

DOI: 10.11686/cyxb2025209

http://cyxb.magtech.com.cn

刘雪霞, 郝媛媛, 孟哲, 等. 基于变化图谱视角下的高寒山地生态系统土地利用模式及驱动因素探究. 草业学报, 2026, 35(5): 20—35.

LIU Xue-xia, HAO Yuan-yuan, MENG Zhe, *et al.* Exploring land use patterns and their driving forces in alpine mountain ecosystems: A changing atlas perspective. Acta Prataculturae Sinica, 2026, 35(5): 20—35.

## 基于变化图谱视角下的高寒山地生态系统 土地利用模式及驱动因素探究

刘雪霞, 郝媛媛\*, 孟哲, 安春春, 何生申, 黄才成, 祁瀚, 花立民, 楚彬

(甘肃农业大学草业学院, 草业生态系统教育部重点实验室, 国家林业草原高寒草地鼠害防控工程技术研究中心, 甘肃兰州730070)

**摘要:**为深入揭示高寒山地生态系统土地利用/覆被变化的时空演变特征及其驱动机制,本研究以祁连山国家公园为研究区,基于多期遥感数据构建恒定、涨势与落势图谱,系统分析1990—2022年土地利用/覆被变化(LUCC)的演变过程及其驱动因子。结果表明:1)土地利用/覆被变化图谱能够有效反映典型时间节点(1995、1997、2004、2008和2019年)与区域生态工程的高度一致性。2)土地利用/覆被变化图谱可以深入刻画土地利用/覆被各时段的细节差异。具体地,从恒定图谱来看,草原(>48.00%)和裸地(>25.00%)主要呈块状分布于大雪山峰与则吾结山峰区域;从涨势图谱来看,草原扩张主要集中在大雪山峰和冷龙岭山峰区域,而裸地扩张区域则主要集中在祁连山峰和大雪山峰,且扩张幅度裸地低于草原(整体低2.75%),森林、冰雪和水域等类型扩张幅度均较小(<3.00%);从落势图谱来看,草原(>1.40%)和裸地(≥1.09%)的收缩面积明显高于其他类型(>0.01%),且收缩区域除以块状分布于祁连山峰与冷龙岭山峰之间外,还零星分布于整个祁连山脉。3)土地利用/覆被变化图谱可以表征土地利用程度呈东南高、西北低的分布趋势,且主要受潜在蒸散发量、海拔和人类足迹等自然因子的影响(>0.09),同时经济发展和政策干预的影响作用逐渐显现。本研究展示了一种基于变化图谱的LUCC动态识别新路径,不仅能够区分其稳定区与变化区,还能量化其动态变化,提升了土地系统动态表达的精度与深度。研究结果可为高寒山地生态系统管理提供科学参考与决策支持。

**关键词:**时段划分;变化图谱;土地利用综合程度;地理探测器;祁连山国家公园

## Exploring land use patterns and their driving forces in alpine mountain ecosystems: A changing atlas perspective

LIU Xue-xia, HAO Yuan-yuan\*, MENG Zhe, AN Chun-chun, HE Sheng-shen, HUANG Cai-cheng, QI Han, HUA Li-min, CHU Bin

College of Grassland, Gansu Agricultural University, Key Laboratory of Grassland Ecosystem, Ministry of Education, National Engineering Technology Research Center for Rodent Pest Control in Alpine Grassland, State Forestry and Grassland Administration, Lanzhou 730070, China

**Abstract:** The aim of this research was gain deeper insights into the spatio-temporal evolution of land use/cover change (LUCC) and its driving mechanisms in Qilian Mountain National Park, an alpine ecosystem. Based on multi-temporal remote sensing data, this study constructed maps showing where land use/cover has remained constant,

收稿日期:2025-05-26;改回日期:2025-07-18

基金项目:甘肃农业大学青年研究生指导教师扶持基金(GAU-QDFC-2025-06),草地生态系统教育部重点实验室“揭榜挂帅”项目(KLGE-2024-06)和国家林业和草原局草地啮齿动物危害防控创新团队资助。

作者简介:刘雪霞(2000—),女,甘肃定西人,在读硕士。E-mail: 19896006961@163.com

\* 通信作者 Corresponding author. E-mail: haoyy@gsau.edu.cn

expanded, and contracted, and systematically analyzed the evolution of LUCC and its driving factors during 1990–2022. The results show that: 1) The LUCC trajectory maps effectively captured the consistency among typical time nodes (1995, 1997, 2004, 2008, and 2019) and regional ecological projects. 2) The LUCC trajectory maps revealed differences in LUCC across periods. Specifically, the constancy map indicates that grassland ( $>48.00\%$ ) and bare land ( $>25.00\%$ ) are primarily distributed in patches around the Daxue and Zewujie peaks. The expansion map shows that grassland expansion has been concentrated around the Daxue and Lenglongling peaks, while bare land expansion has mainly occurred around the Qilian and Daxue peaks, although the magnitude of expansion has been lower for bare land than for grassland (by  $2.75\%$  overall). Forest, glacier/snow, and water expansion have been relatively minor ( $<3.00\%$ ). The contraction map shows that grassland ( $>1.40\%$ ) and bare land ( $\geq 1.09\%$ ) areas have decreased more than other land types ( $>0.01\%$ ), with areas of contraction patchily distributed between the Qilian and Lenglongling peaks and scattered across the entire Qilian range. 3) The LUCC trajectory maps further reveal a southeast-northwest gradient in land use intensity, which has been mainly affected by natural factors such as potential evapotranspiration, elevation, and human footprint ( $>0.09$ ), whereas the effects of economic development and policy interventions have become increasingly evident over time. The results of this study demonstrate a novel trajectory-based approach for dynamic LUCC identification that distinguishes stable areas from changing areas and quantifies their dynamics, thereby improving the precision and depth of land-system dynamics representation. The findings provide a scientific reference and decision-making support for alpine ecosystem management.

**Key words:** temporal segmentation; change atlas; integrated land use degree; geo-detector; Qilian Mountain National Park

土地利用/覆被变化是地球系统的基本特征<sup>[1]</sup>和关键组成部分<sup>[2]</sup>,是人地系统交互链接的纽带<sup>[2-3]</sup>,也是生态文明建设及可持续发展的主要空间载体<sup>[4-6]</sup>;自 20 世纪 80 年代以来,随着工业化、城市化进程的推进,全球范围内的土地利用/覆被结构、方向和利用方式等均发生了显著变化<sup>[3-4]</sup>,且这种变化对不同区域和国家的气候<sup>[5]</sup>、水资源<sup>[6]</sup>、碳循环<sup>[7]</sup>、生物多样性<sup>[8]</sup>以及潜在生态服务<sup>[9]</sup>的变化等产生了空前未有的影响。在此背景下,土地利用/覆被变化逐渐成为人地矛盾日益显现的重要表现之一,且在高寒山地生态系统中尤为突出<sup>[10]</sup>。高寒山地生态系统作为全球生物多样性的集中区,极易受社会发展、政策导向以及自然环境条件的共同影响<sup>[11-12]</sup>。因此,在全球变化的背景下,特别是土地利用/覆被变化加剧的发达国家和发展中国家,为了更好地监测和评估生态与社会经济的发展过程,不可避免地需要探究不同时段土地利用/覆被的演变过程,揭示其对自然和人类社会经济影响因素的反馈机制。与此同时,这将为全球变化背景下土地利用/覆被变化的评估、土地管理以及政策制定提供重要的理论依据。

中国重要的生态功能区—祁连山国家公园,属于典型的高寒山地生态系统<sup>[13-14]</sup>,是中国西北地区的重要生态屏障和生物多样性优先保护区,对西北地区的生态稳定具有重要作用。在深入探讨土地利用/覆被变化和影响之前,明确不同时段内的变化特征和发展趋势是至关重要的,目前在不同领域以土地利用/覆被变化为基础的研究仅限于 5、10 年或以主观性分割的年限为主,常见的比如有以社会经济转变为时间轨迹节点探究 1990–2007 年捷克地区的土地利用变化<sup>[15]</sup>,以土地数据库的建立为时间轨迹节点了解斯洛文尼亚土地动态变化过程<sup>[16]</sup>,以 5、10 年或以主观性分割时间轨迹节点探究不同国家不同区域的土地动态变化进而量化与其相关联的其他领域的动态变化过程<sup>[17-20]</sup>。上述研究对时间轨迹的分割均具有主观性,没有充分的科学依据,更没有充分考虑到土地动态变化的时间节点具有缓冲性。与此同时,关于在不同时段对土地利用/覆被动态变化过程的研究在其表现形式上多为土地利用转移矩阵表、单一土地利用转移空间分布图、和弦图和桑基图等;常见的有以转移矩阵表的形式探究不同区域土地利用的动态变化过程<sup>[21-22]</sup>,并通过单一土地利用转移空间分布图、和弦图和桑基图的形式探究不同国家土地动态变化及其为基础的动态变化及演变过程<sup>[23-26]</sup>。上述方法能够清晰地表达多个时间间隔内土地类型之间的转化关系,且有助于揭示土地利用的变化趋势;然而,这些方法却难以定性判断变化发生的具体区域,且在空间表现形式上较为单一,缺乏对变化过程的量化,在一定程度上,不能全面反映土地利用/覆被的时空

变化特征。

此外,高寒山地生态系统极易受社会发展、政策导向以及自然环境条件的共同影响。然而,现有研究大多集中在农村和城市区域,常见的有在非洲的加纳北部<sup>[27]</sup>、亚洲的南亚和东南亚<sup>[28]</sup>、伊朗<sup>[29]</sup>、中国珠三角<sup>[30]</sup>及其他区域<sup>[31-34]</sup>发现人口增长、经济发展以及城市化是土地利用变化的持续驱动因素,而在欧洲罗马尼亚<sup>[35]</sup>、拉丁美洲的墨西哥南部<sup>[36-37]</sup>以及一些区域<sup>[38]</sup>发现政府政策、土地所有制和制度改革对土地利用的变化有重要影响。众所周知,山区生态系统在多种自然和人为驱动因素的影响下变化迅速,且具有高度的社会生态异质性<sup>[39-41]</sup>。然而,与其他区域相比,对山区土地利用/覆被变化的研究仍未受到足够的重视,现有的研究往往忽略了其变化过程,难以刻画整体变化过程中的细节变化。

为了弥补这一不足,本研究以典型高寒山地生态系统—祁连山国家公园为例,采用变化图谱系统地捕捉1990—2022年该生态视角下土地利用/覆被模式及其驱动因素。变化图谱与以往方法相比,能够识别特定的涨势、落势和恒定区域,为土地利用/覆被变化的时空演变提供新视角。具体聚焦以下科学问题:1)土地利用/覆被变化下如何合理划分最优时间节点? 2)土地利用/覆被变化图谱(恒定图谱、涨势图谱和落势图谱)下的时空动态变化特征如何? 3)土地利用程度作为表征土地利用效率和土地开发程度的综合指标,空间分布特征及总体变化趋势如何? 4)影响土地利用变化的主要驱动力有哪些? 通过高寒山地生态系统这一典型案例,旨在揭示土地利用/覆被变化的时空规律及其驱动机制,不仅为土地变化过程及其与自然、社会经济和人类活动的反馈机制提供了深刻理解,同时也可为国土规划提供理论支持,推动人与自然和谐共生。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

祁连山国家公园作为中国典型的生态区,位于青藏、蒙新和黄土三大高原的交汇地带<sup>[42]</sup>,地理坐标 $94^{\circ}00' - 103^{\circ}20' E, 36^{\circ}05' - 40^{\circ}00' N$ ,总面积约 $5.02 \times 10^4 \text{ km}^2$ ,平均海拔4555 m(图1),属大陆性高寒半湿润山地气候,地带性植被有山地草原、温带灌丛、山地森林、亚高山灌丛、高山亚冰雪稀疏植被等类型,有维管植物95科451属1311种,野生脊椎动物28目63科294种<sup>[6]</sup>。

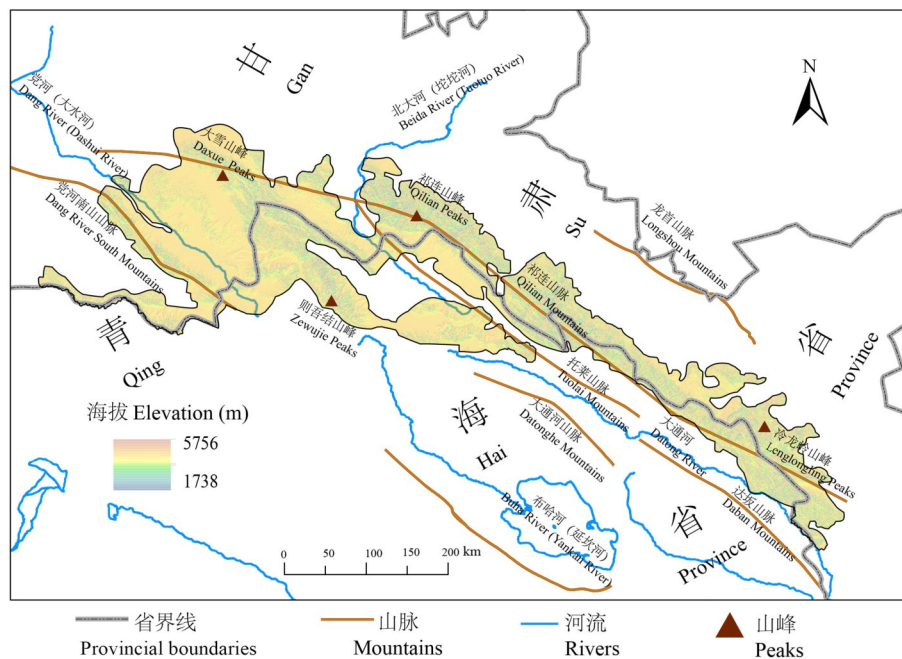


图1 研究区位置

Fig. 1 Location of the study area

基于自然资源部标准地图服务网GS(2020)4619号标准地图制作,底图边界无修改。Based on the standard map GS(2020)4619 from the Standard Map Service of the Ministry of Natural Resources, with no modification to the base map boundaries.

## 1.2 数据来源

本研究所采用的数据(表 1)主要有土地利用/覆被<sup>[43]</sup>、地形(数字高程模型、坡度和坡向)、气候(降水量、气温和潜在蒸散发量)、土壤(砂粒、细粉粒和黏土含量)、社会经济(人口密度、人类足迹指数、国内生产总值、林业工程、化肥使用量和粮食总产量)和综合因子(水土流失和受灾面积)数据集;所涉及各类数据[土地利用/覆被、数字高程模型、气候、土壤、社会经济等]的初始空间分辨率存在差异,为确保空间分析的可比性与一致性,所有数据均统一栅格化处理,并投影至 Krasovsky\_1940\_Albers 坐标系,重采样至 1 km 空间分辨率。此外,为避免空间错位导致的误差,进一步对所有栅格数据进行边界裁切与缺失值处理,从而确保数据之间的尺度统一和空间对齐。

表 1 数据来源及详细信息

Table 1 Data sources and detailed information

数据类型 Data type	数据名称 Data name	数据来源 Data source	分辨率 Resolution	格式 Format
气候 Climate	降水量、气温和潜在蒸散发量 Precipitation, temperature, and potential evapotranspiration	国家地球系统科学数据中心共享服务平台 National earth system science data center shared service platform ( <a href="http://www.geodata.cn">http://www.geodata.cn</a> )	1 km	数字控制 Numerical control (NC)
土地利用/覆被 Land use/cover	土地利用/覆被变化 Land use/cover change (LUCC)	中国科学院资源环境科学与数据中心 Resource and environmental science and data center, Chinese Academy of Sciences ( <a href="https://www.resdc.cn">https://www.resdc.cn</a> )	1 km	标记图像文件格式 Tagged image file format (TIF)
土壤 Soil	黏土、砂粒和细粉粒含量 Clay, sand, and silt content	世界土壤数据库 Harmonized world soil database (HWSD, <a href="https://poles.tpdc.ac.cn">https://poles.tpdc.ac.cn</a> )	1 km	标记图像文件格式 Tagged image file format (TIF)
地形 Topography	数字高程模型、坡度和坡向 Digital elevation model (DEM), slope, and aspect	中国科学院地理空间数据云平台 Chinese Academy of Sciences, geospatial data cloud platform ( <a href="https://www.gscloud.cn">https://www.gscloud.cn</a> )	30 m	标记图像文件格式 Tagged image file format (TIF)
人类社会经济 Human socio-economy	国内生产总值 Gross domestic product (GDP)	中国科学院资源环境科学与数据中心 Resource and environmental science and data center, Chinese Academy of Sciences ( <a href="https://www.resdc.cn">https://www.resdc.cn</a> )	1 km	标记图像文件格式 Tagged image file format (TIF)
	人类足迹指数 Human footprint index	中国农业大学土地科学与技术学院 College of Land Science and Technology, China Agricultural University ( <a href="https://www.x-mol.com">https://www.x-mol.com</a> )	1 km	数字控制 Numerical control (NC)
	人口密度 Population density	人口密度数据库 Population density database ( <a href="https://landscan.ornl.gov/">https://landscan.ornl.gov/</a> )	1 km	标记图像文件格式 Tagged image file format (TIF)
	林业工程、化肥使用量和粮食总产量 Forestry engineering, fertilizer usage, and total grain production	2000—2022 年中国统计年鉴 2000—2022 China statistical yearbook ( <a href="https://www.stats.gov.cn/sj/ndsj/">https://www.stats.gov.cn/sj/ndsj/</a> )	无 None	文本 Text
综合因子 Integrated factors	水土流失和受灾面积 Soil erosion and disaster-affected area	2000—2022 年中国统计年鉴 2000—2022 China statistical yearbook ( <a href="https://www.stats.gov.cn/sj/ndsj/">https://www.stats.gov.cn/sj/ndsj/</a> )	无 None	文本 Text

## 1.3 研究方法

本研究基于曼肯德尔 (Mann-Kendall, M-K) 检验法<sup>[44]</sup>和滑动  $t$  检验<sup>[45-46]</sup>来识别长时间序列中土地利用/覆被时间轨迹的突变节点,并将其作为典型年份节点划分不同时间段。通过土地利用转移矩阵分析不同时段的变化图谱(恒定、涨势和落势图谱),进一步探讨典型年份的土地利用程度以及整个研究时段的综合土地利用程度指数,最后,基于地理探测器揭示不同因子对土地利用程度的影响。

**1.3.1 土地利用转移矩阵** 土地利用转移矩阵可直观地表现出不同土地类型之间的转换关系,是探究土地利用类型变化的有效方法之一<sup>[47-48]</sup>,其计算公式为:

$$A_{ij} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & \cdots & A_{1n} \\ A_{21} & A_{22} & \cdots & A_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ A_{n1} & A_{n2} & \cdots & A_{nn} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: $A_{ij}$  代表土地利用类型的转化,即土地利用类型  $i$  向  $j$  的转换; $n$  代表土地利用类型的数目。

**1.3.2 变化图谱** 根据转化类型将其分为恒定图谱(研究时段内某种土地利用类型无转移变化)、涨势图谱(不同土地利用类型的扩张即新增面积)和落势图谱(不同土地利用类型的萎缩即减少面积)。

**1.3.3 土地利用综合程度** 土地利用综合程度指数表征在不同时间对土地的开发程度,能够反映区域内土地利用的深度<sup>[49-50]</sup>。计算公式为:

$$L = 100 \times \sum_{i=1}^n (A_i \times C_i) \quad (2)$$

式中: $L$  表示不同时间土地利用的综合程度指数; $A_i$  为第  $i$  类土地利用类型分级指数; $C_i$  表示第  $i$  类土地利用类型面积占比。

**1.3.4 地理探测器** 地理探测器模型主要包括因子、交互、生态和风险探测4个模块<sup>[51-52]</sup>。本研究涉及17种不同自变量,采用渔网法和K均值聚类法将其分解为8类,并在  $P < 0.001$  水平下,通过因子、交互和生态探测模块分析影响土地利用程度的主要驱动因素。具体而言,因子探测评估单一因子对土地利用程度的影响解释力;交互探测分析两种不同因子相互作用时对土地利用程度的影响;生态探测则比较不同因子对土地利用程度的影响是否存在显著差异<sup>[53-55]</sup>。

$$q = 1 - \frac{1}{N\sigma^2} \sum_{i=1}^L N_i \sigma_i^2 \quad (3)$$

式中: $q \in [0, 1]$ ,表示影响因子对土地利用程度空间变化的解释力,其值越接近1,表明影响因子对土地利用程度的主导能力越强,反之则越弱; $N$ 和 $\sigma^2$ 分别表示检测的总样本量和方差, $i$ 和 $L$ 均表示分类数(其中 $i=1, L=8$ )。

## 2 结果与分析

### 2.1 趋势与突变检验分析

在 $\alpha=0.05$ 的显著水平下,农田、水域及冰雪均呈不显著上升趋势,森林与草原呈显著上升趋势,灌木和裸地呈显著下降趋势(表2),通过M-K突变检验及滑动 $t$ 检验发现所有的土地利用类型均在不同年份发生了突变,选择发生突变次数较多(4~5次)的年份,最终将1995、1997、2004、2008和2019年确定为时间轨迹突变节点,故将1990—2022年划分为6个研究时段,即1990—1995、1995—1997、1997—2004、2004—2008、2008—2019和2019—2022年。

表2 1990—2022年不同土地利用类型的变化趋势及突变年份

Table 2 Trends and abrupt change years of various land use types from 1990 to 2022

土地利用类型 Land use type	Mann-Kendall (M-K)趋势检验 Trend test		突变检测 Breakpoint test	
	统计学Z值 Statistical Z-value	趋势 Trend ( $\alpha=0.05$ )	M-K突变点检测 M-K breakpoint test ( $\alpha=0.05$ )	滑动 $t$ 检验 Sliding $t$ -test ( $\alpha=0.05$ )
	农田 Cropland	0.48	不显著 Not significant ↑	1999, 2007, 2002
森林 Forest	7.79	显著 Significant ↑	无 None	1993, 1995, 1997, 2005, 2008, 2012, 2015
灌木 Shrub	-3.08	显著 Significant ↓	2004	1994, 1997, 2002, 2004, 2006, 2008, 2011, 2013
草原 Grassland	5.07	显著 Significant ↑	2006	1995, 1997, 2008, 2013, 2019
水域 Water	1.50	不显著 Not significant ↑	1991	1998, 2000, 2003, 2008, 2006, 2010, 2012, 2015, 2017, 2019
冰雪 Snow	0.29	不显著 Not significant ↑	1990, 1996	1992, 1995, 2000, 2004, 2012, 2014, 2017, 2019
裸地 Bare land	-5.10	显著 Significant ↓	2004	1995, 1997, 2000, 2008, 2019

## 2.2 土地利用/覆被类型的时空变化

**2.2.1 空间分布** 不同土地利用类型的空间分布具有明显差异性(图 2)。其中草原主要以块状形式分布在祁连山脉与托莱山脉之间,沿祁连山脉自大雪山峰顶端延伸至冷龙岭山峰末端;裸地则集中分布在则吾结山峰与大雪山峰,呈块状分布;森林主要分布在祁连山脉中下端,呈不连续块状及零星点状分布;相比之下,冰雪分布与河流位置密切相关,主要沿着党河(大水河)、北大河(沱沱河)以及布哈河(延坎河)的走向呈区域性块状分布,除河流区域外,冰雪还在则吾结山峰呈连续块状分布;水域则主要以点状分布于冰雪区域周围;此外,农田和灌木主要零星分布在沿着祁连山脉下端的冷龙岭山峰区域。

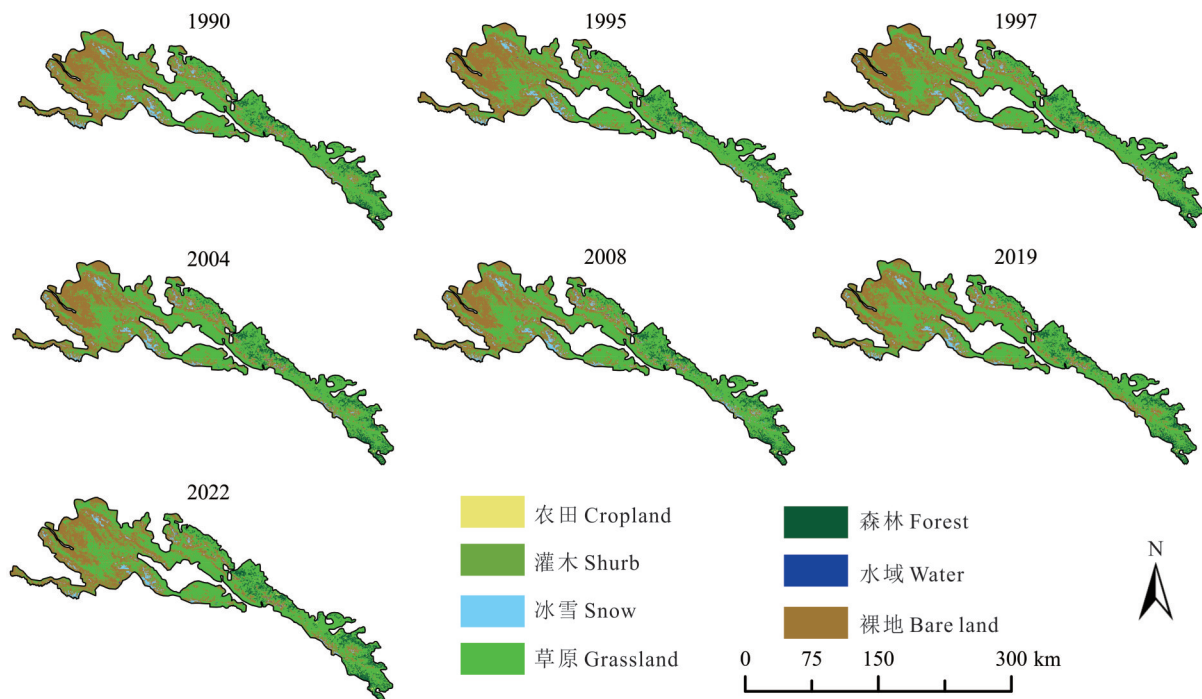


图 2 典型年份的土地利用空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of land use in typical years

基于自然资源部标准地图服务网 GS(2020)4619 号标准地图制作,底图边界无修改。Based on the standard map GS(2020)4619 from the Standard Map Service of the Ministry of Natural Resources, with no modification to the base map boundaries.

**2.2.2 恒定图谱** 不同典型时段的恒定图谱具有明显的时空差异性(图 3)。不同土地利用/覆被类型中草原未变化的面积占比最高,其次是裸地、森林和冰雪,而农田、灌木和水域未变化的面积不足 1.00%(图 3)。除 2019—2022 年外的其余时段,草原未变化的面积均高于 1/2,且主要位于祁连山脉中部至冷龙岭山峰末端;裸地未变化的面积占比大于 25.00%,且主要分布在党河南山山脉与祁连山脉之间;森林未变化的面积不足草原未变化面积的 1/4,除 2019—2022 年达到最大值(13.52%),其余时段未变化面积占比均小于 5.00%,主要位于靠近龙首山脉的祁连山脉附近;冰雪未变化面积较森林更小,占比均不足 1/20,主要分布于则吾结山峰以及河流区域;而水域、灌木以及农田三者零星分布于祁连山脉区域。

**2.2.3 涨势图谱** 不同典型时段的涨势图谱呈现出明显的时空差异性(图 4)。草原与裸地扩张面积普遍高于其他类型,除 1995—1997 与 2019—2022 年裸地扩张面积略高外,其余时段均以草原扩张为主。草原扩张广泛分布于祁连山脉,尤以大雪山峰、则吾结山峰及冷龙岭区域最为明显,2019—2022 年扩张面积达 10.06%,为各时段之最。裸地扩张主要集中在祁连山峰与大雪山峰之间,除 2019—2022 年外,其余时段面积均小于 5.00%,2004—2008 年最小,仅 1.36%。森林扩张位于冷龙岭山峰一带,面积均低于 2.80%;冰雪和水域扩张多分布于北大河(沱沱河)与党河(大水河)流域附近。灌木与农田扩张在 2019—2022 年达到最大,合计面积仅占 0.80%,主要位于达坂山脉和冷龙岭区域。

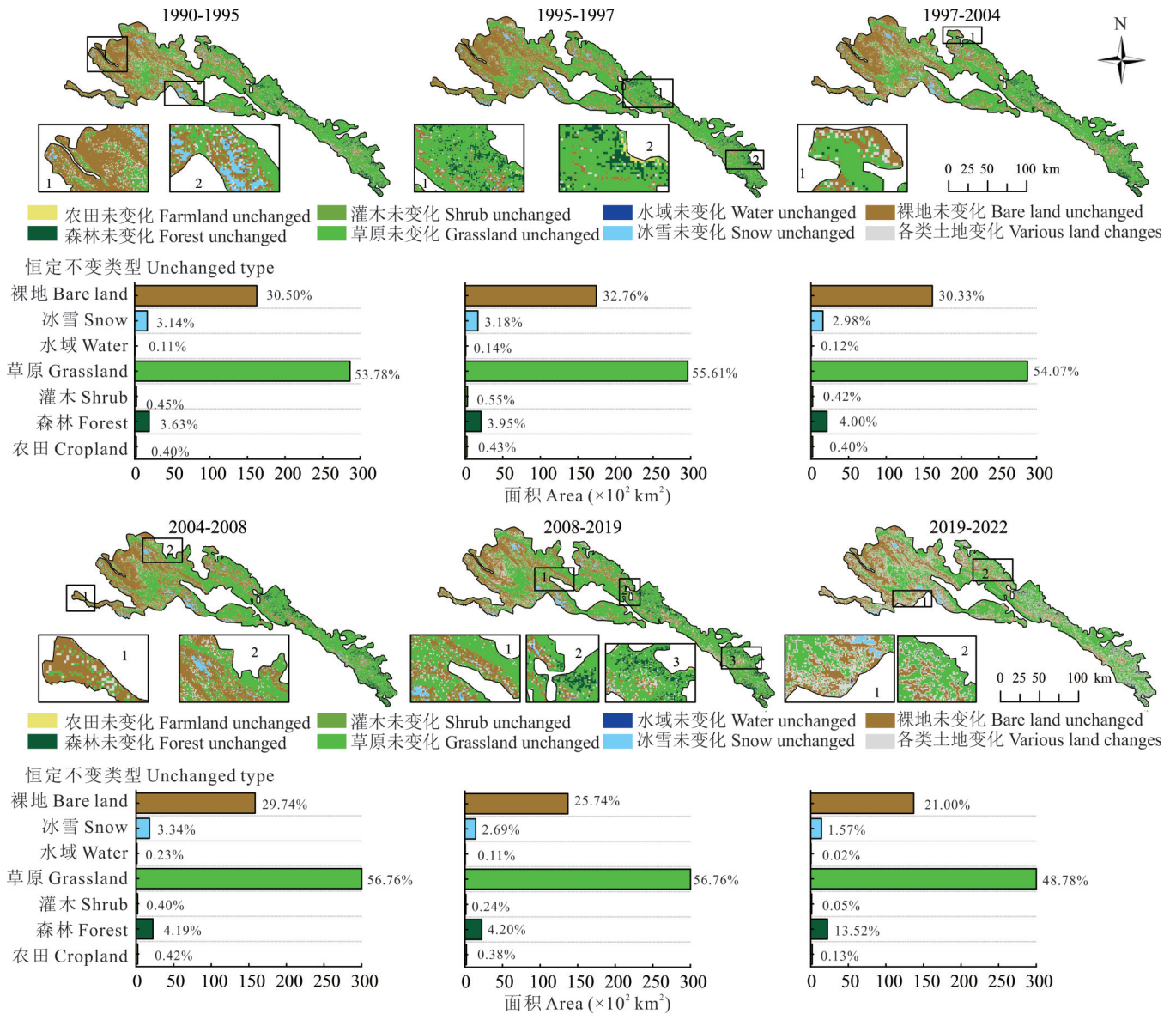


图3 不同时期的恒定图谱

Fig. 3 Constant maps for different periods

基于自然资源部标准地图服务网GS(2020)4619号标准地图制作,底图边界无修改。Based on the standard map GS(2020)4619 from the Standard Map Service of the Ministry of Natural Resources, with no modification to the base map boundaries.

**2.2.4 落势图谱** 不同典型时段的落势图谱表现出明显的时空差异性(图5)。草原与裸地的收缩面积普遍高于其他类型,农田、水域收缩面积则较小。2019—2022年草原收缩明显,占比达13.33%,其余时段亦存在不同程度收缩,主要块状分布于祁连山峰与冷龙岭山峰之间。除1995—1997年与2019—2022年外,裸地在各时段的收缩面积均高于草原,2008—2019年达到峰值(5.35%),区域呈不连续片状分布,集中于党河、大雪山峰及祁连山脉其他地段。冰雪收缩面积远低于草原与裸地,2004—2008年最小(0.06%),2008—2019年为其26倍,主要块状分布于党河与则吾结山峰,点状见于达坂山脉。2019—2022年森林收缩明显,集中于祁连山峰与冷龙岭。灌木、农田与水域收缩面积始终不足1.00%,零星分布于整个祁连山脉。

### 2.3 土地利用程度和其综合程度指数

土地利用程度在空间上整体呈东南高,西北低的变化趋势,且在1997、2019和2022年大雪山峰区域的土地利用程度明显低于其他4个年份(图6);时间上,土地利用综合程度指数整体呈增加趋势,年变化率为0.18%,局部呈先增后减的变化趋势,且随着时间的迁移波动幅度逐步增大。具体来看,近33年间,共有13年土地利用综合程

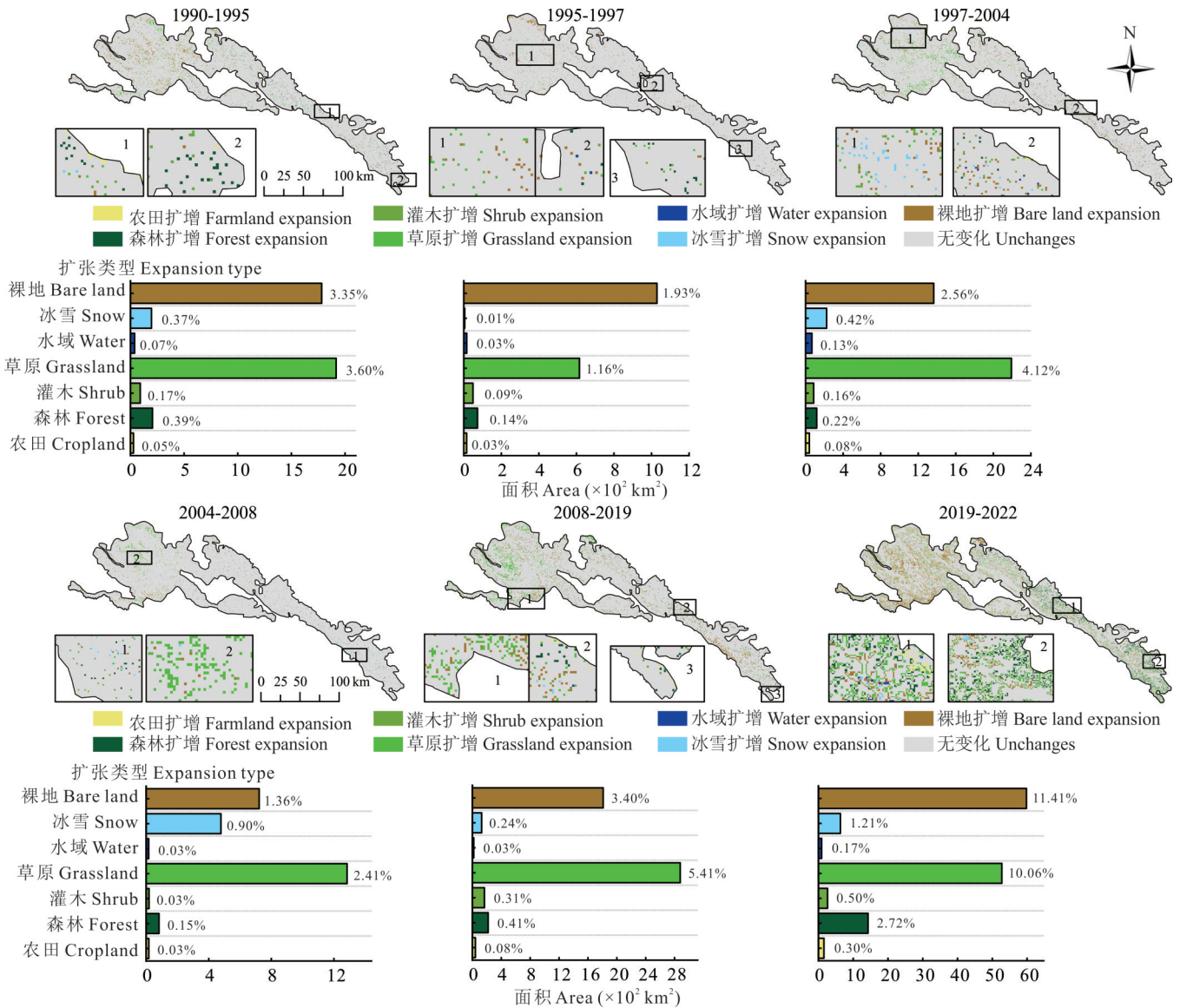


图 4 不同时期的涨势图谱

Fig. 4 Growth trend maps for different periods

基于自然资源部标准地图服务网 GS(2020)4619 号标准地图制作, 底图边界无修改。Based on the standard map GS(2020)4619 from the Standard Map Service of the Ministry of Natural Resources, with no modification to the base map boundaries.

度指数高于均值(165.13), 从 1996 年起, 土地开发程度整体逐步上升, 且在 2018 年达到最大值, 此时土地利用综合程度指数最高, 表明对土地的开发程度最为强烈。随后, 土地利用综合程度指数开始大幅度下降, 并在 2022 年降低至 164.83。

#### 2.4 影响因素

不同因子对土地利用程度的影响具有明显的差异性, 除坡度、坡向、气温、黏土含量、GDP 和人口密度外, 其余 11 种影响因子整体上均对土地利用程度具有极显著影响 ( $P < 0.001$ )。其中潜在蒸散发量、海拔和人类足迹对土地利用程度的影响较为强烈, 且除 2022 年外的其他典型年份对土地利用程度的解释力均大于 0.090 (图 7); 此外, 在 2022 年除坡度、坡向和人类足迹外, 其余因子均对土地利用程度具有极显著影响 ( $P < 0.001$ ), 具体而言, 年均气温 (0.6030)、林业工程 (0.5873)、水土流失 (0.5871)、受灾面积 (0.5867)、粮食总产量 (0.5855)、化肥使用量 (0.5850)、砂粒含量 (0.5846) 和细粉粒含量 (0.5796) 对土地利用程度的解释能力均高于 57.90%, 而其余 6 种因子的解释能力值为 2.52%~22.55%。

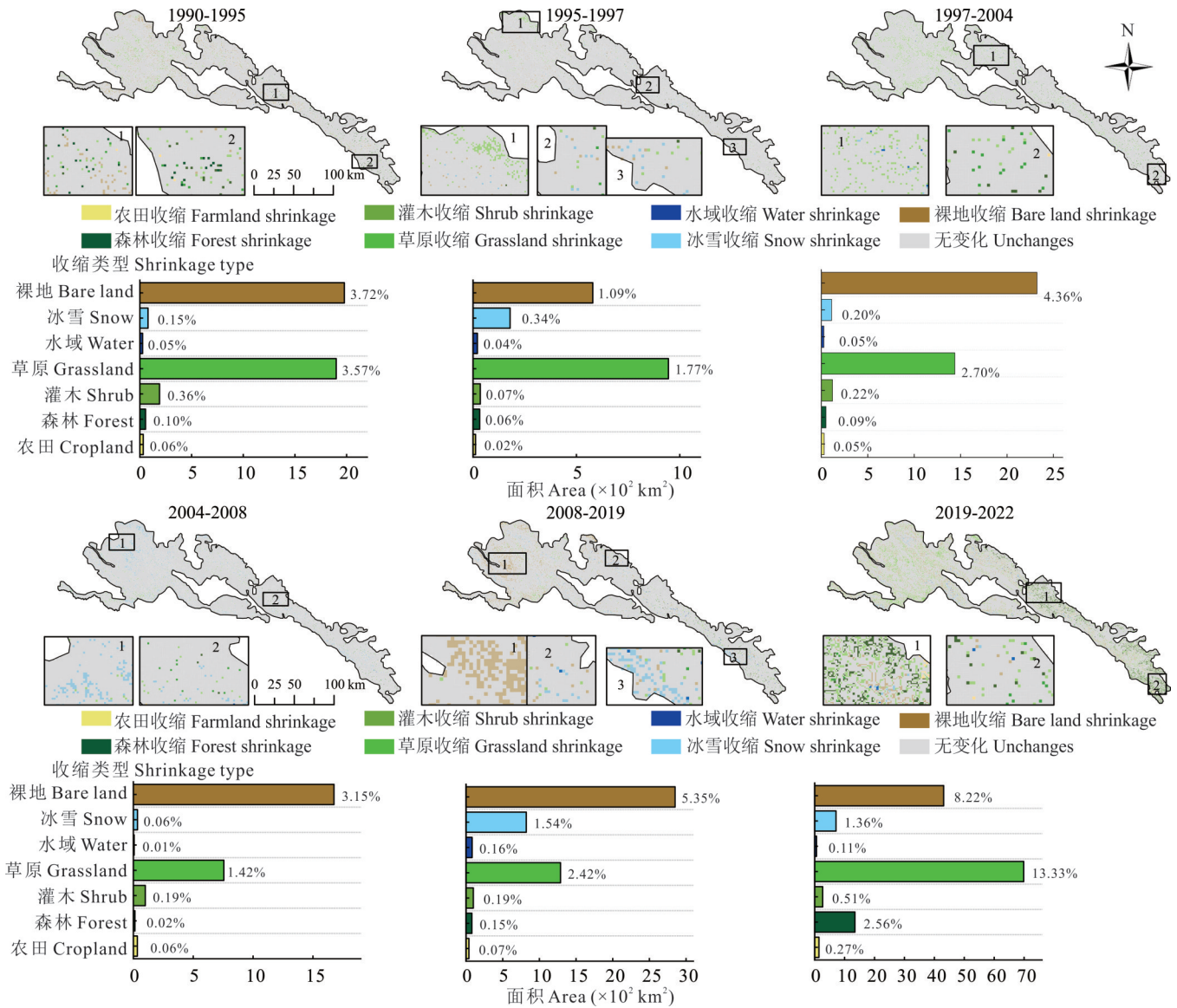


图5 不同时期的落势图谱

Fig. 5 Decline trend maps for different periods

基于自然资源部标准地图服务网GS(2020)4619号标准地图制作,底图边界无修改。Based on the standard map GS(2020)4619 from the Standard Map Service of the Ministry of Natural Resources, with no modification to the base map boundaries.

**2.4.1 交互探测辨析** 本研究发现土地利用程度的变化并非由单一因子所驱动,而是多因素之间协同驱动。本研究应用交互探测方式发现各因子之间在不同时间均呈双因子增强和非线性增强(图8),进一步表明不同因子之间的协同性在土地利用程度变化中起着决定性作用。具体而言,除2022年外,人类足迹和降水量相互协同时对土地利用程度的影响较大,且其解释能力均超过29.60%,这一现象可理解为“自然环境脆弱性”与“人为干扰外源性”叠加的空间放大机制。具体而言,当自然降水引发水土流失或地表扰动时,若叠加人类足迹干扰,则更易引发土地退化过程的非线性响应。这种关系在生态脆弱区尤为突出,进一步表现出典型的“脆弱区—扰动共振”协同机制。其中海拔作为影响土地利用程度变化的主导因子,其与降水量( $q>0.270$ )、受灾面积( $q>0.263$ )、水土流失( $q>0.252$ )、人类足迹指数( $q>0.248$ )、化肥使用量( $q>0.232$ )和粮食总产量( $q>0.225$ )相互协同时均对土地利用程度的变化呈明显影响,而潜在蒸散发量同样作为主导因子之一,其与人类足迹、林业工程、水土流失、化肥使用量、粮食总产量、受灾面积和土壤状况相互协同时对土地利用程度的解释能力均大于21.00%;而在

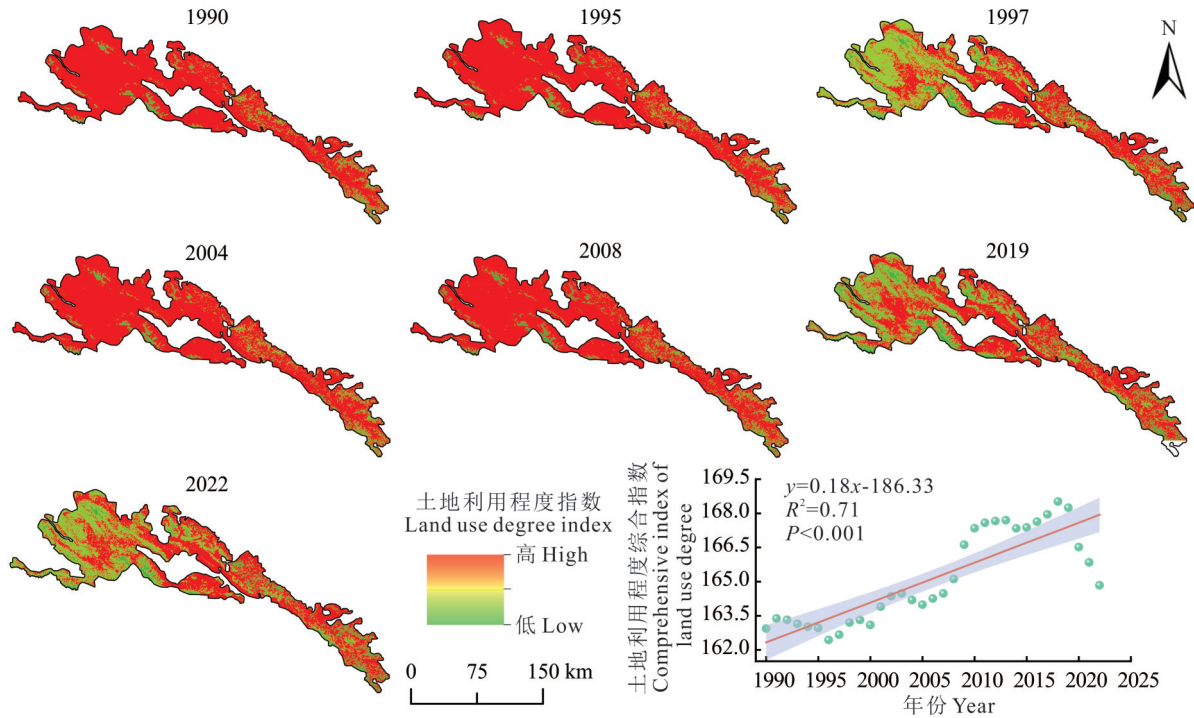


图 6 典型年份的土地利用程度及土地利用综合程度指数

Fig. 6 Land use degree and comprehensive index of land use degree for typical years

基于自然资源部标准地图服务网 GS(2020)4619 号标准地图制作, 底图边界无修改。Based on the standard map GS(2020)4619 from the Standard Map Service of the Ministry of Natural Resources, with no modification to the base map boundaries.

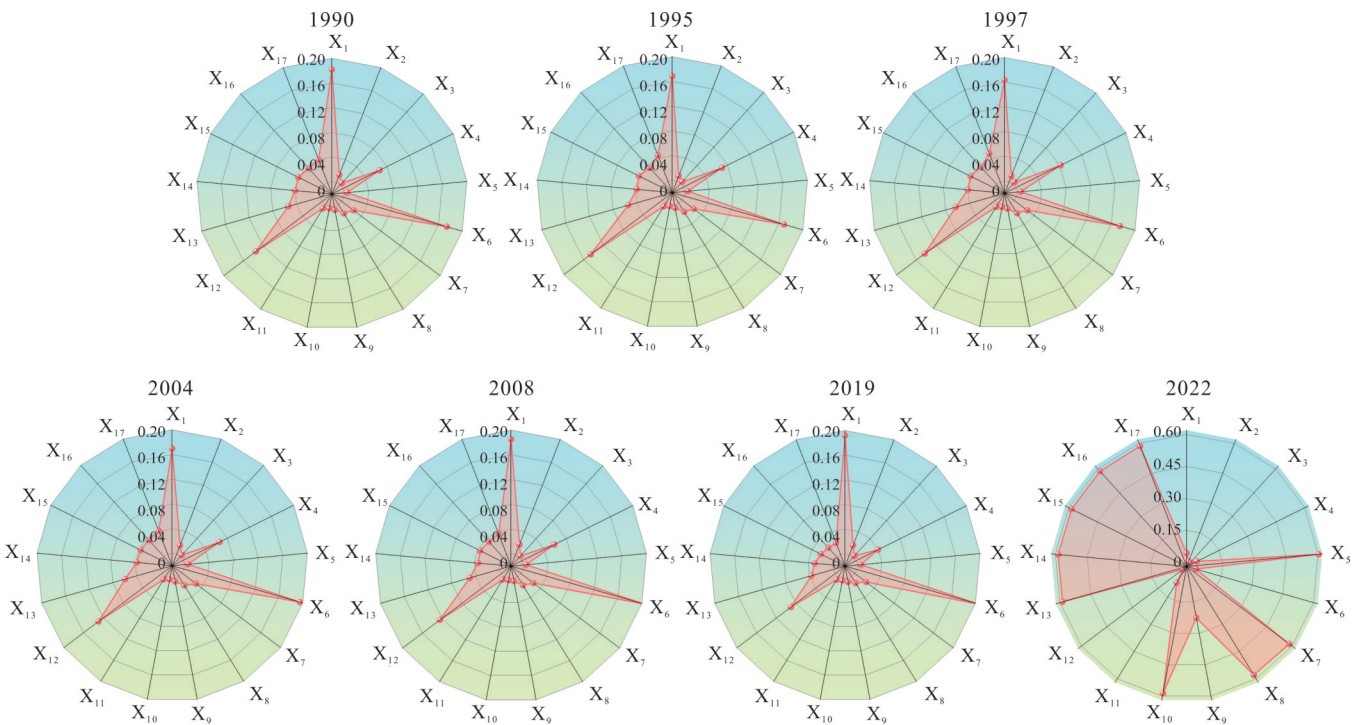


图 7 典型年份土地利用程度驱动力

Fig. 7 Driving forces of land use degree in typical years

$X_1 \sim X_{17}$  分别表示数字高程模型、坡度、坡向、降水量、气温、潜在蒸散发量、黏土含量、砂粒含量、细粉粒含量、国内生产总值、人口密度、人类足迹指数、林业工程、水土流失、化肥使用量、粮食总产量和受灾面积。  $X_1 \sim X_{17}$  represent the following variables: Digital elevation model (DEM), slope, aspect, precipitation, temperature, potential evapotranspiration, clay content, sand content, silt content, gross domestic product (GDP), population density, human footprint index, forestry projects, soil erosion, fertilizer usage, total grain output, and affected area by disasters. 下同 The same below.

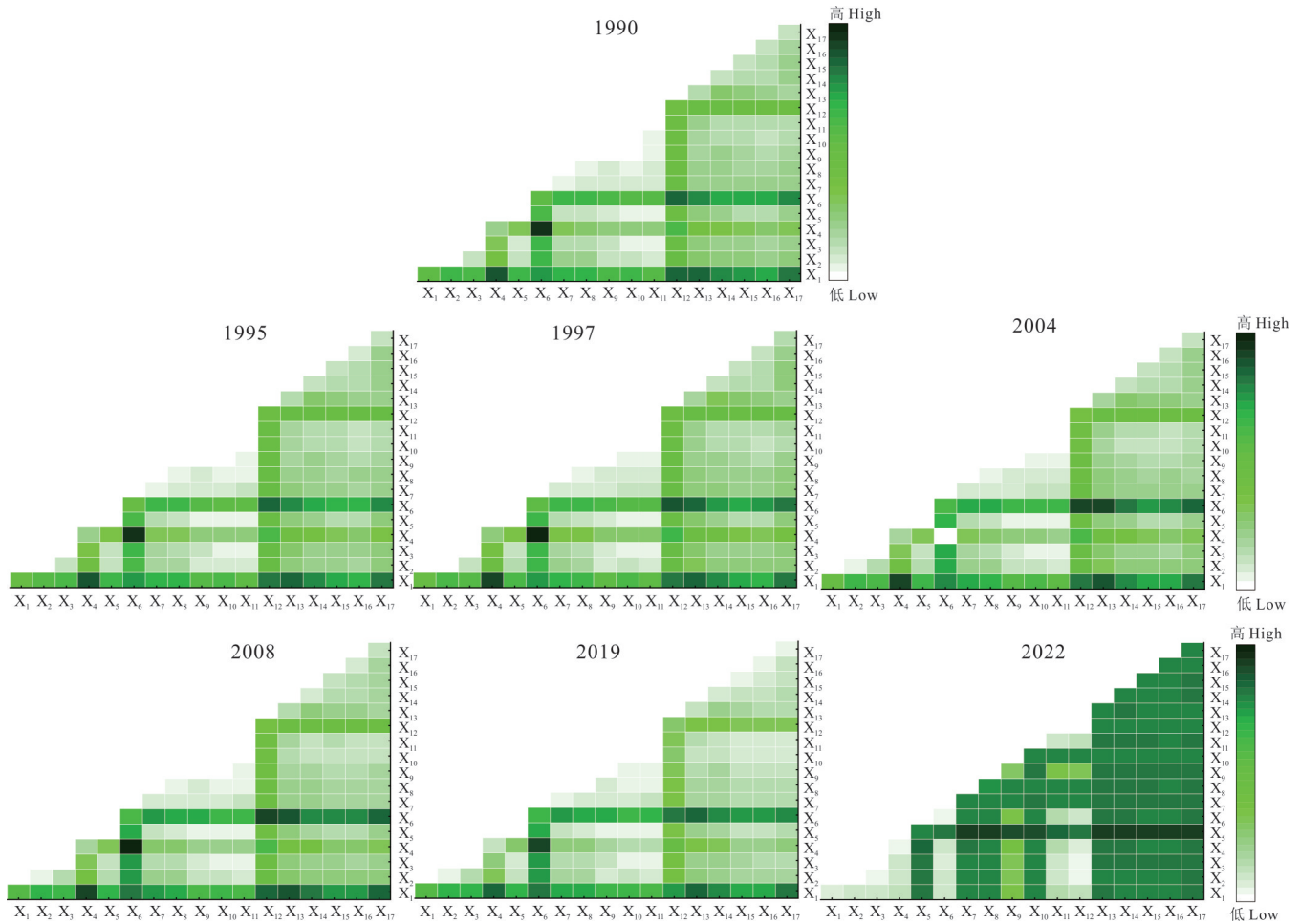


图8 典型年份土地利用程度的交互驱动

Fig. 8 Interaction-driven of land use degree in typical years

图中颜色由浅至深表示不同影响因子对不同年份土地利用程度的交互作用,即评估两种影响因子共同作用时是否会增加或减弱土地利用程度的大小。The color gradient from light to dark indicates the interaction effects of different influencing factors on land-use intensity across years, reflecting whether their combined effects enhance or reduce the degree of land use.

2012年,林业工程、水土流失、化肥使用量、粮食总产量和受灾面积与其他因子相互协同时对土地利用程度变化的解释力均大于59.20%(图8)。

2.4.2 生态探测辨析 本研究进一步应用生态探测方法比较不同影响因素对土地利用程度空间变化是否具有显著性差异。发现海拔、潜在蒸散发量和人类足迹指数作为主导因子,与其他因子对土地利用程度的影响几乎均呈显著性差异(图9)。具体而言,从1990至2008年,海拔、降水量、潜在蒸散发量、砂粒、细粉粒和黏土含量等自然因子的显著性差异始终是驱动土地利用程度变化的主要因素。而经济因子与其他因子的显著性差异在2004年之前较为微弱,直到2019年后才逐渐增强,这一结果不仅反映了自然因子的空间主导性,也与区域生态保护政策有关。自祁连山国家公园设立以来,研究区被划入生态保护红线范围,区域开发强度受到严格限制,城镇扩张与基础设施建设受控,从而使得GDP、人口密度等因子的空间异质性减弱,导致其在地理探测器模型中的解释力较弱。

3 讨论

3.1 典型时间节点的合理性

为了捕捉近33年间祁连山国家公园土地利用/覆被类型在不同时段细节变化,本研究引入了曼肯德尔检验法<sup>[56]</sup>和滑动t检验法,这两种方法能够有效识别在长时间序列中发生显著变化的年份,并精准定位局部变化趋

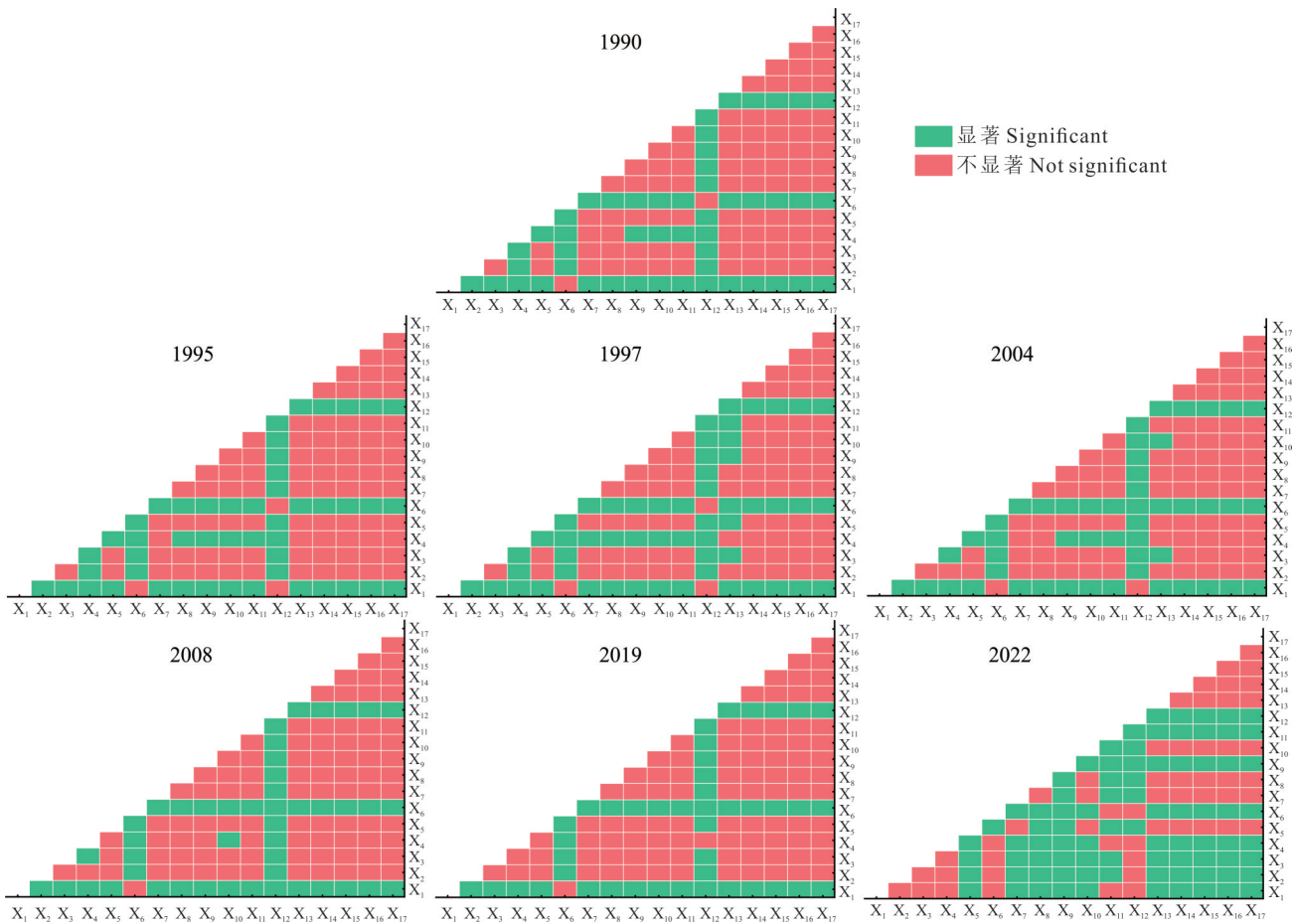


图 9 典型年份土地利用程度的生态探测

Fig. 9 Ecological detection of land use degree in typical years

势及突变点发生的位置<sup>[57-58]</sup>。本研究将 1995、1997、2004、2008 和 2019 年确定为典型时间节点,定性定量分析不同时段土地利用/覆被变化。相关学者通常以 5 或 10 年为间隔评估不同阶段的土地利用/覆被变化<sup>[59-61]</sup>,然而 Li 等<sup>[62]</sup>和 Mehra 等<sup>[63]</sup>指出在不同区域以土地利用/覆被变化为基础的相关研究在时段划分上存在主观性。此外,本研究还发现本研究的时间节点与该区域的生态工程具有一致性,进一步验证了上述时间节点在该研究中的适用性及合理性。

### 3.2 图谱在细节信息捕捉中的应用优势

在典型高寒山地生态系统—祁连山国家公园区域,本研究发现土地利用图谱(恒定、涨势和落势)具有明显的时空差异,草原和裸地是该区域占比较大且变化较为明显的土地利用/覆被类型。

相关学者通过土地利用转移矩阵发现草原和裸地是祁连山区的主要土地类型,且草原面积呈增加趋势,而裸地面积呈下降趋势<sup>[60]</sup>;在三江源及西部地区,草原与裸地之间转化最为频繁<sup>[59,64]</sup>;此外,已有研究应用和弦图和桑基图分析了不同土地利用类型之间的转化情况,涵盖了地中海葡萄牙<sup>[65]</sup>、波多黎各圣胡安地区<sup>[24]</sup>、印度<sup>[66]</sup>、新疆<sup>[67]</sup>和缅甸<sup>[68]</sup>等区域。上述研究应用转移矩阵表、和弦图和桑基图清晰地表达了多个时间间隔内土地类型之间的转化关系,然而,这些方法不能定性判断变化发生的具体区域,也无法定量地评估面积占比。与上述方法相比,土地利用/覆被时空变化分析中的变化图谱(恒定图谱、涨势图谱和落势图谱)在捕捉土地变化时段信息上更加全面。一方面,变化图谱能够具体表达出不同区域的动态变化,通过空间分布图清晰地表达每一时期的变化特征;另一方面,它还能量化不同区域的动态变化,提供更加细致的变化分析。

### 3.3 土地利用程度变化的归因辨析

本研究发现土地利用程度的变化并非由单一因子所驱动,而是多因素之间的协同驱动。本研究应用交互探

测方式发现各因子之间在不同时间均呈双因子增强和非线性增强。这一现象主要归因于该区域属于高寒山地生态系统,其独特的地理位置和气候条件导致不同因子协同时对土地利用程度的影响呈显著差异<sup>[51,69-70]</sup>。本研究发现气候与地形的交互效应对土地利用程度变化起主导作用<sup>[54,71-72]</sup>,这主要源于山脉的高度和坡度导致降水分布不均;其次,随着人类活动的加剧,土地利用程度发生了显著变化,其与降水量以及地形因子之间的交互作用,进一步加剧了土地利用程度的变化<sup>[73-74]</sup>。此外,高寒山地生态系统的自我恢复能力较弱,尤其是滑坡、泥石流和水土流失等自然灾害与海拔、降水量等因子交互叠加作用时,进一步加剧了土地利用程度的变化<sup>[52,75]</sup>。

进一步应用生态探测方法比较不同影响因素对土地利用程度空间变化是否具有显著性差异。自2004年起,林业工程等政策干预因子的显著性逐步增强,成为土地利用驱动机制的重要组成部分。自然因子、经济因子和政策因子在2022年均对土地利用程度变化产生显著影响,表明此时期土地利用程度变化是多因子综合作用的结果。这主要归因于该区域特殊的地理气候条件对土地利用程度的直接影响<sup>[55,76]</sup>,尤其是海拔、降水量、潜在蒸散发量和土壤粒度长期主导了土地利用程度的变化<sup>[53,77]</sup>,且随着经济发展以及生态保护政策的逐步加强,土地利用程度的变化受自然、经济和政策等因子的共同影响<sup>[78-79]</sup>。

#### 3.4 方法局限性与未来研究展望

尽管本研究通过变化图谱系统刻画了高寒山地生态系统土地利用/覆被的时空演变过程,并揭示了主要驱动机制,但仍存在一定的局限性。变化图谱主要关注土地利用类型的转化过程,能够有效识别“恒定—扩张—收缩”区域,但对土地利用的内部结构、功能利用效率等微观演变过程反映不足,尤其无法揭示“同一类型”土地随时间发生的隐性退化或功能劣变。因此,后续研究可在图谱分析基础上,融合遥感植被指数、地表温度、碳通量等生态指标,以更全面地刻画土地系统的动态演变特征,提高对土地利用质量变化的解释力。

#### 4 结论

本研究以典型高寒山地生态系统—祁连山国家公园为例,从变化图谱视角探讨其土地利用/覆被模式及其驱动因素。选取1995、1997、2004、2008和2019年为典型时间节点,与区域生态工程实施具有较高的一致性,便于捕捉近33年土地利用/覆被的时空动态。结果表明,草原和裸地为比例较大且变化较明显的类型,尤其2019—2022年草原收缩面积比扩张面积高出3.27%,在大雪山峰与冷龙岭区域尤为突出;裸地则主要在祁连山峰和大雪山峰区域扩张,但幅度小于草原。森林、冰雪、水域等类型的变化幅度较小,农田、灌木、水域和冰雪的扩张与收缩面积在各时段均小于1.50%。土地利用程度整体呈现东南高、西北低的空间格局。地理探测器分析表明,除坡度、坡向、气温、黏土含量、GDP和人口密度外,其他因子对土地利用的程度也具有明显的影响,主要由高寒山地特有的地理与气候条件所致。其中,海拔、潜在蒸散发量与人类足迹对土地利用程度的变化起主导作用,自然、经济与政策因素协同作用尤为关键。本研究展示了一种基于变化图谱的土地利用/覆被动态识别新路径,不仅能够识别其稳定区与变化区,还能量化其动态变化,提升了土地系统动态表达的精度与深度,研究结果可为高寒山地生态系统管理提供科学参考与决策支持。

#### 参考文献 References:

- [1] Aune-Lundberg L, Strand G H. Comparison of variance estimation methods for use with two-dimensional systematic sampling of land use/land cover data. *Environmental Modelling & Software*, 2014, 61(9): 87-97.
- [2] Talukdar S, Singha P, Mahato S, *et al.* Land-use land-cover classification by machine learning classifiers for satellite observations—A review. *Remote Sensing*, 2020, 12(7): 1135.
- [3] Hansen M C, Loveland T R. A review of large area monitoring of land cover change using Landsat data. *Remote Sensing of Environment*, 2012, 122(7): 66-74.
- [4] Dutta D, Rahman A, Paul S K, *et al.* Changing pattern of urban landscape and its effect on land surface temperature in and around Delhi. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2019, 191(9): 551.
- [5] Borrelli P, Robinson D A, Panagos P, *et al.* Land use and climate change impacts on global soil erosion by water (2015-2070). *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2020, 117(36): 21994-22001.

- [6] Gao X, Huang X X, Chang S H, *et al.* Long-term improvements in water conservation functions at Qilian Mountain National Park, northwest China. *Journal of Mountain Science*, 2023, 20(10): 2885–2897.
- [7] Lu W Z, Xiao J F, Liu F, *et al.* Contrasting ecosystem CO<sub>2</sub> fluxes of inland and coastal wetlands: a meta-analysis of eddy covariance data. *Global Change Biology*, 2017, 23(3): 1180–1198.
- [8] Hu S J, Niu Z G, Chen Y F, *et al.* Global wetlands: Potential distribution, wetland loss, and status. *Science of the Total Environment*, 2017, 586: 319–327.
- [9] Dumitrascu M, Himiyama Y, Gabrovec M, *et al.* Land use and land cover changes in a global environmental change context—the contribution of geography//Research directions, challenges and achievements of modern geography. Singapore: Springer Nature Singapore, 2023: 175–203.
- [10] Guarderas P, Smith F, Dufrene M. Land use and land cover change in a tropical mountain landscape of northern Ecuador: Altitudinal patterns and driving forces. *PLoS One*, 2022, 17(7): e0260191.
- [11] Shahfahad D, Kumari B, Tayyab M, *et al.* Assessment of public open spaces (POS) and landscape quality based on per capita POS index in Delhi, India. *SN Applied Sciences*, 2019, 1(4): 368.
- [12] Rahman A, Aggarwal S P, Netzband M, *et al.* Monitoring urban sprawl using remote sensing and GIS techniques of a fast growing urban centre, India. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2011, 4(1): 56–64.
- [13] Zhang H, Han W H, Song J Y, *et al.* Spatio-temporal variations of habitat quality in Qilian Mountain National Park. *Chinese Journal of Ecology*, 2021, 40(5): 1419–1430.  
张华, 韩武宏, 宋金岳, 等. 祁连山国家公园生境质量时空演变. *生态学杂志*, 2021, 40(5): 1419–1430.
- [14] Yan K, Ding Y. The exploration of China's National Park System Pilot Project: Taking Qilian Mountain National Park as an example. *International Journal of Geoheritage and Parks*, 2020, 8(4): 210–214.
- [15] Bičík I, Jeleček L. Land use and landscape changes in Czechia during the period of transition 1990–2007. *Geografie*, 2009, 114(4): 263–281.
- [16] Gabrovec M, Kumer P. Land-use changes in Slovenia from the Franciscan Cadaster until today. *Acta Geographica Slovenica*, 2019, 59(1): 11–26.
- [17] Deng Z W, Quan B, Zhang H B, *et al.* Scenario simulation of land use and cover under safeguarding ecological security: a case study of Chang-Zhu-Tan metropolitan area, China. *Forests*, 2023, 14(11): 2131.
- [18] Opedes H, Van Eupen M, Múcher C A, *et al.* Park conservation or degradation? iCLUE modelling of land use change projections in the upper Manafwa watershed on Mount Elgon, Uganda. *Journal for Nature Conservation*, 2023, 76(1): 126493.
- [19] Akumu C E, Dennis S. Urban land cover/use mapping and change detection analysis using multi-temporal Landsat OLI with LiDAR-DEM and derived TPI. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 2022, 88(4): 243–253.
- [20] Chen W X, Yang L Y, Chi G Q, *et al.* Ecosystem degradation or restoration? The evolving role of land use in China, 2000–2020. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2024, 196(3): 304.
- [21] Mao S Z, She J Y, Zhang Y. Spatial-temporal evolution of land use change and eco-environmental effects in the Chang-Zhu-Tan core area. *Sustainability*, 2023, 15(9): 7581.
- [22] Lai Y, Huang G Q, Chen S Z, *et al.* Land use dynamics and optimization from 2000 to 2020 in east Guangdong Province, China. *Sustainability*, 2021, 13(6): 3473.
- [23] Ngcinela S, Mushunje A, Taruvinga A, *et al.* Mapping the land use changes in cultivation areas of maize and soybean from 2006 to 2017 in the north west and free state provinces, south Africa. *Agronomy*, 2024, 14(5): 1002.
- [24] Cuba N. Research note: Sankey diagrams for visualizing land cover dynamics. *Landscape and Urban Planning*, 2015, 139(1): 163–167.
- [25] Lambin E F, Turner B L, Geist H J, *et al.* The causes of land-use and land-cover change: moving beyond the myths. *Global Environmental Change*, 2001, 11(4): 261–269.
- [26] Wang Z M, Mao D H, Li L, *et al.* Quantifying changes in multiple ecosystem services during 1992–2012 in the Sanjiang Plain of China. *Science of the Total Environment*, 2015, 514(1): 119–130.
- [27] Kleemann J, Baysal G, Bulley H N N, *et al.* Assessing driving forces of land use and land cover change by a mixed-method approach in north-eastern Ghana, West Africa. *Journal of Environmental Management*, 2017, 196(1): 411–442.
- [28] Vadrevu K P, Heinimann A, Gutman G, *et al.* Remote sensing of land use/cover changes in South and Southeast Asian Countries. *International Journal of Digital Earth*, 2019, 12(10): 1099–1102.
- [29] Alijani Z, Hosseinali F, Biswas A. Spatio-temporal evolution of agricultural land use change drivers: A case study from Chalous

- region, Iran. *Journal of Environmental Management*, 2020, 262(1): 110326.
- [30] Wang J, He T, Lin Y F. Changes in ecological, agricultural, and urban land space in 1984–2012 in China: Land policies and regional social-economical drivers. *Habitat International*, 2018, 71(1): 1–13.
- [31] Antwi-Agyei P, Dougill A J, Fraser E D G, *et al.* Characterising the nature of household vulnerability to climate variability: empirical evidence from two regions of Ghana. *Environment, Development and Sustainability*, 2013, 15(4): 903–926.
- [32] Rimal B, Paudel B, Rijal S, *et al.* Changing pattern and drivers of land use and land cover in Bagmati Province of Nepal. *Himalayan Review*, 2024, 1(1): 1–18.
- [33] Tasser E, Leitinger G, Tappeiner U. Climate change versus land-use change—What affects the mountain landscapes more? *Land Use Policy*, 2017, 60(1): 60–72.
- [34] Kim I, Le Q B, Park S J, *et al.* Driving forces in archetypical land-use changes in a mountainous watershed in East Asia. *Land*, 2014, 3(3): 957–980.
- [35] Petrisor A I, Sirodoev I, Ianos I. Trends in the national and regional transitional dynamics of land cover and use changes in Romania. *Land*, 2020, 9(2): 230.
- [36] Kolb M, Galicia L. Scenarios and story lines: drivers of land use change in southern Mexico. *Environment, Development and Sustainability*, 2018, 20(2): 681–702.
- [37] Wang L, Wu L, Zhang W. Impacts of land use change on landscape patterns in mountain human settlement: The case study of Hantai District (Shaanxi, China). *Journal of Mountain Science*, 2021, 18(3): 749–763.
- [38] Chauvier Y, Thuiller W, Brun P, *et al.* Influence of climate, soil, and land cover on plant species distribution in the European Alps. *Ecological Monographs*, 2021, 91(2): e01433.
- [39] Löffler J, Anschlag K, Baker B, *et al.* Mountain ecosystem response to global change. *Erdkunde*, 2011, 65(2): 189–213.
- [40] Keiler M, Kellerer-Pirklbauer A, Otto J. Preface: concepts and implications of environmental change and human impact: studies from Austrian geomorphological research. *Geografiska Annaler: Series A-Physical Geography*, 2012, 94(1): 1–5.
- [41] Jia Z M, Ma B R, Zhang J, *et al.* Simulating spatial-temporal changes of land-use based on ecological redline restrictions and landscape driving factors: A case study in Beijing. *Sustainability*, 2018, 10(4): 1299.
- [42] Ma L B, Zhu Z H, Li S X, *et al.* Analysis of spatial and temporal changes in human interference in important ecological function areas in China: the Gansu section of Qilian Mountain National Park as an example. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2023, 195(9): 1029.
- [43] Yang J, Huang X. The 30 m annual land cover dataset and its dynamics in China from 1990 to 2019. *Earth System Science Data*, 2021, 13(8): 3907–3925.
- [44] Brockhoff R C, Biesbroek R, Van der Bolt B. Drought governance in transition: a case study of the Meuse River Basin in the Netherlands. *Water Resources Management*, 2022, 36(8): 2623–2638.
- [45] Fan X Y, Chen B, Fu C F, *et al.* Research on the influence of abrupt climate changes on the analysis of typical meteorological year in China. *Energies*, 2020, 13(24): 6531.
- [46] Jaiswal R K, Lohani A K, Tiwari H L. Statistical analysis for change detection and trend assessment in climatological parameters. *Environmental Processes*, 2015, 2(4): 729–749.
- [47] Zhou Q Z, Song Y, Zhang Y, *et al.* Land use transition and its effect on ecosystem service value with introducing “three wastes” factor in the industrial county, China. *Environmental Science and Pollution Research*, 2024, 31(1): 34962–34980.
- [48] Berdimbetov T, Shelton S, Pushpawela B, *et al.* Use of intensity analysis and transfer matrix to characterize land conversion in the Aral Sea Basin under changing climate. *Modeling Earth Systems and Environment*, 2024, 10(4): 4717–4729.
- [49] Shao Y T, Xiao Y, Sang W G. Land use trade-offs and synergies based on temporal and spatial patterns of ecosystem services in South China. *Ecological Indicators*, 2022, 143(1): 109335.
- [50] Wang S X, Zhang M, Xi X. Ecological environment evaluation based on remote sensing ecological index: a case study in East China over the past 20 years. *Sustainability*, 2022, 14(23): 15771.
- [51] Sun X Q, Yu Y H, Wang J L, *et al.* Analysis of the spatiotemporal variation in habitat quality based on the invest model—a case study of Shangri-La city, northwest Yunnan, China. *Journal of Physics: Conference Series*, 2021, 1961(1): 012016.
- [52] Yang H J, Gou X H, Xue B, *et al.* Research on the change of alpine ecosystem service value and its sustainable development path. *Ecological Indicators*, 2023, 146(1): 109893.
- [53] Renner M, Brust K, Schwärzel K, *et al.* Separating the effects of changes in land cover and climate: a hydro-meteorological analysis of the past 60 yr in Saxony, Germany. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2014, 18(2): 641–658.
- [54] Wang X J, Liu G X, Xiang A C, *et al.* Terrain gradient response of landscape ecological environment to land use and land cover

- change in the hilly watershed in South China. *Ecological Indicators*, 2023, 146(1): 109797.
- [55] Wang X C, Dong X B, Liu H M, *et al.* Linking land use change, ecosystem services and human well-being: A case study of the Manas River Basin of Xinjiang, China. *Ecosystem Services*, 2017, 27(1): 113–123.
- [56] Mann H B. Nonparametric tests against trend. *Econometrica*, 1945, 13(3): 245.
- [57] Du R S, Shang F H, Ma N. Automatic mutation feature identification from well logging curves based on sliding t test algorithm. *Cluster Computing*, 2019, 22(2): 14841–14850.
- [58] Huang S Z, Huang Q, Chang J X, *et al.* Linkages between hydrological drought, climate indices and human activities: a case study in the Columbia River basin. *International Journal of Climatology*, 2016, 36(1): 364–373.
- [59] Wu X Y, Shen C, Shi L, *et al.* Spatio-temporal evolution characteristics and simulation prediction of carbon storage: A case study in Sanjiangyuan area, China. *Ecological Informatics*, 2024, 80(1): 102485.
- [60] Wang C, Li X M, Yuan C X. Study of the effects of land use change on water yield in the Qilian Mountains in western China. *Ecological Indicators*, 2024, 158: 111464.
- [61] Jiang F, Song P F, Gu H F, *et al.* New shortcut for boundary delimitation and functional zoning of national parks based on keystone species in China: A case study of Kunlun Mountains National Park. *Ecological Indicators*, 2024, 159(1): 111675.
- [62] Li Z W, Chen X Y, Qi J, *et al.* Accuracy assessment of land cover products in China from 2000 to 2020. *Scientific Reports*, 2023, 13(1): 12936.
- [63] Mehra N, Swain J B. Assessment of land use land cover change and its effects using artificial neural network-based cellular automation. *Journal of Engineering and Applied Science*, 2024, 71(1): 70.
- [64] Zuo Z Q, Yang Y Z, Wang R, *et al.* Analysis of the gains and losses of ecosystem service value under land use change and zoning in Qiqihar. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 2023, 11(1): 1192952.
- [65] Vinatier F, Arnaiz A G. Using high-resolution multitemporal imagery to highlight severe land management changes in Mediterranean vineyards. *Applied Geography*, 2018, 90(1): 115–122.
- [66] Sinha R K, Eldho T I, Subimal G. Assessing the impacts of land cover and climate on runoff and sediment yield of a river basin. *Hydrological Sciences Journal*, 2020, 65(12): 2097–2115.
- [67] Zhang F, Kung H, Johnson V C. Assessment of land-cover/land-use change and landscape patterns in the two national nature reserves of Ebinur Lake Watershed, Xinjiang, China. *Sustainability*, 2017, 9(5): 724.
- [68] Wang Y M, Hu Y F, Niu X Y, *et al.* Myanmar's land cover change and its driving factors during 2000–2020. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2023, 20(3): 2409.
- [69] Zhu Y Y, Ling G H T. Spatio-temporal changes and driving forces analysis of urban open spaces in Shanghai between 1980 and 2020: an integrated geospatial approach. *Remote Sensing*, 2024, 16(7): 1184.
- [70] Yu L F, Chen Y, Sun W J, *et al.* Effects of grazing exclusion on soil carbon dynamics in alpine grasslands of the Tibetan Plateau. *Geoderma*, 2019, 353(1): 133–143.
- [71] Bax V, Francesconi W. Environmental predictors of forest change: An analysis of natural predisposition to deforestation in the tropical Andes region, Peru. *Applied Geography*, 2018, 91(8): 99–110.
- [72] Kanade R, John R. Topographical influence on recent deforestation and degradation in the Sikkim Himalaya in India; Implications for conservation of East Himalayan broadleaf forest. *Applied Geography*, 2018, 92(1): 85–93.
- [73] Mo C X, Bao M X, Lai S F, *et al.* Impact of future climate and land use changes on runoff in a typical Karst basin, southwest China. *Water*, 2023, 15(12): 2240.
- [74] Meng X M, Zhu Y, Yin M S, *et al.* The impact of land use and rainfall patterns on the soil loss of the hillslope. *Scientific Reports*, 2021, 11(1): 16341.
- [75] Hohensinner S, Atzler U, Fischer A, *et al.* Tracing the long-term evolution of land cover in an alpine valley 1820–2015 in the light of climate, glacier and land use changes. *Frontiers in Environmental Science*, 2021, 9(1): 683397.
- [76] Msofe N, Sheng L, Lyimo J. Land use change trends and their driving forces in the Kilombero Valley Floodplain, Southeastern Tanzania. *Sustainability*, 2019, 11(2): 505.
- [77] Jin Z Z, Zhao Q D, Qin X, *et al.* Quantifying the impact of landscape changes on hydrological variables in the alpine and cold region using hydrological model and remote sensing data. *Hydrological Processes*, 2021, 35(10): e14392.
- [78] Allan A, Soltani A, Abdi M H, *et al.* Driving forces behind land use and land cover change: A systematic and bibliometric review. *Land*, 2022, 11(8): 1222.
- [79] Rai M K, Paudel B, Zhang Y, *et al.* Appraisal of empirical studies on land-use and land-cover changes and their impact on ecosystem services in Nepal Himalaya. *Sustainability*, 2023, 15(9): 7134.