

引用格式: 姜跃峰, 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 Yuefeng, ZHOU Liang, CHEN Zhijie. Climbing characteristics of typical valley-type urban construction land and its ecological quality influence [J]. Mountain Research, 2022, 40(4): 570-580.

典型河谷型城市建设用地的爬坡特征 及其生态质量影响

姜跃峰^{1a}, 周亮^{1a,2,3*}, 陈志杰^{1b}

(1. 兰州交通大学 a. 测绘与地理信息学院; b. 建筑与城市规划学院, 兰州 730070;

2. 地理国情监测技术应用国家地方联合工程研究中心, 兰州 730070; 3. 甘肃省地理国情监测工程实验室, 兰州 730070)

摘要: 为缓解城市用地紧张, 大量山地城市在建设过程中向周围更高的坡地扩张和延伸(即城市爬坡), 引发一系列的生态环境与灾害等问题。量化城市爬坡过程对生态质量的影响, 对规避城市与区域生态风险具有重要意义。本研究选取城市用地紧张的典型河谷型城市兰州作为研究区, 通过构建中心城区长时间序列的建设用地坡谱, 细致刻画了 2000—2020 年城市建设用地的爬坡速度、规模和空间异质性特征, 通过引入遥感生态指数评估了城市爬坡导致的生态质量变化。结果表明: (1) 2000—2020 年兰州市中心城区上限坡度增加 8°, 整体爬坡指数为 10.94, 其中 2015—2020 年建设用地爬坡现象最为剧烈, 爬坡指数高达 9.63, 上限坡度增加 5°。(2) 耕地在 8°以下区域对建设用地扩张的贡献率达 69.36%, 更高坡度上生态用地对建设用地扩张的贡献率达 58.92%, 且随时间变化, 高坡生态用地对建设用地的扩张贡献率进一步提高。(3) 城市爬坡区域生态质量整体明显下降, 其中生态质量下降的区域占比 17.79%, 而生态质量提升的区域占比仅有 9.5%。本研究对量化城市爬坡过程, 降低生态风险, 推动山地城市可持续发展具有积极意义。

关键词: 山地城市; 坡谱; 遥感生态指数; 城镇化; 兰州

中图分类号: P942

文献标志码: A

城镇化根本上改变了区域景观格局, 是全球可持续发展研究的关键科学问题之一^[1-3]。2021 年中国的人口城镇化率已达到 64.72%, 城镇常住人口增加至 9.14 亿人^[4]。过度的人口聚集导致城市土地资源需求激增, 城市用地供应紧张, 城市土地进一步扩张造成大规模的土地消耗^[5]。中国的城镇化地区差异显著, 城镇化率较高地区主要集中在东部沿海和长江流域, 西部山地和丘陵地区城镇化率则相对较低^[6]。西部山地城市受地形和区位因素影

响, 城镇化过程中面临着一系列问题。例如, 建设用地紧缺、生态质量下降、灾害风险频发易发等^[7]。为了缓解城镇化与城市土地资源之间的空间矛盾^[8], 山地城市不得不向周围更高的坡地扩张和延伸, 以相对较低的成本实现爬坡模式^[9]。爬坡过程可能引发一系列的生态环境问题, 例如大气污染加剧、植被破坏、生态多样性损失以及生境和生态功能区被侵占^[10]。

面对以上现实问题和困境, 结合山地特殊的地

收稿日期(Received date): 2022-04-16; 改回日期(Accepted date): 2022-08-02

基金项目(Foundation item): 国家自然科学基金(41961027); 甘肃省重点人才项目(2021RCXM073); 甘肃省自然科学基金重点项目(21JR7RA281)。[National Natural Science Foundation of China(41961027); Foundation of Key Talent Projects of Gansu Province(2021RCXM073); Key Program of Natural Science Foundation of Gansu Province(21JR7RA281)]

作者简介(Biography): 姜跃峰(1998-), 男, 江苏省南通人, 硕士研究生, 主要研究方向: 城市遥感。[JIANG Yuefeng(1998-), male, born in Nantong, Jiangsu province, M. Sc. candidate, research on urban remote sensing] E-mail: jiangyuefeng161@163.com

* 通讯作者(Corresponding author): 周亮(1983-), 男, 甘肃天水人, 博士, 教授, 主要研究方向: 城市与区域可持续发展。[ZHOU Liang(1983-), male, born in Tianshui, Gansu province, Ph. D., professor, research on urban and regional sustainable development] E-mail: zhougeo@126.com

形条件,探究城市建设与生态环境变化对山地城镇可持续发展意义重大。已有研究通常将地形因子作为评估生态环境变化的指标或驱动因素之一,通过 TRS 与 VSD 等模型或提出新的生态因子概念框架评估城镇及其周边的环境^[11-13],利用地理探测器的方法探索生态变化的驱动机制^[14],但仅将地形因素作为静态指标无法反映生态质量随地形空间的动态变化。对此,一些学者通过划分地形梯度,研究生态状况在地形空间下的变化特征^[15-16]。在此基础上,如何在地形空间下结合城镇扩张的具体模式量化生态损失也成为研究的重点方向。例如,将全国范围的山坡城市化划分为高环境成本与低环境成本,量化高环境成本山坡城市化导致的山坡森林损失^[17];通过整合 Hansen 高分辨率森林覆盖产品和实地调查,评估森林丧失动态与地形之间的关系^[18];国外学者在农业用地减少和居住区增加的背景下,利用变化检测分析,对阿尔卑斯山低地的草甸损失进行评估与量化^[19]。这些研究尺度相对较大,评估多基于行政单元进行数据统计,在一定程度上忽视了山地城市扩张的空间特征。综上所述,已有研究主要在城镇化的背景下结合地形因素评估生态环境变化及对生态损失进行量化,但是没有聚焦到单个山地城市的具体扩张模式并有效地将该模式与生态质量损失较好地联系在一起。

将城市在地形空间上的扩张形态与生态损失联系起来,定量探究山地城市扩张对生态质量的影响,有助于规避由城市爬坡造成的生态风险。本研究利用土地利用数据与数字高程模型,构建兰州市 2000—2020 年每隔 5 年的建设用地坡谱,揭示城市的爬坡特征;通过计算不同坡度区间的土地利用转移面积,探索兰州市建设用地的转移特征与生态用地的损失情况;基于 Landsat 影像数据计算生态指数,探究重点爬坡区域生态质量的变化趋势。本研究可以为量化城市爬坡的强度、规模与速率提供理论基础,也可以为决策者制定合理的坡地开发政策与生态修复措施提供科学依据。

1 数据来源与方法

1.1 研究区

位于中国西北的兰州市是典型的河谷型城市,主要城区位于南北两座山之间,黄河自西向东穿城

而过。因其“两山夹一河”的特殊地形,兰州市土地资源严重匮乏,“削山造地”“低丘缓坡改造”等措施致使建设用地向坡地上蔓延,呈现显著的城市爬坡现象^[20]。2000—2020 年兰州市建设用地增加 182.51 km²,城市人口增加 30 多万。随着兰州市城镇化速度的加快,兰州市主城区的扩张也更加剧烈,逐步突破现有行政规划的限制。在研究兰州市主城区爬坡的过程中,需要考虑到行政区划调整滞后于城区发展的实际情况,改变传统以行政区划为研究区的方式,转而以建成区的范围划定研究区域。本文通过观察遥感影像中的城市爬坡区域和查阅相关资料,最终以兰州市第四版总体规划(2011—2020 年)所确定的中心城区范围作为研究区(图 1;103°25'E ~ 104°5'E,35°53'N ~ 36°15'N)。该区域主要包含城关区、安宁区、西固区、七里河区、皋兰县与榆中县的建设用地。

1.2 数据来源

研究选用的土地利用数据源自中国科学院资源环境科学数据中心(<https://www.resdc.cn/>),空间分辨率为 30 m。数字高程模型源自美国国家航空航天局(NASA)航天飞机雷达地形任务(SRTM)数据集,空间分辨率也为 30 m。Landsat 数据来源于地理空间数据云(<https://www.gscloud.cn/>),共下载 2000 年、2005 年、2010 年、2015 年、2020 年 5 期影像,每期选择 5—8 月且云量较少的影像,当云量过多时选择相邻年份同一月份的影像替换。遥感影像的预处理包括辐射校正、大气校正、影像镶嵌,并根据研究区的矢量边界进行裁剪,得到研究区的遥感影像数据集。

1.3 研究方法

1.3.1 建设用地坡谱构建

为揭示黄土高原地貌的演变规律,汤国安^[21]提出了坡谱的概念。研究为定量地分析城市建设用地在坡度空间上演变特征,反映城市爬坡这一现象,以坡度数据与土地利用数据为基础,根据坡谱的建立方法,构建了地形坡谱与建设用地坡谱^[22]。研究采用分区统计方法,以 1°为区间分别计算土地面积占比和建设用地面积占比,其公式如下:

$$P_{t,i} = A_{t,i}/A_t \times 100\% \quad (1)$$

$$P_{cl,i} = A_{cl,i}/A_{cl} \times 100\% \quad (2)$$

式中, $P_{t,i}$ 与 $P_{cl,i}$ 分别指坡度为 i 的区域的土地面积频率与建设用地面积频率(%); $A_{t,i}$ 与 $A_{cl,i}$ 分别指的

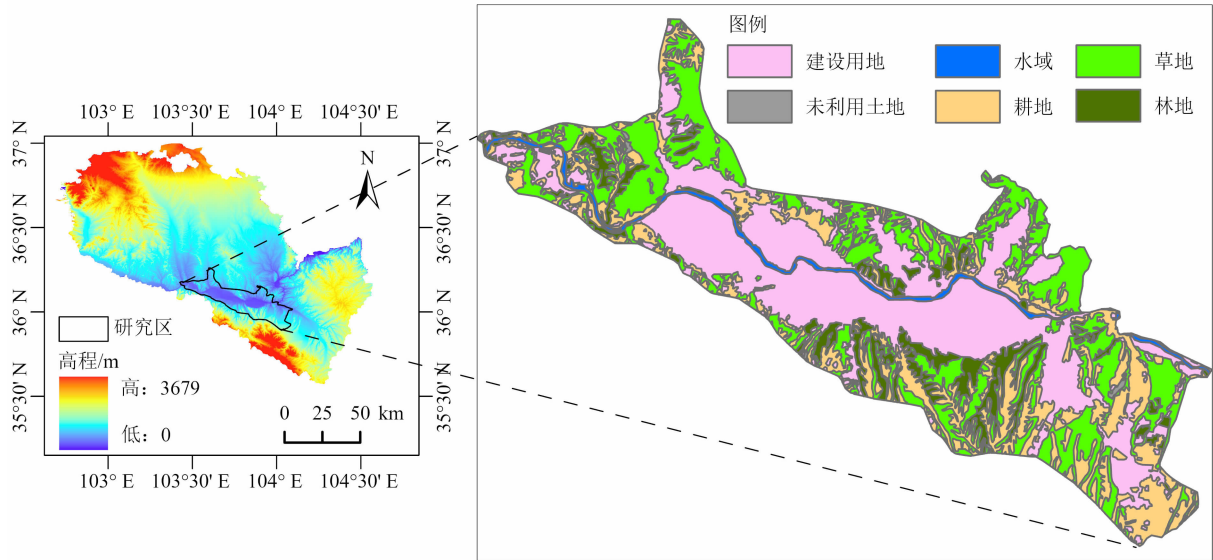


图 1 研究区域位置和土地利用情况

Fig. 1 Location and land use of the study area

是坡度为 i 的土地面积和建设用地面积 (km^2); A_i 与 A_d 分别指的是研究区内的土地总面积与建设用地总面积 (km^2)。在坡谱图中, x 轴和 y 轴分别表示坡度与面积频率。当地形坡谱曲线与建设用地坡谱曲线相交于某一交叉点, 该点的坡度值被称为 T 值 ($^\circ$)。以 T 点作为转折点, 可以分析建设用地爬坡的强度。当坡度大于 T 的建设用地累计频率增加时, 表明城市正在向坡度更高地区扩张。同时, T 值也可以作为划分优势建设用地坡度的一个标准值。当坡度小于 T 时, $P_{t,i} < P_{cl,i}$, 说明该坡度区间内, 建设用地的面积占比要大于土地面积占比, 反之则表明建设用地面积占比要小于土地面积占比。

1.3.2 建设用地爬坡指数与上限坡度厘定

为了进一步解析建设用地的爬坡程度, 将某一段时间内坡度高于 T 的建设用地占比的变化量作为爬坡指数 (Built-Up Land Climbing Index, BCI), 作为衡量爬坡剧烈程的标准, 其公式如下:

$$BCI = (l_j/L_j - l_i/L_i) \times 100\% \quad (3)$$

式中, l_i 和 l_j 分别指在 i 和 j 时间点上, 坡度在 T 以上建设用地面积 (km^2); L_i 和 L_j 分别指在 i 和 j 的建设用地总面积 (km^2)。当 $BCI > 0$ 时, 说明坡度在 T 以上的建设用地比例增加, 表明存在爬坡的现象, 相反, 则在该时间段内没有发生建设用地的爬坡现象。

按照地形坡度是否适宜城市建设, 将坡度划分为 5 个等级 (小于 3° 、 $3^\circ \sim 8^\circ$ 、 $8^\circ \sim 15^\circ$ 、 $15^\circ \sim 25^\circ$ 和大于 25°), 分别代表适宜城市建设、较适宜城市建

设、中等适宜城市建设、不适宜规模化城市建设和无法集中安排城市建设用地^[23]。研究按照顺坡度方向累积建设用地频率为 95% 所对应的坡度值为上限坡度 (Upper Limited Slope, ULS), 同时采用上限坡度的变化值 (Upper Limited Slope Change, ULSC) 来判断城市建设是否向更高的坡度发展。当 $ULSC > 0$ 时, 表明城市建设用地的上限坡度增大, 向更高的坡度地区发展, 值越大表明爬坡的幅度越大。

1.3.3 遥感生态指数评价模型

遥感生态指数 (RSEI) 集成了绿色、湿度、热度和干度 4 个指标可以综合反映、定量刻画城市生态质量及其变化^[24]。将 4 个指标进行标准化处理后进行主成分分析, 得到 4 个指标的第一主成分 (PC_1), 为使大的数值对应较高的生态指数值, 用 1 减去 PC_1 来获取初始的生态指数, 为便于指标的度量, 需将其归一化, 获得所需的生态指数。

1.3.4 遥感生态指数年际变化趋势计算

穆少杰^[25]利用线性回归的方法分析植被覆盖度的变化趋势, 之后这一方法被大量应用于评价生态质量的变化趋势中^[26]。本研究利用一元线性回归分析方法模拟了建设用地重点爬坡区域 2000—2020 年 5 期数据生态指数的变化趋势, 计算公式为:

$$\theta_{\text{slope}} = (n \times \sum_{i=1}^n i \times RSEI_i - \sum_{i=1}^n i \sum_{i=1}^n RSEI_i) / [n \times \sum_{i=1}^n i^2 - (\sum_{i=1}^n i)^2] \quad (4)$$

式中, θ_{slope} 为趋势的斜率; n 是研究时间段内影像的期数; $RSEI_i$ 为第 i 年的生态质量指数。利用生态指数序列与时间序列(年份)的相关关系来判断生态质量年际间变化的显著性,斜率为负值时,代表生态质量变差,反之代表生态质量变好。 $RSEI$ 年际变化趋势的显著性采用 F 检验,统计量 F 的计算公式为:

$$F = U \times (n - 2) / Q \quad (5)$$

式中, $U = \sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2$ 为误差平方和; $Q = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y})^2$ 为回归平方和; y_i 为第 i 年的生态指数 $RSEI$ 的观测值; \hat{y} 为生态指数的回归值; \bar{y} 为 5 期生态质量 $RSEI$ 指数的平均值, $n = 5$ 为年数。根据检验结果将变化趋势分为 5 个等级:极显著变差 ($\theta_{\text{slope}} < 0, p < 0.01$); 显著变差 ($\theta_{\text{slope}} < 0, 0.01 < p < 0.05$); 变化不显著 ($p > 0.05$); 显著增加 ($\theta_{\text{slope}} > 0, 0.01 < p < 0.05$); 极显著增加 ($\theta_{\text{slope}} > 0, p < 0.01$)。

2 结果分析

2.1 城市建设用地爬坡空间特征

根据坡谱概念构建兰州市建设用地坡谱(图 2a),发现曲线呈现出偏正态分布,先升后降,峰值位于 $1^\circ \sim 2^\circ$ 坡度区间内。建设用地坡谱与地形坡谱相交于 6° 附近,表明兰州市的建设用地主要位于 6° 以下。2000 年坡度在 6° 以下的建设用地面积占比 86.38%,2020 年减至 72.10%。建设用地坡谱的峰值随时间的推移而下降,2000 年的峰值为 27.76%,2020 年降至 22.98%。结合兰州市建设用

地平均坡度自 2000 年的 3.94° 增至 2020 年的 5.81° ,发现兰州市建设用地整体坡度在升高。

从建设用地坡谱的时间变化来看,2000—2015 年建设用地坡谱的变化不明显,峰值的变化量为 0.06%,而 2015—2020 年峰值的变化量增至 4.72%。对比相应时期的爬坡指数与上限坡度变化值(图 2b),2000—2015 年的爬坡指数均小于 1 且上限坡度变化值均为 1° ;2015—2020 年的上限坡度变化值达到 5° ,而爬坡指数高达 9.63,增幅超过 9 倍。这些结果表明,兰州市中心城区在 2015—2020 年的爬坡现象最为显著,这可归结于城市待开发土地资源的快速消耗,2000—2015 年间耕地资源共损失 110.8 km^2 。同时房地产开发购置的土地面积在 2015 年前后有较大的起伏,2014 年的土地购置面积为 3.88 km^2 ,2015 年降至 0.85 km^2 ,至 2020 年仅存 0.45 km^2 。此外,政策的导向作用也具有一定影响,2013 年左右甘肃省开始制定低丘缓坡开发的相关政策,2015 年后兰州市政府开始划定新的开发试点并且逐步规范开发中的工作。

2.2 城市土地覆盖在坡度空间上的转换

2000—2020 年兰州市各个土地覆盖在不同坡度的增减情况(图 3)表明,兰州市的建设用地增加 138.86 km^2 ,耕地减少 102.15 km^2 ,林地与草地共减少 35.82 km^2 ,且土地转移存在显著的坡度分异。在适宜城市建设 ($\leq 3^\circ$) 的低坡度区域内,土地转移程度最为剧烈,建设用地增加最为明显。在该坡度区间内,新增建设用地面积占建设用地总增加面积的 40.63%,耕地损失比例最高,达到 37.62%。建

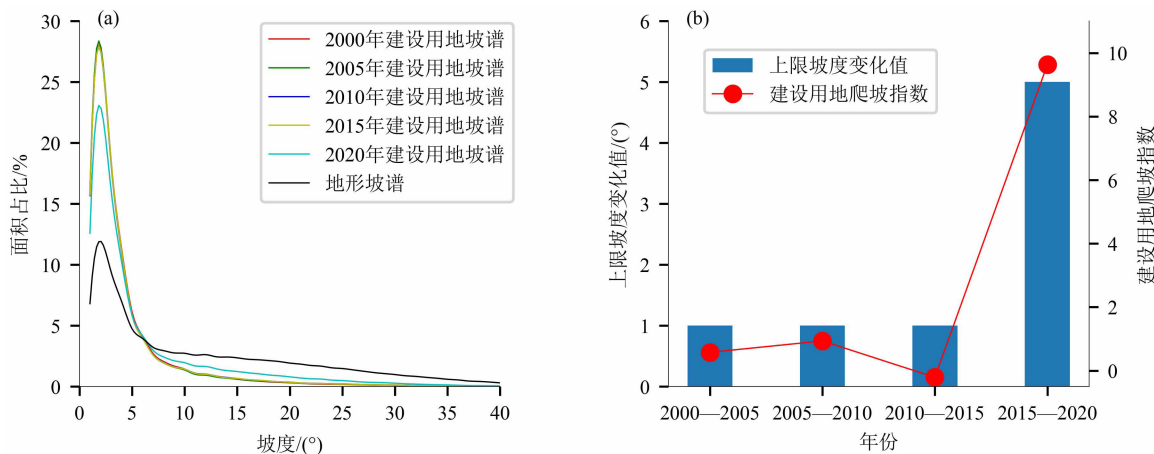


图 2 2000—2020 年建设用地爬坡特征:(a)坡谱与地形坡谱;(b)爬坡指数与上限坡度

Fig. 2 Climbing characteristics of construction land from 2000 to 2020;

(a) slope spectrum and topographic slope spectrum; (b) built-up climbing index and upper limit slope

设用地的增量与耕地的损失量随坡度增加而减少,建设用地从对耕地的广泛侵占转变为对耕地与林草地的共同侵占。在 3° 以下的坡度区间内,新增的建设用地占比 85.85%,其中耕地贡献 72.16%,林地贡献 18.23%,而草地的贡献率为 4.47%。坡度在 $3^{\circ} \sim 8^{\circ}$ 区间内,新增的建设用地中耕地、林地、草地的总体贡献为 95.76%,其中耕地为 64.86%,林地为 10.30%,草地为 20.60%。在 $8^{\circ} \sim 15^{\circ}$ 、 $15^{\circ} \sim 25^{\circ}$ 、 $\geq 25^{\circ}$ 区间内,林地与草地对于建设用地增加的总体贡献率分别为 54.11%、50.91% 与 52.73%。由此可见,在低坡度区域内,城市建设用地扩张导致耕地大量流失,而在较高的坡度范围内,建设用地侵占的主要用地类型从耕地转变为林地与草地。兰州市不同坡度的优势土地类型与转换成本是造成土地

转换坡度分异的关键因素。

将 2000—2020 年细分为 4 个时间段,分析不同土地类型在各个坡度区间上的转移特征(图 4)。2000—2005 年新增的建设用地集中于 8° 以下地区,新增的部分主要来自于耕地及少量林地(图 4a)。结合建设用地坡谱与爬坡指数,城市建设用地在该阶段的扩张主要发生在平坦及低坡区域,城市内部有大量的农田可供城市建设开发。2005—2010 年高坡区域的耕地主要转变为林地与草地(图 4b),而在下一阶段,高坡区域新增的土地类型主要是未利用土地(图 4c)。表明 2005—2015 年转自耕地的生态用地没有直接转变为建设用地,而是先转换成未利用土地再进行城市建设。因此,2010—2015 年爬坡指数(BCI)有明显下降趋势,而上限坡度依旧增

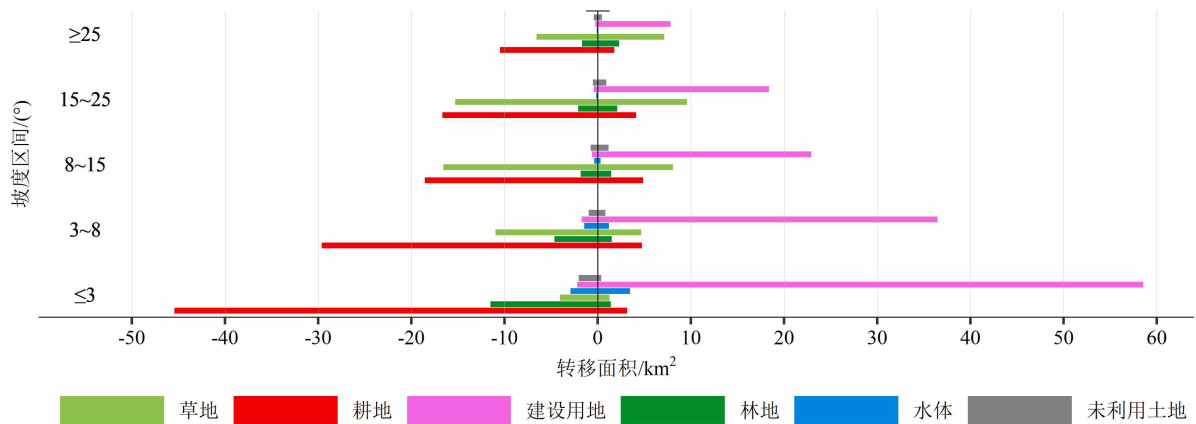


图 3 不同坡度上的土地转移幅度

Fig. 3 Land transfer on different slopes

注:当转移面积为负值表示该土地利用类型减少,当转移面积为正值表示该土地利用类型增加。

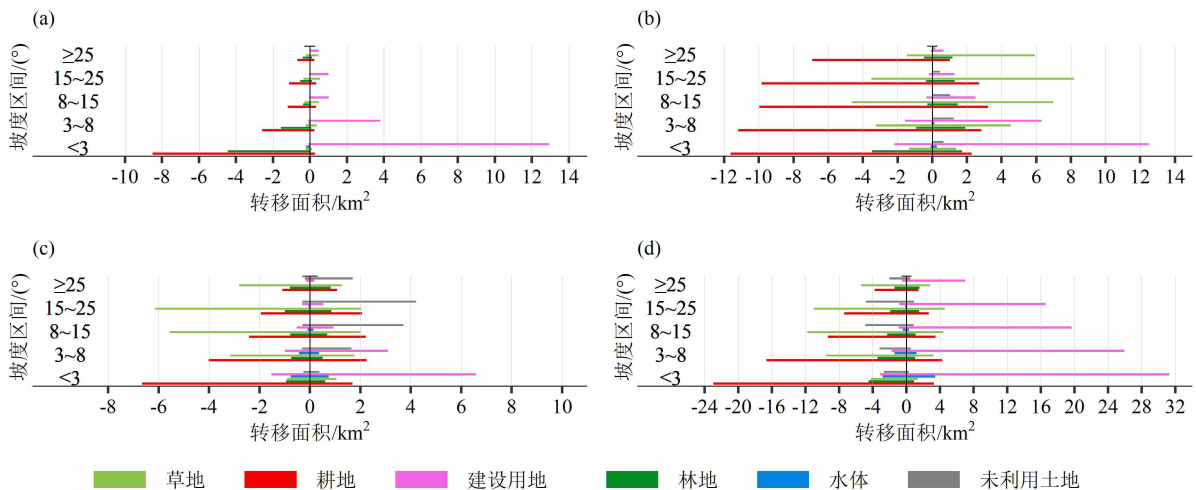


图 4 各时期土地类型的转移:(a) 2000—2005 年;(b) 2005—2010 年;(c) 2010—2015 年;(d) 2015—2020 年

Fig. 4 Transfer of land types in four periods: (a) 2000—2005; (b) 2005—2010; (c) 2010—2015; (d) 2015—2020

加,该时期相当于建设用地爬坡的“准备期”。2015—2020 年的建设用地在高坡区域的增量比重较前期显著扩大,高达 43.02%。此外,尽管在低缓坡($<8^{\circ}$)上损失量较大的依旧是耕地,但在高坡度($\geq 8^{\circ}$)区域草地的损失量超过了耕地。总之,兰州市建设用地爬坡过程中南北两山的生态用地被大量侵占,且随着时间变化与坡度的增加,这种现象愈发显著。

2.3 区域生态质量的变化趋势

利用遥感生态指数模型得到主要生态因子与 RSEI 均值以及对应年份遥感生态指数影像(表 1、图 5),发现研究区域在 20 年间生态质量总体呈现下降趋势。2000 年与 2005 年的生态指数维持在 0.59 左右,至 2010 年降至 0.55,2010—2015 年总体

保持稳定,2020 年又降至 0.50。NDVI 与 WET 指数和生态质量呈正相关,总体呈现出下降趋势,其中 NDVI 指数逐年下降,从 2000 年的 0.48 降至 2020 年的 0.42,而 WET 指数先轻微上升后大幅度下降,2010 年后始终保持平稳。LST 与 NDBSI 指数和生态质量呈负相关,在 20 年间呈现出上升趋势,LST 指数从 2000 年的 0.42 波动上升至 2020 年的 0.53, NDBSI 从 2000 年的 0.32 增至 2020 的 0.45。

研究将生态质量指数 RSEI 的值以 0.2 为间隔,将生态质量划分 5 个等级,分别为差、较差、中等、良好、优(图 5)。2000 年 49.22% 地区的 RSEI 值低于 0.6,即位于中等生态质量及以下;2020 年 60.84% 地区的 RSEI 值低于 0.6,面积占比增加 11.63%。同时,生态质量等级为优的地区正在逐

表 1 各生态因子及 RSEI 均值
Tab. 1 Ecological factors and RSEI mean value

年份	NDVI		WET		LST		NDBSI		RSEI 指数	
	均值	标准差	均值	标准差	均值	标准差	均值	标准差	均值	标准差
2000	0.48	0.31	0.61	0.32	0.42	0.27	0.32	0.23	0.59	0.26
2005	0.47	0.31	0.63	0.28	0.47	0.25	0.35	0.25	0.59	0.25
2010	0.45	0.32	0.57	0.28	0.44	0.27	0.43	0.27	0.55	0.27
2015	0.44	0.32	0.57	0.30	0.46	0.26	0.41	0.26	0.55	0.26
2020	0.42	0.31	0.56	0.28	0.53	0.23	0.45	0.25	0.50	0.24

注:NDVI 代表绿度指标;WET 代表湿度指标;LST 代表热度指标;NDBSI 代表干度指标。

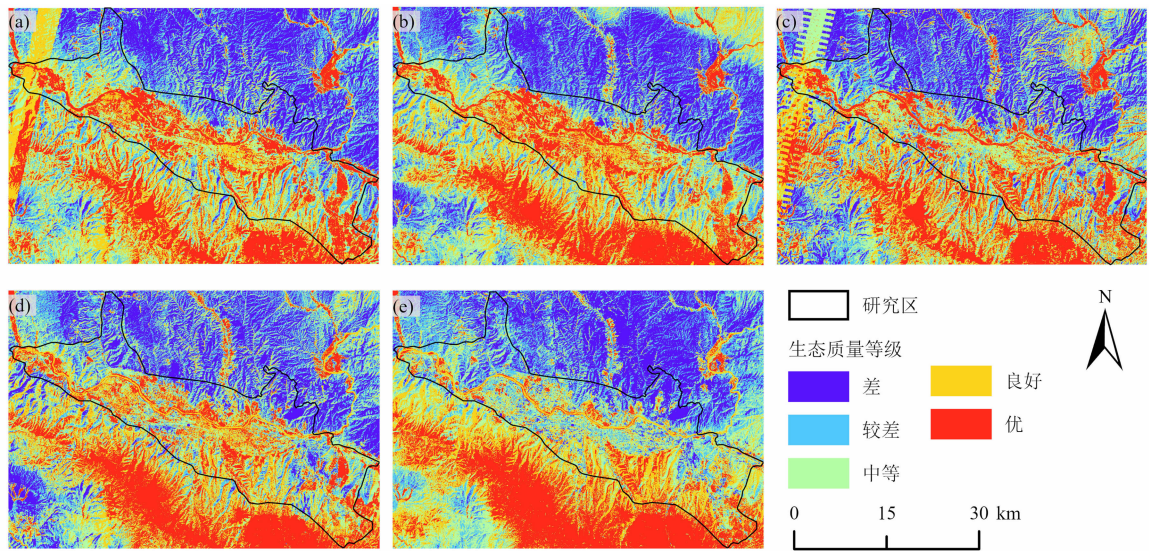


图 5 遥感生态指数影像:(a) 2000 年;(b) 2005 年;(c) 2010 年;(d) 2015 年;(e) 2020 年
Fig. 5 Remote sensing ecological index image: (a) 2000; (b) 2005; (c) 2010; (d) 2015; (e) 2020

步减少,2000 年生态质量等级为优的土地面积为 200.83 km^2 ,2010 年降至 181.46 km^2 ,2020 年面积仅剩 98.94 km^2 ,20 年间面积占比减少 13.31%。

为探究空间上爬坡现象对于生态质量的具体影响,研究选取建设用地爬坡现象最显著的 5 个区域,对其进行生态指数的年际变化趋势分析。兰州市建设用地爬坡区域集中于北部,主要分布于沙井驿街道(区域 1)、忠和镇(区域 2)、九州开发区(区域 3)与青白石街道(区域 4 与 5)(图 6)。根据 5 个区域生态质量在各个显著水平的百分比(图 7)发现,区域 1 中有 21.88% 的区域生态质量极显著变差,4.38% 的区域显著变差,而生态质量有变好趋势的面积占比仅为 5.27%,生态质量提高的区域小于生态质量下降的区域;区域 2 有 18.93% 的区域生态质量呈下降趋势,5.88% 的区域生态质量提高;区域 3 生态质量提高的面积占比 12.55%,下降的面积占比 14.91%;区域 4 极显著变差的面积占比 13.90%,显著变差的面积占比 3.87%,两者总计 17.77%,变好的面积占比 12.57%;区域 5 生态质量下降的区域面积占比 10.69%,而生态质量提高的区域面积占比 6.54%。综合来看,2000—2020 年兰州市 5 个建设用地的重点爬坡区域的生态质量呈

现出显著下降趋势,兰州市中心城区建设用地的爬坡对原本坡地区的生态质量造成剧烈影响。

3 讨论

城市爬坡对生态用地的侵占,是否会导致爬坡区域生态质量下降,是本研究探究的重点。因此,本文通过构建坡谱,计算爬坡指数与上限坡度变化值来定量反映城市爬坡进程。建设用地坡谱与爬坡指数显示,兰州市 2015 年之后的爬坡趋势尤为显著。结合该时间点前后的相关政策性文件,这很可能是受 2013 年兰州市制定的低丘缓坡开发政策所直接推动^[27]。同时,城市人口规模的进一步扩大,对于土地资源需求增加是加剧爬坡现象的根本原因^[28-29]。城市爬坡现象的加剧直接导致生态用地被大量侵占,进一步导致生态质量的下降。本文基于坡度分区与遥感生态指数模型量化了城市爬坡过程中生态用地的损失,确定了生态质量的变化趋势。本研究弥补了以往研究中山地城市具体扩张形态与生态损失联系不强的欠缺,在国土空间规划中具有参考价值。在实践中,可以针对城市开发建设与生态保护的冲突划定城市的增长边界,以期缓解

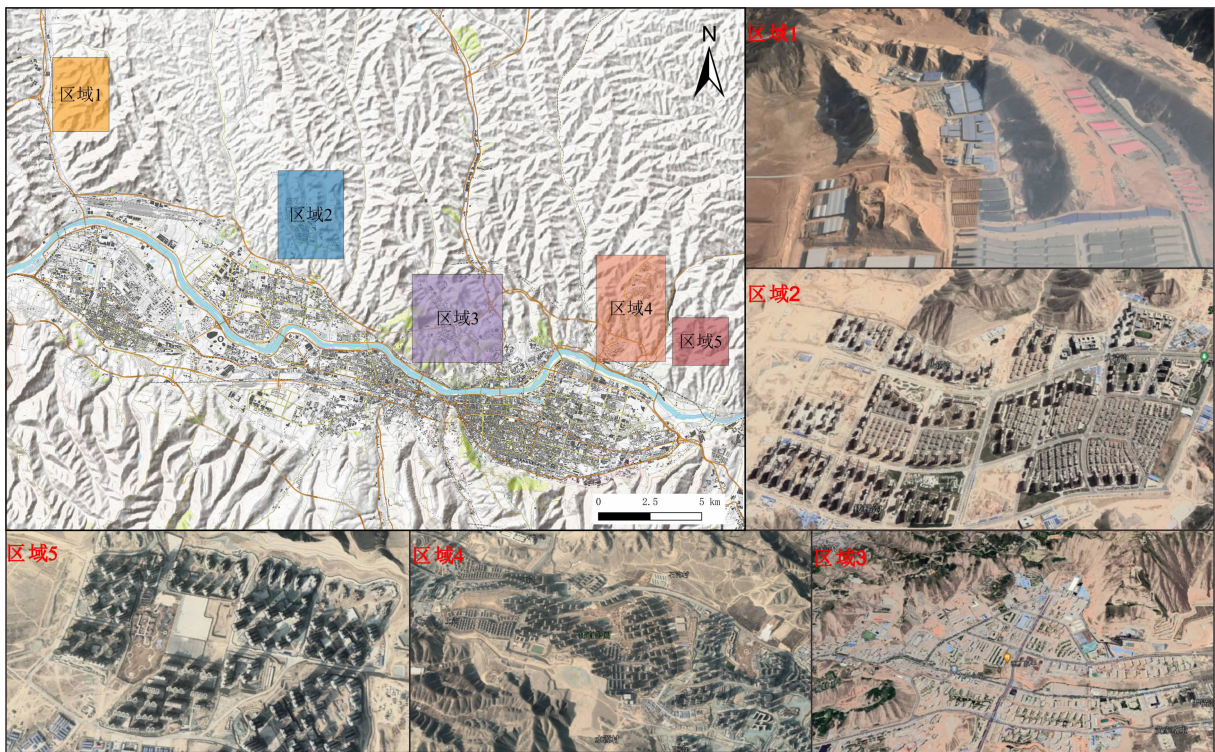


图 6 重点区域建设用地爬坡分布图

Fig. 6 Key areas of construction land climbing

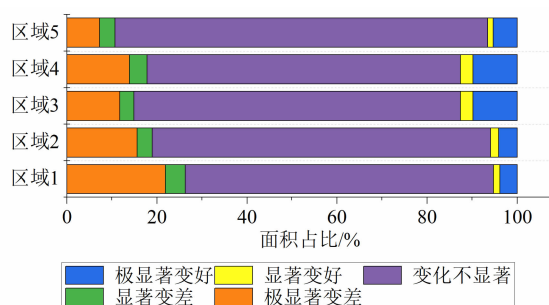


图7 生态质量在各个显著水平的百分比

Fig. 7 Percentage of ecological quality at each significance level

冲突^[30-31]。

尽管本研究详细探究了城市爬坡对生态质量的影响,然而受数据限制,未能进一步地解析其与地质灾害的关系。相关研究表明山地城镇存在许多地质灾害风险,包括山洪、泥石流、滑坡等。这些地质灾害风险都是自然环境和人类活动综合作用的结果,其中地质环境的脆弱性是灾害发生的前提,而以土地利用为载体的人类活动破坏了区域生态系统的稳定性,是诱发地质灾害的重要因素^[32]。人类在地质环境脆弱区进行的开发建设活动,首先会对原本的环境造成破坏,继而改变地表的各种物理性质^[33-34],最终增加地质灾害发生的风险。因此,如何评估山地城镇化过程中的地质风险以及影响因素也是后续研究的重点方向。

4 结论

研究通过兰州市中心城区的建设用地坡谱构建,系统刻画研究区域内建设用地的爬坡特征。同时,在分析不同坡度区间土地转换的基础上,进一步通过基于 Landsat 遥感数据的遥感生态指数探究了对应年份研究区的生态质量特征,并在爬坡现象发生的重点区域通过对生态指数变化的趋势分析,探究了空间上的爬坡现象对于生态质量的具体影响。结论如下:

(1) 2000—2020 年兰州市中心城区建设用地爬坡趋势显著,坡度在 6° 以上的建设用地面积占比由 2000 年的 13.62% 增至 2020 年的 27.90%, 20 年间上限坡度增加 8° 。其中, 2015—2020 年建设用地爬坡最为剧烈,爬坡指数较于其他时期增加超过 9 倍,建设用地的上限坡度也增加 5° 。

(2) 不同土地类型对于建设用地增加的贡献率

随时间与坡度发生巨大变化。较低坡度上 ($< 8^\circ$), 耕地对于建设用地扩张的贡献率达到 69.36%, 随着坡度的增加,建设用地逐渐开始侵占兰州市南北两山上的林地草地,导致生态用地显著损失,在较高坡度上 ($\geq 8^\circ$) 林草地对建设用地扩张的贡献率达到 58.92%, 且该趋势随时间变化更加明显。表明兰州市建设用地爬坡过程中,从对耕地的占用转为对生态用地的侵占,因此存在着生态用地损失的风险。

(3) 兰州市中心城区的生态质量整体在下降,坡地生态质量存在变差的风险。2000—2020 年兰州市重点爬坡区域的生态质量下降的面积始终大于生态质量提高的面积。综合 5 个爬坡重点区域的生态质量变化趋势,发现极显著变差的土地面积占比 14.20%, 显著变差的区域占比 3.59%, 而极显著变好的区域占比 7.27%, 显著变好的区域为 2.23%。

参考文献 (References)

- [1] CHEN Guangzhao, LI Xia, LIU Xiaoping, et al. Global projections of future urban land expansion under shared socioeconomic pathways [J]. *Nature Communications*, 2020, **11**: 1–12. DOI: 10.1038/s41467-020-14386-x
- [2] VAN VIET J. Direct and indirect loss of natural area from urban expansion [J]. *Nature Sustainability*, 2019, **2**: 755–763. DOI: 10.1038/s41893-019-0340-0
- [3] 周亮,唐建军,刘兴科,等. 黄土高原人口密集区城镇扩张对生境质量的影响——以兰州、西安—咸阳及太原为例[J]. *应用生态学报*, 2021, **32**(1): 261–270. [ZHOU Liang, TANG Jianjun, LIU Xingke, et al. Effects of urban expansion on habitat quality in densely populated areas on the Loess Plateau: A case study of Lanzhou, Xi'an-Xianyang and Taiyuan, China [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2021, **32**(1): 261–270] DOI: 10.13287/j.1001-9332.202101.019
- [4] 国家统计局. 中华人民共和国 2021 年国民经济和社会发展统计公报 [R/OL]. 北京: 国家统计局, 2022: [2022-02-28]. http://www.stats.gov.cn/xgk/sjfb/zxfb2020/202202/t20220228_1827971.html [National Bureau of Statistics. Statistical communiqué of the People's Republic of China on the 2021 national economic and social development [R/OL]. Beijing: National Bureau of Statistics, 2022: [2022-02-28]. http://www.stats.gov.cn/xgk/sjfb/zxfb2020/202202/t20220228_1827971.html]
- [5] KUANG Bing, LU Xinhai, HAN Jing, et al. How urbanization influence urban land consumption intensity: Evidence from China [J]. *Habitat International*, 2020, **100**: 102103. DOI: 10.1016/j.habitatint.2019.102103
- [6] 林文棋,吴梦荷,张悦,等. 中国城镇化的地区差异及其驱动因

- 素[J]. 中国科学:地球科学, 2018, **48**(5): 639 – 650. [LIN Wenqi, WU Menghe, ZHANG Yue, et al. Regional differences of urbanization in China and its driving factor [J]. Science China Earth Sciences, 2018, **48**(5): 639 – 650] DOI: 10.1360/N072016-00316
- [7] 丁宇, 张雷, 吴映梅. 山地城镇化的困境与出路: 以云南省大理州为例[J]. 山地学报, 2018, **36**(6): 917 – 929. [DING Yu, ZHANG Lei, WU Yingmei. Predicament and solution of urbanization in mountainous regions: A case study of Dali Autonomous Prefecture in Yunnan province, China [J]. Mountain Research, 2018, **36**(6): 917 – 929] DOI: 10.16089/j.cnki.1008-2786.000387
- [8] SALVATI L, CARLUCCI M. Distance matters: Land consumption and the mono-centric model in two southern European cities [J]. Landscape and Urban Planning, 2014, **127**: 41 – 51. DOI: 10.1016/j.landurbplan.2014.04.008
- [9] ZHOU Liang, DANG Xuwei, MU Haowei, 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. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.145836
- [10] 彭建, 谢盼, 刘焱序, 等. 低丘缓坡建设开发综合生态风险评价及发展权衡——以大理白族自治州为例[J]. 地理学报, 2015, **70**(11): 1747 – 1761. [PENG Jian, XIE Pan, LIU Yanxu, et al. Integrated ecological risk assessment and spatial development trade-offs in low-slope hilly land: A case study in Dali Bai Autonomous Prefecture, China [J]. Acta Geographica Sinica, 2015, **70**(11): 1747 – 1761] DOI: 10.11821/dlxb201511005
- [11] 徐超璇, 鲁春霞, 黄绍琳. 张家口地区生态脆弱性及其影响因素[J]. 自然资源学报, 2020, **35**(6): 1288 – 1300. [XU Chaoxuan, LU Chunxia, HUANG Shaolin. Study on ecological vulnerability and its influencing factors in Zhangjiakou area [J]. Journal of Natural Resources, 2020, **35**(6): 1288 – 1300] DOI: 10.31497/zrzyxb.20200603
- [12] 魏明欢, 胡波洋, 杨鸿雁, 等. 山区县域土地利用变化对生态脆弱性的影响——以青龙满族自治县为例[J]. 水土保持研究, 2018, **25**(6): 322 – 328. [WEI Minghuan, HU Boyang, YANG Hongyan, et al. Effects of land use transformation on ecological vulnerability in mountainous counties: Taking Qinglong Manchu Autonomous County as an example [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2018, **25**(6): 322 – 328] DOI: 10.13869/j.cnki.rswc.2018.06.046
- [13] CHANG Yue, HOU Kang, WU Yiping, et al. A conceptual framework for establishing the index system of ecological environment evaluation: A case study of the upper Hanjiang River, China [J]. Ecological Indicators, 2019, **107**: 105568. DOI: 10.1016/j.ecolind.2019.105568
- [14] XIAO Zuolin, LIU Rui, GAO Yanghua, et al. Spatiotemporal variation characteristics of ecosystem health and its driving mechanism in the mountains of southwest China [J]. Journal of Cleaner Production, 2022, **345**: 131138. DOI: 10.1016/j.jclepro.2022.131138
- [15] ZHANG Ji, SHI Yu, XIAN Chaofan, et al. How urbanization affect the ecosystem health of Tibet based on terrain gradients: A case study of Shannan, China [J]. Ecosystem Health and Sustainability, 2022, **8**: 2097449. DOI: 10.1080/20964129.2022.2097449
- [16] 石宇, 韩蕊, 郭冻. 基于地形梯度的南方丘陵山地带生态系统服务价值对城市化的空间响应——以粤北地区为例[J]. 生态学报, 2021, **41**(18): 7238 – 7248. [SHI Yu, HAN Rui, GUO Luo. Ecosystem service value and its spatial response to urbanization based on terrain gradient in southern hilly and mountainous region: A case study in northern Guangdong, China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, **41**(18): 7238 – 7248] DOI: 10.5846/stxb202006121526
- [17] YANG Chao, GUO Wenhao, ZHANG Chenchen, et al. Characteristics and trends of hillside urbanization in China from 2007 to 2017 [J]. Habitat International, 2022, **120**: 102502. DOI: 10.1016/j.habitatint.2021.102502
- [18] XIONG Bo, CHEN Ruishan, XIA Zilong, et al. Large-scale deforestation of mountainous areas during the 21(st) century in Zhejiang province [J]. Land Degradation and Development, 2020, **31**: 1761 – 1774. DOI: 10.1002/ldr.3563
- [19] MONTEIRO A T, FAVA F, HILTBRUNNER E, et al. Assessment of land cover changes and spatial drivers behind loss of permanent meadows in the lowlands of Italian Alps [J]. Landscape and Urban Planning, 2011, **100**: 287 – 294. DOI: 10.1016/j.landurbplan.2010.12.015
- [20] 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 Liang, DANG Xuwei, ZHOU Chenghu, 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] DOI: 10.11821/dlxb202107013
- [21] TANG Guoan, LI Fayuan, LIU Xuejun, et al. Research on the slope spectrum of the Loess Plateau [J]. Science in China Series E: Technological Sciences, 2008, **51**: 175 – 185. DOI: 10.1007/s11431-008-5002-9
- [22] 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 Qiuzhi, TANG Ling, CHEN Jie, 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] DOI: 10.31497/zrzyxb.20171159
- [23] 徐勇, 赵荣, 樊杰. 中国城市规划建设用地标准及气候和地形地貌修订[J]. 地理学报, 2020, **75**(1): 194 – 208. [XU Yong, ZHAO Shen, FAN Jie. Urban planning construction land standard and its revision of climate and topography in China [J]. Acta Geographica Sinica, 2020, **75**(1): 194 – 208] DOI: 10.11821/

dlxb202001014

- [24] 徐涵秋. 城市遥感生态指数的创建及其应用[J]. 生态学报, 2013, **33** (24): 7853 – 7862. [XU Hanqiu. A remote sensing urban ecological index and its application [J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, **33** (24): 7853 – 7862] DOI: 10. 5846/stxb201208301223
- [25] 穆少杰, 李建龙, 陈奕兆, 等. 2001—2010 年内蒙古植被覆盖度时空变化特征[J]. 地理学报, 2012, **67** (9): 1255 – 1268. [MU Shaojie, LI Jianlong, CHEN Yizhao, et al. Spatial differences of variations of vegetation coverage in Inner Mongolia during 2001—2010 [J]. Acta Geographica Sinica, 2012, **67** (9): 1255 – 1268] DOI: 10. 11821/xb201209010
- [26] 杨泽康, 田佳, 李万源, 等. 黄河流域生态环境质量时空格局与演变趋势[J]. 生态学报, 2021, **41** (19): 7627 – 7636. [YANG Zekang, TIAN Jia, LI Wanyuan, et al. Spatio-temporal pattern and evolution trend of ecological environment quality in the Yellow River Basin [J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, **41** (19): 7627 – 7636] DOI: 10. 5846/stxb202012083131
- [27] 甘肃省人民政府办公厅. 甘肃省人民政府关于低丘缓坡等未利用地开发利用试点工作的指导意见 [EB/OL]. (2013 – 06 – 06) [2013 – 06 – 17]. <http://www.gansu.gov.cn/gsszf/c100063/201306/177521.shtml> [General Office of the People's Government of Gansu. Instructions on the development and utilization of unused land such as low hills and gentle slopes by the People's Government of Gansu [EB/OL]. (2013 – 06 – 06) [2013 – 06 – 17]. <http://www.gansu.gov.cn/gsszf/c100063/201306/177521.shtml>]
- [28] 史海金, 吴文恒, 李研, 等. 基于夜间灯光影像数据的黄河流域中心城市建成区空间扩展及动力因子分析[J]. 中国沙漠, 2021, **41** (6): 235 – 248. [SHI Haijin, WU Wenheng, LI Yan, et al. Study on spatial expansion and dynamic factors of built-up area of central cities in the Yellow River Basin based on night-time light data [J]. Journal of Desert Research, 2021, **41** (6): 235 – 248] DOI: 10. 7522/j. issn. 1000 – 694X. 2021. 00126
- [29] 周亮, 车磊, 孙东琪. 中国城镇化与经济增长的耦合协调发展及影响因素[J]. 经济地理, 2019, **39** (6): 97 – 107. [ZHOU Liang, CHE Lei, SUN Dongqi. The coupling coordination development between urbanization and economic growth and its influencing factors in China [J]. Economic Geography, 2019, **39** (6): 97 – 107] DOI: 10. 15957/j. cnki. jjdl. 2019. 06. 011
- [30] WANG Weilin, JIAO Limin, ZHANG Weina, et al. Delineating urban growth boundaries under multi-objective and constraints [J]. Sustainable Cities and Society, 2020, **61**: 102279. DOI: 10. 1016/j. scs. 2020. 102279
- [31] 孔祥玉, 闵婕, 侯莉蓉, 等. 权衡生态安全与城市扩展模拟的山地城市增长边界划定[J]. 山地学报, 2021, **39** (1): 88 – 100. [KONG Xiangyu, MIN Jie, HOU Lirong, et al. Delineation of the growth boundary of mountain cities by weighing ecological security and urban expansion simulation [J]. Mountain Research, 2021, **39** (1): 88 – 100] DOI: 10. 16089/j. cnki. 1008 – 2786. 000578
- [32] LIN Jinhuan, CHEN Wenhui, QI Xinhua, et al. Risk assessment and its influencing factors analysis of geological hazards in typical mountain environment [J]. Journal of Cleaner Production, 2021, **309**: 127077. DOI: 10. 1016/j. jclepro. 2021. 127077
- [33] HU Xie, XUE Liang, YU Yongtang, et al. Remote sensing characterization of mountain excavation and city construction in Loess Plateau [J]. Geophysical Research Letters, 2021, **48**: e2021GL095230. DOI: 10. 1029/2021GL095230
- [34] LI G K, MOON S. Topographic stress control on bedrock landslide size [J]. Nature Geoscience, 2021, **14**: 307 – 313. DOI: 10. 1038/s41561 – 021 – 00739 – 8

Slope-Climbing Characteristics of Typical Valley-Type Urban Construction Land and Its Ecological Quality Influence

JIANG Yuefeng^{1a}, ZHOU Liang^{1a, 2, 3*}, CHEN Zhijie^{1b}

(1. a. Faculty of Geomatics; b. School of Architecture and Urban Planning, Lanzhou Jiaotong University,

Lanzhou 730070, China; 2. National-Local Joint Engineering Research Center of Technologies and

Applications for National Geographic State Monitoring, Lanzhou 730070, China;

3. Gansu Provincial Engineering Laboratory for National Geographic State Monitoring, Lanzhou 730070, China)

Abstract: To alleviate the chronic urban land shortage in urbanization, a large number of mountain cities incline to expand toward higher slopes in close proximity (i. e. occupation in slope land by urbanization, known as slope-climbing), which lead to a series of ecological environment and geo-disaster issues. Quantifying the impact of

slope-climbing process on ecological quality is of great significance for avoiding urban and regional ecological risks. In this study, Lanzhou, a typical valley city with tight supply of urban land, was selected as the study area. By constructing a long-term sequence of construction land slope spectrum in the central urban area, the climbing speed, scale and spatial heterogeneity of urban construction land from 2000 to 2020 were described in detail. By introducing the remote sensing ecological index, the ecological quality changes caused by slope-climbing were further evaluated. The results show that: (1) From 2000 to 2020, the upper limit slope of the central urban area of Lanzhou increased by 8° , and the overall built-up land climbing index was 10.94. From 2015 to 2020, the climbing of construction land was the most severe, with built-up land climbing index of 9.63, and the upper limit slope increased by 5° . (2) The contribution rate of cultivated land to the expansion of construction land in the area below 8° was 69.36%, and the contribution rate of ecological land on higher slopes to the expansion of construction land was 58.92%. With the change of time, the contribution rate of ecological land to the expansion of construction land was further improved. (3) The overall ecological quality of slope-climbing areas decreased significantly, of which the areas with decreased ecological quality accounted for 17.79%, while the areas with improved ecological quality accounted for only 9.5%. This study has positive significance for quantifying slope-climbing process, reducing ecological risks and promoting sustainable development of mountainous cities.

Key words: mountain city; slope spectrum; remote sensing ecological index; urbanization; Lanzhou