研究论文

太行山地区生境质量坡谱演变特征与影响因素*

李诗尧 李 翅

北京林业大学园林学院 北京 100083

摘要:【目的】立足区域地形特征,深刻认识土地覆被、景观格局与生境质量的坡面分异规律及影响因素,为山地区域生态环境的分区治理优化提供重要思路。【方法】以太行山地区为例,研究时间段为 1990、2000、2010、2020 年,运用 JS 散度分析地形因子概率分布的相似性,验证坡谱统计的可靠性;计算土地利用转移矩阵与景观格局指数变化,借助 InVEST 模型测算生境质量,并通过坡谱统计解析三者的坡面分异规律;采用参数最优地理探测器与灰色关联度模型,在区域及坡度区间层面识别影响因素。【结果】1)在 1990—2020 年,太行山地区绿色空间占比逐年降低,耕地和建设用地集聚在山前平原和斜缓坡区段,林灌草集聚在山坡区段。山区景观格局由分散趋向集聚,景观格局平均值呈现 U 型变化—小幅波动—宽幅震荡坡谱分布。2)生境质量呈现“中部高—两侧低”和“北部高—南部低”,平均值呈现平滑上升—小幅波动下降—宽幅剧烈震荡坡谱分布。3)生境质量主要受建设用地距离和林灌草占比的影响,在平缓坡和急陡坡主要受社会经济因素的驱动,在山坡中段主要受自然环境因素的多元作用效应。【结论】相较于山前平缓地带,山地急陡坡和垂直坡区间生态环境更为敏感脆弱,林灌草斑块的集聚整合能够更好促进生境质量提升。

关键词:坡谱;生境质量;景观格局;相关性;太行山地区

DOI:10.12169/zgcsly.2025.01.09.0001

Evolution Characteristics and Influence Factors of Habitat Quality Slope Spectrum in the Taihang Mountains Region

Li Shiyao Li Chi

(School of Landscape Architecture, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

Abstract:【Objective】Based on the regional topographic features, the hillslope differentiation pattern of land use, landscape pattern and habitat quality and their influence factors are analyzed to provide an important idea for the zonal governance and optimization of the ecological environment in mountainous areas.【Method】The Taihang Mountains region is taken to analyze the probability distribution similarity of terrain factors using Jensen-Shannon Divergence and verify the reliability of slope spectrum statistics during the period of 1990, 2000, 2010 and 2020. Land use transfer matrix and landscape pattern index are calculated, habitat quality is measured by the InVEST model, and the hillslope differentiation patterns of the three factors are analyzed through slope spectrum statistics. The OPGD and GRA model are adopted to identify the influence factors at regional and slope levels.【Result】1) The proportion of green space had decreased year by year in 1990-2020, and cropland and construction land were concentrated in the

收稿日期:2025-01-09

*基金项目:国家自然科学基金面上项目(51978050)

第一作者:李诗尧(1996-),女,博士生,研究方向为城乡人居生态环境。E-mail:lsybjfu@foxmail.com

通信作者:李翅(1971-),男,博士,教授,研究方向为韧性城市与区域空间发展、国土空间规划与城市设计、绿色社区与低影响开发。E-mail:lichi@bjfu.edu.cn

plain and slow slopes, while forest, shrub and grassland were clustered on the hillside. Landscape patches in mountainous areas tend to be clustered, and the mean value of landscape patches presents the changes in slope spectrum from U-shaped change through small fluctuation to wide fluctuation; 2) Habitat quality was high in the middle and low on both sides, as well as high in the north and low in the south region, and the slope spectrum curve was shaped in smooth rise, small fluctuation and wide and violent fluctuation; and 3) The habitat quality was mainly affected by the distance away from construction land and the proportion of forest, shrub and grassland. The habitat quality on gentle slope and steep slope was mainly driven by social and economic factors, and the habitat quality on the hillside was multiply affected by natural environment factors. 【Conclusion】 The ecological environment is more sensitive and fragile on steep slopes and vertical slopes than on submountain flat terrain area, and the agglomeration and integration of forest, shrub and grassland patches can better improve habitat quality.

Keywords: slope spectrum; habitat quality; landscape pattern; correlation; Taihang Mountains region

生境质量代表区域生态环境为各类生物提供适宜生存条件的能力，反映了生物多样性保护与生态稳定性水平[1-2]，城市扩张与高强度的土地利用转变往往导致连续的生境空间破碎失衡[3]。景观格局作为土地利用的外在表现，反映了地表景观各单元的组成、分布、组合等特征规律[4-5]。将土地利用、景观格局与生境质量相结合，能够更好反映区域内生态环境组分与质量的变化水平[1,5-6]。

近年来，定量、可视化与长时序成为区域层面生境质量的分析趋势[7]。现有研究大多依托遥感影像解译、土地覆被、地形高程等基础数据[2,8-9]，聚焦流域、城市群、山区或典型地理单元的时空演变、空间分异、模拟优化与影响因素等内容[2-3,5-6,8,10-12]，主要关注二维水平面的分析，对于山地地区的三维垂直空间关注相对较少[13]。地面坡谱以地面坡度为自变量，以坡度对应的地面面积占比为因变量，对地貌的定量表达和精细刻画具有巨大优势，并逐渐应用于土地利用、景观生态风险等地表计量当中[13-16]，为山地生态环境分析提供了新思路。

太行山地形地貌复杂，是我国东部地区重要地理分界线与华北平原生态屏障[12,17]。伴随太行山周边城市群崛起与重大国家战略实施，近年来，生态优先、绿色发展、严守生态保护红线成为区域发展的基本原则。目前太行山地区相关研究聚焦局部地区土地利用转变、生态遥感指数、生态效率等方面[12,17-20]，缺少全域景观格局、生境质量等内容的坡度分异规律探究。因此，本文运用 JS 散度、坡谱计算、参数最优地理探测器等方法，明确坡度对于地形特征的涵盖能力，分析太行山地区土地利用、景观格局、生境质量的坡谱演变特征，探究生境质量在区域和各坡度区间的影响因素，从而为山区土地利用管理和生态治理提供科学依据。

1　研究区概况

参考 2020 年《太行山旅游业发展规划（2020—2035 年）》并确保空间连续性，将太行山地区（34°53′—40°35′N，111°30′—116°30′E）共 80 个县（市、区）作为研究区，地跨北京、河北、山西、河南 4 省（市），包含东太行、西太行、南太行 3 个板块，总面积 107 427.09 km^2（图 1）。太行山地区地处黄土高原向华北平原过渡带，地质构造复杂，发育了众多峡谷群，切割深，落差大[19]。近几十年太行山周边城市群的崛起与扩张带来了土地利用的剧烈转变，从而为生态环境保护带来了压力[20]。

2　研究方法

2.1　数据来源

研究时间段为 1990、2000、2010、2020 年。行政边界数据源自国家地球系统科学数据中心和中科院资源环境科学数据平台。土地利用数据源自武汉大学 CLCD 土地覆盖数据集，分辨率 30 m，整合为耕地、林地、灌木地、草地、水域、荒地、建设用地共计 7 类。地形数据源自地理空间数据云，使用 SRTMDEM 90M 分辨率原始高程数据和 SRTMSLOPE 90M 分辨率坡度数据产品，二者是目前研究区域大中尺度地形地貌中精度较高且采

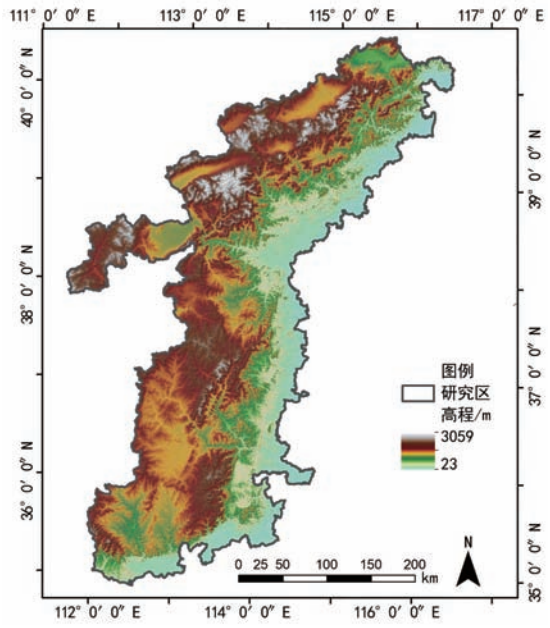


图 1 研究区位图

用较多的基础数据[21]。上述数据分辨率均重采样为 90 m。

2.2 地形因子与关联性计算

以坡度为基础，计算高程、坡向、地形起伏度等 8 项地形因子与坡度的关联水平[21-24]。运用均值变点法确定地形起伏度、地表切割深度和高程变异系数分析窗口为 27×27 像元。熵用于度量分布的随机性水平，相对熵 Kullback-Leibler 散度（KL 散度）是评估分布差异的传统工具。Jensen-Shannon 散度（JS 散度）是 KL 散度的变形，不需要所涉概率分布的绝对连续性，并具有良好的对称性和较高的鲁棒性，取值［0，1］，数值越低表明两个变量之间的概率分布越相似，因此能够较好反映两个地形因子的概率分布相似性[24]。在研究区生成 10 000 个随机点，提取点位数值计算地形因子之间的 JS 散度。

2.3 土地利用与景观格局演变分析

通过土地利用转移矩阵反映 1990—2020 年研究区各类用地的相互转化情况；运用景观格局指数量化景观斑块的空间结构特征；选择常用于表征斑块聚散性、密度、形状与多样性的 6 个景观格局指数，分别为聚合度（AI）、蔓延度（CONTAG）、边缘密度（ED）、景观形状指数（LSI）、斑块平均大小（MPS）、香农多样性（SHDI），并以 2 km 为粒度在 FRAGSTATS 4.2 软件开展移动窗口法分析[3-8]。

2.4 生境质量计算

运用 InVEST 中的生境质量模块（Habitat Quality）计算逐年生境质量，参考模型使用手册与已有生境质量研究成果[5-8]，得到威胁因子和生境敏感性参数（表 1～2）。生境质量评估结果以相等间隔划分为 4 类：低［0，0.25）、中低［0.25，0.5）、中高［0.5，0.75）、高［0.75，1］。

表 1 威胁因子参数

威胁因子	最大影响距离/km	权重	空间衰减形式
农田	1	0.6	线性
建设用地	10	1	指数
荒地	0.5	0.5	指数

表 2 各类景观对威胁因子敏感度参数

序号	土地分类名称	生境适宜度	耕地	建设用地	荒地
1	耕地	0.5	0.3	0.5	0.2
2	林地	1	0.8	0.9	0.3
3	灌木地	1	0.4	0.8	0.3
4	草地	1	0.5	0.7	0.1
5	水域	1	0.7	0.9	0.5
6	荒地	0.2	0.2	0.5	0.3
7	建设用地	0	0	0	0

2.5 坡谱计算与坡度区间划分

坡谱曲线构建以 1°为间隔区间[13-15]，计算公式为：

$$P_i = \frac{A_i}{A_t} \times 100\% \quad (1)$$

式（1）中：P_i为坡度区间之内对应的地面面积占比；A_i为坡度区间之内的土地面积；A_t为研究区总面积。

在此基础上以地面坡度为自变量，分别以各类土地利用占比、景观格局指数平均值和生境质量平均值为因变量，构建土地利用、生境质量和景观格局坡谱曲线。各类用地面积占比数值高于地形占比时，表明该类用地形成分布优势。参考国际地理学联合会地貌调查与地貌制图委员会关于地貌详图应用的坡地分类标准、临界坡度分级法、自然资源部《第三次全国国土调查技术规程》等分类标准与经验[23-26]，将坡度划分为 7 类展开详细分析，分别为平原（0°～2°）、缓斜坡（2°～6°）、斜坡（6°～15°）、陡坡（15°～25°）、急坡（25°～35°）、急陡坡（35°～55°）、垂直坡（55°～90°）。

2.6　生境质量影响因素分析

以生境质量为分析对象，选取社会经济（X1 GDP、X2 夜间灯光指数、X3 人口密度、X4 建设用地距离）和自然环境（X5 降雨、X6 气温、X7 林灌草占比、X8 河流距离）8 项影响因子，运用参数最优地理探测器（OPGD），通过研究区整体提取 10 000 个随机点分析总体影响水平，运用灰色关联度在 7 类坡度区间根据面积占比生成 500~10 000 个随机点计算坡度分区的关联水平。

3　结果与分析

3.1　太行山地区地形特征及关联性

太行山山势大致呈现 S 型东北—西南走向，地势西高东低，坡向变化复杂，围绕山脉形成清晰的条带趋势。地形在水平和垂直方向上均表现出复杂弯曲特征，尤其是山区表现出鲜明的坡面凹凸性。山区的地形起伏度和地表切割深度显著高于两侧的高原和平原地带，地表粗糙度轻微高于两侧，表明山区地形复杂且不规则，切割破碎程度较深。山脉东侧高程变异系数数值较高，此区域内高程的变化较为剧烈，地形起伏更为鲜明（图 2）。

太行山地区总体坡度分布表现为中部高—两侧低，北部地区陡坡分布更为密集。其中，坡度与其余各项地形因子概率分布较为相似，能够较为充分反映当地地形特征（图 3、表 3）。太行山地区地面坡谱曲线表现为高速下降—平稳下降—低水平稳定 3 个区段。伴随坡度上升，占比在 0°~2°达到峰值并剧烈下降，在斜坡区段内短暂平稳，在陡坡和急坡区段内均匀平稳下降，在急陡坡和垂直坡区段内保持极低占比，表明多数区域保持较为和缓的地势变化，但陡峭地形仍然占据了相当比例（图 4）。

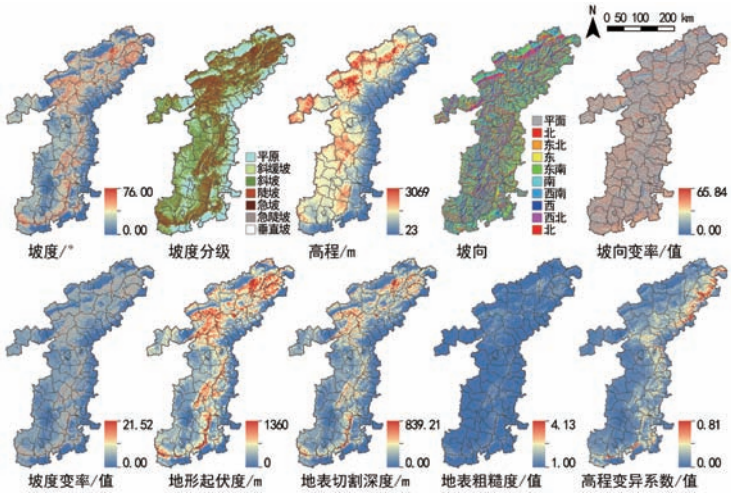


图 2　太行山地区地形因子分布

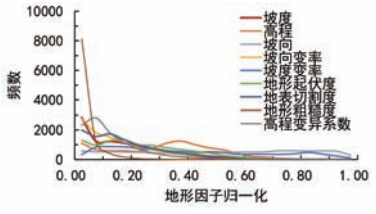


图 3　太行山地区地形因子频数分布

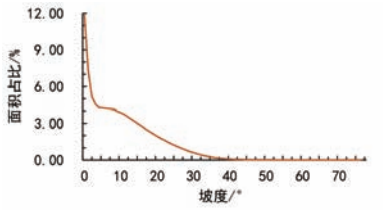


图 4　太行山地区地面坡谱图

表 3　地形因子与坡度因子的散度数值

散度	高程	坡向	坡向变率	坡度变率	地形起伏度	地表切割度	地表粗糙度	高程变异系数
KL 散度	0.362	0.797	0.033	0.637	0.111	0.033	1.294	0.150
JS 散度	0.093	0.224	0.008	0.142	0.026	0.008	0.197	0.036

3.2　太行山地区土地利用与景观格局坡谱演变

1990—2020 年，太行山地区以耕地、林地、草地和建设用地为主要类型，耕林草占比较高，水域和荒地占比极低。耕地占比先降后增，草地占比先增后降，建设用地、林地和水域占比持续上升，灌木地占比持续下降。30 年间绿色空间尤

其耕地大量转为建设用地，绿色空间耕地、林地和草地内部之间也同样发生了较大转化（图 5~7）。太行山地区各类用地在不同坡度区间呈现出分布差异（图 8）：耕地和建设用地主要在平原和缓斜坡区段集中分布，逐年占比由增加变化至平稳。水域主要在平原地带优势分布，各年份占比极为接近。伴随坡度提升，林地在斜坡以上区段优势分布，峰值曲线逐年左移，表明占比优势逐年下坡蔓延。草地主要在斜坡和陡坡区段优势分布，在 2000—2020 年保持稳定。灌木地在陡坡以上区段优势分布，呈现出不稳定波动，占比优势逐年爬坡蔓延。

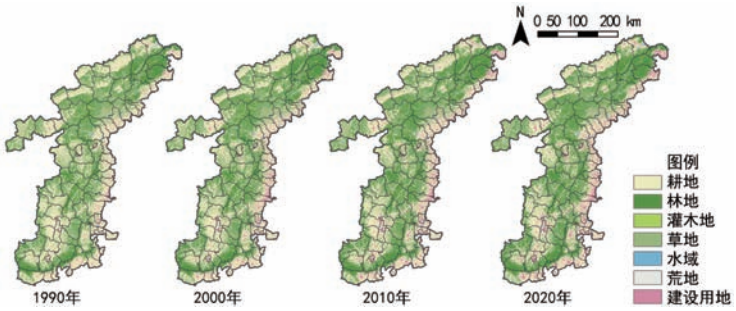


图 5 1990—2020 年太行山地区土地利用演变

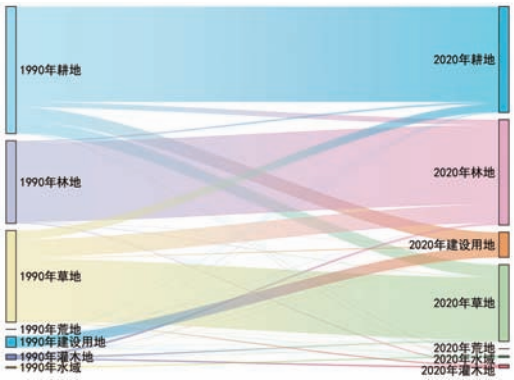


图 6 土地利用转移矩阵

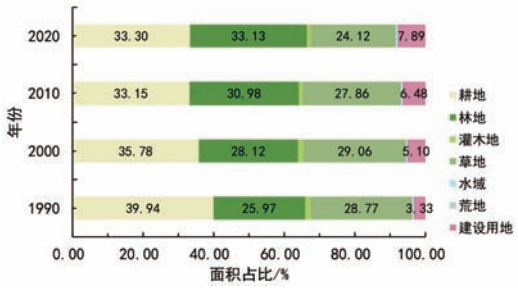


图 7 土地利用占比

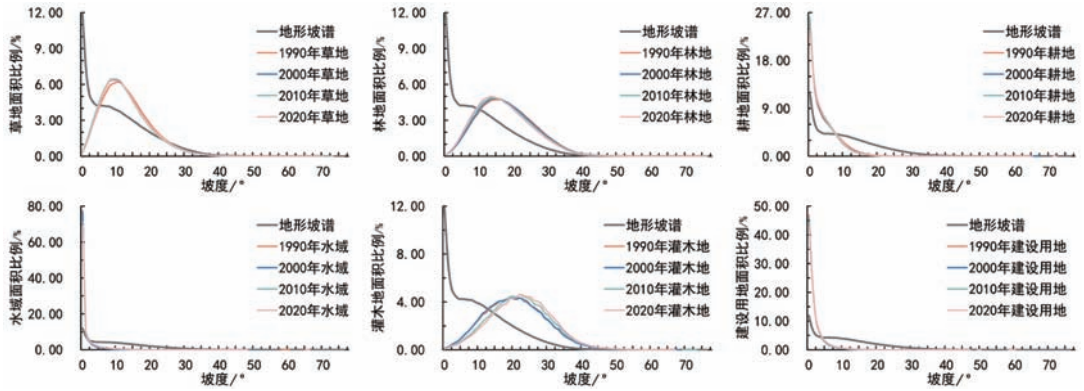


图 8 1990—2020 年太行山地区各类用地坡谱

景观格局指数计算结果表明，1990—2020 年太行山地区各类景观斑块形状趋于复杂，斑块的稳定性、团聚和延展趋势有所下降，由集聚连续趋向分散和异质性。中部山区林草生态用地景观斑块形态复杂、分散破碎、类型交织多样，变化趋势为规整集聚和优势主导；两侧山前的耕地和建设用地斑块集聚连续、规整单一，但变化趋势为复杂多元和分散破碎。太行山地区景观格局平均值的坡谱曲线总体呈现 U 型变化—小幅波动—宽幅震荡分布特征，斜坡、急陡坡和垂直坡区间成为景观格局的转折区段（图 9）：在山前平缓地带，耕地和建设用地斑块集聚规整、优势度高、

类型单一；伴随坡度提升，地形趋于复杂多变，各类绿地斑块也趋向分散破碎，由平稳增降转为非稳定波动；垂直坡区间地貌类型特殊，林草斑块的单一集聚特征更加鲜明，指数的非规律性敏感波动特征进一步放大。

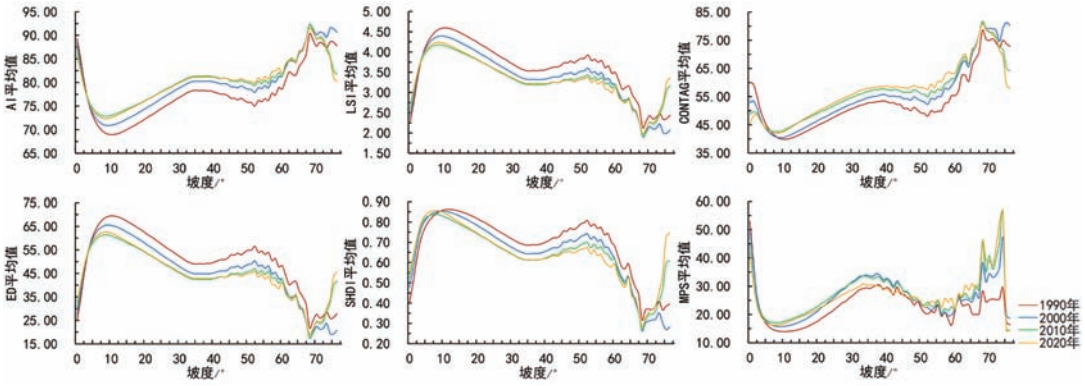


图 9　1990—2020 年太行山地区景观格局平均值坡谱

3.3　太行山地区生境质量坡谱演变

1990—2020 年，太行山地区生境质量平均值先增后降，由 0.575 5 降至 0.545 0，并在 2010—2020 年降幅明显。生境质量低值占比持续增加，中高和高值占比相近并保持平稳波动；中低值占比持续降低，并在近 10 年有所回升。30 年间，太行山地区中部山区总体生境水平高于两侧城乡建设区域，高值由集中连片逐渐趋于分散破碎，增减图斑密集分布但总体以增量为主，表现出山区经历了较为剧烈的生态变化，局部区域得到明显改善；区域东部边缘和西北地区的城镇地带以组团和带状的减量图斑集聚为主，表明城镇扩张和开发建设导致生境破碎化与质量下降（图 10）。

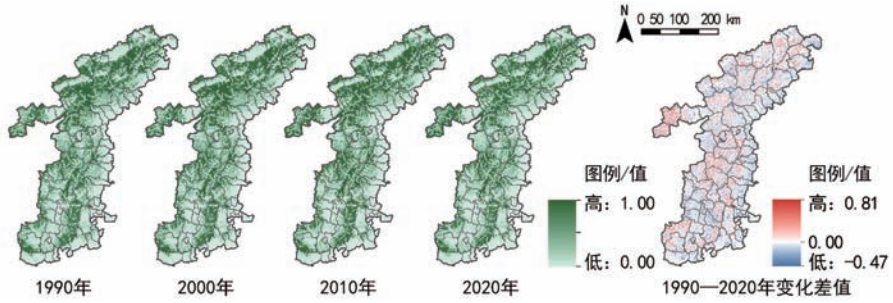


图 10　1990—2020 年太行山地区生境质量演变

1990—2020 年，太行山地区生境质量坡谱曲线可划分为平滑上升—小幅波动下降—宽幅剧烈震荡 3 个阶段（图 11）。在平原至急坡区段，城镇建设开发对于生境的干扰压力持续下降，生境质量保持着较好的稳定性，平均值持续增加并达到峰值。急陡坡区段地形极其险峻，土壤稳定性较低，生态环境较为敏感脆弱，难以维持自身的稳定调节水平。进入垂直坡区段，生境质量的敏感性和时空波动性显著增强，数值剧烈变化，表明这一坡度内以林草用地为主导的自然系统的抗干扰能力极低，受到扰动和压力后难以恢复稳定。

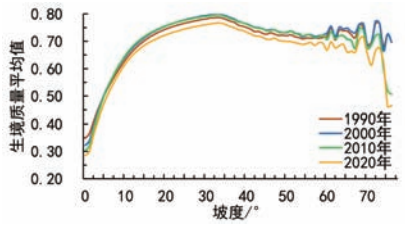
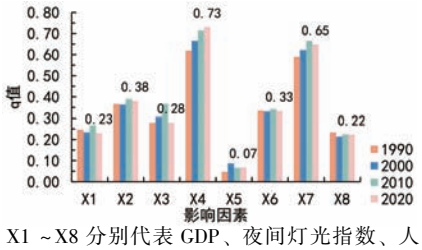


图 11　1990—2020 年生境质量平均值坡谱

3.4　太行山地区生境质量影响因素

由图 12 可知，太行山地区生境质量主要受到 X4 建设用地距离和 X7 林灌草占比的影响，X5 降雨的影响力最低，其余因子的影响水平相近，表明降低人工开发建设对自然环境干扰、增强山区

林灌草用地占比能够快速提升生境质量。由图 13 可知，双因子增强成为主要交互探测类型，社会经济因子之间共同解释效果大于独立解释效果，表明城镇发展建设对于生境质量产生了综合影响。非线性增强主要发生在 X5 降雨和其他因子之间。单因子非线性减弱主要发生于 X7 林灌草占比和社会经济因子之间，表明社会经济因子对其产生一定的抑制，导致解释力有所下降。



注：X1 ~X8 分别代表 GDP、夜间灯光指数、人口密度、建设用地距离、降雨、气温、林灌草占比、河流距离；图 13~16 同。

图 12 因子探测结果

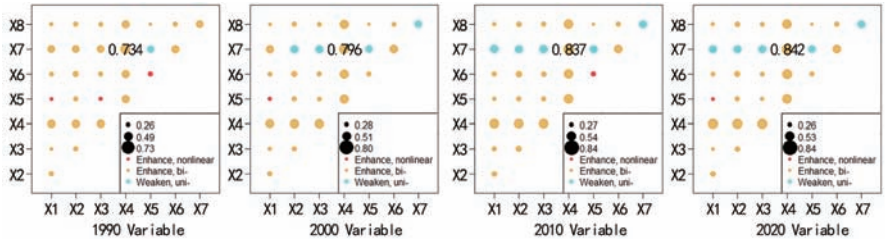
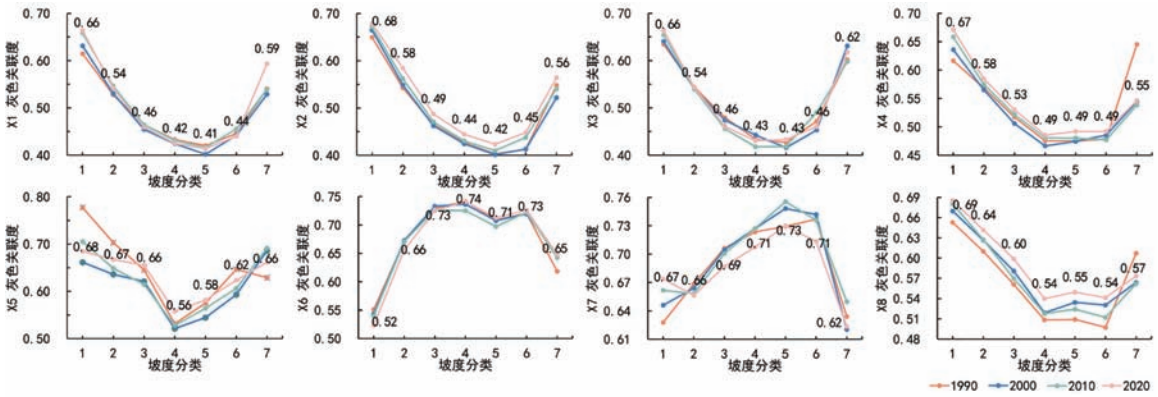


图 13 交互探测结果

由图 14 可知，社会经济因子在坡度区间共同表现出先降后增的关联性转折趋势，表明城乡建设对生境质量产生较大压力；在平缓坡和急陡坡区间关联性较高，在中间坡度区段性有所降低，伴随时间推移关联越发紧密。自然环境因子表现出多样化波动，与水源和水土流失相关的降雨和河流距离表现为先降后增，在山脚平缓坡区间的影响力更高；气温和林灌草占比与当地山坡植被生长状态更为密切，表现为先增后降，在斜坡和急陡坡区段保持较高关联性。



注：横坐标上 1~7 分别代表平原、缓斜坡、斜坡、陡坡、急坡、急陡坡、垂直坡。

图 14 各坡度区间影响因素关联水平

4 讨论

4.1 太行山地区土地利用与生境质量的坡度分异

生境质量的空间分异反映了河势、山势等自然环境典型特征，城乡建设发展与土地高强度利用成为主要降低因素。本研究验证了既有流域地区、城市群、中心城市、县域等地的研究结果[1,2,4-6,8]，并运用坡谱深入分析不同坡度区段内生境质量的演变特征和主导因素。太行山以峡谷、长崖断壁和长脊长墙为主要地貌形态[19]，其坡谱曲线并不像平原流域或高原湖泊流域那样形成偏正态分布[13,16]，而是与山地研究近似[15]，耕地和城镇在山前平缓地带聚集，林灌草在土层浅薄的山坡优势分布。因此，生境质量呈现山前城镇地带低水平稳定、山城过渡爬坡地带轻微敏感、陡峭坡度区段脆弱失衡的区域特征，反映了各类环境要素对地形变化的紧密依存。

4.2　太行山地区生境质量提升思路

自十八大以来，太行山河北、河南、山西等地已扎实开展生态治理修复重大工程，通过全面加快保护和修复步伐，生态环境水平得到整体性改善。立足于国土空间规划与三区三线划定成果，基于坡谱分布特征，太行山地区生境质量的提升以土地利用垂直分层管控为主要思路，顺应地形变化分为山前平缓城镇区、山城交错爬坡区、生态脆弱陡坡区。在山前平缓城镇区加强耕地和建设用地划定管控，以低效用地再开发和生态建设整体推动城乡结构优化和品质提升。在山城交错爬坡区注重城市边缘区的绿色空间治理，构建城乡与山区之间的绿色生态廊道与蓝绿网络，增强生态用地的联通性。在生态脆弱陡坡区需降低风景资源的开发强度，提升适地植被覆盖水平，以持续开展和巩固专项陡坡生态治理为主要方向。

4.3　展望

以大中尺度的区域地形地貌为基础开展地表生态环境演变研究成为当下重要的研究方向。考虑基础地形数据精度带来的误差影响，研究预先对比 1 km 和 90 m 分辨率的地形数据，发现提升数据精度能更好呈现宏观地形细节并有效降低统计噪声，坡谱曲线增降趋势较为接近但变化幅度和关联系数也随之发生改变，因此未来地形分析需要重视观测尺度所带来的局部差异影响。此外，研究仅深入分析了典型生态系统服务之一的生境质量，未来可以对太行山地区多类自然环境和社会经济要素的垂直分布展开深入刻画，并关注耕地、建设用地爬坡对于多项生态系统服务的影响关系，从而为山地区域的分层管理和科学治理提供依据。

5　结论

太行山地区坡度分布呈中部高—两侧低的特征，中部山脉地形变化剧烈，且各项地形因子与坡度分布一致性高，地面坡谱曲线呈现高速下降—平稳下降—低水平稳定的特征。在 1990—2020 年，太行山地区绿色空间占比逐年降低，土地利用类型沿坡度地形分异显著，耕地与建设用地集中于山前平原及斜缓坡区段，林灌草在山坡区段优势分布，且中部山区林草景观斑块由复杂破碎趋向规整集聚，斜坡、急陡坡和垂直坡区间成为转折波动区段。同期生境质量持续下降，在山区由高值集中连片趋于分散破碎，随坡度提升由平稳转向敏感波动。区域生境质量主要受建设用地距离与林灌草占比影响，社会经济因子共同解释力强且影响力度随坡度提升先降后增，自然环境因子因受社会经济因素抑制解释力降低，且在不同坡度区间作用关联存在差异，整体反映了太行山地区自然地形与人类活动共同驱动下各类生态要素的爬坡演变规律。

参考文献

[1]杜峯屹,陈松林,蒲佳豪.2000—2020 年闽东南地区土地利用变化及生境质量时空演变[J].水土保持研究,2023,30(6):345-356.

[2]CAO H L, WU Z J, ZHENG W J. Impact oftouristification and landscape pattern on habitat quality in the Longji Rice Terrace Ecosystem, Southern China, based on geographically weighted regression models[J].Ecological Indicators,2024,166:112259.

[3]冯一凡,冯君明,李翅.生态韧性视角下绿色空间时空演变及优化研究进展[J].生态学报,2023,43(14):5648-5661.

[4]HU J Y,ZHANG J X,LI Y Q.Exploring the spatial and temporal driving mechanisms of landscape patterns on habitat quality in a city undergoing rapid urbanization based on GTWR and MGWR: The case of Nanjing,China[J].Ecological Indicators,2022,143:109333.

[5]刘佳依,许大为,徐嘉.基于 InVEST 模型的蒲河流域景观格局及生境质量时空演变分析[J].水土保持学报,2024,38(2):258-267.

[6]冯君明,冯一凡,李翅,等.河势特征分界下的黄河滩区周边城镇生境质量与景观格局演变[J].生态学报,2023,43(16):6798-6809.

[7]QIN X H,YANG Q K,WANG L.The evolution of habitat quality and its response to land use change in the coastal China,1985-2020[J].Science of The Total Environment,2024,952:175930.

[8]ZHENG L, WANG Y, LI J F. Quantifying the spatial impact of landscape fragmentation on habitat quality: a multi-temporal dimensional comparison between the Yangtze River Economic Belt and Yellow River Basin of China[J]. Land Use Policy, 2023, 125:106463.

[9]周鹏,邓伟,张少尧,等.太行山区国土空间格局演变特征及其驱动力[J].山地学报,2020,38(2):276-289.

[10]ZHANG X M,WAN W Q,FAN H B,et al.Temporal and spatial responses of landscape patterns to habitat quality changes in the Poyang Lake region,China[J].Journal for Nature Conservation,2024,77:126546.

[11]ZHU C M,ZHANG X L,ZHOU M M,et al.Impacts of urbanization and landscape pattern on habitat quality using OLS and GWR models in Hangzhou, China[J]. Ecological Indicators, 2020, 117:106654.
[12]魏静,刘丽丽,王红云,等.1990—2020 年太行山区土地利用景观格局时空变化[J].中国生态农业学报(中英文),2022,30(7):1123-1133.
[13]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.
[14]汤国安,李发源,熊礼阳.黄土高原数字地形分析研究进展[J].地理与地理信息科学,2017,33(4):1-7.
[15]魏梦雨,卞鸿雁,高洁,等.山地都市区景观生态风险:时空动态及 SSPs-RCPs 流转情景[J].水土保持学报,2024,38(5):353-363.
[16]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.
[17]徐永浩,张廷斌,易桂花,等.太行山区生态环境质量时空特征及影响因素分析[J].环境科学,2025,46(4):2428-2438.
[18]王万同,周苗苗,兰嘉琦,等.基于生态系统服务的河南省南太行山区旅游生态效率时空演变与影响因素研究[J].地域研究与开发,2024,43(3):143-150.
[19]樊克锋,杨东潮.论太行山地貌系统[J].长春工程学院学报(自然科学版),2006,7(1):51-53,62.
[20]李诗尧,李翅.南太行城镇群绿色空间时空演变与驱动因素分析[J].中国城市林业,2024,22(6):108-115.
[21]张坤,肖燕,何振芳,等.基于 SRTM DEM 的祁连山自然保护区地形特征研究[J].干旱区地理,2020,43(6):1559-1566.
[22]姜雨璇,查小春.基于 DEM 的巴山地区地貌区划研究[J].水土保持研究,2022,29(1):127-132,139.
[23]符帆,赵德轩,张贝尔,等.我国不同气候带多年植被覆盖度时空变化特征及其地形效应[J].环境科学,2025,46(8):5206-5216.
[24]周宇梦.基于 DEM 的地形因子分类与关联性研究[D].南京:南京师范大学,2021.
[25]周成虎,程维明,钱金凯,等.中国陆地 1∶100 万数字地貌分类体系研究[J].地球信息科学学报,2009,11(6):707-724.
[26]汤国安,宋佳.基于 DEM 坡度图制图中坡度分级方法的比较研究[J].水土保持学报,2006,20(2):157-160,192.

(上接第 139 页)

[32]ZHANG Z,PAPAIK M J,WANG X,et al.The effect of tree size, neighborhood competition and environment on tree growth in an old-growth temperate forest[J].Journal of Plant Ecology,2017,10(6):970-980.
[33]KOZÁK D,SVITOK M,ZEMLEROVÁ V,et al. Importance of conserving large and old trees to continuity of tree-related microhabitats[J].Conservation Biology,2023,37(3):e14066.
[34]杨娱,田明华,黄三祥,等.公众认知、情感对公众参与古树名木保护与管理的行为意向影响研究:以北京市为例[J].干旱区资源与环境,2019,33(7):49-55.
[35]HUANG L,TIAN L J,ZHOU L H,et al.Local cultural beliefs and practices promote conservation of large old trees in an ethnic minority region in southwestern China[J]. Urban Forestry & Urban Greening,2020,49:126584.
[36]雷硕,马奔,温亚利.北京市民对古树名木保护支付意愿及影响因素研究[J].干旱区资源与环境,2017,31(4):73-79.
[37]LINDENMAYER D B,LAURANCE W F.The ecology,distribution, conservation and management of large old trees [J]. Biological Reviews,2017,92(3):1434-1458.
[38]刘益曦,胡春,朱圣潮,等.基于 GIS 的温州古树资源空间分布特征分析[J].中国园林,2019,35(5):107-111.
[39]LINDENMAYER D B.Conserving large old trees as small natural features[J].Biological Conservation,2017,211:51-59.
[40]郑然,乐也,王晓晖,等.古树风险评估与风险管理方法研究[J].北京林业大学学报,2013,35(6):144-150.
[41]杨娱,田明华,秦国伟,等.城市古树名木综合价值货币化评估研究:以北京市古树“遮荫侯”为例[J].干旱区资源与环境,2019,33(6):185-191.
[42]谭莹,徐军,林聪聪,等.基于层次分析法的浙江省古树名木资源综合价值评估研究[J].林业资源管理,2023(4):169-178.
[43]MALYSZ M,MÜLLER S C,MILESI S V,et al.Functional patterns of tree communities in natural Araucaria forests and old monoculture conifer plantations [J]. Acta Botanica Brasilica, 2019,33(4):777-785.
[44]XU W,LUO W X,ZHANG C Y,et al. Biodiversity-ecosystem functioning relationships of overstorey versus understorey trees in an old-growth temperate forest [J]. Annals of Forest Science, 2019,76(3):64.
[45]REN J,FANG S,LIN G G,et al.Tree growth response to soil nutrients and neighborhood crowding varies between mycorrhizal types in an old-growth temperate forest[J].Oecologia,2021,197(2):523-535.
[46]韩波,柴哲,张照义,等.基于 RFID 的古树名木智慧档案库房管理系统设计与实现[J].生物灾害科学,2023,46(3):383-389.