

doi:10.11733/j.issn.1007-0435.2026.06.025

引用格式:张艳,张嘉倩.基于CA-Markov模型的黄河流域上游草地退化时空分异特征及预测研究[J].草地学报,2026,34(6):2229-2241

ZHANG Yan, ZHANG Jia-qian. Research on the Spatiotemporal Differentiation Characteristics and Prediction of Grassland Degradation in the Upper Reaches of the Yellow River Based on CA-Markov Model[J]. Acta Agrestia Sinica, 2026, 34(6):2229-2241

基于CA-Markov模型的黄河流域上游草地退化 时空分异特征及预测研究

张艳^{1,2*}, 张嘉倩^{1,2}

(1. 长安大学土地工程学院, 陕西 西安 710054; 2. 陕西省土地整治重点实验室, 陕西 西安 710054)

摘要:以黄河流域上游草地为研究对象,基于2000—2023年多源数据,结合“草地覆盖度类型转化+退化评价指标体系”双视角解析退化问题,并运用CA-Markov模型预测未来退化格局。结果表明:(1)草地以中覆盖度草地为主,23年间草地总面积减少2201.60 km²,且覆盖度转换波动大,呈现明显的空间分异特征。(2)未退化草地面积占比由59.77%降至54.62%,整体呈“一降三升”退化特征。空间呈“西南低-东北高”格局,且退化等级升高区面积超过降低区。(3)至2030年,未退化草地比例进一步下降,轻、中、重度退化比例上升,退化态势持续加剧。研究可为区域草地保护与管理提供科学依据。

关键词:草地利用动态变化;草地退化;CA-Markov模型;黄河流域上游

中图分类号:S812.6

文献标识码:A

文章编号:1007-0435(2026)06-2229-13

Research on the Spatiotemporal Differentiation Characteristics and Prediction of Grassland Degradation in the Upper Reaches of the Yellow River Based on CA-Markov Model

ZHANG Yan^{1,2*}, ZHANG Jia-qian^{1,2}

(1. College of Land Engineering, Chang'an University, Xi'an, Shaanxi Province 710054, China;

2. Key Laboratory of Land Consolidation, Xi'an, Shaanxi Province 710054, China)

Abstract: Taking the grassland in the upper reaches of the Yellow River Basin as the research object, based on multi-source data from 2000 to 2023, the degradation problem was analyzed from the dual perspectives of “grassland coverage type transformation + degradation evaluation index system”, and the CA-Markov model was used to predict the future degradation pattern. The results showed that: (1) The grassland is mainly composed of medium coverage grassland. Over the past 23 years, the total area of grassland has decreased by 2201.60 km², and the coverage conversion has fluctuated greatly, showing obvious spatial differentiation characteristics. (2) The proportion of un-degradation grassland has decreased from 59.77% to 54.62%, showed an overall “one decrease and three increases” degradation feature. Spatially, it presented a pattern of “low in the southwest and high in the northeast”, and the area of regions with increased degradation grades was larger than that of regions with decreased grades. (3) By 2030, the proportion of un-degradation grassland will further decline, while the proportions of mild, moderate and severe degradation grassland will increase, and the degradation trend will continue to intensify. The research can provide a scientific basis for regional grassland protection and management.

收稿日期:2025-06-17;修回日期:2025-12-05

基金项目:国家自然科学基金项目(41971033);陕西省重大科技项目(2022ZDLSF07-05)资助

作者简介:张艳(1978-),女,汉族,河北沧州人,副教授,主要从事土地资源管理、生态安全研究,E-mail: zyzyhangyan@chd.edu.cn; *通信作者
Author for correspondence, E-mail: zyzyhangyan@chd.edu.cn

Key words: Grassland utilization dynamic changes; Grassland degradation; CA-Markov model; Upper reaches of the Yellow River Basin

作为地球上分布最广泛的生态系统,草地在发挥生态系统服务功能、全球碳循环以及水源涵养等方面发挥着重要的作用^[1-3]。草地退化指气候或人为干扰超出草地生态系统的自我调节阈值,使其难以恢复并出现逆向演替变化的现象^[4],其不仅直接导致物种多样性丧失、土壤肥力流失、土壤沙化与盐碱化加剧,使草地面临不可持续发展的现状^[5],还造成生态环境恶化,威胁人类的生存与发展^[6-7]。在气候变化和人类活动加剧的双重作用下,草地生态系统面临严峻挑战^[8]。全球约49%草地遭受干旱威胁,近半呈退化趋势,生物多样性锐减,土壤侵蚀加剧,草地退化已经成为全球性生态问题^[9]。我国约90%的天然草地存在不同程度的退化,且呈显著的区域差异性^[10];青藏高原受冻融侵蚀和超载放牧导致草地退化较严重,可利用草地出现沙化或黑土滩化^[11-12];北方温带草原面临干旱加剧和农垦扩张的双重压力,处于中度至重度退化状态^[13];而南方草山草坡整体退化较轻。近年来,由于国家退耕还草工程、山水林田湖草沙一体化保护和修复工程、三北防护林工程、京津风沙源治理工程等草地工程项目实施,草地退化速度得以减缓,但退化依然比较严重^[14]。随着我国土地利用变化研究的深入与遥感技术的广泛使用^[15-16],草地研究逐渐从全国^[17-18]宏观层面细化至流域^[19-20]、城市群^[21]、省域^[22]、市域^[13]等更精细的研究尺度。当前,草地退化研究主要聚焦于退化现状和特征分析^[11,23]、退化驱动因素探讨^[24-26]、退化评价指标体系构建^[10]、退化评价方法优化^[27-28]和退化治理对策^[29]等方面,其在多位学者的共同努力下取得了显著进展,然而,当前研究仍存在以下问题:(1)对草地退化的研究往往仅限于采用单一植被或土壤指标,缺乏从草地覆盖度类型间的变化和利用自然-经济-社会综合指标构建草地退化评估指标体系;(2)多集中于草地退化的现状评估和驱动因素分析,但对未来退化趋势的预测研究较为薄弱,尤其是缺乏融合气候变化、人类活动演变影响的动态模拟,难以支撑草地生态系统的长期风险预警和适应性管理。综上所述,构建多维度评估体系和动态预测模型,将显著提升草地退化机理认知精度和生态风险预警能力,为科学治理提供科学支持。

黄河流域上游是黄河水源涵养地和水土流失严重区域^[30-31],经济基础薄弱、发展水平低,特殊的自然

地理和气候条件及相对落后的经济社会发展水平,使黄河上游生态保护任务艰巨^[32-34]。草地面积约占该区域总面积的61%^[35],流域内草地利用情况关系到整个黄河流域的生态安全与高质量发展。基于此,本研究以黄河流域上游为研究区,2000—2023年为研究时段,首先分析高、中、低覆盖度草地间的转化,从草地结构变化初步评估退化状况;其次突破单一指标局限,构建包含植被、土壤、气候、地形及人类活动要素的草地退化综合评价指标体系,量化评估草地退化程度的时空分异特征。最后引入CA-Markov模型,结合自然演变与人类活动共同作用的草地退化等级结果,预测2025年和2030年草地退化格局。研究结果可为黄河流域上游的草地退化监测与防治工作,为优化草地资源利用及促进草地可持续发展提供支持。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

如图1所示,水利部黄河水利委员会按照黄河真实自然流域特征,将河源至内蒙古自治区托克托县河口镇段划分为黄河上游^[36](32°47'~41°84' N, 95°98'~112°78' E),涉及甘肃、青海、四川、宁夏、内蒙古5省(自治区)的部分区县。流域面积约42.8万km²,占黄河流域总面积的52.86%。黄河上游地处青藏高原、黄土高原、内蒙古高原交汇区,地形地貌复杂,生态环境脆弱。地势西南高、东北低,最高处海拔6253 m,最低处海拔979 m,高差5274 m。该地区位于半干旱地区,多年降水量在200~500 mm之间,属于典型的大陆性气候。流域内土地利用以草地、耕地和未利用地为主,草地类型多样且分布广泛。受气候变化及过度放牧等综合影响,生态脆弱性加剧,草地退化。

1.2 数据来源及处理

研究数据涵盖2000年、2005年、2010年、2015年、2020年和2023年共6期的多源数据,具体数据类型及其来源详见表1。研究区空间范围较大,综合参考相关研究以及从数据处理和可视化表达等方面考虑,以1 km×1 km栅格作为草地退化评价的最小单元。该尺度下各栅格单元内具有相同的土地利用、土壤类型和气候特征等,可有效控制信息损失。在ArcGIS平台利用BILINEAR(双线性插

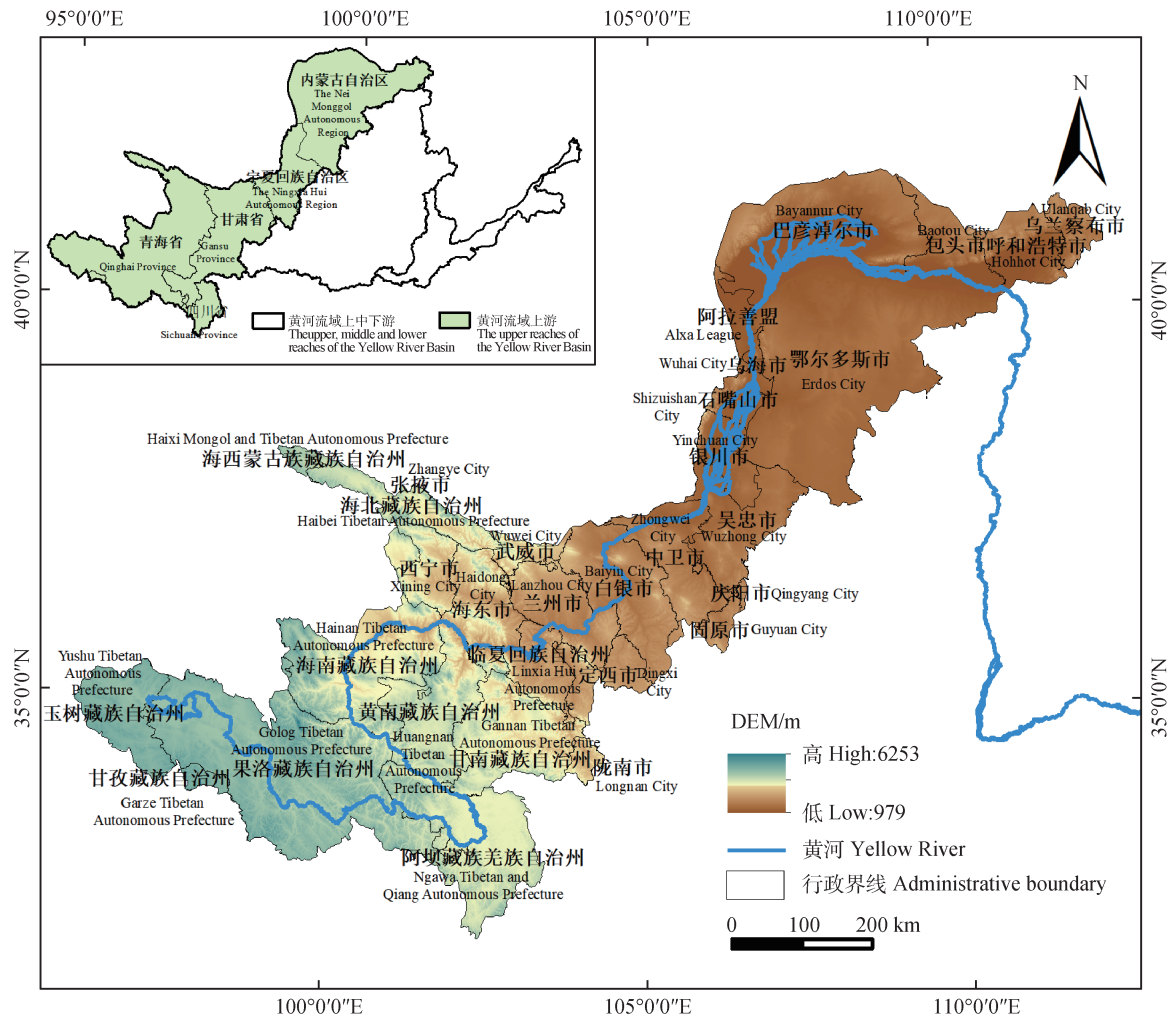


图 1 研究区位置示意图

Fig. 1 Location diagram of the study area

注:该图基于自然资源部标准地图服务网站审图号为 GS(2019)1822 号的标准地图制作,底图无修改

Note: This map was produced based on the standard map from the Ministry of Natural Resources' map service website with the review number GS (2019)1822. The base map has not been modified

值法)将栅格数据统一重采样至 $1\text{ km} \times 1\text{ km}$ 。统一地理坐标系为 GCS_WGS_1984, 投影坐标系为 WGS_1984_UTM_Zone_47N。

1.3 草地覆盖度变化转移矩阵

以矩阵形式展示不同时期的草地覆盖度互相转换的数量关系,体现黄河流域上游草地覆盖度类型的数值和转移方向,公式为:

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

式中 S_{ij} 代表 $n \times n$ 矩阵, S 代表面积, n 代表草地覆盖度类型数, i 和 j 分别代表研究初期和末期的草地覆盖度类型。

1.4 草地退化评价指标体系

选取黄河流域上游草地为研究对象,对草地退化状况进行定量评价。参考相关研究成果^[6, 10, 20, 23],从植被、土壤、气候、地形及人类活动 5 个维度选取 13 项具有针对性和代表性的指标,构建草地退化评价指标体系,采用极差标准化法对正负向指标进行归一化处理,通过熵权法确立各指标权重。具体指标及其属性、选取依据、权重见表 2。

针对土壤类型这一定性指标,原始数据依据成土条件(水热状况、岩性及盐碱化程度)划分出 12 个土纲^[37]。基于土壤发生学原理并参考相关文献^[38],将黄河流域的土壤类型依据其理化性质进行系统量化,将其转化为正向指标,具体分类及赋值见表 3。

表 1 数据来源
Table 1 Data sources

名称 Name	来源 Source	空间分辨率 Spatial resolution
数字高程数据 Digital elevation model	地理空间数据云 (http://www.gscloud.cn/)	30 m
放牧强度 Grazing intensity	国家生态科学数据中心 (http://www.nesdc.org.cn)	250 m
夜间灯光 Nighttime lights	国家地球系统科学数据中心 (http://www.geodata.cn)	500 m
植被净初级生产力 Net primary productivity、蒸散发 Evapotranspiration	NASA Earthdata (https://www.earthdata.nasa.gov/)	500 m
叶面积指数 Leaf area index	Google Earth Engine (https://earthengine.google.com/)	500 m
土地利用数据 Land use data、土壤类型 Soil type	中国科学院资源环境科学数据中心 (http://www.resdc.cn/)	1000 m
人口密度 Density of population	LandScan (https://landscan.ornl.gov/)	1000 m
归一化植被指数 Normalized difference vegetation index	NASA Earthdata (https://www.earthdata.nasa.gov/)	1000 m
降水 Precipitation、气温 Temperature、土壤有机质 Soil organic matter、 土壤砂粒含量 Soil sand content	国家青藏高原科学数据中心 (https://data.tpdac.ac.cn/home)	1000 m

表 2 草地退化评价指标体系
Table 2 Evaluation index system for grassland degradation

目标层 Target layer	准则层 Criterion layer	指标层 Indicator layer	属性 Property	选取依据 Selection criteria	权重 Weight
草地退化评价指标体系 Grassland degradation evaluation index system	植被因子 Vegetation factor	植被覆盖度 Fractional vegetation cover	负向 Negative	反映草地生态系统的生长状况 和生产力水平 Reflect the growth status and productivity level of grassland ecosystems	0.028
		植被净初级生产力 Net primary productivity	负向 Negative		0.023
		叶面积指数 Leaf area index	负向 Negative		0.003
	土壤因子 Edaphic factor	土壤有机质含量 Soil organic matter	负向 Negative	表征土壤质量和抗退化能力 Characterizing soil quality and anti-degradation capacity	0.012
		土壤类型 Soil type	正向 Positive		0.129
		土壤砂粒含量 Soil sand content	正向 Positive		0.019
	气候因子 Climatic factor	降水量 Precipitation	负向 Negative	决定草地水热条件 Determine the water and heat conditions of grassland	0.030
		气温 Temperature	负向 Negative		0.045
		蒸散发 Evapotranspiration	正向 Positive		0.046
	地形因子 Terrain factor	坡度 Slope	正向 Positive	影响草地水土保持能力 Affecting the water and soil conservation capacity of grasslands	0.082
	人类活动因子 Human activity factor	放牧强度 Grazing intensity	正向 Positive	反映人为干扰强度 Reflect the intensity of human interference	0.073
		夜间灯光 Nighttime lights	正向 Positive		0.335
		人口密度 Density of population	正向 Positive		0.175

表 3 土壤类型赋值表
Table 3 Assignment table of soil and land use type

土壤类型 Soil type	水成土 Hydromorphic soil、 淋溶土 Alfisols、 高山土 Alpine soil	铁铝土 Ferralsol、 钙层土 Caliche soils	半淋溶土 Semi-Alfisols、 半水成土 Semi-Hydromorphic soil	人为土 Anthrosol、 初育土 Primary soil	干旱土 Aridisols、 盐碱土 Saline-alkali soil、漠土 Desert soil
赋值 Assignment	2	4	6	8	10

1.5 草地综合退化指数和退化分级

草地综合退化指数 (Grassland degradation index, GDI) 作为草地退化的综合量化指标^[6,28], GDI 值越低表明草地生长状况良好, 退化程度低; GDI 值高则反映草地生长状况差, 退化程度高。基于退化评价指标体系计算得到 GDI, 划分退化等级并深入分析其演变规律。公式为:

$$GDI = \sum_{i=1}^n A_{ij} W_j \quad (2)$$

式中 GDI 为草地综合退化指数, 数值范围为 0~1, n 为变量个数, A_{ij} 为第 i 个栅格单元上的第 j 个评价指标的标准化处理值, W_j 为第 j 个评价指标的权重。

采用 ArcGIS 的自然断点法同时参考《天然草地退化、沙化、盐渍化的分级指标》并结合研究区实际退化状况, 把 2000—2023 年 GDI 划分为未退化、轻度退化、中度退化和重度退化 4 个等级, 见表 4。

表4 草地退化分级表

Table 4 Classification of grassland degradation

草地退化等级 Grassland degradation grade	草地综合退化指数 Grassland degradation index
未退化 Un-degradation	$0.0665 < \text{GDI} \leq 0.1659$
轻度退化 Mild degradation	$0.1660 < \text{GDI} \leq 0.2156$
中度退化 Moderate degradation	$0.2157 < \text{GDI} \leq 0.3041$
重度退化 Severe degradation	$0.3042 < \text{GDI} \leq 0.6438$

1.6 元胞自动机马尔可夫模型(CA-Markov)

CA-Markov模型的预测结合了元胞自动机(CA)的空间动态演化和马尔可夫(Markov)过程的状态转移,依据系统不同状态的初始概率和状态间的转换概率预测未来各状态趋势^[38]。

元胞自动机是一种离散空间、时间的动态模型,将地理空间离散为元胞网格,对下一时刻的元胞状态进行模拟。公式为:

$$S_{ij}^{t+1} = f_q(S_{ij}^t) \quad (3)$$

式中: S 为第 ij 元胞的状态; t 和 $t+1$ 为时刻; f 为转换函数; q 为邻域。

马尔可夫模型是利用初始与中间状态间的转移概率预测 t 时刻的变化趋势。若系统变化过程满足马尔可夫性, S' 为其在 t 时刻的状态, P 为概率转移矩阵,那其在 $t+1$ 时刻的状态 S'^{+1} 为:

$$S'^{+1} = S' \times P \quad (4)$$

表5 草地二级类型^[39]

Table 5 Secondary types of grassland

名称 Name	含义 Meaning	特点 Characteristic
高覆盖度草地 High coverage grassland	覆盖度>50%的天然草地、改良草地和割草地 Natural grasslands, improved grasslands and harvested grasslands with a coverage rate of over 50%	水分条件较好,草被生长茂密 The moisture conditions are favorable, and the grass is growing thickly
中覆盖度草地 Medium coverage grassland	覆盖度20%~50%的天然草地和改良草地 Natural grasslands and improved grasslands with a coverage of 20% to 50%	水分不足,草被较稀疏 Insufficient water led to sparse grass growth
低覆盖度草地 Low coverage grassland	覆盖度5%~20%的天然草地 Natural grasslands with a coverage of 5% to 20%	水分缺乏,草被稀疏,牧业利用条件差 Lack of water, sparse grass, and poor conditions for livestock utilization

由图2所示,23年间,黄河流域上游草地总面积减少2201.60 km²。草地以中覆盖度草地为主(41.97%~42.07%),高覆盖度草地较少(22.48%~22.89%)。高、中、低覆盖度草地面积由59 469.95 km²,111 043.99 km²,94 053.96 km²变化为60 058.03 km²,110 386.33 km²,91 921.94 km²。草地广泛分布于流域,其中青海省和内蒙古自治区的草地面积之和超流域草地总面积的50%。高覆盖度草地集中于内蒙古自治区南部、甘肃省南部及四川省,中覆盖度草地分布较广,低覆盖度草地在流域中部有所集中。

$$P = \begin{bmatrix} P_{11} & \cdots & P_{1n} \\ \vdots & \cdots & \vdots \\ P_{n1} & \cdots & P_{nm} \end{bmatrix} \quad (5)$$

CA-Markov模型结合两者优势,基于既有年份的草地退化等级图像,能够对未来年份的草地退化等级图像进行时间、空间上的双重模拟。采用IDRISI17.0软件:(1)基于两期草地退化等级数据,获取转移概率矩阵作为转换规则。参照IDRISI Tutorial将等比例误差设为0.15(该参数下大多数图像可达85%的精度)。(2)根据两期数据时间间隔设置迭代次数,采用5×5的滤波器,即认为一个元胞周围5×5个元胞组成的矩形空间对该元胞状态的改变具有显著影响。(3)利用CROSSTAB模块完成真实和模拟成果Kappa系数的计算与精度验证。(4)使用通过检验的CA-Markov模型进行黄河流域上游未来草地退化等级模拟。

2 结果与分析

2.1 草地空间格局演变特征

参照中国科学院资源环境科学数据中心发布的中国多时期土地利用遥感监测数据集(CNLUCC)将草地分为高覆盖度、中覆盖度和低覆盖度草地(表5)。

2.2 草地覆盖度时空演变

高覆盖度草地向中低覆盖度草地、中覆盖度草地向低覆盖度草地转换意味着草地退化^[19];而中、低覆盖度草地向高覆盖度草地转化缓解总面积损失的不利影响^[40]。

如图3所示,2000—2005年,高覆盖度草地向中、低覆盖度草地转出量分别为470.82 km²和278.29 km²,中覆盖度草地向低覆盖度草地转出量为760.97 km²,虽有1248.39 km²转入,但整体覆盖度呈下降趋势。2005—2010年短期改善,提升面积

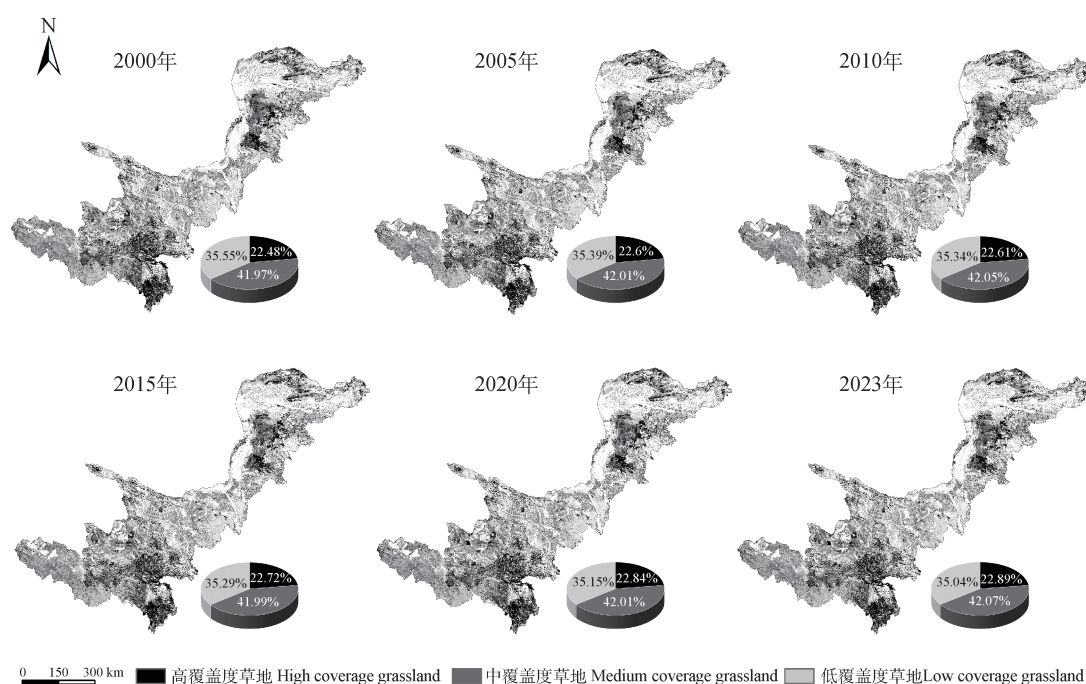


图2 黄河流域上游草地时空格局与覆盖度结构演变

Fig. 2 Evolution of spatial-temporal patterns and cover degree structure of grassland in the upper reaches of the Yellow River Basin

(197.13 km²)高于下降面积(34.36 km²)。2010—2023年呈现波动状态:2010—2015年净上升533.75 km²,2015—2020年净下降面积271.82 km²,2020—2023年净上升面积350.44 km²。长期来看(2000—2023年),高覆盖度草地向中覆盖度草地转出4105.80 km²,另有2131.04 km²转出为低覆盖度草地,中覆盖度草地向低覆盖度草地转出12 968.74 km²。高覆盖度草地转入7197.81 km²,低覆盖度草地向中覆盖度草地转换13 146.33 km²。

2000—2005年以内蒙古鄂尔多斯市为核心的区域变化最为集中,2005—2010年流域尺度变化幅度小且分布分散,2010—2015年内蒙古鄂尔多斯市及研究区西部青海省成为草地覆盖度变化较为集中的区域,2015—2020年青海省全域变化突出,2020—2023年除北部的内蒙古自治区外,青海省、甘肃省、宁夏回族自治区及四川省均呈升降波动。从2000—2023年的长时序观测看,全流域草地覆盖度呈现明显的空间分异特征。

2.3 草地退化等级时空分异特征

2000年、2005年、2010年、2015年、2020年和2023年GDI平均值分别为0.1693,0.1734,0.1742,0.1743,0.1739,0.1802,虽整体维持较低水平,但呈持续上升趋势。

由图4可知,2000—2023年草地退化等级整体

上升,趋于恶化,各等级面积排序始终为:未退化>轻度退化>中度退化>重度退化。未退化草地虽保持主导地位,但23年间面积减少14 820.65 km²,占比由59.77%降至54.62%;轻度、中度、重度退化区面积分别增加1435.08 km²,5878.5 km²,5327.98 km²,占比依次升至22.30%,20.96%,2.12%,呈现“一降三升”的特征。

空间上,草地退化呈“西南低-东北高”格局,退化水平加剧,但分布格局总体保持稳定。未退化草地集中于青海省、四川省大部分区域以及甘肃省甘南藏族自治州、武威市等地。这些地区水热资源充足(如青海三江源是黄河源头,甘肃特别是甘南藏族自治州是黄河的蓄水池);草地覆盖率普遍较高,高、中覆盖度草地广泛分布;当地生态保护政策严格,牧民有较强的环境保护和生态安全意识。退化等级较高的中度和重度退化区广泛分布于内蒙古鄂尔多斯市、宁夏回族自治区大部分区域以及甘肃省兰州市、白银市等地。这些地区自然本底脆弱,草地覆盖度低,生态系统抗干扰能力较弱,且近年来社会经济发展迅速,例如兰州-白银经济带城市化率快速提升,鄂尔多斯能源基地的煤炭开采导致地表植被破坏,宁夏灌区农业扩张加剧了水资源竞争等,人类活动干扰频繁,城市化和工业化程度高,过度开发及不合理利用资源对草地生态系统造成了更大的压力。

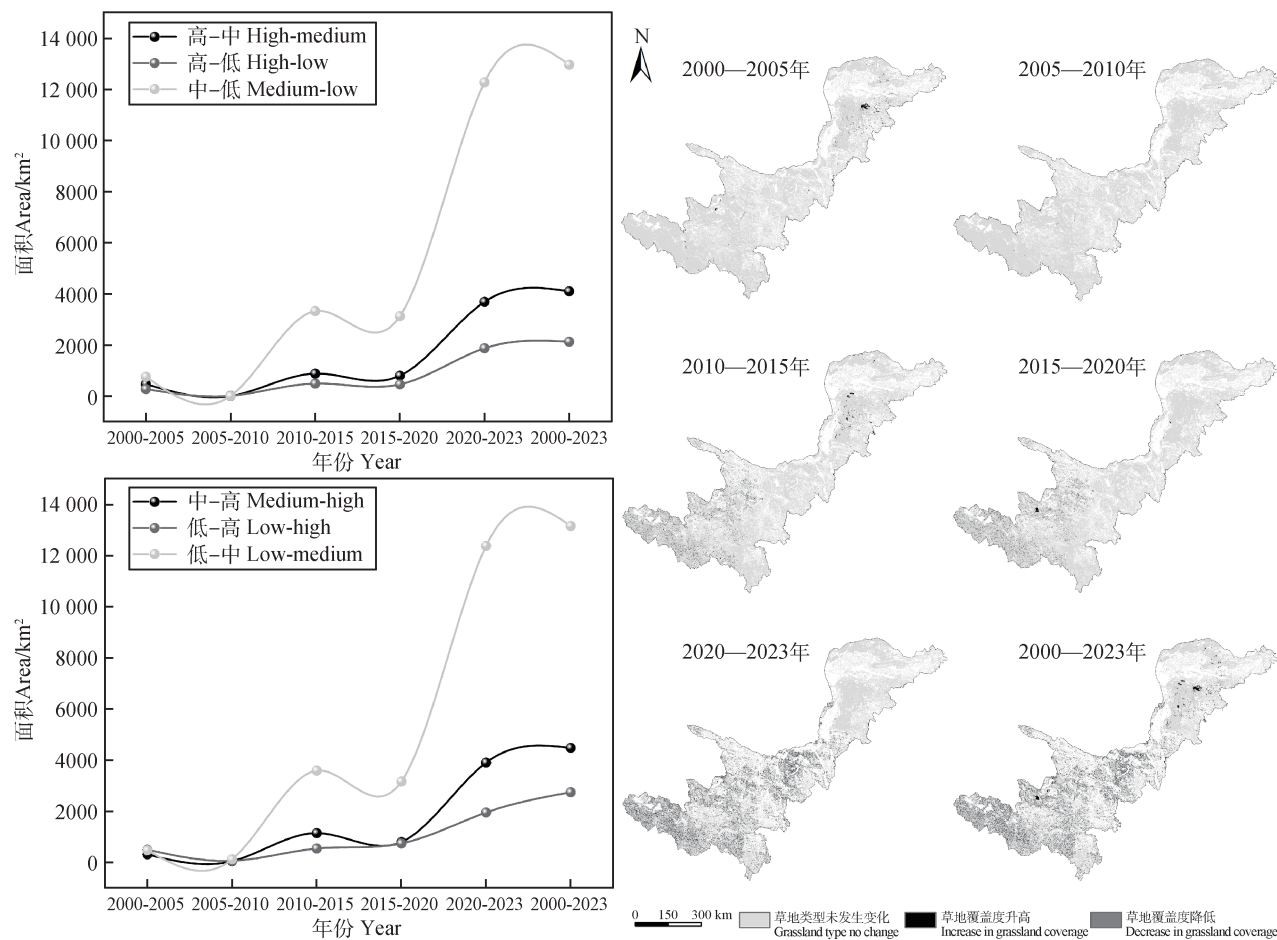


图 3 黄河流域上游草地覆盖度类型转移折线图与转移图谱

Fig. 3 Line chart and transfer map of grassland coverage type transition in the upper reaches of the Yellow River Basin

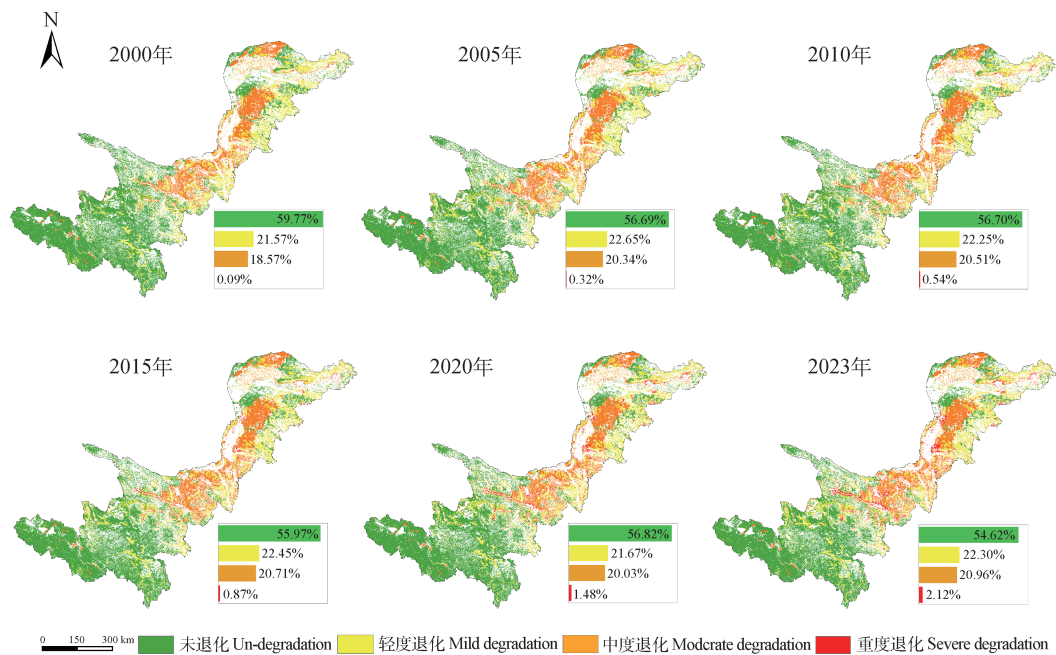


图 4 黄河流域上游草地退化等级占比及分布图

Fig. 4 Proportion and distribution map of degradation grades of grasslands in the upper reaches of the Yellow River Basin

根据各时段草地退化等级转化情况,绘制黄河流域上游6个阶段的草地退化演替分布图(见图5)。大部分区域退化等级相对稳定,仅局部存在程度差异。在2000—2005年、2005—2010年和2010—2015年这3个时间段内,退化加剧的区域在空间上零散分布,其中流域中部的青海省海南藏族自治州、海东市和甘肃省白银市等区域尤为突出。2015—2020年退

化等级降低区面积高于升高区,2020—2023年退化升高区面积反超降低区,集中分布于内蒙古自治区鄂尔多斯市、宁夏回族自治区吴忠市、青海省海南藏族自治州、海东市以及甘肃省定西市等地。

23年间,黄河流域上游约90%地区的退化等级保持稳定,而退化等级升高的区域数量持续上升,并超过退化等级降低的区域数量。

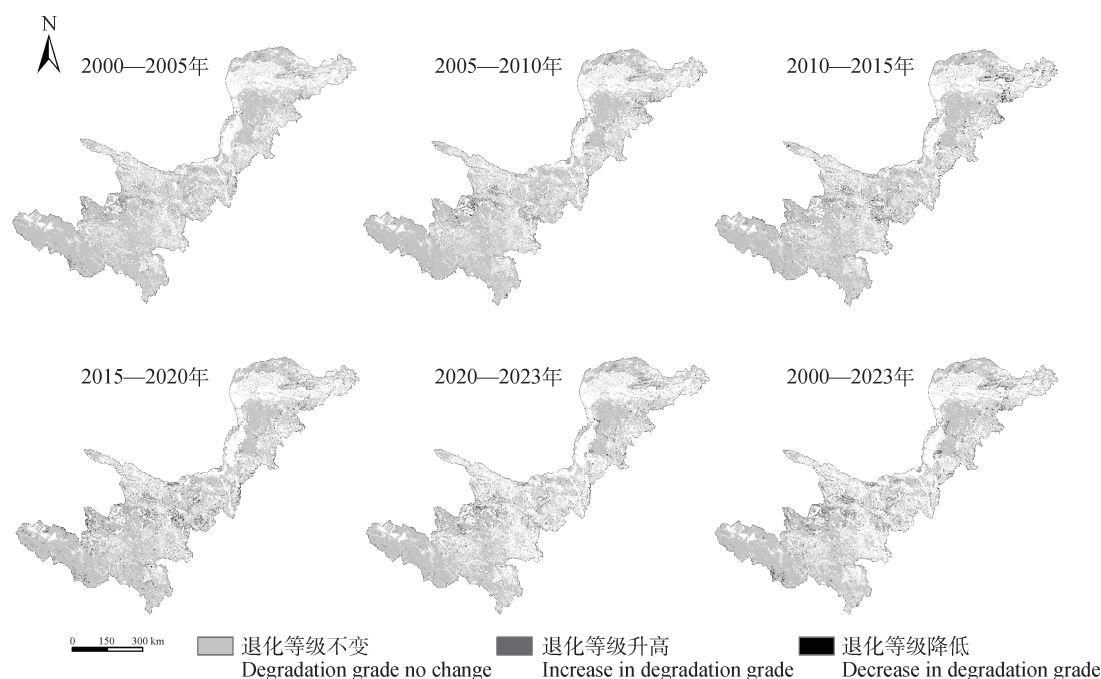


图5 黄河流域上游草地退化等级演替分布图

Fig. 5 Map of the distribution of grassland degradation grades in the upper reaches of the Yellow River Basin

2.4 草地退化等级预测

基于IDIRISI平台,分别以10年(2000—2010年)和5年(2010—2015年)为时间间隔,运用CA-Markov模型对黄河流域上游2020年草地退化状况进行模拟,生成草地退化等级空间分布图,并与实际退化数据对比,定量评估不同时间间隔对模拟精度的影响。

根据Kappa系数的划分标准,Kappa系数在0~0.20时,模拟结果精度极低;在0.20~0.40时,模拟精度一般;在0.40~0.60时,模拟精度中等;在0.60~0.80时,模拟精度较高;在0.80~1.00时,模拟精度非常高^[41]。基于IDIRISI平台精度评价模块,对预测结果与实际草地退化等级进行对比分析,自动生成混淆矩阵并计算Kappa系数及其显著性水平。结果显示,以10年为间隔模拟2020年草地退化等级的Kappa系数为0.7313,而以5年为间隔的Kappa系数提升至0.8266,且两者均通过显著性检验($P < 0.001$)。表明随着时间间隔的缩短,草地退化等级的模拟精度随之提高,模拟结果在空间分布

上与实际状况具有较好一致性,满足精度要求,表明该预测模型具有较高准确度,适用于研究区草地退化预测研究。

图6展示了2020年草地退化等级预测图(R_{10} 、 R_5)、实际退化图(R)及其误差分布图,通过对比10年与5年间隔的预测结果,可直观看出,以5年为间隔的模拟结果中误差区域明显较少,各退化等级的模拟效果均优于10年间隔。在此基础上,进一步采用5年为间隔,基于2015年和2020年数据,依次推演预测2025年与2030年黄河流域上游草地退化等级空间格局。

未来草地退化变化趋势的预测结果如图7所示。2025年黄河流域上游草地面积占比按退化程度排序为:未退化(50.87%)>轻度退化(27.95%)>中度退化(19.14%)>重度退化(2.04%)。相较于2020年,未退化草地虽仍占主导地位,但轻度、中度与重度退化草地面积均呈现不同程度增加趋势。至2030年,未退化草地比例进一步下降至41.24%,

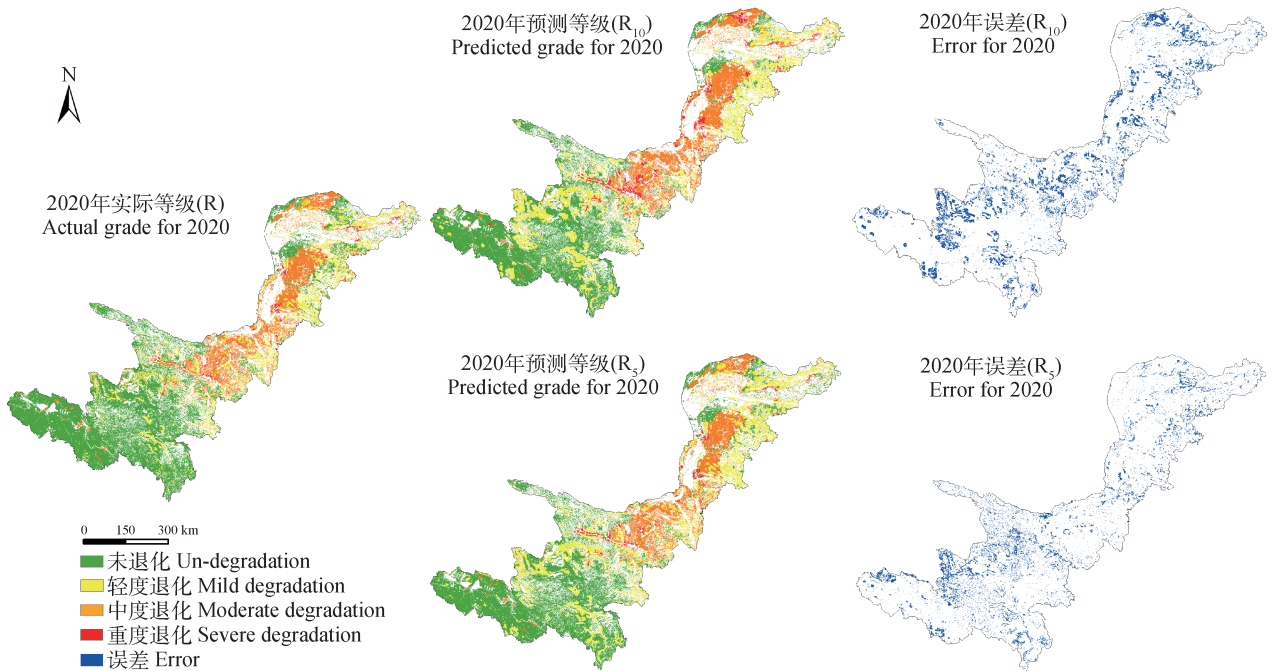


图6 2020年黄河流域上游实际与预测的草地退化等级

Fig. 6 The actual and predicted grades of grassland degradation in the upper reaches of the Yellow River Basin in 2020

而轻度、中度和重度退化草地比例分别上升至32.42%, 21.87%和4.47%。

在空间分布上,各年的草地退化特征与2000—2023年表现出相似性,均呈现“西南低东北高”的格局。草地退化呈局部集中连片分布的特征,2025年未退化草地集中于流域西南部的青海省和四川省,

轻度退化草地呈带状自东北向中部延伸,中度及重度退化区则多分布在流域中部和东北部的宁夏回族自治区、甘肃省兰州市、白银市以及内蒙古自治区鄂尔多斯市等人类活动密集区。至2030年,轻度退化区向西南部和东北部的未退化区扩展,重度退化区呈点状恶化。

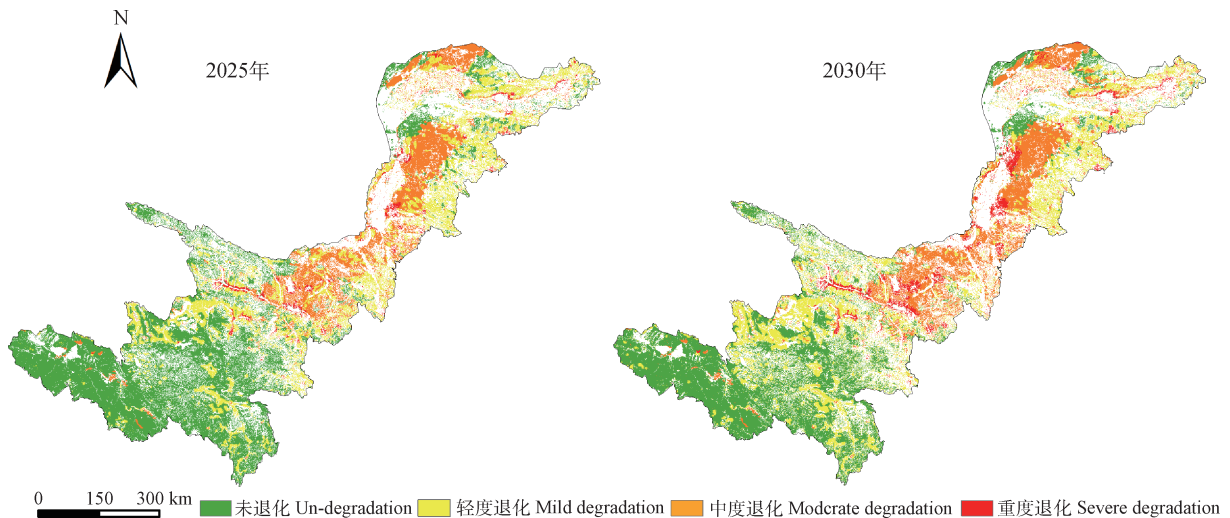


图7 2025和2030年黄河流域上游草地退化等级预测结果

Fig. 7 The predicted results of grassland degradation grades in the upper reaches of the Yellow River Basin in 2025 and 2030

通过CA-Markov模型进行的预测结果表明,黄河流域上游的草地退化格局在未来十年间将发生一定变化,未退化草地始终占据首要地位,与当前采取的生态保护与修复策略密切相关,但其面积持

续减少,轻度、中度和重度退化草地面积增加,草地状况恶化,草地生态系统面临潜在的退化风险,区域生态环境问题不容忽视,需持续强化生态环境保护措施的实施效果。建议实施分级分区治理策略:

在重度退化区,应以严格禁牧封育为核心,辅以人工补播等生态修复工程;在轻度退化区要重点推行草畜平衡制度,遏制其向更高退化等级转化。研究结果为区域草地生态管理和保护提供了科学依据,也强调了加强草地保护措施、实施可持续发展策略的重要性。

3 讨论

3.1 黄河流域上游草地退化时空演变

2000—2023年黄河流域上游地区草地面积总体下降,归因于其地处半干旱地区,自然环境相对脆弱,叠加人类活动的多重干扰:一方面是不合理开垦、过度放牧等直接破坏行为,导致牧草减少、畜草矛盾日益突出;另一方面,从夜间灯光数据反映的人类活动强度提升、人口密度增加等指标来看,其引发的资源消耗与环境压力,共同推动了草地面积的减少。

草地退化评价指标影响各异,人类活动因素相较于自然因素更为突出,这与相关生态系统评估^[42-43]的研究结论一致,表明人类活动对草地的干扰强度与频率超越自然因子的缓变作用。未退化草地始终占据数量优势主要得益于国家层面的系统性治理:例如党的十八大将生态文明建设纳入中国特色社会主义事业“五位一体”总体布局;新一轮西部大开发战略更注重基础设施建设投资与生态环境保护^[34];2019年黄河流域生态保护和高质量发展上升为重大国家战略;建立横向生态补偿机制及不断完善《中华人民共和国草原法》等一系列综合措施。研究区降水波动加剧、干旱频率上升,导致草地生物量下降,直接削弱草地自我恢复潜力;旅游业快速发展致使核心景区游客量激增,旅游设施建设使草地破碎化加剧;畜牧业规模扩张,草地载畜量超载,生态补偿标准低于牧民机会成本,导致偷牧现象屡禁不止;能源开发等工业活动对周边草地造成显著扰动,植被恢复周期延长。气候-人为耦合效应使得黄河流域上游整体草地退化程度随时间推移而有所加剧。应从以下方面加强管理:一是完善上游地区草地恢复与保护政策体系,强化生态补偿机制;二是科学调控放牧强度,优化区域人口分布,降低人为干扰;三是严格控制大规模、高强度的工业开发活动,充分发挥生态系统的自然修复能力。

3.2 预测未来黄河流域上游草地退化

CA-Markov模型通过CA模型与Markov模型的有机结合,既能分析系统空间格局演变,又能对其未来发展状况进行科学预测模拟。其多应用于土地利用变化领域的模拟预测,近年来应用范围已扩展至土壤侵蚀^[44]、生态脆弱性预测^[38,45]等研究领域。鉴于草地退化等级计算结果同样为离散状态的栅格数据,本研究采用CA-Markov模型完成黄河流域上游草地退化状况的模拟预测,其可作为区域草地退化模拟预测的一种技术手段。

为评估时间间隔对模拟效果的影响,本研究分别以10年和5年为跨度进行草地退化模拟,结果表明,5年时间间隔的模拟精度优于10年时间间隔,这与朱磊等^[46]研究结论一致。

3.3 研究的局限性

在构建草地退化评价指标体系时,由于缺乏统一的标准规范及数据可获取性的限制,无法获取部分数据,导致当前指标体系尚难以全面、系统地反映黄河流域上游草地退化全貌。鉴于此,未来研究需深入探索退化草地指标变化,构建更为完善和具有代表性的评价体系,为草地生态系统的保护与恢复提供更加坚实的科学依据。

CA-Markov模型基于历史草地退化等级变化的外推预测,其对非线性、突变性过程的捕捉能力存在局限。例如,若未来实施更严格的生态保护政策,模型可能高估退化速度;此外,尽管模型精度在2020年数据上得到验证,但短期验证难以充分揭示长期预测中因系统误差累积所导致的不确定性。因此,在应用CA-Markov模型进行草地退化模拟时,需结合研究区的自然背景、政策导向及模型本身的限制条件进行综合分析,以增强模拟结果的可靠性与实用性。

4 结论

本文以黄河流域上游为研究区,在综合分析其土地利用、气候、土壤、植被及社会经济等多维信息的基础上,监测2000—2023年草地时空动态并深入开展草地退化研究。结论如下:

(1)23年间草地面积呈减少态势,分布格局呈“西南多东北少”空间分异特征。中、低覆盖度草地持续减少,高覆盖度草地呈增加趋势。

(2)草地覆盖度类型间的面积转换呈现动态特征,高覆盖度草地转变为中、低覆盖度草地的面积超过其反向转化的面积。

(3)草地退化趋于恶化,空间分布呈现“西南低东北高”的退化格局,且退化等级升高的面积超越等级降低的面积。

(4)CA-Markov模型可用于草地退化的预测,且精确度较高,预测2025年和2030年黄河流域上游草地退化状况将持续恶化,草地生态系统仍面临潜在的退化风险。

参考文献

- [1] 刘佳,朱求安,王乐,等. 基于多源数据的近40年黄河上游地区草地变化特征[J]. 草业科学,2023,40(2):405-418
LIU J, ZHU Q A, WANG L, et al. Characteristics of grassland change in the upper Yellow River over the past 40 years based on multi-source data[J]. Pratacultural Science, 2023, 40(2): 405-418
- [2] GANG C C, ZHOU W, CHEN Y Z, et al. Quantitative assessment of the contributions of climate change and human activities on global grassland degradation[J]. Environmental Earth Sciences, 2014, 72(11):4273-4282
- [3] MA C H, XIE Y W, DUAN S B, et al. Characterization of spatio-temporal patterns of grassland utilization intensity in the Selinco watershed of the Qinghai-Tibetan Plateau from 2001 to 2019 based on multisource remote sensing and artificial intelligence algorithms[J]. GIScience & Remote Sensing, 2022, 59(1):2217-2246
- [4] 高清竹,李玉娥,林而达,等. 藏北地区草地退化的时空分布特征[J]. 地理学报,2005,60(6):965-973
GAO Q Z, LI Y E, LIN E D, et al. Temporal and spatial distribution of grassland degradation in northern Tibet[J]. Acta Geographica Sinica, 2005, 60(6):965-973
- [5] 岳书平,张树文,闫业超. 内蒙古东部地区草地退化的时空分布特征——以巴林右旗为例[J]. 资源科学,2007,29(6):154-161
YUE S P, ZHANG S W, YAN Y C. Temporal and spatial distribution of grassland degradation in eastern Inner Mongolia: a case study in Balinyouqi[J]. Resources Science, 2007, 29(6): 154-161
- [6] 刘文慧,李欣烨,李晓燕. 基于综合遥感指数的松嫩平原西部草地退化及其对干旱的响应[J]. 自然资源遥感,2025,37(1):232-242
LIU W H, LI X Y, LI X Y. Grassland degradation and its response to drought in the western Songnen Plain based on comprehensive remote sensing index[J]. Remote Sensing for Natural Resources, 2025, 37(1):232-242
- [7] 程佳蕊,毛德华,玉山,等. 1980—2020年克鲁伦河流域草地的时空变化[J]. 水土保持通报,2022,42(3):296-303
CHENG J R, MAO D H, YU S, et al. Temporal and spatial changes of grassland in kherlen river basin from 1980 to 2020[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2022, 42(3):296-303
- [8] 黄麟,翟俊,祝萍,等. 中国草畜平衡状态时空演变指示的草地生态保护格局[J]. 地理学报,2020,75(11):2396-2407
HUANG L, ZHAI J, ZHU P, et al. Spatiotemporal evolution characteristics of livestock-carrying pressure in China and its implications for grassland ecosystem conservation pattern[J]. Acta Geographica Sinica, 2020, 75(11):2396-2407
- [9] 李伟,李亚晓,元雯雯,等. 全球草地退化的成因、修复技术及恢复效果评估研究进展[J]. 中国草地学报,2024,46(11):110-129
LI Y, LI Y X, QI W W, et al. Review of causes, restoration techniques, and effectiveness evaluation of global grassland degradation[J]. Chinese Journal of Grassland, 2024, 46(11): 110-129
- [10] 乌云嘎,乌兰图雅,张卫青,等. 基于CiteSpace的中国草地退化评价指标体系演进分析[J]. 中国草地学报,2023,45(5):125-136
WU Y G, WU L T Y, ZHANG W Q, et al. Analysis of the evolution of the grassland degradation evaluation index system in China based on CiteSpace[J]. Chinese Journal of Grassland, 2023, 45(5):125-136
- [11] 石明明,王喆,周秉荣,等. 青藏高原草地退化特征及其与气候因子的关系[J]. 应用生态学报,2022,33(12):3271-3278
SHI M M, WANG Z, ZHOU B R, et al. Characteristics of grassland degradation and its relationship with climate factors on Qinghai-Tibetan Plateau, China [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2022, 33(12):3271-3278
- [12] 张光茹,李红琴,杨永胜,等. 基于主成分分析对退化高寒草甸不同恢复方式下草地质量的综合评价[J]. 中国草地学报,2020,42(2):76-82
ZHANG G R, LI H Q, YANG Y S, et al. Comprehensive evaluation of grassland quality under different restoration methods in degraded Alpine meadow based on principal component analysis[J]. Chinese Journal of Grassland, 2020, 42(2):76-82
- [13] 汤昕,张福平,冯起,等. 20年来鄂尔多斯市草地产草量变化及草畜平衡[J]. 生态学报,2024,44(23):10887-10896
TANG X, ZHANG F P, FENG Q, et al. Changes in grassland yield and grassland-livestock balance in Ordos City over the past 20 years[J]. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(23):10887-10896
- [14] 王宗松,姜丽丽,汪诗平,等. 草地退化恢复评估方法述评[J]. 生态学报,2022,42(16):6464-6473
WANG Z S, JIANG L L, WANG S P, et al. Assessment methods for grassland restoration[J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(16):6464-6473
- [15] 史晓亮,王馨爽. 黄土高原草地覆盖度时空变化及其对气候变化的响应[J]. 水土保持研究,2018,25(4):189-194
SHI X L, WANG X S. Spatial and temporal variation of vegetation coverage and its response to climate change in the Loess Plateau[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2018, 25(4):189-194

- [16] 阿卜杜热合曼·吾斯曼, 玉素甫江·如素力, 张发, 等. 基于遥感监测的天山新疆段草地退化时空特征及其与气候因子的关系[J]. 草业科学, 2023, 40(7): 1779-1792
Abudurehman·Wusiman, Yusufjiang·Rusuli, ZHANG F, et al. Temporal and spatial characteristics of grassland degradation in Xinjiang Section of Tianshan Mountains based on remote sensing monitoring and its relationship with climate factors[J]. Pratacultural Science, 2023, 40(7): 1779-1792
- [17] 刘洋洋, 任涵玉, 章钊颖, 等. 中国草地覆盖度时空动态格局及其影响因素[J]. 水土保持研究, 2022, 29(2): 221-230, 242
LIU Y Y, REN H Y, ZHANG Z Y, et al. Temporal and spatial dynamic pattern of grassland coverage and its influencing factors in China[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2022, 29(2): 221-230, 242
- [18] 杨勇, 邓祥征, 白羽萍, 等. 2000—2015年中国典型草原草地动态及其对管理政策的响应[J]. 资源科学, 2017, 39(7): 1272-1280
YANG Y, DENG X Z, BAI Y P, et al. Grassland dynamics and response to management policies in China's typical steppe from 2000 to 2015[J]. Resources Science, 2017, 39(7): 1272-1280
- [19] 赵宇豪, 戎战磊, 张玉凤, 等. 近30年黑河流域草地变化分析及分布格局预测[J]. 草业学报, 2017, 26(6): 1-15
ZHAO Y H, RONG Z L, ZHANG Y F, et al. Analysis of change in grassland area in the Heihe River basin over the past 30 years and prediction of future trends[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2017, 26(6): 1-15
- [20] 张重, 龚健, 李靖业, 等. 基于信息量模型的三江源东部草地退化易发性评价——以青海省果洛州为例[J]. 资源科学, 2022, 44(3): 464-479
ZHANG Z, GONG J, LI J Y, et al. Grassland degradation susceptibility assessment of the eastern area of the Three Rivers Source region based on the information quantity model: A case study of Golog Tibetan Autonomous Prefecture, Qinghai Province[J]. Resources Science, 2022, 44(3): 464-479
- [21] 谢花林, 李秀彬, 张燕婷, 等. 基于ESDA的京津冀地区草地变化空间分异[J]. 自然资源学报, 2012, 27(7): 1224-1232
XIE H L, LI X B, ZHANG Y T, et al. Spatial difference of regional grass changes based on ESDA at county level in Beijing-Tianjin-Hebei area [J]. Journal of Natural Resources, 2012, 27(7): 1224-1232
- [22] 武爽, 冯险峰, 孔玲玲, 等. 气候变化及人为干扰对西藏地区草地退化的影响研究[J]. 地理研究, 2021, 40(5): 1265-1279
WU S, FENG X F, KONG L L, et al. Effects of climate variation and human activities on grassland degradation in Tibet[J]. Geographical Research, 2021, 40(5): 1265-1279
- [23] 万华伟, 高帅, 刘玉平, 等. 呼伦贝尔生态功能区草地退化的时空特征[J]. 资源科学, 2016, 38(8): 1443-1451
WAN H W, GAO S, LIU Y P, et al. Grassland degradation monitoring and spatio-temporal variation analysis of the Hulun Buir Ecological Function Region[J]. Resources Science, 2016, 38(8): 1443-1451
- [24] 满卫东, 刘明月, 王宗明, 等. 1990—2015年东北地区草地变化遥感监测研究[J]. 中国环境科学, 2020, 40(5): 2246-2253
MAN W D, LIU M Y, WANG Z M, et al. Remote sensing investigation of grassland change in Northeast China during 1990-2015 [J]. China Environmental Science, 2020, 40(5): 2246-2253
- [25] 白晓, 黄千翔, 田丹, 等. 黄土高原草原区草地退化时空演变及其驱动因素分析[J]. 环境科学, 2025, 46(4): 2363-2372
BAI X, HUANG Q X, TIAN D, et al. Spatiotemporal evolution patterns of grassland degradation and its driving factors on the Loess Plateau [J]. Environmental Science, 2025, 46(4): 2363-2372
- [26] 高梓茜, 包安明, 郑国雄, 等. 基于空间异质性的库鲁斯台草地退化[J]. 中国科学院大学学报(中英文), 2023, 40(6): 735-742
GAO Z Q, BAO A M, ZHENG G X, et al. Grassland degradation assessment based on spatial heterogeneity in Kulusitai [J]. Journal of University of Chinese Academy of Sciences, 2023, 40(6): 735-742
- [27] 陆均, 胡玉昆, 岳平, 等. 基于CVOR指数的巴音布鲁克高寒草原健康评价[J]. 干旱区研究, 2017, 34(4): 862-869
LU J, HU Y K, YUE P, et al. Assessment on the health of Alpine steppe in bayinbuluk based on CVOR index [J]. Arid Zone Research, 2017, 34(4): 862-869
- [28] 赵剑, 邓成军, 李文利, 等. 近35 a新疆天山巴音布鲁克草原退化程度评价[J]. 干旱区研究, 2023, 40(4): 636-646
ZHAO J, DENG C J, LI W L, et al. Evaluation of the degree of degradation of Xinjiang Tianshan Bayinbuluk grassland in 35 years [J]. Arid Zone Research, 2023, 40(4): 636-646
- [29] 李雪莹, 许娅威, 王峥, 等. 青藏高原2000—2015年草地质量的时空变化研究[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2023, 59(1): 147-155
LI X Y, XU Y W, WANG Z, et al. Spatio-temporal changes in grassland degree in the Qinghai-Tibet Plateau from 2000 to 2015 [J]. Journal of Beijing Normal University (Natural Science), 2023, 59(1): 147-155
- [30] 黄钰清, 李骁尧, 于强, 等. 1995—2018年黄河流域土地利用变化及驱动力分析[J]. 西北林学院学报, 2022, 37(6): 113-121
HUANG Y Q, LI X Y, YU Q, et al. An analysis of land use change and driving forces in the Yellow River Basin from 1995 to 2018 [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2022, 37(6): 113-121
- [31] 张佰发, 苗长虹. 黄河流域土地利用时空格局演变及驱动力[J]. 资源科学, 2020, 42(3): 460-473
ZHANG B F, MIAO C H. Spatiotemporal changes and driving forces of land use in the Yellow River Basin [J]. Resources Science, 2020, 42(3): 460-473
- [32] 郭婧, 张骞, 宋明华, 等. 黄河上游草地生态现状及功能提升技术[J]. 草地学报, 2020, 28(5): 1173-1184
GUO J, ZHANG Q, SONG M H, et al. Status and function improvement technology of the grassland ecosystem in the

- upper Yellow River Basin[J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2020, 28(5):1173-1184
- [33] 叶培龙,张强,王莺,等. 1980—2018年黄河上游气候变化及其对生态植被和径流量的影响[J]. *大气科学学报*, 2020, 43(6):967-979
- YE P L, ZHANG Q, WANG Y, et al. Climate change in the upper Yellow River Basin and its impact on ecological vegetation and runoff from 1980 to 2018[J]. *Transactions of Atmospheric Sciences*, 2020, 43(6):967-979
- [34] 付乐,迟妍妍,于洋,等. 2000—2020年黄河流域土地利用变化特征及影响因素分析[J]. *生态环境学报*, 2022, 31(10):1927-1938
- FU L, CHI Y Y, YU Y, et al. Characteristics and driving forces of land use change in the Yellow River Basin from 2000 to 2020[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2022, 31(10):1927-1938
- [35] 施亚林,曹艳萍,苗书玲. 黄河流域草地净初级生产力时空动态及其驱动机制[J]. *生态学报*, 2023, 43(2):731-743
- SHI Y L, CAO Y P, MIAO S L. Spatiotemporal dynamics of grassland net primary productivity and its driving mechanisms in the Yellow River Basin[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2023, 43(2):731-743
- [36] 廖美玉,方秀琴,蒋心远,等. 黄河流域近40年土地利用/覆被时空变化特征[J]. *水土保持学报*, 2024, 38(2):165-177, 189
- LIAO M Y, FANG X Q, JIANG X Y, et al. Spatiotemporal characteristics of land use/cover changes in the Yellow River Basin over the past 40 years[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2024, 38(2):165-177, 189
- [37] 陈玉兰,焦菊英,田红卫,等. 黄土高原归一化植被指数与自然环境因子的空间关联性——基于地理探测器[J]. *生态学报*, 2022, 42(9):3569-3580
- CHEN Y L, JIAO J Y, TIAN H W, et al. Spatial correlation analysis between vegetation NDVI and natural environmental factors based on geographical detector on the Loess Plateau[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, 42(9):3569-3580
- [38] 茹少峰,马茹慧. 黄河流域生态环境脆弱性评价、空间分析及预测[J]. *自然资源学报*, 2022, 37(7):1722-1734
- RU S F, MA R H. Evaluation, spatial analysis and prediction of ecological environment vulnerability of Yellow River Basin[J]. *Journal of Natural Resources*, 2022, 37(7):1722-1734
- [39] 徐新良,刘纪远,张树文,等. 中国多时期土地利用遥感监测数据集(CNLUCC)[EB/OL]. <http://www.resdc.cn/>, 2018-07-02/2025-06-17
- XU X L, LIU J Y, ZHANG S W, et al. China Multi-Period Land Use Remote Sensing Monitoring Dataset (CNLUCC)[EB/OL]. <http://www.resdc.cn/>, 2018-07-02/2025-06-17
- [40] 侯西勇,庄大方,于信芳. 20世纪90年代新疆草地资源的空间格局演变[J]. *地理学报*, 2004, 59(3):409-417
- HOU X Y, ZHUANG D F, YU X F. Grassland change and its spatial patterns in Xinjiang in 1990s[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2004, 59(3):409-417
- [41] 张学儒,周杰,李梦梅. 基于土地利用格局重建的区域生境质量时空变化分析[J]. *地理学报*, 2020, 75(1):160-178
- ZHANG X R, ZHOU J, LI M M. Analysis on spatial and temporal changes of regional habitat quality based on the spatial pattern reconstruction of land use[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2020, 75(1):160-178
- [42] 席磊,冯益明,戚璠,等. 基于综合评价指数的塔里木盆地荒漠化风险评估[J]. *生态学报*, 2025, 45(3):1126-1136
- XI L, FENG Y M, QI Z, et al. Risk assessment of desertification in Tarim Basin based on comprehensive evaluation index[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2025, 45(3):1126-1136
- [43] 张艳,苏兰欣. 基于SRP模型的黄河流域中段生态脆弱性评价及驱动因素分析[J]. *环境科学*, 2025, 46(8):5134-5144
- ZHANG Y, SU L X. Ecological vulnerability assessment and driving factor analysis in the middle section of Yellow River Basin based on SRP model[J]. *Environmental Science*, 2025, 46(8):5134-5144
- [44] 陈仕军,黄元章,谭定光,等. 基于CA-Markov模型的巴东县土壤侵蚀预测及空间驱动力分析[J]. *中国水土保持科学*, 2025, 23(1):222-232
- CHEN S J, HUANG Y Z, TAN D G, et al. Prediction and spatial driving force analysis of soil erosion in Badong county based on CA-Markov model[J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2025, 23(1):222-232
- [45] 赵宗泽,马倩,王一,等. 基于SRP模型的中原城市群生态脆弱性分析与预测[J]. *环境科学*, 2025, 46(3):1621-1632
- ZHAO Z Z, MA Q, WANG Y, et al. Analysis and prediction of ecological vulnerability of the central Plains urban agglomeration based on the SRP model[J]. *Environmental Science*, 2025, 46(3):1621-1632
- [46] 朱磊,夏鑫鑫,杨爱民,等. 玛纳斯河流域绿洲区耕地扩张的CA-Markov模型参数敏感性分析[J]. *干旱区研究*, 2020, 37(5):1327-1336
- ZHU L, XIA X X, YANG A M, et al. Expansion of cultivated land in the oasis area of the Manas River Basin sensitivity analysis of CA-Markov model parameters[J]. *Arid Zone Research*, 2020, 37(5):1327-1336

(责任编辑 刘婷婷)