动因子 表 6 总结了 MGWR 模型下自变量对 RSEI 产生驱动因子系数。结果表明, 高程、夜间灯光、人口数量都对 RSEI 均有显著的负向影响, 三者的增加导致了 CZT 内 EEQ 的下降, 不同土壤类型对区域 EEQ 也有相当大的影响。降水与 RSEI 呈显著正相关, 表明充沛的降水改善了 CZT 内的 EEQ。其中降水和气温对 EEQ 的解释力较强, 分别为 65.6% 和 59.7%。气温、不透水面面积也有负向影响, 但与 RSEI 关系的显著性不是很高, 解释的区域不到 1%。土壤连续性与 RSEI 的关系总体上不显著, 说明该因素对 PER 内的 EEQ 影响不大。

基于 MGWR 结果, 使用克里格插值绘制以上 7 个变量, 使用自然断裂法将每个变量的系数划分为 6 个级别, 6 个驱动因子对 RSEI 的影响表现出空间聚类和梯度定向的特征(图 6)。根据系数, 高程、夜间灯光、人口数量分别对 RSEI 产生了较轻微的负面影响。土壤的负面影响由北向南递增, 人口的负面影响逐渐减小。高程的影响由西北侧向东南侧增加。降水对 CZT 内的 RSEI 有显著的正向影响, 且这种正向影响自北向南递增。

根据 2003—2023 年不同县数阈值获得的 PER 数(图 5), 出现三次以上的县被指定为最终 PER, 面积分别为 6 992.53 km², 12 177.167 km², 15 393.07 km²。其中, EQR 主要位于 CZT 北部边缘以及南部。ESR 与 IER 基本重合主要分布在东部一带。结合表 5 可以看出, PRE 区域主要由林地和耕地组成, 主要分布在 CZT 东部一带, 尤其是株洲一带。这些地区属于 CZT 内环境条件相对较好的地区。根据以上结果, 利用 Marxan 模型将 30% IER 地区设为保护目标进行模拟退火算法, 得出最优生态保护区与优先生态保护区, 其中最优生态保护区占地 9 512.00 km² 纳入, 优先生态保护区占地 1 718.42 km²。

表 6 多尺度地理加权回归对 RSEI, CES 回归分析结果

Table 6 Regression analysis results of RSEI and CES by MGWR

变量	回归系数 a(RSEI)			回归系数 b(CES)		
	最小值	最大值	均值	最小值	最大值	均值
降水	0.019	0.073	0.039	0.039	0.074	0.039
气温	-1.23	0.675	-0.043	0.856	0.856	0.856
高程	-0.025	-0.021	-0.023	-0.025	-0.021	-0.023
土壤	-0.011	0.006	-0.01	-0.011	-0.006	-0.010
夜间灯光	-0.005	-0.001	-0.004	-0.005	-0.001	-0.004
人口数量	-0.016	-0.074	-0.032	0.016	0.074	0.032
不透水面	-0.13	-0.003	-0.053	-0.130	-0.130	-0.130

2.4.2 影响 CES 的驱动程序 表 6 总结了 MGWR 模型下自变量对 CES 产生的驱动作用。高程、土壤、夜间灯光对 CES 的负面影响约为 100%, 且显著性均大于 80%。降水量显著影响 CES 的地区占 75.32%, 说明降水量有助于改善 CES 现状。CZT 区域受不透水面和年均气温影响的区域非常小(<1%), 表明这两个变量对 CES 的影响不显著。

基于 MGWR 结果, 使用克里格插值法绘制以上

7个变量,使用自然断裂法将每个变量的系数划分为6个级别。如图7所示,5个驱动因子在各自的区域内表现出空间聚类和梯度定向模式对CES的影响。从系数分析结果来看降水量对CES表现结果为正,

并自北向南解释力逐步增强。高程与土壤连续性结果相似,均由北向南逐步递增。人口数量、夜间灯光、不透水面面积表现出的结果是一致的,影响由西向东逐渐扩大。

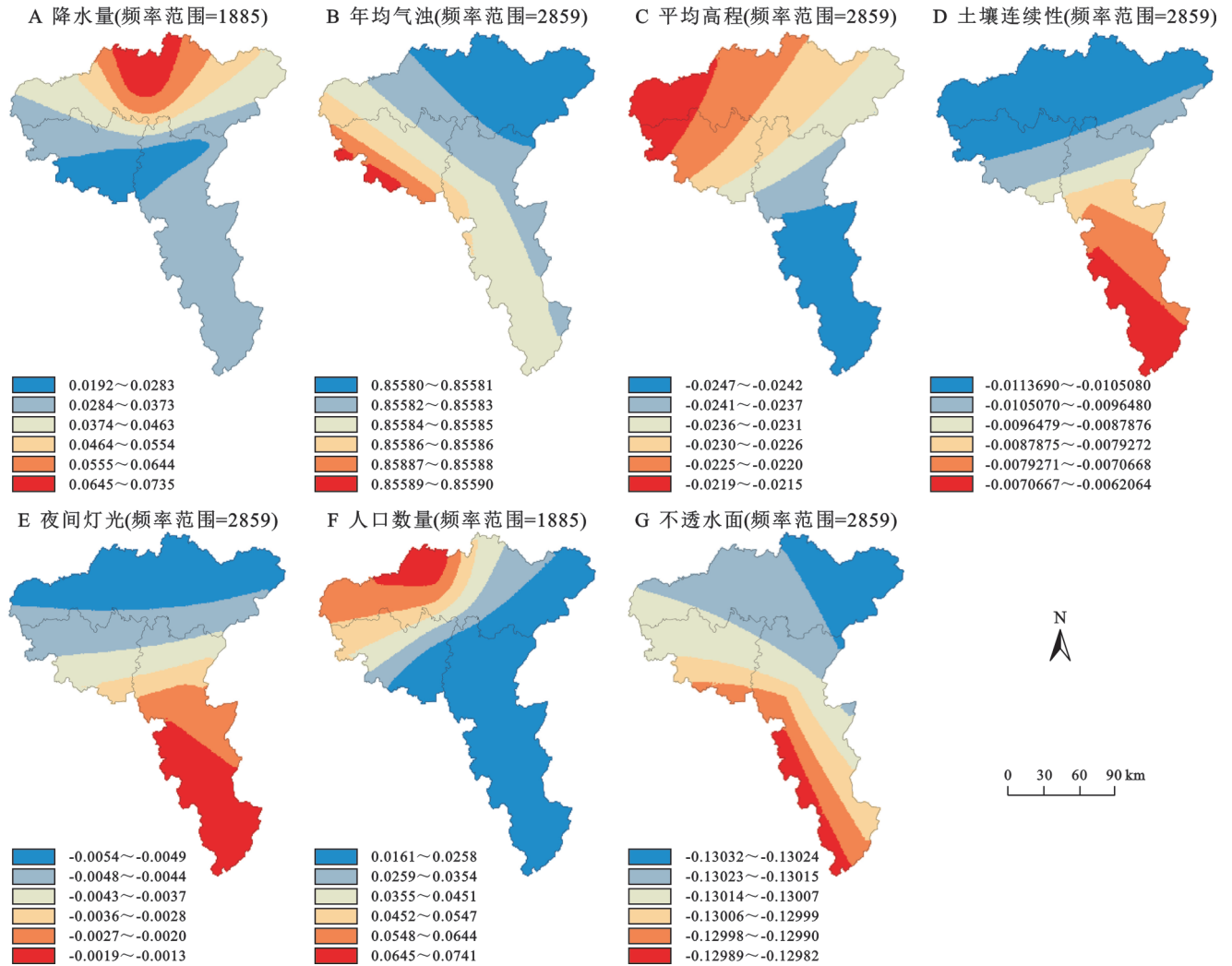


图 6 影响RSEI的驱动因子空间分布
Fig. 6 Spatial distribution of driving factors influencing RSEI

3 讨论与结论

3.1 讨论

3.1.1 PER划分的合理性及意义 PER旨在优先保护具有显著生态价值和重要生态功能的地区,强调生态系统服务整体价值。研究采用RSEI和CES方法,在县域尺度上对CZT的PER进行圈定。在选择构成CES的指标时,考虑了HQ, HQ可以在一定程度上反映一个地区的生物多样性状况,并已在多个地区得到应用^[26]。这表明该研究全面考虑EEQ、人类福祉和生物多样性,从而更全面地描述CZT的PER。

目前的研究主要使用ESs来描述PER,缺乏将EEQ作为划定保护区指标的研究。研究将EEQ整

合到PER中,导致PRE主要分布在CZT的西南部与东部地区。其中,ESR主要分布在CZT东部一侧,EQR, IER分布在南部以及北部东西侧(图5)。PER的分布表明CZT的东侧ESs最高。而南部以及北部东西侧最好,这与现有的研究结果一致^[27],表明本研究是合理的,可以为区域管理提供有效的建议。

本文所划定的PER值,有利于根据不同县域的生态状况采取不同的保护和管理策略,也有助于了解不同区域的具体生态状况。在提取阈值的基础上利用Marxan模型识别最优保护区,使研究更具有说服力。

3.1.2 洞察PER驱动因素 通过分析提取CES和RSEI的主要驱动因素,可以确定影响PER中ESs和EEQ的关键因子,从而实现PER的划分与保护,在

后续的治理工作中,实施有针对性的保护措施。但由于生态环境污染主要分布在长株潭都市区中心,人口密度高不可避免,在管理规划时,要严格调控人口密度以及不透水面面积,包括加强空气质量管理、植被维护、划定建成区面积等。对于ESR而言,调控

具有负面影响的驱动因子,如气温、土壤等同样至关重要,同时也应关注高程等自然因素对环境的影响。另外,人口密度、平均气温、人口数量和不透水面面积对RSEI和CES都有负面影响,需要重点监管,以制定具体的监管措施。

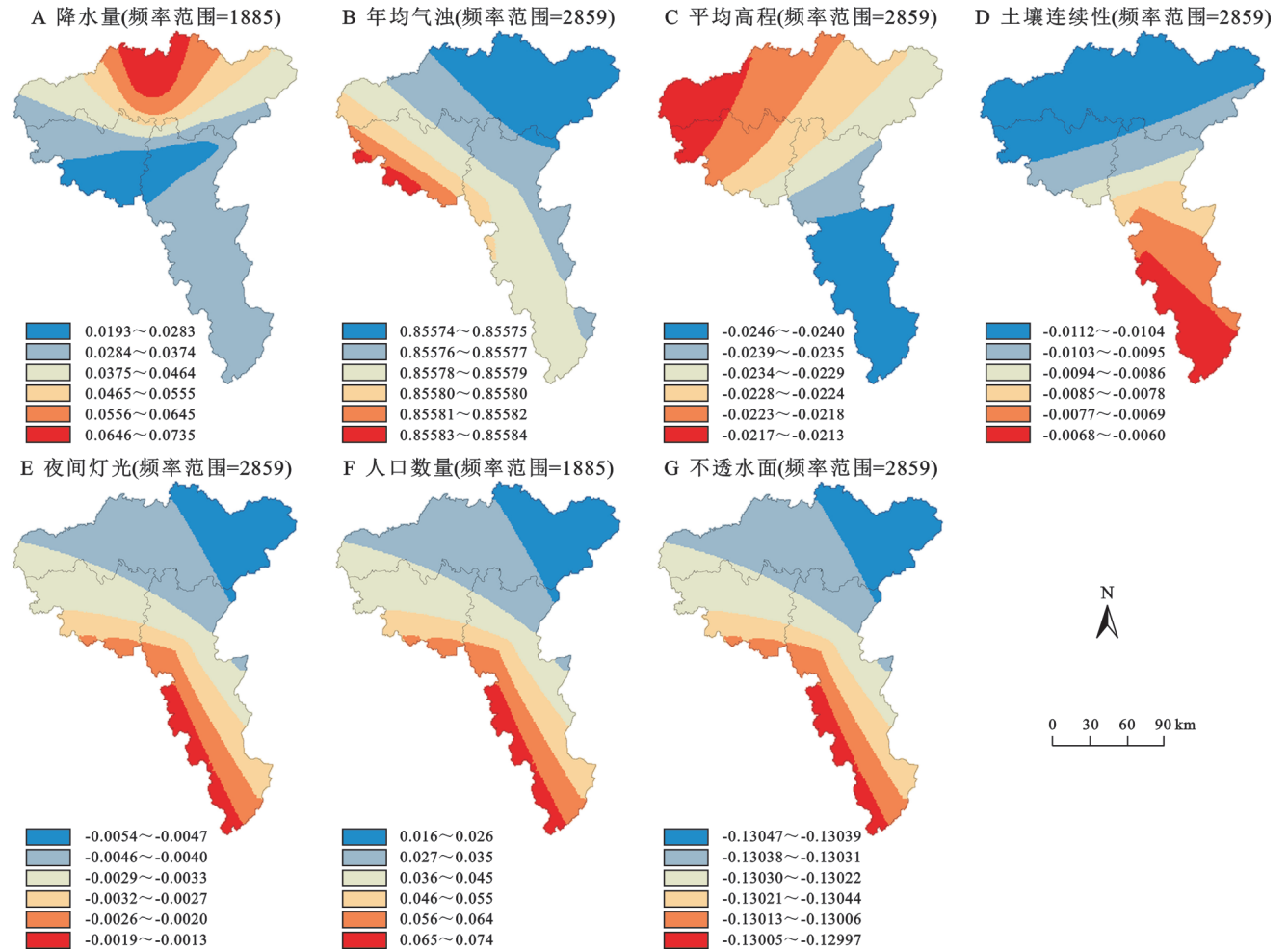


图 7 影响 CES 的驱动因子空间分布

Fig. 7 Spatial distribution of driving factors influencing CES

3.1.3 局限性与展望 尽管研究在描述CZT中的PER时考虑了EEQ和ESs,但仍具有局限性。研究仅考虑4个ESs来评估CZT的整体ESs状况,可能无法完全覆盖该地区所有关键ESs。一些关于CZT地区ESs研究将粮食生产、文化娱乐和其他ESs纳入了分析^[28],减少了旅游和食品生产价值分布不均带来的不确定性。然而,许多研究选择了与本文相似的ESs^[29],表明研究选择的ESs较为典型,有助于建立CZT中PER识别的一般方法。

其次,研究只构建了CES、RSEI与7个驱动因素之间的相关性分析,忽略了驱动因素与构成CES和RSEI的单个指标之间的相关性,并未就其空间属性与未来变化做出更加深入的探讨。但研究的主要内容是RSEI、CES两者耦合对PRE划定的影响,重点

研究哪些驱动因素影响生态状况,并根据结果制定必要的管理措施。最后,研究中考虑的驱动因素忽略了与环境教育和研究区域环境法律实施相关的具体社会经济因素。这些社会经济因素也会影响相应的PER生态指数。由于难以获得数据,暂时没有考虑这些因素。在未来的研究中,可以通过引入更全面的ESs和EEQ评价标准来界定PER,并通过选择更全面的驱动因素来制定合理的管理策略来扩大研究范围。

3.1.4 对策与建议

(1) 生态质量较高但生态系统服务综合指数较低地区:该地区通常生态系统结构完整,植被覆盖好,但对人类社会的直接效益,如水源供给、碳汇、经济产出较低。建议合理开发生态产品价值,建设生态廊道或

水利设施,提升水源调节等服务能力,完善生态系统服务评估体系,识别未被量化的服务。

(2) 生态质量较低但生态系统服务综合指数较高地区:该地区通常是人类活动密集区,短期服务突出,但生态脆弱,面临土壤退化问题。建议推行可持续农业,建设城市海绵设施,调整土地利用结构,设定开发红线,严格控制污染和过度开采。

(3) 生态质量与生态系统服务综合指数均较高地区:该地区基本达到理想状态,兼具生物多样性保护与高服务产出。建议划入核心保护区,限制人类干扰;在缓冲区发展教育科研等低影响产业,总结成功模式,复制到其他区域。

(4) 生态质量与生态系统服务综合指数均较低地区:该地区通常是荒漠化土地、工业废弃地等严重退化区,生态功能与服务双缺失。建议实施植树造林、污染土壤修复等工程治理,选择耐逆物种,逐步恢复生态基础,纳入国家重点生态工程,加大资金与技术投入。

对于其他一般地区基于“三区三线”实施分区管控,联合环保、农业、住建等部门共同行动;提升社区生态意识,鼓励参与保护;通过分类施策,可实现生态保护与经济社会发展的协同,最终推动区域可持续发展。

3.2 结论

(1) 2003—2023年长株潭城市群RSEI呈波动下降趋势,CES表现为逐期下降,在空间上表现为中心城区生态环境质量逐渐退化,非中心城区生态环境质量稳步提升。

(2) 提取出前10%,20%和30%的县域PER值,ESs储量主要分布在研究区东侧,EQ储量主要分布在研究区边缘,CES储量主要分布在研究区东侧及西侧中部地区,均以林地利用类型为主。

(3) 在提取的PER值过程中,自然因子生态环境质量与生态系统服务功能的影响较为显著,但随着社会经济发展,夜间灯光等社会经济因子对生态的影响逐渐增强。

(4) 为提高长株潭城市群的EEQ和ESs,建议将至少9 512.00 km²纳入最优生态保护区,1 718.42 km²纳入优先生态保护区。合理利用生态资源,积极响应高质量发展和生态环境保护政策,促进生态环境和经济发展协调。

参考文献(References):

[1] 方创琳.中国新型城镇化高质量发展的规律性与重点方向[J].地理研究,2019,38(1):13-22.
Fang C L. Basic rules and key paths for high-quality development of the new urbanization in China[J]. Geo-

graphical Research, 2019,38(1):13-22.

[2] 黄安,许月卿,王燕,等.“三生”空间冲突风险研究的逻辑主线:机制、评估与优化路径[J].经济地理,2024,44(11):173-183.
Huang A, Xu Y Q, Wang Y, et al. The paradigms of the research on the production-living-ecological space conflict risk: mechanism, evaluation and optimization path[J]. Economic Geography, 2024,44(11):173-183.

[3] 刘晓曼,王超,肖如林,等.中国重要生态保护区人类干扰时空变化特征分析[J].地理科学,2022,42(6):1082-1090.
Liu X M, Wang C, Xiao R L, et al. Characteristics of human disturbance and the spatio-temporal changes of important ecological protection areas in China[J]. Scientia Geographica Sinica, 2022,42(6):1082-1090.

[4] 金贵,郭柏枢,成金华,等.基于资源效率的国土空间布局及支撑体系框架[J].地理学报,2022,77(3):534-546.
Jin G, Guo B S, Cheng J H, et al. Layout optimization and support system of territorial space: an analysis framework based on resource efficiency[J]. Acta Geographica Sinica, 2022,77(3):534-546.

[5] Huang Z X, Qian L Y, Cao W Z. Developing a novel approach integrating ecosystem services and biodiversity for identifying priority ecological reserves[J]. Resources, Conservation and Recycling, 2022,179:106128.

[6] 熊鹰,肖蓉,张坤,等.南方丘陵山地农户对生态系统服务的感知及其影响因素:以湖南省慈利县为例[J].自然资源学报,2022,37(7):1766-1781.
Xiong Y, Xiao R, Zhang K, et al. Farmers' perception on ecosystem services and the influencing factors in key ecological function areas of hilly and mountainous areas in Southern China: a case study of Cili county, Hunan Province [J]. Journal of Natural Resources, 2022, 37 (7) : 1766-1781.

[7] 邓丽明,杨骥,尹小玲,等.粤港澳大湾区生态系统服务供需关系及其对城市化多空间尺度的响应[J].生态学报,2024,44(20):9094-9107.
Deng L M, Yang J, Yin X L, et al. Supply and demand of ecosystem services and its multi-spatial scale response to urbanization in Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area [J]. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44 (20) : 9094-9107.

[8] 欧阳晓,陈键,魏晓,等.长株潭城市群土地利用变化对生态系统健康影响的关键类型及阈值效应[J].地理科学,2024,44(11):1946-1954.
Ou Y X, Chen J, Wei X, et al. Exploring key types and threshold effects of land use change impact on ecosystem health in Changsha-Zhuzhou-Xiangtan Urban Agglomeration [J]. Scientia Geographica Sinica, 2024, 44 (11) : 1946-1954.

- [9] 高吉喜, 万华伟, 王永财, 等. 大尺度生态质量遥感评价方法构建及应用[J]. 遥感学报, 2023, 27(12): 2860-2872.
Gao J X, Wan H W, Wang Y C, et al. New framework for large-scale ecological quality evaluation and application research using remote sensing data [J]. National Remote Sensing Bulletin, 2023, 27(12): 2860-2872.
- [10] 徐涵秋. 区域生态环境变化的遥感评价指数[J]. 中国环境科学, 2013, 33(5): 889-897.
Xu H Q. A remote sensing index for assessment of regional ecological changes [J]. China Environmental Science, 2013, 33(5): 889-897.
- [11] 权文婷, 周辉, 王卫东, 等. 2000—2023年关中平原城市群生态环境质量动态特征[J]. 水土保持研究, 2025, 32(1): 336-346, 357.
Quan W T, Zhou H, Wang W D, et al. Characteristics of ecological environment quality dynamic of the urban agglomeration in Guanzhong Plain from 2000 to 2023 [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2025, 32(1): 336-346, 357.
- [12] 周博天, 张雅燕, 施坤. 湖泊营养状态遥感评价及其表征参数反演算法研究进展[J]. 遥感学报, 2022, 26(1): 77-91.
Zhou B T, Zhang Y Y, Shi K. Research progress on remote sensing assessment of lake nutrient status and retrieval algorithms of characteristic parameters [J]. National Remote Sensing Bulletin, 2022, 26(1): 77-91.
- [13] 顾恬玮, 彭建, 姜虹, 等. 流域国土空间生态修复: 理论认知与规划要点[J]. 自然资源学报, 2023, 38(10): 2464-2474.
Gu T W, Peng J, Jiang H, et al. Watershed-based territorial ecological restoration: theoretical cognition and key planning issues [J]. Journal of Natural Resources, 2023, 38(10): 2464-2474.
- [14] Liu C L, Li W L, Xu J, et al. Temporal and spatial variations of ecological security on the northeastern Tibetan Plateau integrating ecosystem health-risk-services framework [J]. Ecological Indicators, 2024, 158: 111365.
- [15] 石晶, 石培基, 李雪红, 等. 石羊河流域生态系统服务时空变化及其多尺度影响因素研究[J]. 地理科学进展, 2024, 43(2): 276-289.
Shi J, Shi P J, Li X H, et al. Spatial and temporal variability of ecosystem services in the Shiyang River Basin and its multi-scale influencing factors [J]. Progress in Geography, 2024, 43(2): 276-289.
- [16] 朱青, 蔡永立. 基于“风险—健康—服务”的生态安全评价框架构建及模拟预测: 以淮河流域为例[J]. 自然资源学报, 2024, 39(11): 2676-2690.
Zhu Q, Cai Y L. Assessment framework and simulation prediction for ecological security based on “risk-health-services”: a case study of the Huaihe River Basin [J]. Journal of Natural Resources, 2024, 39(11): 2676-2690.
- [17] Chen Z Q, Yu B L, Yang C S, et al. An extended time series (2000—2018) of global NPP-VIIRS-like nighttime light data from a cross-sensor calibration [J]. Earth System Science Data, 2021, 13(3): 889-906.
- [18] Ding Y X, Peng S Z. Spatiotemporal trends and attribution of drought across China from 1901—2100 [J]. Sustainability, 2020, 12(2): 477.
- [19] Yang J, Huang X. The 30 m annual land cover dataset and its dynamics in China from 1990 to 2019 [J]. Earth System Science Data, 2021, 13(8): 3907-3925.
- [20] 王晓峰, 郑媛元, 孙泽冲, 等. 青藏高原自然保护区生态脆弱性演化与模拟[J]. 环境科学, 2025, 46(3): 1633-1644.
Wang X F, Zheng Y Y, Sun Z C, et al. Evolution and simulation of ecological vulnerability in Qinghai-Xizang Plateau nature reserve [J]. Environmental Science, 2025, 46(3): 1633-1644.
- [21] 陈红, 欧小杨, 吕英烁, 等. 时空变化视角下北京市湿地优先保护格局[J]. 生态学报, 2024, 44(12): 5128-5139.
Chen H, Ou X Y, Lü Y S, et al. Priority conservation pattern of wetlands in Beijing from the perspective of time and space [J]. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(12): 5128-5139.
- [22] 杨剩富, 吴美伊, 张轶, 等. 大都市郊区民宿空间演化特征及其影响因素: 以武汉市为例[J]. 经济地理, 2024, 44(10): 214-223.
Yang S F, Wu M Y, Zhang Y, et al. Spatial evolution characteristics and impact factors of homestay in metropolitan suburbs: taking Wuhan as an example [J]. Economic Geography, 2024, 44(10): 214-223.
- [23] Mansour S, Alahmadi M, Darby S, et al. Geospatial modelling of post-cyclone Shaheen recovery using nighttime light data and MGWR [J]. International Journal of Disaster Risk Reduction, 2023, 93: 103761.
- [24] 苑韶峰, 唐奕钰, 申屠楚宁. 土地利用转型时空演变及其生态环境效应: 基于长江经济带127个地级市的实证研究[J]. 经济地理, 2019, 39(9): 174-181.
Yuan S F, Tang Y Y, Shentu C N. Spatiotemporal change of land-use transformation and its eco-environmental response: a case of 127 counties in Yangtze River economic belt [J]. Economic Geography, 2019, 39(9): 174-181.
- [25] Zhang L F, Fang C L, Zhao R D, et al. Spatial-temporal evolution and driving force analysis of eco-quality in urban agglomerations in China [J]. Science of the Total Environment, 2023, 866: 161465.