



· 人地系统耦合与演化机制 ·

长江经济带建设用地扩张的多维特征与综合生态效应评价

孔雪松^{1,2}, 张健勇¹

1. 武汉大学 资源与环境科学学院, 湖北 武汉 430079;

2. 自然资源部数字制图与国土信息应用重点实验室, 湖北 武汉 430079

摘要 解析建设用地的生态效应能为国土空间优化管控和生态保护提供决策支持。采用多维扩张指数、生态系统服务价值测算和综合评价法等多种方法,定量评价长江经济带2000—2020年建设用地扩张的多维时空特征与综合生态效应。结果表明:①研究期内长江经济带建设用地扩张态势明显,规模增长91.55%,其中近九成源于耕地转用,形成了以长三角、长江中游、成渝城市群为主的沿江高密度发展廊道;②综合扩张水平呈现出西升东降、中部崛起的时空演变特征,但受开发适宜度以及东部虹吸效应的影响,建设用地分布和扩张水平始终呈现出东高西低的空间失衡特征;③建设用地扩张产生了明显的生态效应,直接导致长江经济带生态用地和生态系统服务价值大量流失,间接导致人类足迹扰动压力和碳排放量的显著提升;④基于建设用地综合扩张指数与综合生态效应指数,开展二维“扩张-生态”分类,识别了中压均衡型、弱压稳态型、强压退化型与弱压敏感型四类主导类型。长江经济带建设用地扩张对生态环境造成了显著的干扰,亟需构建区域发展与生态保护的协同管控机制,优化国土空间开发格局,统筹生态安全与高质量发展。

关键词 长江经济带;建设用地扩张;生态效应;综合生态指数

中图分类号:X2;F301.2 DOI:10.16152/j.cnki.xdxbr.2026-04-001

Multi-dimensional characteristics and comprehensive ecological effects of construction land expansion in the Yangtze River Economic Belt

Kong Xuesong^{1,2}, Zhang Jianyong¹

1. School of Resource and Environmental Sciences, Wuhan University, Wuhan 430079, China;

2. Key Laboratory of Digital Cartography and Land Information Application, Ministry of Natural Resources, Wuhan 430079, China

Abstract Analyzing the ecological effects of construction land expansion supports optimized territorial spatial management and ecological conservation. Using multidimensional indices, ecosystem service value (ESV) assessment, and comprehensive evaluation methods, this study quantitatively examines the spatiotemporal characteristics and ecological effects of construction land expansion in the Yangtze River Economic Belt (YREB) from 2000 to 2020. Results indicate: ① construction land expanded markedly, increasing by 91.55%, with nearly 90% originating from cropland conversion, forming a high-density development corridor along the river

收稿日期:2025-11-21 修回日期:2025-12-22

基金项目:国家自然科学基金(42571248)

第一作者:孔雪松,男,博士,教授,博士生导师,从事土地利用及其生态效应研究,xuesongk@whu.edu.cn。

通信作者:张健勇,男,从事城市土地利用研究,zjy426@whu.edu.cn。

centered on major urban agglomerations; ② the comprehensive expansion level increased in the west and central regions but remained spatially unbalanced, with higher intensity in the east due to development suitability and the siphoning effect of the eastern region; ③ expansion caused significant ecological impacts, including direct loss of ecological land and ESV, and indirect increases in human footprint pressure and carbon emissions; ④ a two-dimensional "expansion-ecology" classification identified four dominant types: medium-pressure balanced, low-pressure stable, high-pressure degrading, and low-pressure sensitive. These findings underscore the need for a coordinated mechanism to balance development and ecological protection, optimize spatial planning, and harmonize ecological security with high-quality development in the YREB.

Keywords the Yangtze River Economic Belt; construction land expansion; ecological effects; comprehensive ecological index

作为土地要素再配置和资本化的空间表征,建设用地扩张通过产业发展、基础设施建设、土地金融化等路径驱动经济增长并重塑区域发展格局^[1]。同时,建设用地扩张也会通过改变地表生态系统^[2-3]、增加能源消耗、污染物排放^[4]等途径对生态系统产生显著的空间胁迫效应。改革开放四十余年来,我国实现了土地和人口城镇化的快速发展,有力拉动了产业发展和基础设施建设的高速推进。然而,建设用地扩张也长期伴随着土地资源浪费、环境污染、生态用地破坏等生态问题,阻碍着城镇化高质量发展和人民美好生活的实现。《中共中央国务院关于全面推进美丽中国建设的意见》明确提出,推进以“绿色低碳、环境优美、生态宜居、安全健康、智慧高效”为导向的美丽城市建设^[5],要求城镇化必须以生态保护为前提,亟需开展建设用地扩张的生态效应评价,为区域平衡经济发展和生态保护提供决策支持。

快速城镇化推动了建设用地扩张时空格局研究的纵深发展,学界围绕建设用地扩张的数量规模、形态模式、方向重心等内容开展了深入探索^[6-8]。早期研究主要依托扩张指数、GIS空间叠置分析^[9-10],量化建设用地扩张的规模变化与形态分异特征;随着遥感及人工智能技术的发展,机器学习、夜间灯光数据融合等研究方法也被广泛运用于土地利用时空格局分析^[11],为揭示建设用地扩张与其他多元系统的复杂交互机制提供重要基础^[12-14]。但在生态效应研究这一关键领域,由于生态系统的响应程度与方式直接受到扩张规模、强度、形态等多维特征的协同驱动,而现有方法多聚焦单一维度评估,导致难以建立从扩张到生态效应的完整因果链条,揭示多维扩张特征耦合驱动的生态效应机制。因此,亟需整合扩张规模、速率与空间分异等时空特征分析,以系统揭示

建设用地扩张的演化规律与生态响应关联。

基于响应路径和时间差异,建设用地扩张的生态效应可分为直接和间接生态效应两部分^[15-16]。①在空间维度上,建设用地扩张直接导致地表覆被发生改变,侵占生态用地,并造成生态用地景观破碎化^[17];②随着时间推移,地表生态结构的改变以及建成区人类活动所产生的物质能量输出,共同对生态系统施加持续累积性扰动,导致生态功能退化与生态质量下降,进而引发土壤污染、空气污染、河湖水质下降等次生环境问题^[18]。二者在时空上的耦合与相互作用,共同构成了综合生态效应。现有研究从不同角度评估了建设用地扩张对生态系统结构和功能变化的影响^[19-20],评估指标的选取主要采取过程导向和结果导向两种思路,过程导向关注建设用地扩张与自然系统的交互作用,常选用人类足迹^[21]、污染物排放和建成区相关指标^[22]等反映扰动源头的指标,有利于揭示生态效应的驱动机制,但其对生态系统的终端响应表征不足,导致从驱动到结果的因果链条断裂;结果导向则更加关注生态扰动的最终结果,选取遥感生态指数、景观格局指数、生态系统服务价值^[23-25]等直接表征环境质量的指标。这类指标能够直观反映生态质量变化,但评估结果难以排除其他因素在生态过程中的影响,因果关系的归因相对困难。进一步审视上述评价思路可以发现,既有研究在以下两个方面仍有待深化:①直接生态效应与间接生态效应之间的时空关联性尚未得到充分揭示;②过程导向与结果导向指标多被单独运用,二者的有机融合尚显不足,生态效应传导链条的量化刻画仍有待加强。为此,有必要构建融合多维度的综合生态效应评估指标体系,对生态效应进行系统定量评估,从而实现对建设用地扩张生态效应的深度解析。

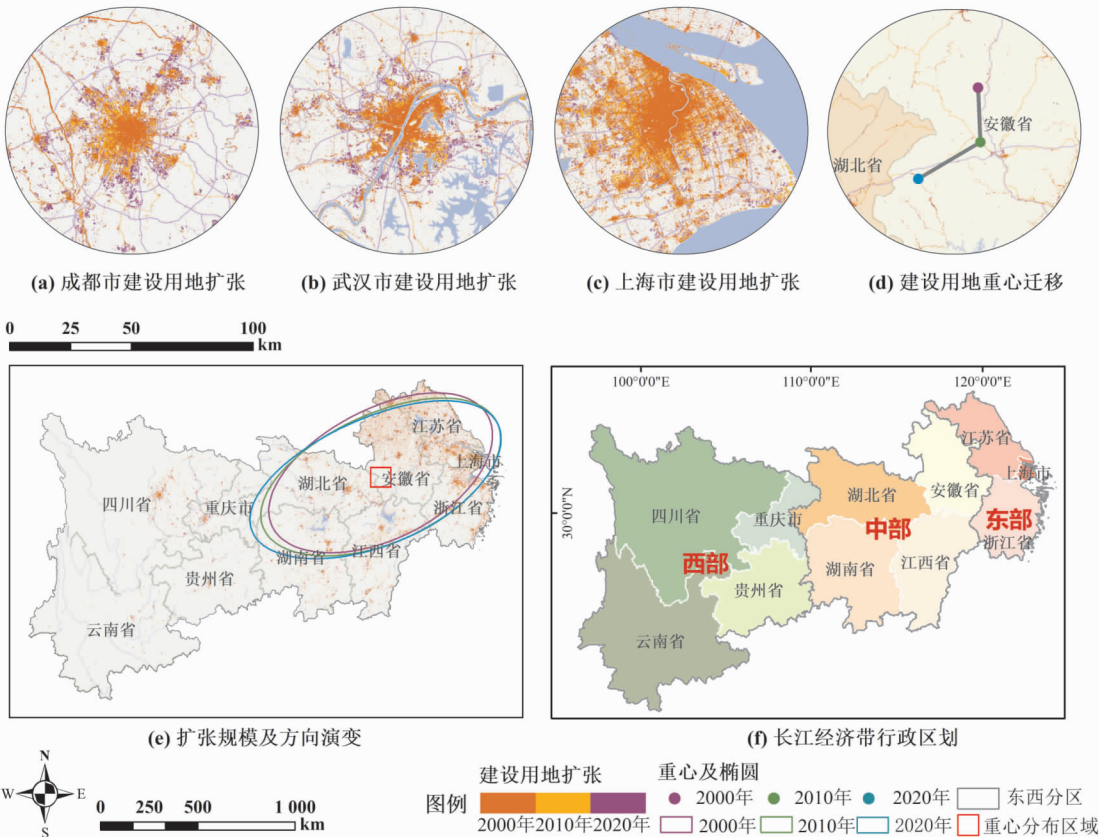
长江经济带在我国发展格局中具有极其重要的经济和生态地位。作为国家经济发展的核心区域,其生态资源在快速城镇化背景下面临严峻的保护困境。党的十九大报告将“以共抓大保护、不搞大开发为导向推动长江经济带发展”纳入新时代区域协调发展战略^[26],在此背景下,对长江经济带建设用地扩张的时空格局及其生态效应开展系统研究显得尤为重要。因此,本文以长江经济带作为研究区域,采用多元方法分析其建设用地扩张的多维特征,构建融合直接与间接、过程与结果多个维度指标的综合生态效应评估体系,系统评估建设用地扩张的生态效应,以期为协调区域发展与生态保护、优化国土空间开发格局提供科学支撑。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区域概况

长江经济带贯穿东、中、西三大地理分区,总面积为 205.23 万 km²,约占我国陆地国土面积的

1/5。地势自西向东梯度递减,生态资源丰富,生态系统复杂多样,涵盖亚热带常绿阔叶林、高山草甸、湿地湖泊等多类型的生态系统,并分布有川滇森林、桂黔滇喀斯特石漠化防治区、三峡库区、长江中下游平原湿地等我国重要的生态功能区。得益于优越的自然环境与生态资源禀赋,长江经济带形成了得天独厚的社会经济发展格局,自唐宋经济重心南移以来,长江流域一直占据着我国经济和人口重心的地位。2024 年,长江经济带常住人口数量占全国比重为 43.1%,生产总值为 63.02 万亿元,占全国比重近半。人口和经济的发展促使城市规模不断增长,孕育了以上海、杭州等为核心的长三角城市群,以武汉为中心的长江中游城市群,以及重庆、成都为双核的成渝城市群。本文以长江经济带全域的 11 个省市为研究区域,其中包括 122 个地级市、6 个副省级城市、2 个直辖市。其中,东部地区包括上海市、浙江省、江苏省,中部地区包括江西省、安徽省、湖南省、湖北省,西部地区包括重庆市、贵州省、云南省、四川省。经济带区位与建设用地扩张见图 1。



注:基于自然资源部标准地图服务网站审图号为 GS(2020)4619 号的标准地图制作,底图无修改,下同。

图 1 长江经济带区位与建设用地扩张

Fig. 1 Regional context and construction land expansion in the Yangtze River Economic Belt

1.2 数据来源

本研究所涉及的数据主要包括土地利用数据、碳排放数据、人类活动数据及相关统计和行政区划数据,选取 2000、2010、2020 年作为时间截面。其中土地利用数据来源于武汉大学的杨杰和黄昕教授发布的 1990—2022 年的空间分辨率为 30 m 的中国年度土地覆盖数据,本文在原有分类体系的基础上保留农田、草原、不透水地面,分别对应耕地、草地、建设用地 3 种用地类型,并按照我国土地利用类型 3 级分类标准将森林及灌木合并为林地,将水域、湿地合并为水体、将冰雪及裸地合并为其他土地^[27]。人类足迹数据来源于中国农业大学土地科学与技术学院的城市环境监测及建模团队开发的 2000—2020 年全球人类足迹数据,数据采用建筑环境、人口密度、夜间灯光、农田、牧场、公路、铁路、通航水道 8 个指标进行测算^[28]。CO₂ 排放数据源自 EDGAR Community GHG Database,由欧盟联合研究中心与国际能源署联合开发。数据涵盖 2000—2023 年全球分部门、分国家的化石燃料燃烧及工业过程 CO₂ 排放量(<https://edgar.jrc.ec.europa.eu>)^[29]。矢量数据包括区域及行政区边界、省会位置等,源自国家基础地理信息中心(<http://www.ngcc.cn>)。涉及的其他社会经济数据来源于各省市统计年鉴和农村统计年鉴。

2 研究方法

2.1 扩张多维指数及生态用地流失量测算

本文从时序演变、空间密度及区域异质性 3 个维度构建建设用地扩张时空演变评价体系,并通过多维指标集成实现综合解析^[30]。

1) 扩张速度(时间维度):计算年均变化速率,量化建设用地规模随时间演变的快慢趋势。

$$v = \sqrt[t]{\frac{A_t}{A_0}} - 1 \tag{1}$$

式中: v 为建设用地扩张速度; t 为时间间隔; A_t 、 A_0 为期末、期初子区域建设用地面积, km²。

2) 扩张强度指数(空间维度):测算新增建设用地面积占区域土地总面积的比例,揭示扩张对土地利用结构的空间扰动程度。

$$S = (A_t - A_0)/(R \cdot t) \tag{2}$$

式中: S 为建设用地扩张强度; R 为区域土地总面积。

3) 扩张贡献度(区域分异维度):统计子区域扩张量占全域增量的比重,识别不同区域对整体扩张的差异性贡献。

$$P = (A_t - A_0)/(A_{T,t} - A_{T,0}) \tag{3}$$

式中: P 为建设用地扩张贡献度, $A_{T,t}$ 、 $A_{T,0}$ 分别为期末和期初的区域建设用地总面积, km²。

4) 综合扩张指数:集成上述三维特征,突破单一维度局限,实现扩张速率、强度与贡献度的耦合分析,实现扩张格局的多尺度量化解析。

$$I_{CEI,n} = \sqrt[3]{v_n S_n P_n} \tag{4}$$

式中: $I_{CEI,n}$ 为建设用地综合扩张指数(Comprehensive Expansion Index, CEI), n 为长江经济带以地级市为单位的区域。

生态用地年流失量通过计算林地、草地和水体的年均流失总量得到,从土地利用变化视角,表征建设用地扩张导致的生态空间缩减程度,是评估建设用地扩张的直接生态效应的重要参数。

$$l_{AE} = (l_F + l_G + l_W)/t \tag{5}$$

式中: l_{AE} 为生态用地年流失量; l_F 、 l_G 、 l_W 分别为林地、草地、水体流失量。

2.2 生态系统服务价值测度

本文采用谢高地等^[31-32]建立的生态系统服务价值(ecosystem services value, ESV)核算体系,将 ESV 定义为可被价值核算的凝结在生态系统产品和服务中的生态系统平均作用时间^[33]。基于用地类型及服务功能二维矩阵量化计算 ESV 的方法,结合土地利用转移矩阵识别建设用地扩张侵占的生态用地类型和面积,测算建设用地扩张导致的 ESV 流失量,量化扩张导致地表生态系统的直接价值损失。计算公式如下:

$$l_{ESV} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n (A_i \cdot V_{C,ij}) - \sum_{j=1}^n (A_E \cdot V_{C,j}) \tag{6}$$

式中: l_{ESV} 是扩张直接导致的 ESV 流失量,元; A_i 为扩张占用的第 i 类用地的面积, km²; A_E 为扩张的建设用地面积, km²。

$V_{C,ij}$ 为第 i 类用地 j 项生态系统服务价值单位生态系统的价值当量; $V_{C,j}$ 特指建设用地第 j 项生态系统服务价值单位生态系统的价值当量,元。计算公式如下^[31]

$$V_{C,ij} = E_a \cdot E_{ij} \tag{7}$$

单位面积 ESV 基础当量 $V_{C,ij}$,由标准当量因子 E_a 以及单位 ESV 当量因子 E_{ij} 决定。由于 E_a 和

E_{ij} 存在地域差异,因此需要结合长江经济带实际情况对二者分别进行修正。

谢高地等采用单位面积农田生态系统的粮食产值的 1/7 来量化 E_a ^[31-32]。本文针对长江经济带的区域特征和多时点可比性需求,在原方法的基础上对核算公式改进如下:① 分别收集长江经济带 11 个省市 2000、2010、2020 年的稻谷、小麦、玉米 3 种粮食作物的单位产量、播种面积、价格等相关数据,基于省级数据核算 E_a ;② 分时点计算 E_a ,再对 3 个时点结果取均值,以实现 3 个研究时点的价值可比性。完善 E_a 计算公式如下,计算得 $E_a = 1\,638.02\text{ 元}$ ^[34]

$$E_a = \frac{1}{7} \sum_{z=1}^3 \sum_{j=1}^3 \sum_{i=1}^{11} \frac{m_{ijz} p_{ijz} q_{ijz}}{A_M}$$

(8)

表 1 长江经济带陆地生态系统生态服务价值当量表

Tab. 1 Ecosystem service value equivalent table per unit area in the Yangtze River Economic Belt

单位:元/km²

生态 系统分类	供给服务			调节服务				支持服务		文化服务	
	食物 生产	原料 生产	水资源 供给	气体 调节	气候 调节	净化 环境	水文 调节	土壤 保持	维持养 分循环	生物 多样性	美学 景观
耕地	2 060.63	248.98	-3 439.84	1 674.06	864.87	255.53	3 652.78	350.54	288.29	317.78	137.59
林地	413.60	950.05	491.41	3 124.52	9 348.99	2 739.59	6 118.00	3 804.30	290.75	3 464.41	1 519.26
草地	382.20	562.39	311.22	1 976.54	5 225.28	1 725.38	3 827.50	2 407.89	185.64	2 189.49	966.43
水体	1 262.91	420.97	12 645.51	1 446.37	3 965.64	8 771.59	154 692.88	1 749.40	132.68	5 048.37	3 561.05
建设用地	0.00	0.00	-7 665.93	-2 325.99	0.00	-3 964.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
其他用地	6.55	19.66	720.73	144.15	242.43	321.05	2493.06	98.28	6.55	95.01	68.80

注:建设用地以不透水人工地表为主,基本不具备正向生态系统服务能力,故多数服务价值系数计为 0;负值反映其对气体调节、水文调节等服务的负向胁迫效应。

2.3 综合评价方法

本文借鉴压力-状态-响应 (pressure-state-response, PSR) 理论框架,以建设用地扩张为起点,结合时间序列和因果逻辑,梳理“扩张驱动-生态基底侵占-服务功能衰退 (function, F)-人类活动胁迫 (pressure, P)-碳排放响应 (response, R)”的生态效应传递链条,从直接、间接生态效应双维度解构建设用地扩张的生态效应 (见图 2)。直接生态效应侧重于量化建设用地扩张对地表生态系统的物理扰动,表现为“生态基底侵占-服务功能衰退”的作用路径 ^[37]:首先扩张直接侵占生态用地导致生态基底结构发生改变 (结构层,以生态用地流失量作为表征),继而导致生态功能发生改变 (功能层,以 ESV 流失量为表征)。间接生态效应随时间推进呈现出“压力-响应”的持续累积,主要关注扩张引发的社会

式中: $i = 1, \dots, 11$ 对应 11 个省市, $j = 1, 2, 3$ 对应 3 种粮食作物, $z = 1, 2, 3$ 为 2000、2010、2020 年 3 个时间点; m_{ijz} 为第 i 个省市第 j 种粮食作物第 z 年的单位产量, t/hm^2 ; p_{ijz} 为 i 个省市第 j 种粮食作物第 z 年的播种面积, hm^2 ; q_{ijz} 为第 i 个省市第 j 种粮食作物第 z 年的价格,元/ t ; A_M 为长江经济带 3 种主要粮食作物在 3 个研究时点的总播种面积。

中国陆地生态系统单位面积 ESV 当量因子表 ^[32-33] 能够有效地反映地表生态系统服务功能的差异和变化。参照相关研究 ^[35-36] 的修正方法,结合长江经济带用地结构情况和环境特征,对全国当量因子表进行修正调整,得到长江经济带陆地生态系统单位面积生态服务价值当量表。

经济代谢反馈:压力层通过人类足迹数据度量人类对自然系统的胁迫强度,响应层则以碳排放年增量揭示能源消耗与生态系统的物质交换效应。基于以上构建“结构-功能-压力-响应”(SF-PR)的生态效应分析框架 (见图 2),共同构成综合生态效应。相较于传统的生态效应评估体系, SFPR 框架的创新性体现在:①通过直接效应与间接效应的解耦,突破单一因果链局限;②基于多维度、多指标的评价体系实现多要素生态效应的综合量化。

采用层次分析和熵权法组合赋权测算综合生态指数,在此基础上,采用 TOPSIS 模型评估区域生态状况,通过标准化处理消除量纲影响后,计算各评价单元与正/负理想解的欧氏距离,以其相对接近度表征综合生态指数,融合主客观赋权优势,实现多维度生态效应的科学量化 ^[38]。

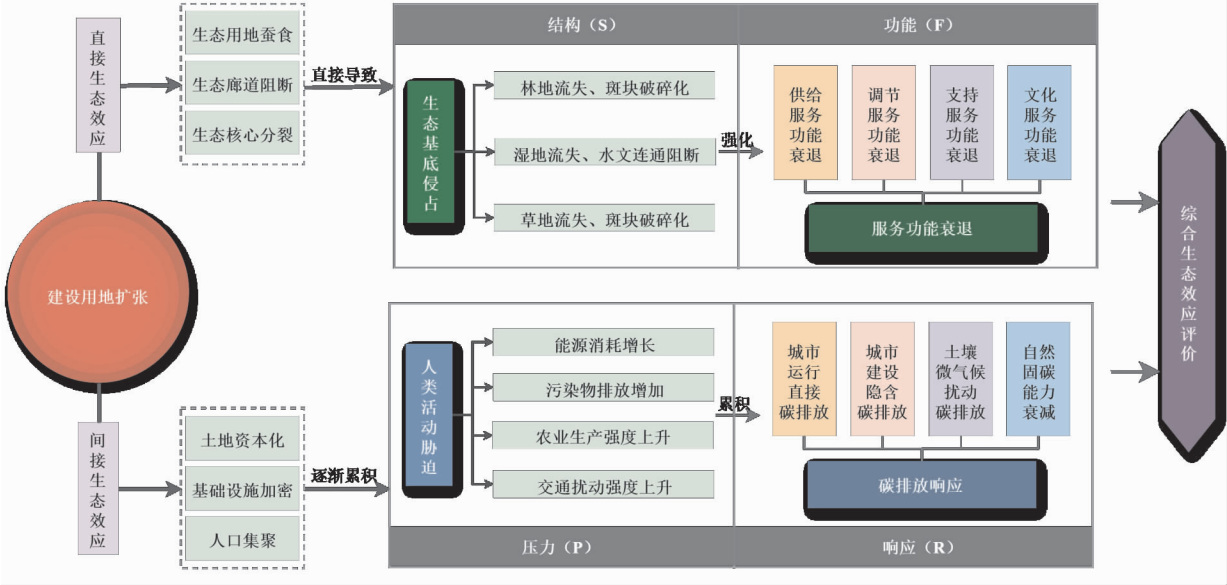


图 2 SFPR 生态效应分析框架

Fig.2 SFPR ecological effect analysis framework

表 2 长江经济带建设用地扩张的生态效应评估体系

Tab.2 Evaluation system for the ecological effects of construction land expansion in the Yangtze River Economic Belt						
层次	指标	单位	指标方向	AHP/%	熵权法/%	最终权重/%
直接生态效应	供给 ESV 年流失量	元/年	+	5.09	13.97	9.53
	支持 ESV 年流失量	元/年	+	7.80	13.07	10.43
	调节 ESV 年流失量	元/年	+	12.28	17.75	15.02
	文化 ESV 年流失量	元/年	+	3.45	17.44	10.44
	生态用地年流失量	km ²	+	19.97	16.84	18.41
间接生态效应	人类足迹指数年增长		+	19.97	7.04	13.50
	CO ₂ 年碳排放增量	万吨/年	+	31.44	13.89	22.67

3 长江经济带建设用地扩张的时空特征

3.1 扩张规模与方向分析

2000—2020 年,在经济发展的驱动下,长江经济带建设用地规模呈现出明显的扩张增长特征。规模从 36 612.62 km² 跃升至 70 132.11 km²,增长 91.55%,占区域总面积的比重从 1.79% 升至 3.43%。其中,2000—2010 年增长规模为 16 401.26 km²,2010—2020 年达到 19 087.21 km²。从空间维度看,建设用地规模及占比均呈现出东高西低的梯度分异特征。东部三省市的建设用地规模占比从 7.23% 升至 14.17%,中部四省则从 2.53% 升至 4.39%;省际差异显著,安徽受到长

三角辐射效应的影响,占比高达 9.42%,而湖南则仅有 2.32%;西部地区受地形约束与生态红线管控的双重限制,2020 年建设用地规模仅约为中东部的 1/3,占区域总面积比重仅有 0.79%,呈现出稀疏点状分布的特征(见图 1)。这种空间分异现象折射出长江经济带“核心(长三角)–边缘”结构下的区域发展失衡问题^[39-40],本质上是自然区位条件差异与政策导向协同作用的结果,但也暴露出中上游生态屏障区发展权受限的制度困境,亟待通过构建流域协同土地管理制度优化人地关系,提升区域协调发展水平。

2000—2020 年,涵盖长江经济带 68% 建设用地的标准差椭圆面积扩大 7.83%,重心向西南迁移,这表明研究期内长江经济带建设用地在东西方向的空间分布整体趋于分散化。同时,椭圆长

轴的长度增加 10.77%,短轴缩短 2.65%,且长轴的延伸方向与长江流向大致平行,表明长江经济带建设用地在 2000—2020 年沿长江向心分布的

趋势逐渐增强,形成了沿江高密度发展廊道(见图 3)。

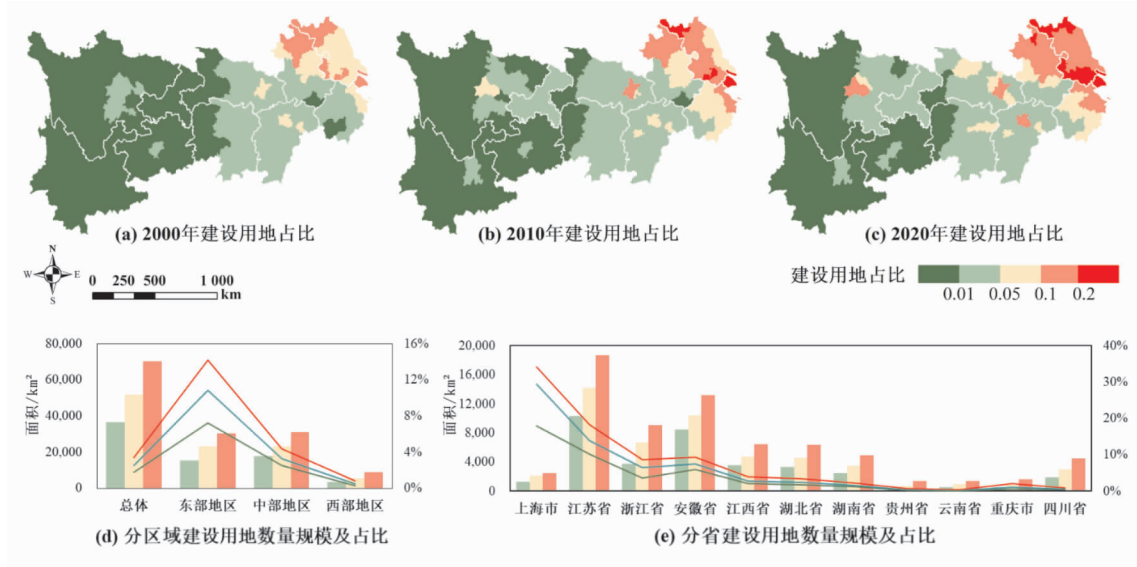


图 3 长江经济带建设用地数量规模与占比

Fig. 3 Scale and proportion of construction land in the Yangtze River Economic Belt

3.2 扩张多维指数分析

2000—2020 年,长江经济带建设用地综合扩张水平呈现出西升东降、中部崛起的时空演变特征。全域综合扩张指数 (comprehensive expansion index, CEI) 从 2.97% (2000—2010 年) 上升至 3.02% (2010—2020 年),东部三省市 CEI 从 4.22% 降低至 3.28%,中部四省由 1.93% 升至 2.38%,西部由 1.11% 升至 1.43%。这一变化趋势同区域协调发展战略的调整高度契合,东部由增量扩张逐渐转向存量优化,而中西部借力中部崛起战略与西部大开发的政策红利,同时承接来自长三角的产业梯度转移而加速土地开发。但从 CEI 的空间分布看,受到发展基础和扩张惯性的影响,CEI 始终呈现出东高西低的特征(见图 4),2000—2020 年东中西三大分区 CEI 分别为 3.47% > 2.17% > 1.48%。值得注意的是,迪庆、甘孜两地在 2000—2020 年分别出现了不同程度的负扩张,主要是受到其域内大规模的重点生态功能区的管控限制、全域生态修复、地形崎岖对传统土地开发的抑制等多重因素的影响。

3.2.1 扩张速度分析

研究期内建设用地的年扩张速度为 3.30%,相较于 2000—2010 年,2010—2020 年的年扩张速度有所放缓,由 3.54 降低至 3.07%。东部地区的建设用地经历了从快速扩张到存量优化与精

明增长的阶段,2000—2010 年的年扩张速度为 4.12%,显著高于区域平均水平,上海作为龙头城市更是高达 5.08%,2010—2020 年则降至 2.72%,上海骤降至 1.50%。2010 年后长三角的新兴产业的蓬勃发展使得传统工业用地需求下降,经济增长与建设用地扩张的捆绑程度下降,同时受到生态和开发边界管制的政策影响,东部三省市可供开发的用地指标下降,进而倒逼其进行存量更新和产业升级。中部四省受到长三角的辐射带动,实施以地招商等一系列优惠政策,承接了大量东部地区转移的产业,进而带动建设用地的需求上升,2000—2020 年的年扩张速度分别为 2.79%,出现了以合肥、武汉为代表的沿江建设用地增长极,但中部地区的扩张依然高度依赖传统的土地财政发展模式,潜藏一定的金融风险,需要通过产业转型升级来制造新的经济增长点。西部地区受到西部大开发战略的带动,增速始终保持高位,2000—2020 年的年扩张速度为 5.07%。

3.2.2 扩张强度分析

2000—2020 年长江经济带建设用地的年扩张强度为 0.08%,高强度区域 (>0.5%) 集中分布于长三角城市群区域,东部三省市整体的年扩张强度为 0.35%,显著高于中西部;中部地区除武汉、南昌、长沙等城市外,年扩张强度均 < 0.2%;西部四省市除成都市呈现 0.36% 的孤岛

式高值外,普遍处于低扩张强度的状态。这既源于发展水平差异和地形因素对区域开发的阻碍,也暴露出单一指数分析的局限性。西部四省市地级市行政区划面积普遍大于中东部省份,即便建

设用地扩张的绝对量较大,但经过计算后扩张强度仍会被稀释。因此需要结合多维扩张指数,对区域扩张水平进行全面分析。

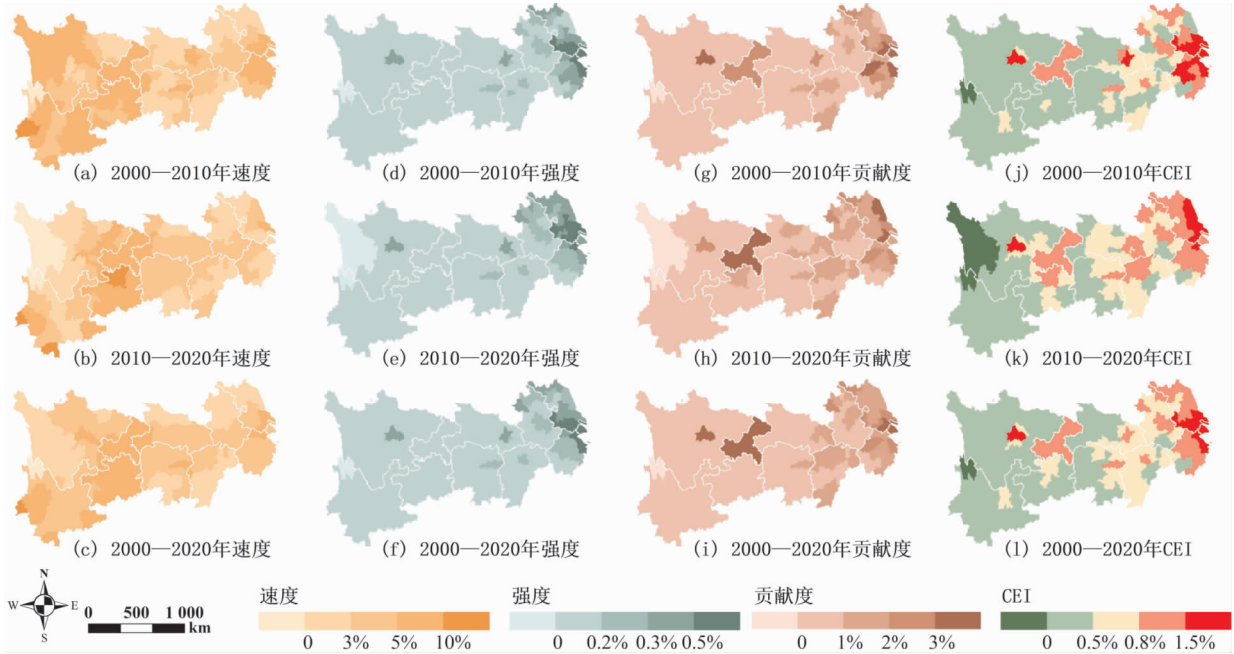


图 4 长江经济带建设用地的多维扩张指数

Fig. 4 Multidimensional expansion index of construction land in the Yangtze River Economic Belt

3. 2. 3 扩张贡献度分析

研究期内建设用地的扩张贡献度呈现出东高西低的空间失衡特征。东部地区贡献了 44. 16% 的新增建设用地,其中 2000—2010 年贡献度高达 50. 49%; 中部地区 2000—2020 年贡献度为 39. 11%,仅次于东部三省市,皖江城市带与长江中游城市群形成了贡献度相对高值的带状区域; 西部地区贡献度仅有 16. 73%,云贵高原、青藏高原东部地市贡献度普遍低于 0. 7%,但成渝双城贡献度接近长三角核心地市水平,这种空间异质性既受地形等自然因素影响,也折射出成渝双城经济圈在国家战略布局中的能级提升。

4 长江经济带建设用地扩张的生态效应

4. 1 直接生态效应

4. 1. 1 生态用地流失分析

2000—2020 年长江经济带建设用地扩张呈现显著的耕地依赖型特征,全域新增建设用地的 88. 21% (30 946. 87 km²) 源自耕地转用,以农养城的传统城镇化模式较为明显。其中东部地区转

用耕地规模为 13 574. 25 km² (89. 39%), 次要来源为水体, 占比 7. 89%; 中部地区转用耕地 11 822. 79 km² (84. 37%), 次要来源为林地 (10. 54%); 西部地区转用耕地 5 549. 83 km² (89. 46%), 次要来源为草地, 占比 6. 23%。

研究期内建设用地扩张对生态用地的侵占呈现出动态强化与东西向梯度分异的时空特征。2010—2020 年扩张直接导致的生态用地的流失强度相较于 2000—2010 年有所提升,生态用地年流失量由 198. 49 km² 提升至 226. 43 km²,这表明在耕地保护刚性约束的背景下,扩张压力部分向生态用地转嫁,以降低建设用地扩张的制度成本。东部、中部、西部地区 2000—2020 年的生态用地年流失量分别为 100. 15 km²、81. 76 km²、23. 36 km²,东西梯度分异格局突出。这种梯度格局的形成,本质上是地理、政策交互作用的时空表征。在地理层面,东部地区平原为主的地形显著提升了生态用地的开发适宜性,而中西部生态用地分布区复杂的地貌格局则抑制了其转用可能性;政策约束层面,西部生态屏障区的政策刚性管控强,转用生态用地面临着严格的准入限制,因而流失量相对较低。

4.1.2 ESV 流失分析

2000—2020 年长江经济带因建设用地扩张直接导致的 ESV 流失总量达 1134.41 亿元,年均流失 56.72 亿元,且 2010—2020 年的流失强度较 2000—2010 年强,年流失量由 56.85 亿元上升至 62.62 亿元。ESV 总量从 2000 年的 51 370.48 亿元降至 2020 年的 50 656.48 亿元,净减损 714.00 亿元,这表明建设用地扩张是导致 ESV 减损的主

要原因,但强有力的生态保护政策也缓解了部分负面效应。空间上,ESV 流失量呈现显著的梯度分异格局,2000—2020 年东部三省、中部四省、西部四省分别流失 687.38 亿、299.16 亿、147.86 亿元,梯度比达 4.65:2.02:1。ESV 流失的高值区域集中分布于长江三角洲城市群、长江中游多个城市及成渝双城,与长江经济带建设用地扩张的热点区域高度耦合(见图 5)。

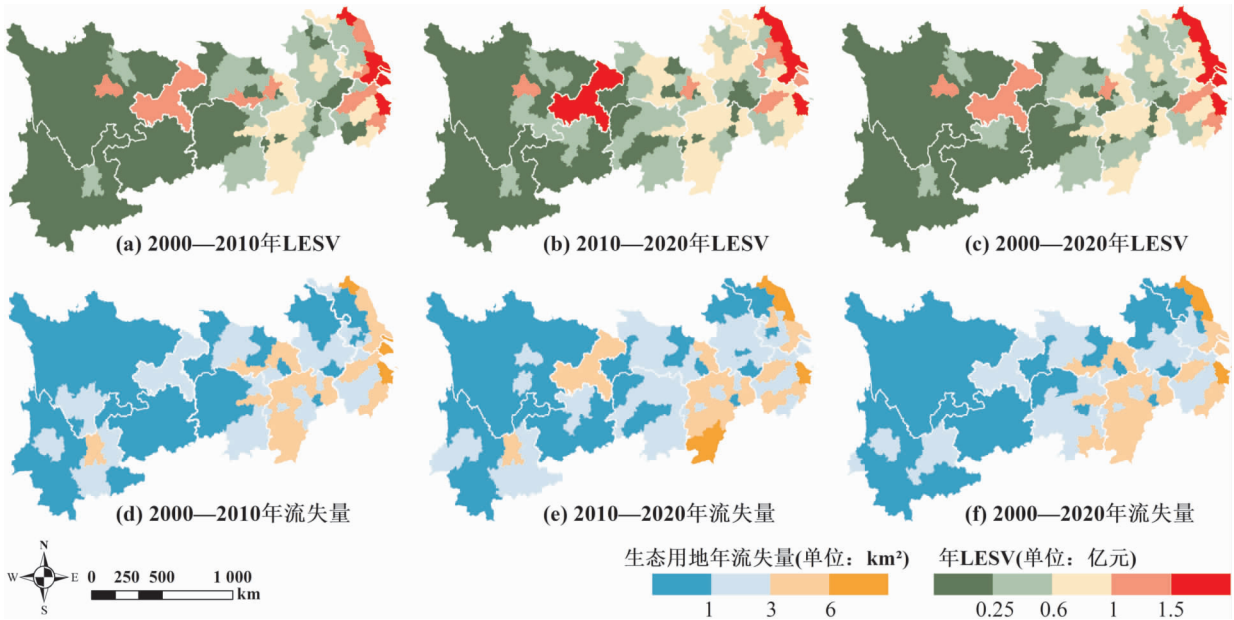


图 5 长江经济带建设用地扩张的直接生态效应

Fig. 5 Direct ecological effects of construction land expansion in the Yangtze River Economic Belt

研究期内建设用地扩张对 ESV 的胁迫效应不同子项服务类型也存在异质性。其中,供给服务价值流失量为 235.06 亿元,流失率为 12.80%,总量由 1 837.06 亿元下降至 1 602.00 亿元,这一变化凸显了耕地粮食供给功能同建设用地生产生活功能间的矛盾,需要进一步强化长江流域的粮食安全保障机制。调节服务价值流失 406.33 亿元,流失率为 2.12%,流失量最大但因其高存量的特征流失率较低;支持服务价值流失 58.58 亿元,其受扩张的直接扰动较小,但因为涉及土壤、生物系统等复杂生态系统,功能退化存在显著的时间滞后性,其对应的生态功能受到的长期累积影响仍需持续监测;文化服务价值流失量为 14.35 亿元,流失率为 0.69%,在建设用地扩张进程中,需要做好生态景观的保护和规划工作。

4.2 间接生态效应

4.2.1 人类足迹分析

建设用地扩张会引发人口集聚、产业扩张和

基础设施加密等连锁反应。这些变化进一步导致资源消耗加剧,污染排放倍增,进而加剧扩张的生态效应^[41]。本文选取人类足迹指数的年增长值作为衡量间接生态效应中压力(P)的指标,该指标能够较好地反映扩张前后人类活动强度的变化。2000—2020 年长江经济带人类足迹指数上升显著,由 13.58 上升至 15.94,年增长值为 0.12。2000—2010 年的年增长值为 0.05,2010—2020 年上升至 0.18,且高值区域(>0.25)在空间上存在显著的蔓延特征(见图 6)。说明在新型城镇化与区域协调发展战略等国家战略驱动下,土地开发与人口经济发展已逐渐由点状突破转向全域协同的发展模式。空间上长三角、长江中游、成渝三大城市群形成人类足迹增长的高值集聚区;就东西区域差异而言,人类足迹增长呈现出显著的“东高西低”的梯度递减特征,2000—2020 年东部、中部、西部人类足迹年增长值分别为 0.27、0.13、0.08。在时序变化上,东部地区人类足迹指数始终保持领先,且增长迅猛,2000—2010 年的

年增长值为 0.23,而 2010—2020 年则攀升至的 0.31;中西部地区在 2000—2010 年指数增长较小,2010—2020 年则增长较为显著。这表明 2010 年后在区域协调发展战略的干预下,中西部地区获得了一定的发展机遇,但在发达地区的先发优势与虹吸效应的双重影响下,东西部发展差距仍持续扩大。东部城市群凭借产业集聚、完善基建

与制度创新,加速吸纳中西部人力、资本与技术。在此过程中,中西部欠发达地区为维持经济增长,无奈陷入对土地资源粗放式开发的路径依赖。因此,亟需完善区域协同发展机制,平衡资源分配、引导产业合理转移,以扭转长江经济带东西部发展失衡的局面。

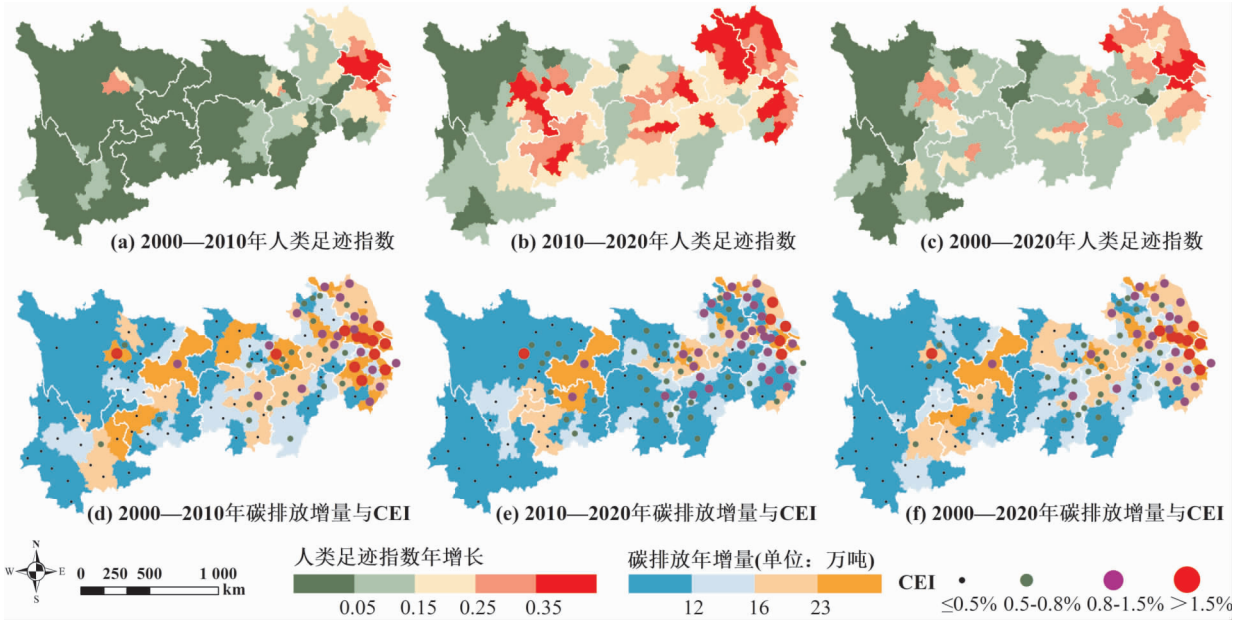


图 6 长江经济带建设用地扩张的间接生态效应

Fig. 6 Indirect ecological effects of construction land expansion in the Yangtze River Economic Belt

4.2.2 碳排放分析

作为全球温室效应的主导因子,碳排放直接反映了工业生产、交通运维等用地功能的代谢强度,选取碳排放作为间接生态效应表征指标,能够有效量化土地利用转型后的能源代谢与生态扰动强度^[42]。2000—2020 年长江经济带碳排放总量从 2000 年的 12.46 亿吨阶梯式跃升至 2020 年的 38.22 亿吨,2020 年东中西部分别排放 14.95、14.76、8.51 亿吨。在碳排放年增量方面,2000—2010 年均增量为 1.82 亿吨/年,2010—2020 年有所放缓,为 0.75 亿吨/年。空间上,2000—2010 年的高值区域集中分布于长三角、成渝、湖北省等制造业发达区域、以及云贵交界的能源枢纽地区,2010—2020 年增量出现明显下降,川贵湘赣鄂的部分地级市出现碳排放总量下降的趋势。2000—2020 年地级市单位的碳排放增量与 CEI 呈现出明显的正相关关系,Pearson 系数为 0.69,2010—2020 年二者的相关性显著减弱,系数由 2000—2010 年的 0.74 降至 0.50。可见尽管建设用地不断扩张导致长江经济带碳排放总量持续攀升,但

通过实施“生态管控+产业升级”的协同治理模式,碳排放增速逐渐出现边际递减,与城镇扩张、经济发展的关联性趋于弱化,区域经济结构的绿色转型成效显著。

建设用地地均碳排放量能够有效表征单位土地能源代谢效率,解耦建设用地扩张的规模效应与集约水平,为评估土地利用的生态效应提供直接量化依据。2000—2020 年长江经济带建设用地地均碳排放量呈现出先增后减的变化趋势,由 2000 年的 3.40 万吨/km² 上升至 2010 年的 5.92 万吨/km²,而后又下降至 2020 年的 5.45 万吨/km²。由于 2000—2010 年经济的相对粗放增长,单位建设用地的利用强度迅速飙升,形成了经济和碳排放量双增长的发展特征,而 2010—2020 年,由于产业的转型升级和低碳技术的推广,单位建设用地的集约利用程度有所提升,建设用地扩张、经济规模增长同碳排放量增长逐步脱钩。

4.3 综合生态效应

4.3.1 综合生态效应指数时空特征分析
2010—2020 年长江经济带综合生态效应指

数相较于 2000—2010 年有所提升,由 0.15 增长至 0.17,与 CEI 的增长趋势一致,地级市单位的相关分析也显示二者呈现出极强的正向相关关系,2000—2020 年的相关系数为 0.89。这表明长江经济带 2000—2020 年的建设用地扩张造成了显著的生态效应,且 2010—2020 年的生态效应由于扩张水平的提升也随之增强。生态效应的增强也受到其时空滞后性的影响,前十年的高强度开发引发的生态系统结构改变,如碳汇功能退化、生境连通性破坏,以及复合污染累积,在后十年持续产生影响,放大生态功能衰退,形成跨周期的生态效应累积。

空间格局上形成三核高值集聚、东西梯度递减的分布特征,长三角、长江中游城市群与成渝双城构成综合生态效应指数的高值核心。中东部地区沿长江干流形成大于 0.25 的生态效应高值密集带,向西至川西高原、鄂西山区等生态敏感区域则低于 0.10。这种东高西低的空间分异受到开发强度与生态保护约束差异的双重影响,东部平原地区开发适宜度较高,建设用地需求较大,刚性

扩张引发的景观破碎化、生产生活污染排放强度加大等因素增强生态效应;而西部生态脆弱区通过主体功能区划约束,将建设用地扩张水平控制在一定范围内,叠加退耕还林、河湖连通等工程实施,使综合生态效应指数水平维持在低值稳定态,印证了生态红线—开发管控—系统修复协同生态治理模式的有效性。

4.3.2 “扩张—生态”类型分析

为了揭示建设用地扩张与生态效应的耦合关系,本文结合自然断点法,分别以 0.004、0.008 以及 0.1、0.3 为断点,对综合扩张指数和综合扩张生态效应指数进行交叉二维象限划分,构建了包含弱压稳态型、中压均衡型、强压抑制型等的 9 类“扩张—生态”分类体系,以实现对建设用地扩张与生态系统复杂关系的系统量化与类型识别。具体分类标准及解析如图 7 所示。分类结果的列联表的卡方检验显示,2000—2010、2010—2020 及 2000—2020 年的 χ^2 值分别为 94.97、67.53 和 95.60 ($p < 0.05$),证实生态扰动与扩张水平存在统计学显著关联。

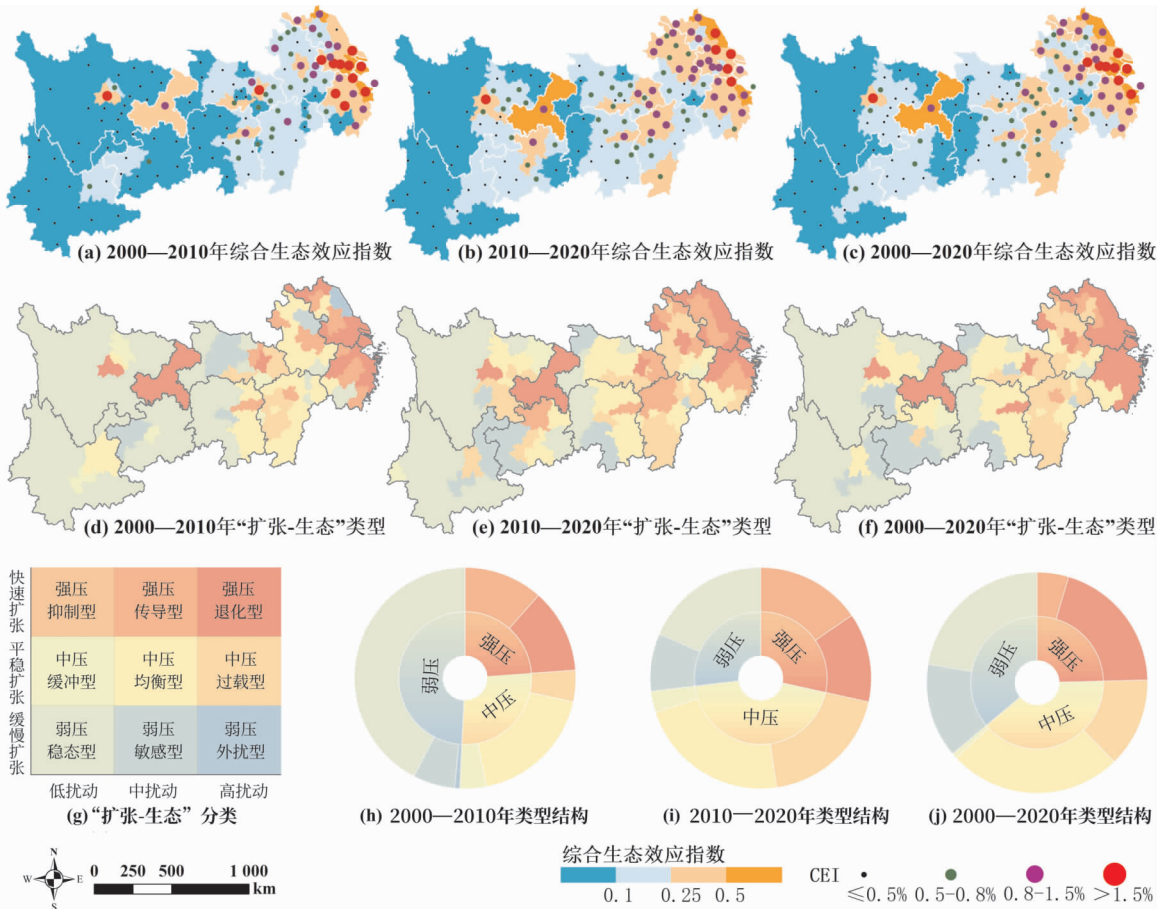


图 7 长江经济带建设用地扩张的综合生态效应
Fig. 7 Integrated ecological effects of construction land expansion in the Yangtze River Economic Belt

2000—2020 年,长江经济带地级市单位的“扩张—生态”类型呈现出明显的类型分异。中压均衡型、弱压稳态型、强压退化型、弱压敏感型作为主导类型,占总体的 81.54%。弱压稳态型主要分布于西部横断山区,其在地理条件约束下的低开发潜力,以及严格的生态政策管控使其生态系统相对维持稳定;中压均衡型主要分布在湘鄂皖三省的普通地级市,开发强度与生态承载力处于动态平衡,但仍需优化经济结构以缓解扩张的间接及潜在生态影响;强压退化型主要分布于长三角、长江中游以及成渝城市群的核心区,这些承担着国家重要经济增长极的区域面临着高强度的开发和持续的生态压力,亟需通过经济绿色转型和生态修复的方式改善城市人居和生态环境;弱压敏感型主要分布于云贵交界以及湘西丘陵,分别属于我国典型的喀斯特和侵蚀剥蚀丘陵地貌的分布区域,地处云贵高原向江南丘陵的过渡带,是亚热带常绿阔叶林与喀斯特稀树草原的生态交错区,生态系统的边界效应显著,稳定性差,轻微扰动可引发生态系统的连锁反应。2000—2010 年长江经济带以弱压稳态型、中压均衡型和强压退化型为主导类型,2010—2020 年则转变为中压均衡型、中压过载型及弱压稳态型。主要类型转变为弱压稳态型向弱压敏感型、中压均衡型、中压过载型转化,以及中压均衡型转变为中压过载型。可见 2010—2020 年在建设用地扩张水平提升,以及生态效应跨时空累积的双重影响下,产生的生态效应显著高于 2000—2010 年。需要重视生态效应的时空累积规律,在城市规划与发展策略中动态监测生态压力和质量趋势,提前布局生态保护战略,优化国土空间开发模式,以维持区域可持续发展能力。

5 结论与讨论

本研究基于多尺度时空分析与综合评价模型,系统解析了长江经济带 2000—2020 年建设用地扩张的时空特征及其生态效应,得出以下核心结论。

1) 长江经济带 2000—2020 年建设用地扩张态势明显,规模增长 91.55%,其中近九成源于耕地转用,2020 年建设用地总规模达到 70 132.11 km²,形成了以长三角、长江中游、成渝城市群为主的沿江高密度发展廊道。综合扩张水平呈现出

西升东降、中部崛起的时空演变特征,但受到开发适宜度以及东部虹吸效应的影响,建设用地分布和扩张水平始终呈现出东高西低的空间失衡特征。

2) 建设用地扩张直接导致长江经济带生态用地和生态系统服务价值大量流失,间接致使人类足迹扰动压力提升并显著提升碳排放量,直接和间接两条路径胁迫生态系统产生了显著的生态效应。受到扩张水平时空分异以及生态效应时空滞后性的影响,2010—2020 年产生的生态效应显著高于 2000—2010 年,空间上呈现出明显的自东向西梯度递减特征。

3) 长江经济带生态扰动与扩张水平存在显著的关联关系,市级单元的“扩张—生态”类型呈现出明显的类型分异,主导类型为中压均衡型、弱压稳态型、强压退化型、弱压敏感型,占总体的 81.54%。从 2000—2010 年到 2010—2020 年,主要的转变类型为弱压稳态型向弱压敏感型、中压均衡型、中压过载型转化,以及中压均衡型转变为中压过载型,验证了 2010—2020 年扩张压力的增强与生态效应的累积协同放大了生态效应。

4) 长江经济带经济绿色转型成效初显,碳排放量增速出现边际递减,地均碳排放量也出现下降,建设用地扩张同碳排放量增长逐步脱钩,驱动长江经济带向碳达峰阶段迈进。但东西部发展失衡仍旧显著,东部转向精明增长和技术革新的发展路径,而中西部仍旧保有粗放开发的发展模式,亟需完善区域协同发展机制。

长江经济带需构建生态文明建设与高质量城镇化协同发展的政策框架,通过分区差异化管控策略、区域协同治理机制与建立动态适应性的管理框架,破解建设用地扩张与生态保护之间的深层矛盾。

1) 针对不同类型的区域,需要结合其矛盾焦点制定差异化的政策策略,如对于扩张压力大、发展水平高的长三角地区,应设定严格的生态修复目标,推动存量更新与产业低碳化改造,而对于云贵高原等生态脆弱区域,则应坚持保护优先,重点实施生态保育与恢复工程。

2) 需要完善统筹东西部发展的协同治理机制,健全生态补偿与利益共享机制,完善由东部生态受益区向中西部生态贡献区、脆弱区的财政转移支付机制,推动产业协同与绿色投资,引导东部资本、技术投资中西部的生态基建、低碳产业项

目,破解东西发展的空间失衡问题。

3)建立适应生态效应时空滞后性的动态适应性管理框架,依托天地一体化监测网络对关键指标实施实时监控、将累积性规律纳入国土空间规划评估体系,实现从被动治理向主动防控的转变。形成建设用地与生态保护协同治理的新格局,实现城镇化与生态建设的良性互动。

参考文献

[1] 瞿诗进,胡守庚,李全峰.中国城市建设用地转型阶段及其空间格局[J].地理学报,2020,75(7):1539-1553.
Qu S J, Hu S G, Li Q F. Stages and spatial patterns of urban built-up land transition in China[J]. Acta Geographica Sinica, 2020, 75(7): 1539-1553.

[2] 冯琰玮,甄江红,马晨阳.城市用地扩展对生态风险影响的多情景模拟:以内蒙古呼和浩特市为例[J].生态学报,2021,41(3):1199-1208.
Feng Y W, Zhen J H, Ma C Y. Multi-scenario simulation of the impact of urban expansion on ecological risk: A case study of Hohhot City, Inner Mongolia [J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(3): 1199-1208.

[3] Liu X P, Wang S J, Wu P J, et al. Impacts of urban expansion on terrestrial carbon storage in China[J]. Environmental Science & Technology, 2019, 53(12): 6834-6844.

[4] 王桂林,张伟.中国城市扩张及空间特征变化对PM_{2.5}污染的影响[J].环境科学,2019,40(8):3447-3456.
Wang G L, Zhang W. Effects of urban expansion and changes in urban characteristics on PM_{2.5} pollution in China[J]. Environmental Science, 2019, 40(8): 3447-3456.

[5] 中共中央,国务院.关于全面推进美丽中国建设的意见[N].人民日报,2024-01-12(01).

[6] 张颖诗,冯艳芬,郭冠华,等.近30年中国典型城市群建设用地扩张的时空特征及其对比:以京津冀城市群和粤港澳大湾区为例[J].华南师范大学学报(自然科学版),2022,54(1):79-90.
Zhang Y S, Feng Y F, Guo G H, et al. The spatio-temporal characteristics of construction land expansion in China's typical urban agglomerations in recent 30 years: A case study of the Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration and the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area[J]. Journal of South China Normal University (Natural Science Edition), 2022, 54(1):

79-90.

[7] 朱肖勇,付占辉,乔家君,等.黄河流域城镇人口和用地变化的关联格局及地域类型[J].西北大学学报(自然科学版),2024,54(3):450-460.
Zhu X Y, Fu Z H, Qiao J J, et al. The correlation pattern and regional types of urban population and land use changes in the Yellow River Basin[J]. Journal of Northwest University (Natural Science Edition), 2024, 54(3): 450-460.

[8] Chakraborty S, Maity I, Dadashpoor H, et al. Building in or out? Examining urban expansion patterns and land use efficiency across the global sample of 466 cities with million + inhabitants[J]. Habitat International, 2022, 120: 102503.

[9] 谈明洪,李秀彬,吕昌河.20世纪90年代中国大中城市建设用地扩张及其对耕地的占用[J].中国科学(D辑:地球科学),2004,34(12):1157-1165.

[10] 吕晓,黄贤金.建设用地扩张的研究进展及展望[J].地理与地理信息科学,2013,29(6):51-58.
Lu X, Huang X J. Research progress and prospect of construction land expansion[J]. Geography and Geo-Information Science, 2013, 29(6): 51-58.

[11] 奥勇,毋冰龙,白召弟,等.基于类NPP-VIIRS夜间灯光数据的粤港澳大湾区城市建成区时空动态特征[J].地球科学与环境学报,2022,44(3):513-523.
Ao Y, Wu B L, Bai Z D, et al. Temporal-spatial changes of urban built-up area expansion in Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area, China based on NPP-VIIRS-like night light data[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2022, 44(3): 513-523.

[12] 印静,王婧,李裕瑞.中国县域城镇化和乡村发展的地域差异与协同类型[J].西北大学学报(自然科学版),2025,55(4):912-931.
Yin J, Wang J, Li Y R. Regional differences and synergistic types of county-based urbanization and rural development in China[J]. Journal of Northwest University (Natural Science Edition), 2025, 55(4): 912-931.

[13] 魏乐,周亮,孙东琪,等.黄河流域城市群扩张的时空格局演化及情景模拟:以呼包鄂榆城市群为例[J].地理研究,2022,41(6):1610-1622.
Wei L, Zhou L, Sun D Q, et al. The evolution of spatio-temporal pattern and scenario simulation of urban agglomeration expansion in the Yellow River Basin: A case study in the Hohhot-Baotou-Ordos-Yulin Urban Agglomeration[J]. Geographical Research, 2022, 41

- (6): 1610-1622.
- [14] 王柯文, 秦见, 马海涛. 基于CA-Markov模型的重庆西部新城城市扩张时空演化模拟与生态响应[J]. 中国科学院大学学报, 2023, 40(4): 496-505.
Wang K W, Qin J, Ma H T. Spatial-temporal evolution simulation and ecological response of urban expansion in Western New City of Chongqing based on CA-Markov model[J]. Journal of University of Chinese Academy of Sciences, 2023, 40(4): 496-505.
- [15] 党雪薇, 周亮, 胡凤宁, 等. 关中平原城市群扩张对生态用地的多尺度影响[J]. 生态学报, 2022, 42(7): 3020-3032.
Dang X W, Zhou L, Hu F N, et al. The multi-scale direct and indirect effects of urban expansion of Guanzhong Plain Urban Agglomeration on ecological land[J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(7): 3020-3032.
- [16] 欧阳晓, 王坤, 魏晓. 城乡建设用地关联对生态系统服务的影响:以洞庭湖地区为例[J]. 生态学报, 2022, 42(21): 8713-8722.
Ouyang X, Wang K, Wei X. Impacts of urban-rural construction land linkages on ecosystem services: A case study of Dongting Lake area[J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(21): 8713-8722.
- [17] 李广东, 戚伟. 中国建设用地扩张对景观格局演化的影响[J]. 地理学报, 2019, 74(12): 2572-2591.
Li G D, Qi W. Impacts of construction land expansion on landscape pattern evolution in China[J]. Acta Geographica Sinica, 2019, 74(12): 2572-2591.
- [18] Sun X M, Lian A X, Wang Z R, et al. Structural, functional, and resilience dynamics of ecological networks in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area: Impacts of climate and urbanization[J]. Journal of Environmental Management, 2025, 393: 126990.
- [19] 武爱彬, 陈辅国, 赵艳霞, 等. 京津冀城市群建设用地扩张多情景模拟及其对生态系统碳储量的影响[J]. 环境科学, 2024, 45(5): 2828-2839.
Wu A B, Chen F G, Zhao Y X, et al. Multi-scenario simulation of construction land expansion and its impact on ecosystem carbon storage in Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration[J]. Environmental Science, 2024, 45(5): 2828-2839.
- [20] Yang H, Wang Y W, Tu P Y, et al. Evaluating the effects of future urban expansion on ecosystem services in the Yangtze River Delta urban agglomeration under the shared socioeconomic pathways[J]. Ecological Indicators, 2024, 160: 111831.
- [21] 周烨. 城市化时空演变的多元多尺度分析及其扩张模拟预测研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2019: 81-82.
- [22] Li P X, Cao H. Comprehensive assessment on the ecological stress of rapid land urbanization per proportion, intensity, and location[J]. Ecosystem Health and Sustainability, 2019, 5(1): 242-255.
- [23] 王安国, 王建强, 王东东. 萍乡市土地利用变化及生态环境质量评价[J]. 气象与减灾研究, 2021, 44(1): 58-66.
Wan A G, Wang J Q, Wang D D. Study on land use change and evaluation of ecological environment quality of Pingxiang city[J]. Meteorology and Disaster Reduction Research, 2021, 44(1): 58-66.
- [24] 王春晓, 何建华, 刘殿锋, 等. 土地利用变化对鸟类栖息地连通性的影响:以鄂州市为例[J]. 生态学报, 2022, 42(10): 4197-4208.
Wang C X, He J H, Liu D F, et al. Impact of land use change on bird habitat connectivity: a case study in Ezhou City[J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(10): 4197-4208.
- [25] Mendoza-González G, Martínez M L, Lithgow D, et al. Land use change and its effects on the value of ecosystem services along the coast of the Gulf of Mexico[J]. Ecological Economics, 2012, 82(C): 23-32.
- [26] 习近平. 决胜全面建成小康社会夺取新时代中国特色社会主义伟大胜利: 在中国共产党第十九次全国代表大会上的报告[EB/OL]. (2017-10-27)[2026-06-10]. http://www.xinhuanet.com/politics/19ecpnc/2017-10/27/c_1121867529.htm.
- [27] 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.
- [28] Mu H R, Li X C, Wen Y Q, et al. A global record of annual terrestrial Human Footprint dataset from 2000 to 2018[J]. Scientific Data, 2022, 9(1): 176.
- [29] European Commission, Joint Research Centre, IEA. GHG emissions of all world countries[M]. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2023: 1-263.
- [30] 孔雪松, 蒋献佳, 程鹏. 中国11个集中连片特困区多维减贫与建设用地扩张的关联分析[J]. 中国土地科学, 2023, 37(5): 125-136.
Kong X S, Jiang X J, Cheng P. Correlation analysis between multi-dimensional poverty reduction and construction land expansion in eleven concentrated and contiguous poverty-stricken areas in China[J]. China Land Science, 2023, 37(5): 125-136.

- [31] 谢高地, 张彩霞, 张雷明, 等. 基于单位面积价值当量因子的生态系统服务价值化方法改进[J]. 自然资源学报, 2015, 30(8): 1243-1254.
Xie G D, Zhang C X, Zhang L M, et al. Improvement of the evaluation method for ecosystem service value based on per unit area [J]. Journal of Natural Resources, 2015, 30(8): 1243-1254.
- [32] 谢高地, 鲁春霞, 冷允法, 等. 青藏高原生态资产的价值评估[J]. 自然资源学报, 2003, 18(2): 189-196.
Xie G D, Lu C X, Leng Y F, et al. Ecological assets valuation of the Tibetan Plateau [J]. Journal of Natural Resources, 2003, 18(2): 189-196.
- [33] 谢高地, 张彩霞, 张昌顺, 等. 中国生态系统服务的价值[J]. 资源科学, 2015, 37(9): 1740-1746.
Xie G D, Zhang C X, Zhang C S, et al. The value of ecosystem services in China [J]. Resources Science, 2015, 37(9): 1740-1746.
- [34] 朱玉鑫, 姚顺波. 基于生态系统服务价值变化的环境与经济协调发展研究: 以陕西省为例[J]. 生态学报, 2021, 41(9): 3331-3342.
Zhu Y X, Yao S B. The coordinated development of environment and economy based on the change of ecosystem service value in Shaanxi Province [J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(9): 3331-3342.
- [35] 黄清瑶. 利益相关者对生态系统服务价值的影响分析: 以广东省为例[D]. 广州: 广州大学, 2023: 18-25.
- [36] Haygarth P M, Ritz K. The future of soils and land use in the UK: Soil systems for the provision of land-based ecosystem services [J]. Land Use Policy, 2009, 26: S187-S197.
- [37] 欧阳晓, 陈键, 魏晓, 等. 长江中游城市群生态韧性时空分异格局与演化机理[J]. 地理学报, 2025, 80(6): 1572-1584.
Ouyang X, Chen J, Wei X, et al. Spatiotemporal differentiation and evolutionary mechanism of ecological resilience in the middle reaches of the Yangtze River urban agglomeration [J]. Acta Geographica Sinica, 2025, 80(6): 1572-1584.
- [38] 丁文璐, 夏军, 姚成慧, 等. 基于压力-状态-响应和 TOPSIS 模型的德安县水生态承载力评价[J]. 武汉大学学报(工学版), 2022, 55(11): 1081-1089.
Ding W L, Xia J, Yao C H, et al. Evaluation of water ecological carrying capacity of De'an County based on PSR and TOPSIS models [J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2022, 55(11): 1081-1089.
- [39] 江孝君, 王小艳. 长江经济带区域经济综合水平的多尺度时空演化特征及驱动机理[J]. 长江流域资源与环境, 2024, 33(9): 1860-1873.
Jiang X J, Wang X Y. Characteristics of multi-scale spatio-temporal evolution and driving mechanisms of regional economic comprehensive level in the Yangtze River Economic Belt [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2024, 33(9): 1860-1873.
- [40] 谭术魁, 刘琦, 李雅楠. 中国土地利用空间均衡度时空特征分析[J]. 中国土地科学, 2017, 31(11): 40-46.
Tan S K, Liu Q, Li Y N. Spatial-temporal characteristics of spatial balance degrees on land use in China [J]. China Land Science, 2017, 31(11): 40-46.
- [41] Zhou W Q, Yu W J, Qian Y G, et al. Beyond city expansion: Multi-scale environmental impacts of urban megaregion formation in China [J]. National Science Review, 2022, 9(1): nwab107.
- [42] 张润森, 濮励杰, 文继群, 等. 建设用地扩张与碳排放效应的库兹涅茨曲线假说及验证[J]. 自然资源学报, 2012, 27(5): 723-733.
Zhang R S, Pu L J, Wen J Q, et al. Hypothesis and validation on the kuznets curve of construction land expansion and carbon emission effect [J]. Journal of Natural Resources, 2012, 27(5): 723-733.

(编辑 邵煜)