

1985—2023年汉江生态经济带建设用地图谱演变特征

安彬^{1,2,3}, 赵文静⁴, 肖薇薇^{2,3}

(1. 华东师范大学地理科学学院, 上海 200241; 2. 安康学院 陕南生态研究中心, 陕西 安康 725000;
3. 陕南乡村振兴研究中心, 陕西 安康 725000; 4. 安康学院 化学与环境学院, 陕西 安康 725000)

摘要: [目的] 探究城市化进程中汉江生态经济带建设用地图谱现象的时空演变规律, 为山区城镇国土空间规划、生态保护与灾害风险管理提供科学依据。[方法] 基于长时序土地利用(1985—2023年)及DEM数据构建出建设用地图谱与地形坡谱, 借助建设用地图谱、上限坡度等指标, 系统分析了汉江生态经济带建设用地图谱演变特征并识别其爬坡现象。[结果] (1) 1985—2023年汉江生态经济带建设用地扩张呈“缓慢—加速—快速”三阶段特征, 90%以上的建设用地分布在坡度 $\leq 11^\circ$ 区域, 平均坡度呈先降后升、总体下降态势。(2) 汉江生态经济带建设用地年均爬坡指数空间分异显著(陕西片区表现为先增后减趋势, 河南片区呈持续增加趋势, 湖北片区呈先减后增趋势), 各片区建设用地上限坡度皆保持相对稳定状态。(3) 汉江生态经济带县域建设用地图谱现象呈现显著的时空差异, 高爬坡型县域集中分布在安康市东部、十堰市辖区和南阳市辖区周边, 以十堰茅箭区爬坡程度最强, 低爬坡型县域主要分布在丹江口水库以东地区。水平扩展型县域数量以1985—1995年最多(61个), 高爬坡型在2005—2015年达到峰值(27个), 低爬坡型以1995—2005年最多(29个)。(4) 建设用地图谱现象既能够有效保护低坡($\leq 6^\circ$)地区的生产-生态空间, 同时也可能加剧高坡区的生态系统退化、土壤侵蚀模数增加、地质灾害易发性提升等环境风险。[结论] 坡谱方法可有效识别建设用地扩展的坡度敏感性, 建议通过差异化坡度管控优化山区国土空间布局, 未来需深化生态-经济风险联动研究。

关键词: 建设用地扩张; 坡谱; 爬坡指数; 上限坡度; 汉江生态经济带

中图分类号: F293.2

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2026)02-0345-10

Evolution characteristics of construction land slope spectrum in Hanjiang Ecological Economic Belt from 1985 to 2023

An Bin^{1,2,3}, Zhao Wenjing⁴, Xiao Weiwei^{2,3}

(1. School of Geographical Sciences, East China Normal University, Shanghai 200241, China; 2. Shaannan Eco-economy Research Center, Ankang University, Ankang, Shaanxi 725000, China; 3. Research Center for Rural Revitalization in Southern Shaanxi, Ankang, Shaanxi 725000, China; 4. School of Chemistry & Environment, Ankang University, Ankang, Shaanxi 725000, China)

Abstract: [Objective] This study explores the spatiotemporal evolution characteristics of the slope-climbing phenomenon of construction land in the Hanjiang Ecological Economic Belt (HEEB) during the urbanization process, aiming to provide a scientific basis for territorial spatial planning, ecological protection, and disaster risk management in mountainous cities and towns. [Methods] Based on long-time series land use data (1985—2023) and DEM (Digital Elevation Model) data, this study constructed the construction land slope spectrum and topographic slope spectrum. Using indicators such as construction land slope-climbing and the upper limit slope, it systematically analyzed the evolution characteristics of the construction land slope spectrum in HEEB and identified its slope-climbing phenomenon. [Results] (1) From 1985 to 2023, the expansion of construction land in HEEB exhibited three distinct stages: slow, accelerated, and rapid expansion. More than 90% of the construction

收稿日期: 2025-04-22

修回日期: 2025-06-27

接受日期: 2025-07-08

资助项目: 陕西省教育厅哲社重点研究基地项目(24JZ001); 安康学院大学生创新创业训练计划项目(S202411397072)

第一作者: 安彬(1988—), 男, 江西九江人, 博士在读, 副教授, 主要从事区域环境评价与地理大数据应用研究。E-mail: leyang1007@126.com

<https://stbeyj.publish.founderss.cn>

land was distributed in areas with slopes $\leq 11^\circ$ and the average slope showed a trend of first decreasing and then increasing, with an overall declining trend. (2) There was a significant spatial differentiation in the annual average construction land climbing index (ACLCI) of construction land in HEEB (the Shaanxi section showed a trend of first increasing and then decreasing, the Henan section presented a continuous increasing trend, and the Hubei section demonstrated a trend of first decreasing and then increasing). However, the upper limit slope (ULS) of construction land in each section remained relatively stable. (3) The slope-climbing phenomenon of construction land at the county level in HEEB showed significant spatiotemporal heterogeneity. The high slope-climbing counties were concentrated in eastern Ankang City, within the jurisdiction of Shiyang City, and around Nanyang City, with Maojian District in Shiyang City exhibiting the most significant slope-climbing intensity. The low slope-climbing counties were primarily distributed to the east of the Danjiangkou Reservoir. The peak number of horizontally-expanding counties was 61 during 1985—1995. The number of high-climbing counties reached a peak of 27 during 2005—2015, while the number of low-climbing counties was highest during 1995—2005 (29). (4) The slope-climbing phenomenon of construction land effectively protected production-ecological spaces in low-slope ($\leq 6^\circ$) areas but might also exacerbate environmental risks in high-slope regions, including ecosystem degradation, increased soil erosion modulus, and heightened susceptibility to geological hazards. [Conclusion] The slope spectrum method can effectively identify the slope sensitivity of construction land expansion. It is suggested to optimize the territorial spatial layout of mountainous areas through differentiated slope management and control, and to further strengthen research on the linkage between ecological and economic risks in the future.

Keywords: construction land expansion; slope spectrum; climbing index; upper limit slope; Hanjiang Ecological Economic Belt (HEEB)

城市化是人类居住模式变化中持续发生的现象,全球城市人口占总人口的比例由1950年的30%增至2023年的56%,预计到2050年将达到70%^[1]。中国城镇化进程始终围绕着区域经济发展的主线展开,2023年末常住人口城镇化率达到66.16%,较1949年末提高了55.52个百分点^[2];与此同时,全国建设用地总面积从1984年的24.81万km²增至2019年的40.86万km²,其中2009—2019年间净增加8.53万km²^[3]。当前,中国将推进农业转移人口市民化作为新型城镇化战略的首要任务,未来建设用地供需矛盾可能将进一步加剧^[4]。面对上述现实困境,政府决策者先后采取了城乡建设用地增减挂钩、低丘缓坡荒滩等未利用土地开发利用措施^[3],例如陕西延安、云南昆明、甘肃兰州等城市开展了大规模“削山造地、上山造城”工程^[5-7],在一定程度上缓解了国土空间开发建设的压力。近年来,全球城市建设用地趋向高坡地区发展^[8],中国也由早期的二维“摊大饼”模式转向“垂直增长—水平扩张”交替推进的三维发展模式^[9]。在此背景下,学者们从“第三维”视角出发,借助单一高程指数^[10]、“高程-坡度”地形梯度^[11]、地形起伏度^[12]、坡谱等^[3,8,13]多种参数,对建设用地的垂直增长模式及其演变特征与内在机制展开深入研究。大量研究表明,坡谱信息可直观定性地揭示建设用地爬坡现象^[8,13-15]。基于该指标,Shi等^[8]发研究

现全球城市用地坡谱峰值由25.67%(2000年)降至24.98%(2018年),其中亚洲城市用地爬坡现象最为突出;周亮等^[3]发现中国建设用地平均坡度由2.92°(1990年)升至3.53°(2018年),中西部山地与丘陵地貌城市的爬坡程度最高,且与地形平均坡度及人口增长呈显著正相关^[16];2000—2020年黄河中游地区有68.45%的县域出现建设用地爬坡现象,尤以土石山区最为突出^[17];深圳市建设用地表现出“爬坡为主、填海共存”的坡谱特征^[14],贵阳市新增建设用地平均坡度持续变陡^[15],2000—2020年兰州市建设用地平均坡度约增加了50%^[7],滇池流域建设用地扩张模式由“向湖-降海拔”转变为“爬坡-升海拔”^[5]。彭秋志等^[18]基于人口集聚势能-人均规模门槛-用地比率门槛的判别指标识别出中国311个潜在的重点爬坡县域,这些县域主要分布于南方山地丘陵区。以上研究充分表明,建设用地爬坡现象具有显著的时空异质性,然而现有研究多集中于大空间尺度^[3,8-9,18]或者单一地貌类型区^[7,14-15],对多地貌类型并存、生态环境脆弱敏感的汉江生态经济带的长时序爬坡规律尚缺乏系统分析。

党的十八大以来,中国确立了以流域为基本单元的“江河战略”,旨在统筹推进江河保护治理与流域高质量发展^[19]。汉江生态经济带既是中国西北地区通江达海的关键通道,也是南水北调中线工程的

重要水源涵养区^[20],其土地利用变化主要表现为林地和耕地之间的互转以及建设用地的持续转入。由于该地区地形复杂、地貌类型多样,土地利用空间受限形成了显著的地形梯度效应,在“山高坡陡”的高地形位出现建设用地扩张现象^[12]。境内秦巴山区、鄂西北中低山区属于地质灾害高易发区^[20],坡地建设进一步加剧了地质灾害发生的潜在风险^[3]。据此,本文基于长时序(1985—2023年)土地利用及数字高程(Digital Elevation Model, DEM)数据,构建地形坡谱和建设用地坡谱信息,结合爬坡指数与上限坡度指数,系统分析汉江生态经济带建设用地坡谱演变特征及其多尺度爬坡规律,以深化对复杂山地城市垂直空间扩张过程的认识,并为城镇空间结构优化与地质灾害风险防控提供理论支撑。

1 数据与方法

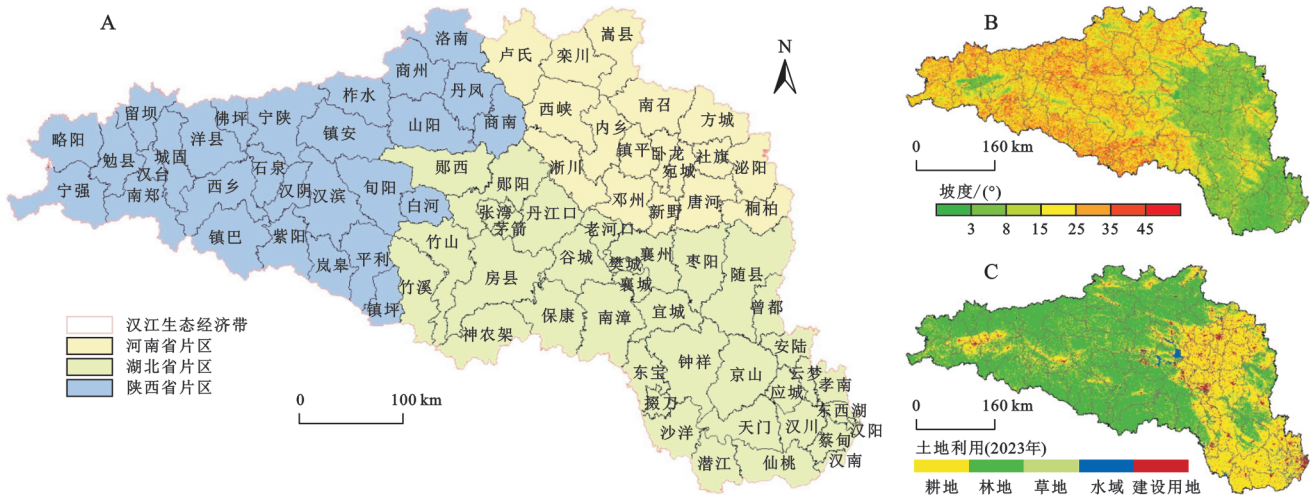
1.1 研究区概况

汉江生态经济带(105°29′—114°18′E, 30°4′—34°26′N)是依托汉江流域形成的跨区域经济区,覆盖湖北、陕西与河南3省的16个市(林区)共84个县(市/区),规划总面积为19.16万km²(图1),是连接长江经济带和新丝绸之路经济带的重要战略通道之一^[20]。境内地势总体东低西高,坡度东缓西陡,东部江汉平原是为我国重要的商品粮生产基地,中西部则分布有秦巴山、桐柏山、伏牛山等重要生态屏障^[12]。全区属于亚热带季风气候,年均气温与降水

量自东南向西北递减;丹江口水库作为南水北调中线工程的核心水源地,截至2024年已累计调水超过767亿m³。2022年末,研究区常住人口为4 113.57万人,地区生产总值(Gross Domestic Product, GDP)为3.16万亿元,分别较2017年减少7.44%、增加41.07%。自1999年以来,退耕还林、天然林保护等生态工程的实施显著改善了区域生态环境,但随着《汉江生态经济带发展规划》及新型城镇化战略的推进,该地区人口-经济-社会城镇化水平不断提高,部分地区生态环境脆弱性亦有所加剧^[21]。

1.2 数据来源

本文所选用的土地利用数据源自武汉大学黄昕教授团队研发的中国年土地覆盖数据集(China Land Cover Dataset, CLCD, <https://zenodo.org/records/12779975>),时间跨度为1985—2023年。该产品基于谷歌地球引擎(Google Earth Engine, GEE)平台整合海量Landsat数据生成,并采用目视解译独立样本与第三方验证样本评估进行精度评价,总体准确率达80%,能够有效反映中国快速城市化进程及一系列重大生态工程的实施效果^[22],具有时空一致性好、空间分辨率高(30 m)和应用广泛等优点^[5,12]。数字高程数据(DEM)来源于美国航天飞机雷达地形任务(SRTM-GL1, <https://lpdaac.usgs.gov/products/srtmgl1v003/>),缺失区域由ASTER GDEM2数据进行填补^[3],该数据具备高空间分辨率(30 m)与垂直精度(10 m),能够支持坡度信息的精确提取^[8]。



注:基于标准地图服务系统下载的审图号GS(2023)2763号的标准地图制作,底图未做修改,下同。

图1 汉江生态经济带位置示意、坡度及土地利用分布

Fig. 1 Spatial distribution of location, slope, and land use in Hanjiang Ecological Economic Belt (HEEB)

1.3 研究方法

1.3.1 地形坡谱和建设用地坡谱构建 为直观分析建设用地的坡度分布特征,本研究依据坡谱地学分析方法,构建研究区地形坡谱与建设用地坡谱^[3,23]。

该方法最初由Tang等^[23]在黄土高原地形地貌分区研究中提出,后逐渐拓展应用于土地利用坡谱分析^[3,7,14-16],能够精细刻画土地利用类型在坡度区间的分布特征与偏好^[5]。基于DEM栅格数据,利用

ArcGIS 软件中的“Slope”和“Int”工具^[14],以 1° 为坡度步长,分别提取各坡度区间内的坡度栅格面积和建设用地栅格面积^[3,5]。具体计算公式为:

$$CF_i = C_i / C \times 100\% \quad (1)$$

$$LF_i = L_i / L \times 100\% \quad (2)$$

式中: CF_i 、 LF_i 分别为坡度 i 的建设用地面积占比和土地面积占比(%); i 为坡度区间编号, $i=0$ 所对应的坡度为 0° , $i=1$ 所对应的坡度为 $(0^\circ, 1^\circ]$,以此类推; C_i 、 L_i 分别为坡度 i 的建设用地面积和土地面积(km^2); C 、 L 分别为建设用地总面积和土地总面积(km^2)。

此外,以坡度为横坐标、面积占比为纵坐标绘制坡谱曲线^[5,7]。若 $LF_i=CF_i$ 时,意味着地形坡谱曲线与建设用地坡谱曲线相交,将此时坡度 i 记为拐点 T ;当 $LF_i < CF_i$ 时,表明坡度高于 T 的地形区域为建设用地分布的劣势区,反之为优势区^[3,7]。同时,借助偏度系数(Sk)和峰度系数(Ku)来描述波谱曲线的分布特征^[24]。

1.3.2 爬坡指数 为定量探究建设用地爬坡强度,利用某一时段内建设用地分布的优势区面积占比变化计算爬坡指数(Construction Land Climbing Index, CLCI)^[7,16-17],公式为:

$$CLCI = (CT_m / C_m - CT_n / C_n) \times 100\% \quad (3)$$

$$ACLCI = CLCI / (m - n) \quad (4)$$

式中:CLCI为建设用地爬坡指数; CT_m 、 CT_n 分别为 m 、 n 年建设用地在高于坡度拐点 T 的总面积(km^2); C_m 、 C_n 分别为 m 、 n 年建设用地总面积(km^2);Average Construction Land Climbing Index (ACLCI)为 $(m-n)$ 年建设用地的平均爬坡指数,若 $ACLCI > 0$,表明建设用地出现爬坡现象,且 $ACLCI$ 越大爬坡程度越强烈。

1.3.3 上限坡度指数 借助前人研究成果^[5,14-15],按照坡度由小到大的顺序计算建设用地面积占比累计值(Cumulative Fraction, CF),当CF达到95%,99%时,将其所对应的坡度值分别记为主要上限坡度(95% Upper Limit Slope, $ULS_{95\%}$)、极限上限坡度(99% Upper Limit Slope, $ULS_{99\%}$)。进一步计算某一时段内上限坡度变化值(ΔULS)^[3,8,16],当 $\Delta ULS > 0$ 时,意味着该时段内建设用地倾向高坡度地区发展,反之倾向低坡度地区发展。

2 结果与分析

2.1 生态经济带尺度建设用地坡谱特征

研究时期内,汉江生态经济带建设用地面积由1985年的 $2\,380.82\text{ km}^2$ 增至2023年的 $6\,297.98\text{ km}^2$,

年均增长率为 1.32% (图2A);其扩张过程经历了“缓慢—加速—快速”的阶段性特征,以2005—2015年扩张速度最高($135.12\text{ km}^2/\text{a}$),该规律与全球^[8]、中国^[3]、郑州^[11]、滇池流域等^[5]地区相似,一定程度上反映了中国城镇化建设由快速发展阶段向减速提质阶段的转变^[2]。汉江生态经济带整体地形平均坡度达到 17.05° ,建设用地分布的平均坡度呈现出先降后升、总体略降的态势,由 5.45° (1985年)逐渐下降至 5.35° (2005年),之后微升至2023年的 5.36° 。该值明显高于1990—2018年中国建设用地的平均坡度值($2.92^\circ \sim 3.53^\circ$)^[3,16],略低于贵阳市($5.40^\circ \sim 6.60^\circ$)^[15],表明区域内建设用地的分布偏好与背景地形之间具有较强关联性^[25]。

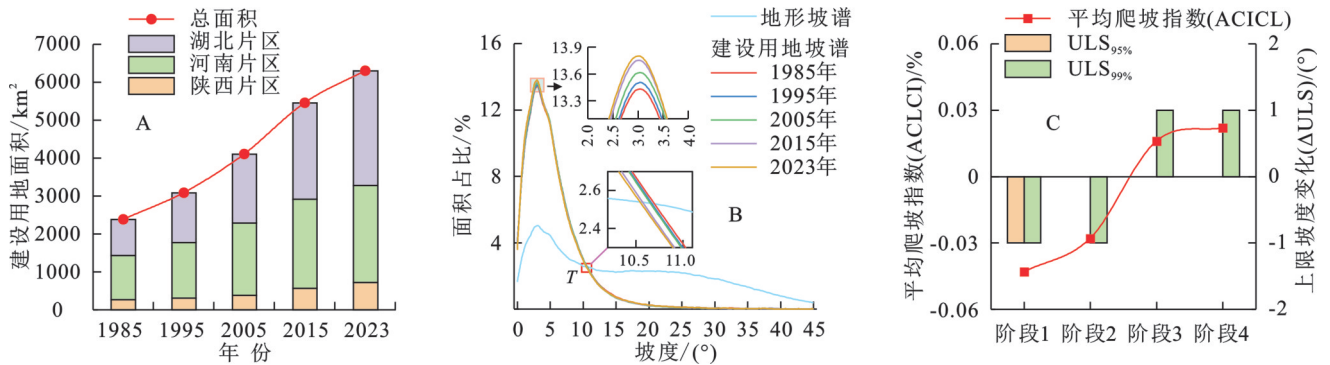
研究区地形坡谱与各时期建设用地的坡谱曲线均呈正偏态分布,其峰值均位于 $3^\circ \sim 4^\circ$ 坡度区间,高于多数城市 $1^\circ \sim 2^\circ$ 峰值区间^[3,14]。建设用地坡谱曲线的偏态系数与峰度系数随时间呈微弱上升趋势,表明研究区建设用地朝着非正态分布方向演化(图2B)。进一步统计发现,各期建设用地坡谱与地形坡谱曲线在 $10^\circ \sim 11^\circ$ 坡度区间相交,意味着 11° 以下区域为汉江生态经济带建设用地的优势分布区,占建设用地总面积比例始终稳定在90%左右,其中1985—2005年该比例上升了 0.71% ,而2005—2023年则下降了 0.33% 。对不同时段建设用地年均爬坡指数(ACLCI)及上限坡度变化值(ΔULS)进行计算(图2C),发现1985—2005年间ACLCI、 $\Delta ULS_{95\%}$ 和 $\Delta ULS_{99\%}$ 均 ≤ 0 ,显示该阶段建设用地扩展趋向低坡度区域;2005—2023年间ACLCI和 $\Delta ULS_{99\%}$ 转为正值,表明该阶段建设用地倾向高坡地区发展,其中2015—2023年间的ACLCI达到最高值(0.022),爬坡趋势最为显著。

2.2 区域尺度建设用地坡谱特征

汉江生态经济带建设用地的扩张速度及坡谱分布特征呈现出明显的区域差异与阶段性变化。具体来看,建设用地主要分布在河南和湖北两个片区,约占研究区建设用地总面积的90%;1985—2023年新增建设用地面积以湖北片区最多($2\,073.38\text{ km}^2$),河南片区次之($1\,389.38\text{ km}^2$),陕西片区最少(454.41 km^2),年均扩张幅度依次为湖北片区($54.56\text{ km}^2/\text{a}$) $>$ 河南片区($36.56\text{ km}^2/\text{a}$) $>$ 陕西片区($11.96\text{ km}^2/\text{a}$),其中以2005—2015年湖北片区扩张最为剧烈($71.97\text{ km}^2/\text{a}$) (图2A)。这种差异是自然地理要素(地形地貌、气候环境等)与社会经济因素(城镇化水平、国土开发政策等)共同作用、动态博弈的结果^[11,17]。从坡度特征来看,陕西片区地形及建设用地分布的平均坡度最高,湖北片区次之,河南片区最低(图3)。陕西片区建设用地平均坡度持续降低,从1985年的 7.56° 逐

渐降至2023年的 6.45° ,河南片区呈缓慢上升趋势,由 5.03° (1985年)增至 5.13° (2023年),湖北片区在

1985—2015年间略有下降(-0.10°),2015—2023年间则微弱上升(0.02°)。



注:阶段1—4分别表示1985—1995年、1995—2005年、2005—2015年和2015—2023年,下同。

图2 汉江生态经济带不同时期建设用地面积、坡谱、平均爬坡指数和上限坡度变化

Fig. 2 Changes in construction land area, slope spectrum, ACLCI and ULS in different periods of HEEB

由图3A可知,陕西片区地形坡谱呈负偏态分布(偏度系数 $Sk < 0$,峰度系数 $Ku < 0$),峰值位于 24° 附近,其面积占总面积的 3.29% ;湖北与河南片区地形坡谱均呈正偏态分布($Sk > 0, Ku > 0$),其峰值皆位于 3° 附近,对应面积占各片区总面积的 7.29% 。三个片区各时期建设用地坡谱曲线亦呈正偏态分布($Sk > 0, Ku > 0$),峰值皆集中在 3° 附近,其中河南片区的 Sk 最高且相对稳定($1.93 \sim 1.94$),湖北与陕西片区的 Sk 持续增加,增加幅度分别达到 $0.12, 0.20$,意味着这两片区建设用地向非正态分布方向演化更为明显。受自然地形的影响,河南与湖北片区各时期建设用地与地形坡谱曲线的相交点(即拐点 T)分别处于 $9^\circ \sim 10^\circ, 10^\circ \sim 11^\circ$ 坡度区间,陕西片区则由2015年之前的 $12^\circ \sim 13^\circ$ 略降至之后的 $11^\circ \sim 12^\circ$,表明陕西片区建设用地优势区分布的坡度最高,湖北次之,河南最低。此外,1985—2023年湖北与陕西片区建设用地在优势分布区的面积占比分别提高了 $3.04\%, 0.47\%$,河南片区则减少了 0.60% 。

汉江生态经济带各片区建设用地的年均爬坡指数(ACLCI)和上限坡度(ULS)呈现明显区域差异(图3B)。例如陕西片区ACLCI表现出先增后减趋势,在2005—2015年达到最高(0.049%),即该时段建设用地存在明显爬坡现象;建设用地的主要上限坡度($ULS_{95\%}$)和极限上限坡度($ULS_{99\%}$)以减少或者不变趋势为主,仅1995—2005年 $ULS_{99\%}$ 略有上升,由 33° 微升至 34° 。河南片区ACLCI始终为正值且持续上升,1985—1995年仅为 0.002% ,2015—2023年增加至 0.049% , $ULS_{95\%}$ 与 $ULS_{99\%}$ 则较为稳定,表明该区建设用地爬坡程度随时间逐渐增强。湖北片区ACLCI呈先减后增趋势,2005年后的两个时段均显示建设用地向高坡度地区扩张,ACLCI分别为 $0.023\%, 0.021\%$; $ULS_{95\%}$ 持续稳定在 13° 附近, $ULS_{99\%}$ 则呈先

减后增态势,其总体变化幅度较小。

2.3 县域尺度建设用地坡谱特征

经统计,汉江生态经济带县域地形平均坡度介于 2.98° (湖北应城) $\sim 27.96^\circ$ (湖北神农架),总体呈现出以 $4^\circ \sim 6^\circ$ 和 $22^\circ \sim 26^\circ$ 为主的哑铃型分布,分别占县域总数的 $25.0\%, 22.6\%$ (图4A)。县域建设用地平均坡度从1985年的 3.25° (湖北仙桃) $\sim 12.96^\circ$ (陕西白河)逐渐降至2023年的 3.04° (湖北仙桃) $\sim 12.92^\circ$ (陕西紫阳),且主要分布在 $4^\circ \sim 7^\circ$ 区间,其数量占县域总数的 58.3% 以上,表明该区域建设用地具有明显的趋平特征,与中国城镇扩张过程中“择平而建”的模式一致^[15,25]。然而,县域建设用地年均爬坡指数(ACLCI)平均值仅在2005—2015年为正值(0.0172),其他时段皆为负值;1985—1995年ACLCI为正值的县域有22个,之后各时段基本稳定在38个左右。建设用地坡谱与地形坡谱曲线相交(即拐点 T)以 $10^\circ \sim 12^\circ$ 区间内的县域数量最多(20个),占县域总数的 23.8% , $8^\circ \sim 10^\circ$ 区段内次之(13个)。研究区建设用地 $ULS_{95\%}$ 由1985年的 $8^\circ \sim 35^\circ$ 逐渐降低至2023年的 $7^\circ \sim 32^\circ$,以 $11^\circ \sim 13^\circ$ 区段内县域数量最多,由1985年的19个逐渐减少至2015年的15个,2023年又回升至23个(图4B)。需要关注的是,建设用地ACLCI与 $ULS_{95\%}$ 之间的显著差异一定程度上反映了区域开发强度与地形约束的复杂互动关系。整体而言,汉江生态经济带地形坡度对建设用地 $ULS_{95\%}$ 具有较强的指示作用($p < 0.01$),且 $ULS_{95\%}$ 取值范围随地形坡度增加有所扩大(图4C),与建设用地“坡少则少爬、坡多未必多爬”的现象相吻合^[25]。例如,地处汉中盆地的勉县和南郑地形平均坡度达到 20° 左右,而建设用地平均坡度和 $ULS_{95\%}$ 分别在 $4^\circ \sim 5^\circ, 10^\circ \sim 11^\circ$ 附近,体现了这些县域在建设用地扩张过程中合理利用平坦地形区,有效规避了滑坡等地质灾害风险。

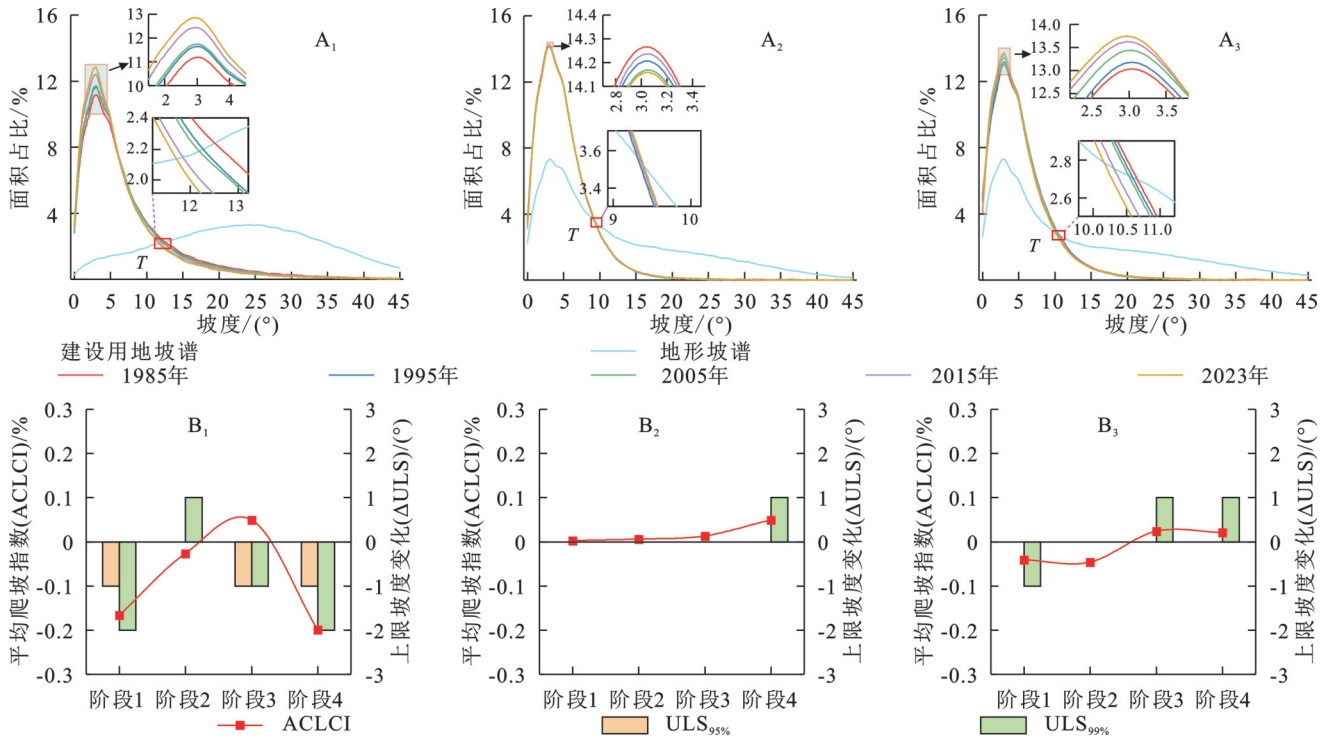


图3 汉江生态经济带不同区域建设用地坡谱、平均爬坡指数和上限坡度变化

Fig. 3 Changes in slope spectrum, ACLCI and ULS of construction land in different regions of HEEB

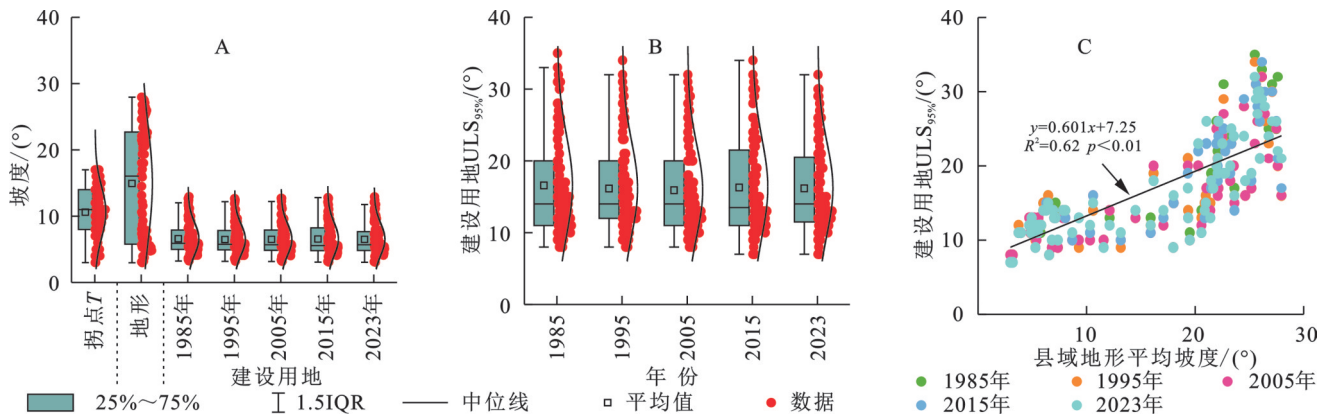


图4 汉江生态经济带县域地形和建设用地平均坡度、主要上限坡度及其关系统计

Fig. 4 Statistics of terrain and average slope of construction land, main upper limit slope, and their relationships at county level of HEEB

基于建设用地的平均爬坡指数(ACLCI)和主要上限坡度变化值($\Delta ULS_{95\%}$),将县域建设用地爬坡现象归为四类:高爬坡型($ACLCI > 0$ 且 $\Delta ULS_{95\%} > 0$)、低爬坡 I 型($ACLCI > 0$ 且 $\Delta ULS_{95\%} \leq 0$)、低爬坡 II 型($ACLCI \leq 0$ 且 $\Delta ULS_{95\%} > 0$)和水平扩展型($ACLCI \leq 0$ 且 $\Delta ULS_{95\%} \leq 0$)^[3,17]。由图 5 可知,1985—1995 年汉江生态经济带建设用地存在爬坡现象的县域相对较少(23 个),占县域总数的 27.38%,以低爬坡 I 型最多(17 个),空间上集中分布在十堰市辖区—南阳桐柏一带及武汉市辖区周边;高爬坡型县域仅有 5 个,以武汉东西湖爬坡程度最强($ACLCI = 0.147\%$, $\Delta ULS_{95\%} = 1$)。1995—2005 年建设用地爬坡型县域增加至 39 个,占县域总数的 46.43%,仍以低爬坡 I

型最多(29 个),新增县域主要位于秦岭南部的安康市和商洛市;高爬坡型县域数量较前一阶段翻倍,但其空间分布相对分散,以安康旬阳、荆门东宝爬坡程度最为强烈,二者 ACLCI 均超过了 0.25% (图 5B)。2005—2015 年建设用地爬坡型县域数量与前一阶段相当,但高爬坡型成为主导类型(27 个),形成以安康紫阳—十堰郧阳—襄阳南漳合围区域为核心的集聚分布区,次要分布区包括秦岭南麓的汉中略阳—商洛柞水、南阳市辖区西部及荆门市东部县域,其中十堰市辖区的爬坡程度最大($ACLCI > 0.996\%$);低爬坡 I 型县域共有 11 个,多位于河南片区西北部(图 5C)。2015—2023 年爬坡型县域进一步增至 40 个,占县域总数的 47.62%,高爬坡型与低爬

坡 I 型县域数量一致(19个),其中高爬坡型县域集中分布于十堰及南阳西南部地区,仍以十堰市辖区

爬坡程度最高($ACL CI > 0.769\%$),而低爬坡 I 型县域则集中分布在河南片区(图 5D)。

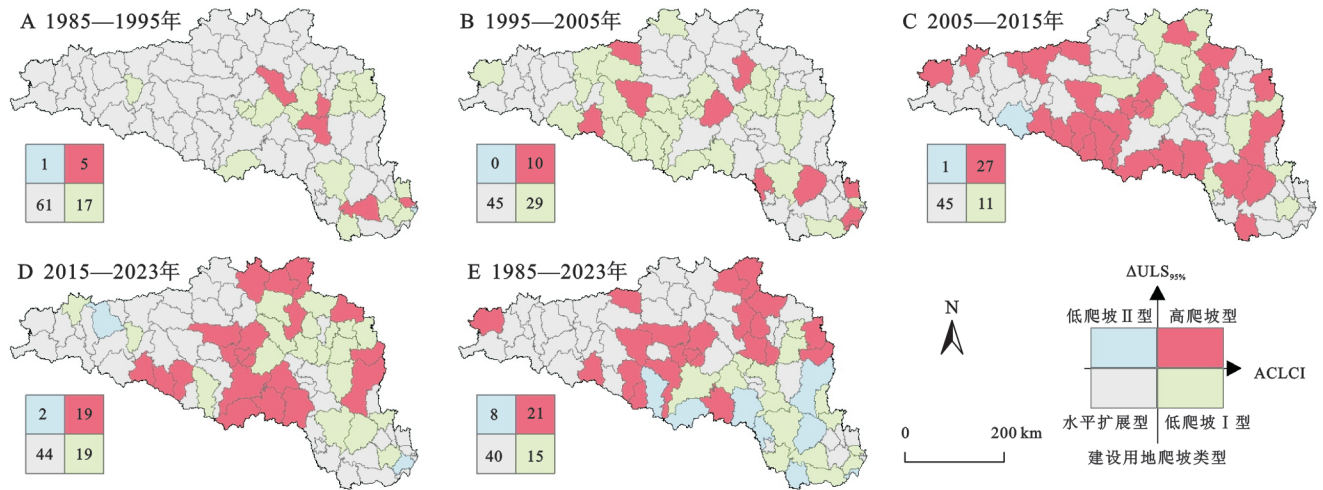


图5 1985—2023年汉江生态经济带建设用地爬坡类型空间分布

Fig. 5 Spatial distribution of construction land climbing types in HEEB (1985—2023)

整体来看,1985—2023年汉江生态经济带爬坡型县域(44个)占县域总数的一半以上,其中22个县域属于高爬坡型,集中分布于安康市东部、十堰市辖区及西部地区,以及南阳市辖区周边区域(图 5E),以十堰茅箭爬坡程度最为显著($ACL CI = 0.504\%$, $\Delta ULS_{95\%} = 9$);低爬坡 I 型和 II 型县域分别为 15 个、8 个,主要分布在丹江口水库以东的广大地区。进一步发现,研究时段内建设用地呈高爬坡型县域主要受 2005—2015 年和 2015—2023 年两个阶段的共同影响,十堰市辖区、安康紫阳、平利、旬阳及东秦岭嵩县、栾川等县域尤为典型。受“九山半水半分田”土地资源条件的限制,十堰市政府自 2008 年起推行“向山要地”“工业梯田”(即对高差相对较大的山地丘陵地区采取“坡改梯”建设立体化工业园)等新型土地利用模式^[6],导致建设用地面积翻番并呈现出较强的爬坡趋势。秦岭南麓沿线县域地势陡峻,适宜城镇开发的平坦土地资源稀缺,在严格遵循秦岭生态保护政策的前提下,城镇化发展表现出较强的空间约束。

3 建设用地爬坡现象的影响

3.1 对耕地的影响

城镇建设在促进区域经济发展和提升民生福祉方面发挥着重要作用^[14]。然而,建设用地空间扩张过程伴随着生产空间(耕地)与生态空间(林地、草地)的持续性侵占^[26-27],且受其固有的非生态属性及不可逆性特征制约^[3],爬坡现象已引发耕地资源流失、生态服务功能衰退等多重负面效应^[7,26]。不同的是,全球范围内(2000—2020 年)的城市用地爬坡现象理论上节约了 4.67 万 km^2 耕地资源^[13],特别是对优质的平缓耕

地的保护^[3]。汉江生态经济带建设用地主要来自于耕地转入,其对建设用地扩张的贡献率高达 90.12%;在坡度 $\leq 2^\circ$ (平缓区), $2^\circ \sim 6^\circ$ (缓坡区)和 $6^\circ \sim 25^\circ$ (斜坡区)的耕地面积占耕地总面积的比例分别为 20.73%~21.28%, 36.97%~38.07%, 37.44%~37.77%。参考前期相关研究^[3,17],对研究区不同时期新增建设用地面积侵占不同坡度等级耕地面积与建设用地侵占耕地总面积的比例(P_{CF})进行计算(图 6A),发现 P_{CF} 在缓坡区最高(平均为 46.07%)且表现出显著减少趋势,斜坡区(29.10%)与平缓区(25.32%)大致相当且均略有增加。对于平缓区 P_{CF} 而言,水平扩展型县域表现出不降反升规律,研究时段内净增加了 3.92%,与周亮等^[3]在全国尺度上的发现一致;高爬坡型和低爬坡型县域则分别下降了 3.72%, 0.84%,意味着建设用地爬坡现象在一定程度上缓解了平原耕地的侵占压力。研究时段内,缓坡区 P_{CF} 在各爬坡类型县域中均有所下降,以高爬坡型降幅最大(-5.31%)。在斜坡区,水平扩展型县域的 P_{CF} 保持下降态势(2.84%),而高爬坡型县域从 1985—1995 年的 25.90% 上升至 2015—2023 年的 34.44%,净增加了 8.54%,这反映出汉江生态经济带建设用地向陡坡要地的趋势有所加剧,可能引发山区人均耕地减少、粮食自给能力下降等农户生计问题。

3.2 对生态用地的影响

随着地形坡度的升高,建设用地在爬坡过程中对耕地的占用逐渐转为对生态用地的侵占^[7]。汉江生态经济带内的林草生态用地集中分布在丹江口水库以上区域及神农架林区,其中位于斜坡区(坡度 $6^\circ \sim 25^\circ$)和陡坡区($> 25^\circ$)的生态用地占生态用地总面积的比例分别超过 51% 和 41%^[12]。对不同时期

新增建设用地面积侵占不同坡度等级生态用地占建设用地侵占生态用地总面积的比例(P_{CE})进行计算(图 6B),发现县域建设用地在平缓区和缓坡区的 P_{CE} 皆呈波动减少趋势,以高爬坡型降幅最为明显,下降幅度分别为 31.21%,11.29%。在斜坡区,高爬坡县域的 P_{CE} 表现出显著增加趋势(33.49%),远高于低爬坡型(11.85%)和水平扩展型(5.09%),说明爬坡现象能降低建设用地对平缓生态用地的影响程度^[17]。随着天然林资源保护等生态修复工程的实施,汉江经济带内生态用地面积持续增加,特别是坡度 $>6^\circ$ 的斜坡和陡坡区域^[12],加之生态用地对新增建设用地的

贡献率相对较低($<10\%$),其向建设用地的转化过程并非生态质量退化的主要驱动因素,表明建设用地向周边坡地扩展对生态用地的整体影响较为有限。与此同时,建设用地爬坡可依地形地貌就势营造更富有特色的城市景观^[11],如旬阳老城区“满城灯火列星案,一曲旬水绕太极”的空间意象,展现了山地城镇独特的历史文化风貌。但也应认识到,建设用地爬坡过程中的地形改造(如开挖、回填等)易引发生态级联扰动效应^[7],导致生态景观破碎化及连通性降低^[28],加剧水土流失和滑坡等地质灾害风险^[3],农村居民点的爬坡扩张更可能造成显著的生物栖息地丧失^[29]。

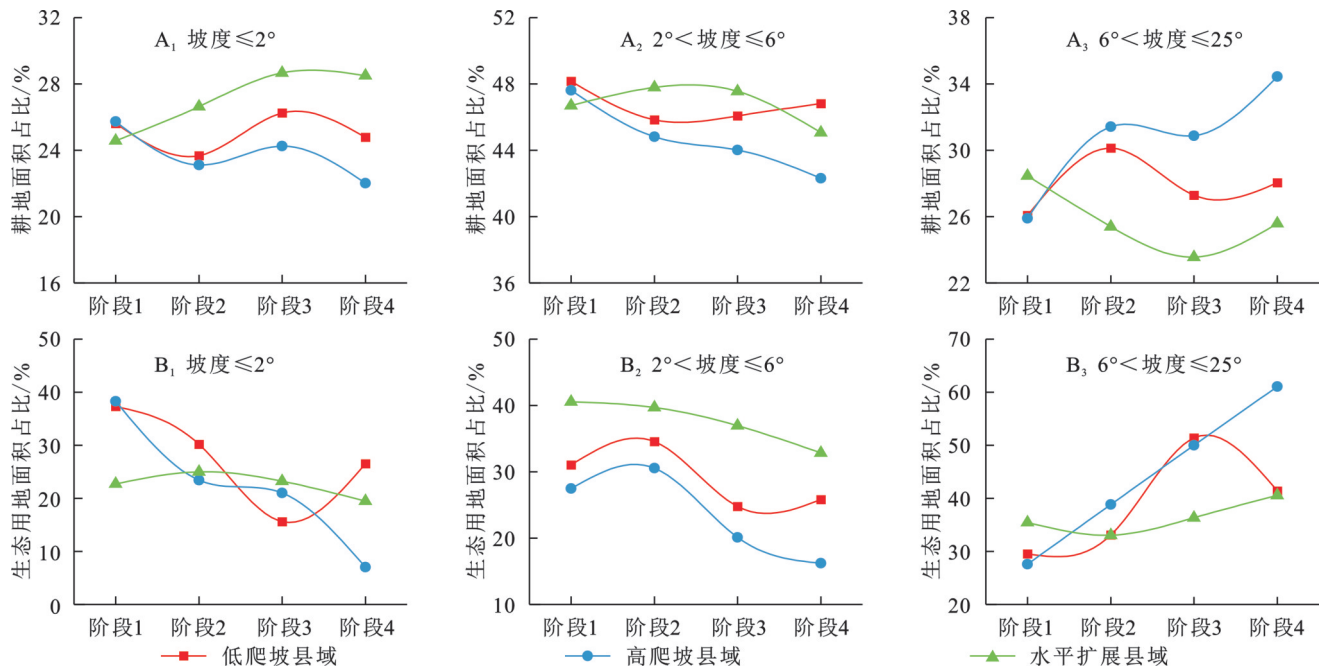


图 6 汉江生态经济带新增建设用地占用耕地和生态用地面积的比例变化

Fig. 6 Changes in proportion of newly added construction land occupying arable land and ecological land areas in HEEB

4 讨论与结论

4.1 讨论

建设用地作为人类活动对地表形态改造最显著的表现形式,其规模动态变化是反映区域社会发展程度的重要表征指标^[11,30]。在城镇化进程中,受自然地理环境约束、城乡发展梯度差异以及国土空间规划政策调控等多重因素驱动,建设用地的“垂直增长与水平扩张”协同演化模式日益显著^[5,11],尤其是山地型城镇的垂直扩张表现出更强的空间异质性^[3,5,14-17]。在汉江经济带县域尺度上,建设用地平均坡度及主要上限坡度变化值与关键地形因子(坡度、海拔、地形位指数)均呈现出高度显著的相关性($p < 0.001$),Spearman 秩相关系数分别为 0.57~0.77,0.63~0.81,体现了区域地形地貌条件对建设用地扩张的显著约束作用^[18,25]。汉江生态经济带内约半数县域的建设用地存在爬坡现象,高爬坡型县域

集中分布于安康东部、十堰市辖区及周边、南阳市辖区邻近区域,低爬坡型则广泛分布在丹江口水库以东地区。值得注意的是,本研究所识别出的爬坡型县域多属农业生产与生态保护重点区域,未来坡地开发须坚持节约集约原则,完善低丘缓坡开发评估标准与防灾规范,制定差异化坡地供给政,并加强新增与存量建设用地的整合优化^[25]。

低丘缓坡土地开发是实现山区城镇化与生态保护协调发展的重要路径^[3,5]。本研究实证表明,汉江生态经济带内不同时期新增建设用地对耕地和生态用地的占用比例具有明显的坡度梯度差异,高爬坡型县域在平缓区(坡度 $\leq 2^\circ$)的占用比例呈减少态势,而在斜坡区($6^\circ \sim 25^\circ$)占用比例显著上升。这种建设用地垂直扩张模式具有显著的双重效应:既能够有效保护平原及缓坡地区的生产—生态空间^[3,16-17],同时可能加剧高坡度区域的生态系统退化、土壤侵蚀及地质灾害风险^[7,28]。此外,受县域社会经济数据完整性的

限制,本研究未能进一步探讨建设用地爬坡的动态演化机制。后续工作中,应融合多源时空数据并构建“自然基底—人类活动—政策调控”耦合模型,引入机器学习算法识别建设用地爬坡行为的关键驱动因素。

4.2 结论

(1) 1985—2023年汉江生态经济带建设用地经历了“缓慢—加速—快速”的阶段性扩张,年均增加速率为1.32%,优势分布区在坡度 11° 以下地区,扩张幅度由高到低依次为湖北片区($54.56 \text{ km}^2/\text{a}$)>河南片区($36.56 \text{ km}^2/\text{a}$)>陕西片区($11.96 \text{ km}^2/\text{a}$)。

(2) 汉江生态经济带建设用地年均爬坡指数(ACLCI)和上限坡度(ULS)的变化存在较大差异。1985—2023年建设用地总体分布的平均坡度呈先降后升、总体下降态势,陕西片区持续降低,河南片区持续升高,湖北片区由小幅降低(-0.10°)转为微弱升高(0.02°);陕西片区ACLCI表现出先增后减趋势,河南片区呈持续增加趋势,湖北片区则呈先减后增趋势,主要上限坡度($ULS_{95\%}$)和极限上限坡度($ULS_{99\%}$)总体变化幅度较小。

(3) 1985—2023年汉江生态经济带县域建设用地爬坡现象展现显著的时空异质性。研究时段内爬坡型县域(44个)占总数52.4%,高爬坡型县域(22个)集中于安康市东部、十堰市辖区和南阳市辖区周边,以十堰茅箭区爬坡程度最强;低爬坡型县域主要分布在丹江口水库以东地区。水平扩展型县域数量以1985—1995年最多(61个),高爬坡型以2005—2015年最多(27个),低爬坡型以1995—2005年最多(29个)。

(4) 建设用地爬坡现象具有显著的双重效应:既能够有效保护平原及缓坡地区的生产-生态空间,同时可能加剧高坡区的生态系统退化、土壤侵蚀模数增加、地质灾害易发性提升等环境风险。

参考文献(References):

- [1] Luo J R, Ma W J, An S, et al. Coupling analysis of multi-systems urbanization: evidence from China [J]. *Ecological Indicators*, 2025, 170: 112977.
- [2] 李刘艳, 邓金钱. 我国城镇化发展的阶段特征、逻辑主线与未来进路[J]. *经济学家*, 2024(3): 87-97.
Li L Y, Deng J Q. The characteristics, logical mainline and future path of China's urbanization development [J]. *Economist*, 2024(3): 87-97.
- [3] 周亮, 党雪薇, 周成虎, 等. 中国建设用地的坡谱演化规律与爬坡影响[J]. *地理学报*, 2021, 76(7): 1747-1762.
Zhou L, Dang X W, Zhou C H, et al. Evolution characteristics of slope spectrum and slope-climbing effects of built-up land in China [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2021, 76(7): 1747-1762.
- [4] 金贵, 贺念慈, 刘志远, 等. 共享社会经济路径下长江经

- 济带国土空间模拟预测与布局优化[J]. *生态学报*, 2024, 44(18): 8084-8093.
- Jin G, He N C, Liu Z Y, et al. Simulation prediction and layout optimization of territorial space in the Yangtze River Economic Belt under the shared socio-economic pathways [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2024, 44(18): 8084-8093.
- [5] 马腾, 段学军, 王佳恒, 等. 高原湖泊流域建设用地坡谱演变研究: 以滇池流域为例[J]. *地理科学*, 2024, 44(7): 1142-1152.
Ma T, Duan X J, Wang J H, et al. Evolution of built-up land slope spectrum in plateau lake basin: a case study of Dianchi Lake Basin [J]. *Geographical Sinica*, 2024, 44(7): 1142-1152.
- [6] 新浪新闻. 湖北十堰投千亿元削山1万 hm^2 造新城[EB/OL]. (2013-01-13) [2025-02-19]. <https://news.sina.com.cn/c/2013-01-13/074726022563.shtml>.
Sina News. Shiyan, Hubei Province, invests 100 billion to cut down mountains on an area of 10 000 hm^2 to build a new city. [EB/OL]. (2013-01-13) [2025-02-19]. <https://news.sina.com.cn/c/2013-01-13/074726022563.shtml>.
- [7] 姜跃锋, 周亮, 陈志杰. 典型河谷型城市建设用地的爬坡特征及其生态质量影响[J]. *山地学报*, 2022, 40(4): 570-580.
Jiang Y F, Zhou L, Chen Z J. Slope-climbing characteristics of typical valley-type urban construction land and its ecological quality influence [J]. *Mountain Research*, 2022, 40(4): 570-580.
- [8] Shi K F, Liu G F, Zhou L, et al. Satellite remote sensing data reveal increased slope climbing of urban land expansion worldwide [J]. *Landscape and Urban Planning*, 2023, 235: 104755.
- [9] Frolking S, Mahtta R, Milliman T, et al. Global urban structural growth shows a profound shift from spreading out to building up [J]. *Nature Cities*, 2024, 1: 555-566.
- [10] 叶高斌, 苏伟忠, 陈维肖. 太湖流域城乡建设用地扩张的高程特征变化[J]. *自然资源学报*, 2015, 30(6): 938-950.
Ye G B, Su W Z, Chen W X. The elevation characteristics variation of urban and rural construction land expansion in Taihu Lake Basin [J]. *Journal of Natural Resources*, 2015, 30(6): 938-950.
- [11] 穆博, 张若兰, 穆涛, 等. 地形梯度视角下郑州城镇建设用地扩张格局时空动态特征[J]. *地域研究与开发*, 2022, 41(5): 133-138.
Mu B, Zhang R L, Mu T, et al. Characteristics of urban built-up land expansion pattern on different topography gradient area in Zhengzhou City [J]. *Areal Research and Development*, 2022, 41(5): 133-138.
- [12] 安彬, 肖薇薇, 崔晓明. 汉江生态经济带土地利用格局的地形梯度效应特征[J]. *水土保持研究*, 2024, 31(4): 288-297, 307.
An B, Xiao W W, Cui X M. Topographic gradient effect of land use pattern in Hanjiang River ecological economic belt [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2024, 31(4): 288-297, 307.

- [13] Shi K F, Wu Y Z, Liu S R. Slope climbing of urban expansion worldwide: spatiotemporal characteristics, driving factors and implications for food security[J]. *Journal of Environmental Management*, 2022,324:116337.
- [14] 彭秋志,唐铃,陈杰,等.2000—2015年深圳市建设用地坡谱演变研究[J].*自然资源学报*,2018,33(12):2200-2212.
Peng Q Z, Tang L, Chen J, et al. Study on the evolution of construction land slope spectrum in Shenzhen during 2000-2015 [J]. *Journal of Natural Resources*, 2018,33(12):2200-2212.
- [15] 彭秋志,马少华,邓启辉,等.山地城市建设用地增长的坡度梯度效应:以贵阳市为例[J].*自然资源学报*,2022,37(7):1865-1875.
Peng Q Z, Ma S H, Deng Q H, et al. Relationship between construction land and slope in rapidly expanding mountain cities: a case study in Guiyang, China[J]. *Journal of Natural Resources*, 2022,37(7):1865-1875.
- [16] Zhou L, Dang X W, Mu H W, et al. Cities are going uphill: slope gradient analysis of urban expansion and its driving factors in China[J]. *Science of the Total Environment*, 2021,775:145836.
- [17] 丛佳敏,孙从建,陈伟,等.2000—2020年间黄河中游不同地貌区城镇建设用地扩张过程及其影响因素[J].*地理研究*,2024,43(8):2121-2140.
Cong J M, Sun C J, Chen W, et al. Unrevealing the process and driving factors of urban construction land expansion in the middle reaches of the Yellow River, 2000—2020[J]. *Geographical Research*, 2024,43(8):2121-2140.
- [18] 彭秋志,朱丹.中国建设用地爬坡潜在重点县域识别与分析[J].*中国土地科学*,2022,36(9):102-110.
Peng Q Z, Zhu D. Identification and analysis of potential key counties for slope-climbing construction land in China[J]. *China Land Science*, 2022,36(9):102-110.
- [19] 赵前前,范巧.“江”“河”国家战略联动促进中国南北方共同富裕的机制研究[J].*兰州大学学报:社会科学版*,2022,50(1):27-38.
Zhao Q Q, Fan Q. Linkage mechanism of the national strategies of “the Yangtze River” and “the Yellow River” to promote common prosperity of southern and northern China [J]. *Journal of Lanzhou University: Social Sciences*, 2022,50(1):27-38.
- [20] 国家发展改革委.汉江生态经济带发展规划[EB/OL].(2018-11-13)[2024-12-18]. http://www.gov.cn/xinwen/2018-11/13/content_5339777.htm.
National Development and Reform Commission. The development plan for Hanjiang Ecological Economic Belt[EB/OL].(2018-11-13)[2024-12-18]. http://www.gov.cn/xinwen/2018-11/13/content_5339777.htm.
- [21] 高艳丽,刘双良,李红波.汉江流域城镇化与土地利用多功能的协调网络演变分析[J].*农业工程学报*,2024,40(11):249-258.
Gao Y L, Liu S L, Li H B. Evolution analysis of the coordinated network between urbanization and multi-functional land use in the Han River Basin of China[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2024,40(11):249-258.
- [22] 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.
- [23] Tang G A, Li F Y, Liu X J, et al. Research on the slope spectrum of the Loess Plateau [J]. *Science in China Series E: Technological Sciences*, 2008,51(1):175-185.
- [24] 吴亚玲,袁丽.浙江省县域建设用地坡谱形态特征及空间格局[J].*浙江农业科学*,2020,61(4):791-796.
Wu Y L, Yuan L. Morphological characteristics and spatial pattern of county construction land slope spectrum in Zhejiang Province[J]. *Journal of Zhejiang Agricultural Sciences*, 2020,61(4):791-796.
- [25] 马经纬,彭秋志,马少华,等.中国城市建设用地坡地率及其与地面坡地率的关联[J].*资源开发与市场*,2022,38(8):948-954,972.
Ma J W, Peng Q Z, Ma S H, et al. Proportion of sloping land in construction land and its correlation with proportion of sloping land in land for cities in China[J]. *Resource Development & Market*, 2022,38(8):948-954,972.
- [26] 谢贤健.四川省城市建设用地扩张及其占用耕地的时空特征[J].*水土保持研究*,2024,31(3):342-349.
Xie X J. Spatiotemporal characteristics of urban construction land expansion and occupation of arable land in Sichuan Province[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2024,31(3):342-349.
- [27] 马彦洁,尹慧慧,王珊珊,等.乌鲁木齐市建设用地扩张与生态用地空间冲突识别[J].*水土保持学报*,2024,38(5):164-174.
Ma Y J, Yin H H, Wang S S, et al. Identification of spatial conflict between construction land expansion and ecological land use in Urumqi [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2024,38(5):164-174.
- [28] Jiang Y F, Zhou L, Wang B, et al. The impact of gradient expansion of urban-rural construction land on landscape fragmentation in typical mountain cities, China [J]. *International Journal of Digital Earth*, 2024,17(1):2310093.
- [29] Cheng G Q, Pan C T, Zhou Y. Urban-rural disparities in the ecological impact of built-up land expansion: a comprehensive assessment from China [J]. *Applied Geography*, 2025,179:103618.
- [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.