

引用格式: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.] DOI: 10.18402/resci.2022.03.04

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

张重¹, 龚健^{1,2}, 李靖业¹, 张子煜³, 张木茜¹

(1. 中国地质大学(武汉)公共管理学院, 武汉 430074; 2. 自然资源部法治研究重点实验室, 武汉 430074; 3. 东南大学交通学院, 南京 211189)

摘要:草地退化的预警对维护草地生态系统稳定及保障牧民财产安全意义重大。本文探索并验证了信息量模型跨领域应用于草地退化易发性评价的可行性, 可为草地退化防治管控提供决策依据。以青海省三江源东部果洛藏族自治州为研究区, 将像元二分模型和信息量模型耦合, 并根据地形、气候、人类活动、水文、土壤5个维度, 进行草地退化易发性评价。结果表明:①2008—2018年果洛藏族自治州草地退化区与草地退化易发性评价中退化高易发区分布特点一致, 主要集中于玛沁县中部、玛多县南部等地区;②处于超过4400 m的高程, 高于25人/km²的人口密度, 大于30°的坡度等位置的草地容易发生退化。而位于年平均降水量大于600 mm, 年累计日照时数小于2400 h, 依附土壤类型为灰褐土、沼泽土等地区的草地具有更好的抗逆性;③共有68.34%的退化草地分布于极易退化区和较易退化区, 15.92%分布于中易发区, 15.74%分布于不易退化区和低易退化区, 评价模型精度较好, AUC (Area Under Curve)值达到0.764。由此可见, 像元二分模型与信息量模型结合以评定草地退化易发性的方法是可靠的, 该思路对其他地区草地退化易发性评价具有借鉴意义。

关键词:草地退化; 易发性评价; 信息量法; 像元二分模型; 果洛藏族自治州; 三江源东部

DOI: 10.18402/resci.2022.03.04

1 引言

草地作为地球上广泛分布的陆地生态系统之一^[1], 发挥着牧草供给、固碳释氧、保持水土、维护生物多样性等重要的生态功能^[2-4]。20世纪70年代以来, 中国境内各草原区出现不同程度的天然草地退化^[5], 草地生产力与生态服务功能下降, 威胁生态安全与畜牧业发展。面对已退化草地, 其修复工作存在恢复演替周期长、难度高、投入成本大的困难。而通过草地退化的预警, 提前做出针对性的防治措施, 防患于未然, 对于草地资源的保护与利用意义重大。

但是迄今为止, 草地退化易发性与预测预警研究较为匮乏, 早期主要为退化演替时间和面积上的预测, 并未在空间上体现草地退化的可能性。如刘伟等^[6]以次级生产力为标准, 优良牧草比例作为主要因子, 建立草地退化预测模型, 模拟退化演化时间; 李素英等^[7]利用马尔柯夫(Markov)模型预测2002—2011年锡林浩特地区退化草地面积。后来的研究开始探索草地退化风险产生的关键阈值, 即找到一个接近灾难性转变的生态系统特征, 此特征可被视为预警信号^[8], 如李学玲等^[9]利用元胞自动机(Cellular Automata)模型对高寒草甸退化序列上秃

收稿日期: 2021-08-25 修订日期: 2022-01-08

基金项目: 国家自然科学基金项目(42071254); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(CUGL170408)。

作者简介: 张重, 男, 湖南岳阳人, 博士研究生, 研究方向为土地利用与生态风险。E-mail: zhangzhong@cug.edu.cn

通讯作者: 龚健, 男, 湖南常德人, 教授, 研究方向为土地评价、土地利用规划和土地信息系统。E-mail: gongjian@cug.edu.cn

2022年3月

斑格局动态进行模拟,确定秃斑连通阈值为草地退化的预警信号;自21世纪以来,大部分研究采用国家标准法^[10,11]和专家经验法^[12,13],从“覆盖度相对百分数的减少”和“覆盖度达到未退化草地覆盖度百分比”两个层面^[14]入手,确定不同的草地退化阈值。近期研究则开始利用新型算法和模型来模拟草地退化过程,将草地退化风险落在空间上并计算退化概率,为草地退化防治提供了可靠的参考,如Batanacun等^[15]利用极端梯度提升(Extreme Gradient Boosting)算法和解释机器学习模型输出的博弈论方法(Shapley Additive Explanations)模拟锡林郭勒地区草地退化动态,并识别草地退化的高风险区域;Chen等^[8]基于随机森林(Random Forest)和贝叶斯信念网络(Bayesian Belief Network)设计了牧场退化风险评估的综合方法,在网格尺度上预测草地退化的概率,并验证了该方法的实用性。总体上,草地退化易发性与风险预警研究已经起步,但仍难以满足草地资源管理的需要。

在地质灾害空间预测领域,易发性研究已经比较成熟^[16,17]。草地退化易发性与地质灾害易发性研究具有部分共性:①都受到多驱动因子耦合的影响;②草地退化和地质灾害的分布数据能作为易发性评价历史统计样本。本文主要探究地质灾害易发性评价中的方法能否移植入草地退化易发性评价,为此,引入地质灾害易发性评价中的常用模型——信息量模型进行尝试,其原因在于信息量模型优点明显:①是一种客观、成熟的概率统计模型^[18];②对多元异质数据融合较好^[19];③在小比例尺大区域中表现良好^[20];④可借助GIS技术强大的空间分析和数据处理能力来简化模型的运算^[21,22]。

因此,本文探索性引进信息量模型并对其内在结构进行定义,基于像元二分模型识别退化草地,并构建草地退化易发性评价指标体系,从地形、气候、人类、水文、土壤5个维度对草地退化驱动因子进行定量分析;探究各驱动因子与草地退化的联系,利用信息量模型评估草地未来退化的易发性,并验证该方法的可行性,以期提升草地退化的防治效率,为生态环境保护预警提供新思路。

果洛藏族自治州(下文简称果洛州)位于青海省三江源东部的核心地带^[23],是国家生态安全战略格局“两屏三带”^[24]的组成部分,区内草地面积广大,

也是青海省重要的畜牧业生产基地。此外,果洛州高寒的自然环境使其生态环境脆弱,加之人为干扰日益增多,草地退化风险较高,预防工作任重道远。果洛州区位的典型性以及环境的敏感性凸显了此处草地退化研究的重要意义,基于上述理论方法与研究背景,本文聚焦于信息量模型在果洛州草地退化易发性评价的应用,主要研究内容包括:①利用像元二分模型结合国家草地退化标准,识别草地退化的范围;②构建草地退化易发性评价指标体系;③信息量模型的运算与退化驱动因子分析;④草地退化易发性分区与精度评价。

2 研究区、数据来源和研究方法

2.1 研究区概况

果洛州地处青海三江源东部,东临甘肃省,南接四川省,深居青藏高原腹地,地跨黄河、长江流域,是中国主要的水源涵养区、草原区,也是中国西北重要的生态屏障^[25]。地理上位于32°21'N—35°45'N、96°56'E—101°45'E之间^[26]。果洛州下辖玛多、达日、甘德、玛沁、久治和班玛6县(图1),总面积为7.64×10⁴ km²。果洛州地广人稀,2018年末^[27]常住人口20.84万人(人口密度<3人/km²),地区年生产总值共41.45亿元。区内平均海拔4200 m以上,西北高、东南低,属高原大陆性气候,表现为高寒缺氧、冷热两季交替、昼夜温差大,年均气温为-4℃,年均降水量在400~760 mm。果洛州草地面积达到6.5×10⁴ km²,是最主要的土地类型,也是本文研究的关键对象。

2.2 数据来源

本文所用的公路、河流线状矢量数据来源于开源地图矢量数据集Open Street Map(OSM: <https://www.openstreetmap.org>);高程数据(DEM)来源于地理空间数据云(<http://www.gscloud.cn>);土地利用数据采用果洛州2018年土地变更调查数据库,来源于果洛州自然资源局;2008—2018年州域6座气象站台记录数据来源于《果洛藏族自治州统计年鉴》,经过整理得到6县共11年的年平均气温、年降水量和年累计日照时数的平均值;NDVI数据为基于连续时间序列的SPOT/VEGETATION NDVI卫星遥感数据,在月数据基础上采用最大值合成法(MVC)生成年度植被指数数据;NDVI、植被类型、土壤类型空间分布和6个县的气象站台坐标矢量数据来源于

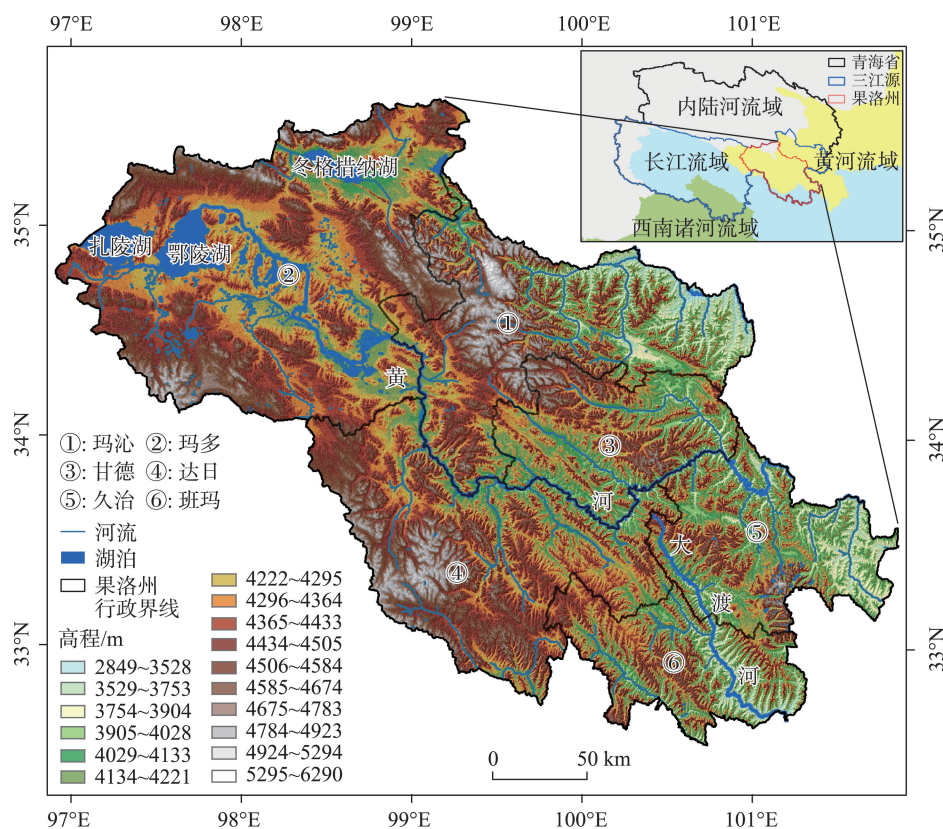


图1 果洛州高程及地理位置示意图

Figure 1 Geographic location and elevation of Golog Prefecture

中国科学院资源环境科学与数据中心(<https://www.resdc.cn>);2018年人口密度数据来源于WorldPop人口数据集(<https://www.worldpop.org/>)。所有数据统一输出为CGCS2000地理坐标系,栅格数据统一重采样至30 m的空间分辨率。

2.3 研究方法

2.3.1 像元二分模型

归一化植被指数(NDVI)常用于土地退化遥感监测^[28,29],它与植被覆盖度(V_c)存在极显著线性相关关系^[30],而植被覆盖度变化能够直接反映草地退化状况。目前,像元二分模型(Dimidiated Pixel Model)估算植被覆盖度已广泛应用于草地退化评估^[14],其计算公式^[31,32]为:

$$V_c = \frac{NDVI - NDVI_{soil}}{NDVI_{veg} - NDVI_{soil}} \quad (1)$$

式中: V_c 表示植被覆盖度; $NDVI_{soil}$ 表示裸地的NDVI值; $NDVI_{veg}$ 表示绿色植被的NDVI值。理论上,裸地 $NDVI_{soil}$ 的值应该接近0,但由于地表湿度、粗糙度、土壤类型、土壤颜色等条件不同,

$NDVI_{soil}$ 会随着时空而变化, $NDVI_{soil}$ 的变化范围一般在-0.1~0.2之间^[33-35]。本文仅计算果洛州草地范围内的植被覆盖度,由此根据以往研究经验^[12,36],采用近似值替代的方法,利用果洛州草地范围作为掩膜,提取其范围内NDVI数据的最小值和最大值分别作为 $NDVI_{soil}$ 和 $NDVI_{veg}$,用以计算对应年份的草地植被覆盖度(通过计算得出文中2008年 $NDVI_{soil} = 0.012$ 、 $NDVI_{veg} = 0.856$,2018年 $NDVI_{soil} = 0.016$ 、 $NDVI_{veg} = 0.920$)。

2.3.2 草地退化范围识别

由于监测指标、经验标准、区位条件不同,现阶段草地退化阈值界定和程度判别仍然难以达成统一^[14,37]。本文以遥感植被指数NDVI为基础,利用公式(1)反演植被覆盖度,同时参考国家标准GB19377-2003天然草地退化、沙化、盐渍化的分级指标^[11],以及相关文献^[10],设定发生草地退化的判别阈值为实验年份植被覆盖度减少量超过基准年份植被覆盖度的10%^[11],即公式(2):

2022年3月

$$\Delta V_c = \frac{V_{ca} - V_{cb}}{V_{ca}} \quad (2)$$

$$\Delta V_c \begin{cases} > 10\% (\text{草地在} a \text{到} b \text{年间发生退化}) \\ \leq 10\% (\text{草地在} a \text{到} b \text{年间没有退化}) \end{cases}$$

式中: ΔV_c 为基准年到实验年间草地植被覆盖率的相对百分数减少率; V_{ca} 和 V_{cb} 分别代表基准年和实验年果洛州草地的植被覆盖度。选取起始时间2008年作为草地未退化的参考基年,2018年为实验年份($V_{ca} = V_{c2008}$, $V_{cb} = V_{c2018}$)。通过公式(2)可得出:2018年植被覆盖度小于2008年植被覆盖度的90%($V_{c2018} < 0.9 V_{c2008}$)的区域,被判定在2008至2018年共11年内发生了草地退化,通过ArcGIS栅格计算器(Raster Calculator)以及重分类(Reclassify)工具可筛选出 $\Delta V_c > 10\%$ 的退化区域。

2.3.3 信息量模型

信息量模型(Information Quantity Model)是一种数据驱动的定量统计方法^[38],该方法理论基础源于20世纪40年代产生的信息论^[39]。将其运用于草地退化易发性评价的主要思路为:以像元二分模型和草地退化标准为基础,识别出草地退化面积与分布信息,再把反映各种影响草地退化的因素实测统计值转化为反映驱动草地退化的贡献值,即“信息量”,其公式如下:

$$I_i(X_i, D) = \log_2 \frac{P(X_i, D)}{P(X_i)} \quad (3)$$

式中: $I(X_i, D)$ 为某易发性评价因子类别 X_i 对草地退化发生(D)提供的信息量; $P(X_i, D)$ 为草地退化(D)发生条件下出现某评价因子类别 X_i 的概率, $P(X_i)$ 为研究区内出现某评价因子类别 X_i 的概率。在实际计算时可用频率估计条件概率来估算,即公式(5)^[16,40]:

$$I_i(X_i, D) = \log_2 \frac{N_i/N}{S_i/S} \quad (4)$$

式中: N_i 为某评价因子类别 X_i 范围内草地退化的面积; N 为研究区内草地退化的总面积; S_i 为研究区范围内某评价因子类别 X_i 的面积; S 为研究区的总面积。故每个评价单元的总信息量为:

$$I = \sum_{i=1}^n I_i(X_i, D) = \sum_{i=1}^n \log_2 \frac{N_i/N}{S_i/S} \quad (5)$$

式中: I 为某评价单元内总的信息量值; n 为参评因子数。 I 越大表示草地退化越容易发生, I 出现负

值表明该单元发生草地退化的可能性小于区域平均发生草地退化的可能性^[41]。

2.3.4 成功率曲线

成功率曲线(Success Rate Curve)广泛应用于灾害易发性预测的精度评价,并认为高易发性区内灾害面积比例越高,模型的预测效果越出色^[42,43]。将果洛州草地退化易发性程度(总信息量值)以降序排列,再利用自然断点法(Natural Breaks)将草地按照退化易发程度分为20个等级,按照等级区间的顺序依次统计各等级草地的累计面积比值以及各等级内对应的退化草地的累计面积比值,分别作为横、纵坐标即可绘制成功率曲线。通过计算曲线下面积AUC(Area Under Curve)量化草地退化预测模型的精度,AUC越趋近于1,表示预测精度越高^[44]。

2.3.5 评价指标体系构建

草地退化驱动因子种类繁多,各驱动因子对草地退化的作用也不尽相同。自然条件变化和人类活动是诱发草地退化的两大最主要原因^[45,46],其中高程、坡度和坡向直接决定草地分布位置,提供草地生长的本底条件;而降水量、气温和日照时数作为关键自然气候驱动因子^[47],为草地提供必要的水热条件以及光合作用基础。果洛州作为青藏高原的典型缩影,生态环境脆弱,容易受到人类干扰,人类活动在小范围、短时间对草地退化的作用显著^[48];此外,土壤直接为草地植被提供养分,而河流湖泊对周边植被影响机制复杂,都可作为草地退化的重要驱动因子。根据果洛州实际情况以及参考以往研究经验^[49,50],确定各评价因子的选取依据(表1),选用11个因子构建草地退化的评价指标体系。同时,沿用或细化相关研究^[49-51]的分级方式,采用等间距法、专家经验法进行分级(图2a-2k)。因子分级结果显示,果洛州高程、坡度、年累计日照时数大体呈现自东南向西北升高的特点,而年平均气温、年平均降水量则自东南向西北降低。果洛州河湖多集中于“千湖之县”的玛多县,而城镇村及工矿用地多分布于果洛州中部与东南部,与人口密度、公路分布特点一致。由于光热、水分等差异,果洛州土壤肥力自东南向西北逐渐下降。

2.3.6 因子相关性分析

为减少因子数量,便于分析,并尽量消除相关性对模型构建的干扰,利用ArcGIS波段集统计

表1 草地退化评价因子选取依据与分级

Table 1 Selection basis of evaluation indicators and classification

类别	名称	选取依据	分级
地形因子	高程/m	植被随着高程变化具有垂直地带性 ^[52] ,不同高程范围内水系发育、人类活动以及气候条件不同,将综合影响草地的生长发育	以400 m为间隔分为6类
	坡度/°	坡度越大产生的地表径流和土壤流失量越高 ^[53] ,水力侵蚀等自然风化作用也越强,草地植被需要更大的抓地力以维持生长	以10°为间隔分为7类
	坡向	坡向的不同导致环境中水、光、热等自然条件的组合各异 ^[54] ,尤其是阴坡和阳坡,草地的抗逆能力有显著差别	根据方位划分为9类
气候因子	年平均气温/℃	在全球变暖的大趋势下,气温对干旱、半干旱地区的植被生长有着显著影响 ^[55,56] 。气温升高导致冻土退化,为冻融侵蚀和水力侵蚀创造了条件,水土流失加剧 ^[57] ,但与此同时,冰川融雪也给草地带来了额外的水分补给	以1℃为间隔分为6类
	年累计日照时数/h	日照时数可以表征当地气候和描述过去的天气状况,可认为日照时数较长的地区有强烈的太阳光,该因子与气温、蒸发量相关,直接或间接地影响草地退化情况	以100 h为间隔分为6类
	年平均降水量/mm	降水量是重要的气候因子,在一定程度上决定一个地区的土壤水分条件,可以为植被提供生长所需要的水分,从而影响草地的长势	以50 mm为间隔分为8类
人类活动因子	离公路的距离/m	公路修建占用了草地,人为地将草地切割,草地斑块变得破碎,相互间连通性降低。同时修建公路改变了周边的土壤状况,使公路边缘草地的生长环境遭到破坏	以500 m为间隔分为9类
	离城镇村及工矿用地距离/m	城镇村及工矿用地为人类活动的高频区域,人口相对较多且流动性大、辐射范围较广,周边的扩张建设、破坏污染等现象更为严重,对草地生长干扰程度大	以1000 m为间隔分为9类
	人口密度/(人/km ²)	人口密度和人类活动直接挂钩,人口越密集,人类活动强度越大,对草地扰动也越大 ^[49] ,针对果洛州地广人稀的实际情况,人口密度所包含的信息几乎能代替大部分人类活动因子,如夜间灯光、地均GDP、POI核密度,该因子是人类活动因子中的代表	参考葛美玲 ^[51] 研究划分为7类
水文因子	离河流湖泊的距离/m	河流湖泊渗透进入土壤或蒸发降雨可以为草地补给水分,但河湖对周边土壤与草地的冲刷侵蚀同样可为草地带来不良影响,且人类聚集区常依傍河流湖泊,因此该因子对草地退化的作用比较复杂	以500 m为间隔分为9类
土壤因子	土壤类型	不同土壤的pH值、有机质、结构等不同,为草地提供的养分和根系环境不同	根据土壤类型分为13类

注:气候因子根据果洛州六县共6个气象站台的坐标以及各站点2008—2018年共11年平均气象数据,利用反距离权重法(Inverse Distance Weighted, IDW)插值得到。

(Band Collection Statistics)工具分析各个草地退化驱动因子间的相关性。根据相关性分级标准^[58],大多数因子间不存在相关关系,仅有气温、日照时数、降水量出现高度相关性。其原因在于果洛州面积较大,但气象站台数量较少,导致大尺度范围内气象数据空间插值产生不可避免的环状相似性。为了消除后续草地退化易发性评价中因子间相关性过高带来的重复性计算,本文引入主成分分析法(Principal Component Analysis)^[59]将高相关性的3个因子进行去耦合,新生成的主成分之间两两相互独立,结果如下:

$$\begin{cases} P_1 = -0.107X_1 + 0.587X_2 + 0.802X_3, c = 89\% \\ P_2 = +0.841X_1 + 0.484X_2 - 0.242X_3, c = 7\% \\ P_3 = -0.531X_1 + 0.648X_2 - 0.546X_3, c = 4\% \end{cases} \quad (6)$$

式中: P_1 、 P_2 、 P_3 为3个主成分; X_1 、 X_2 、 X_3 分别为气温、日照时数、降水量因子; c 为贡献率。由于

第一主成分 P_1 贡献率接近90%,因此可利用第一主成分各因子的权重值,重新组合为一组新的气象因子信息量结果(图21),最终参与易发性评价计算。

3 结果与分析

根据公式(1)、(2)计算出果洛州2008—2018年草地退化的面积共为1775.94 km²(表2),占草地总面积的2.73%。草地退化区主要集中于玛沁县中部、玛多县南北两侧等地区,班玛、久治县草地退化较少(图3),与已有研究相符^[49]。

3.1 信息量模型运算与退化驱动机理分析

基于信息量模型公式(4),计算不同因子各分级的信息量值,并依据信息量值进行排序。由表3可知,处于超过4400 m的高程,高于25人/km²的人口密度,大于30°的坡度,土壤类型为冰川冻土、风沙土等以及距离城镇村及工矿用地小于1000 m等位置的草地更易发生退化。而位于年平均气温超

2022年3月

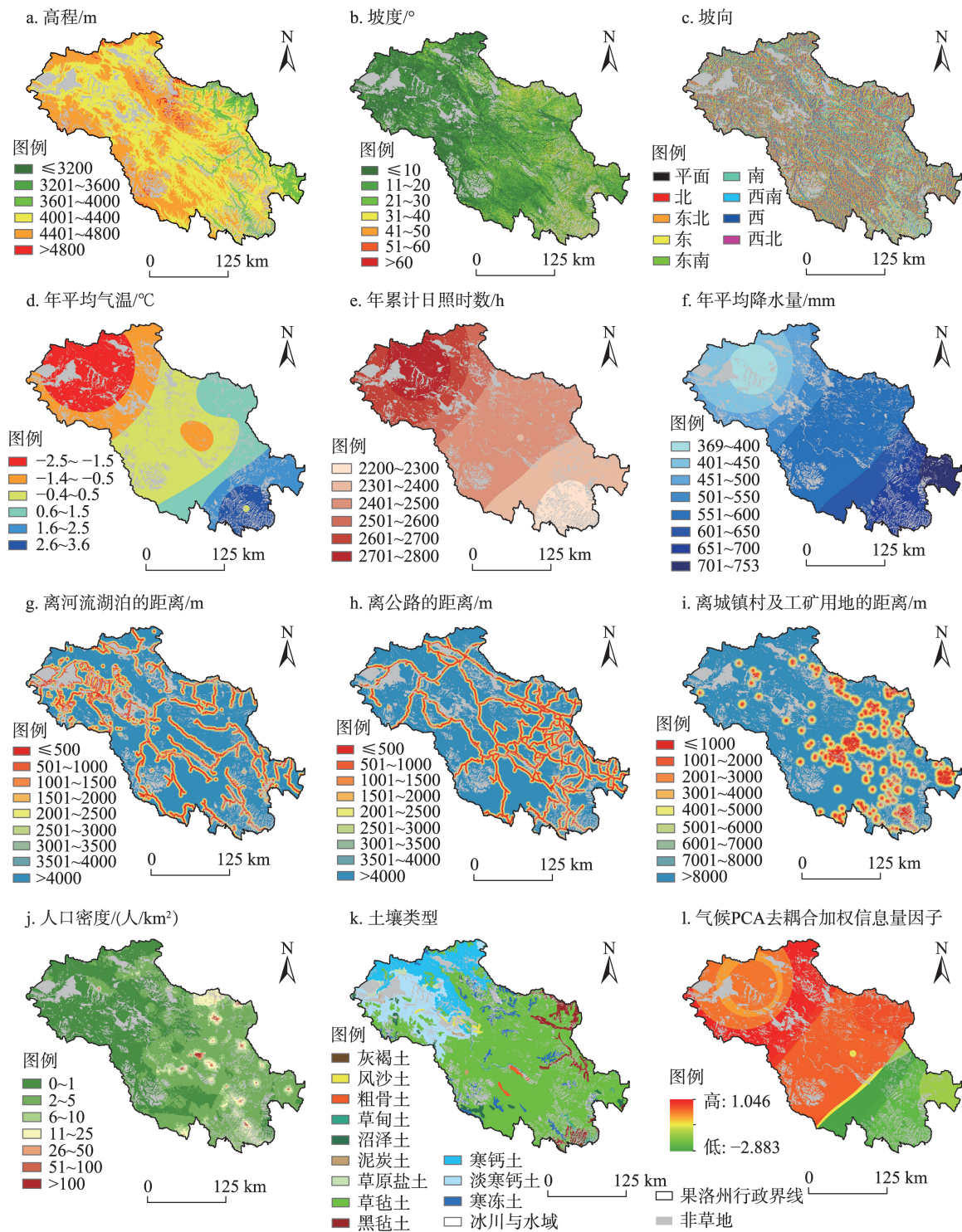


图2 草地退化评价因子图

Figure 2 Evaluation indicators of grassland degradation

表2 果洛州各县草地退化情况

Table 2 Statistics of grassland degradation area in each county of Golog Prefecture

	玛沁县	玛多县	甘德县	达日县	久治县	班玛县	合计
退化面积/km ²	641.29	669.90	184.79	172.58	82.97	24.42	1775.94
占比/%	36.11	37.72	10.41	9.72	4.67	1.37	100.00

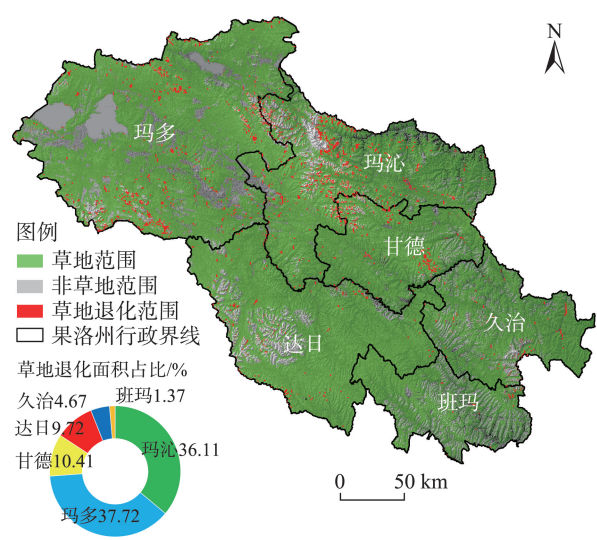


图3 果洛州草地退化范围

Figure 3 Distribution of degraded grassland in Golog Prefecture

过0.5℃,年平均降水量大于600mm,年累计日照时数小于2400h,依附土壤类型为灰褐土、沼泽土等区域的草地具有更好的抗逆性。为进一步探究草地

退化驱动机理,通过统计草地退化面积与信息量值在不同因子分级区间上的变化,分析二者间的联系(图4)。

3.1.1 地形

在高程方面(图4a),低于4000m的草地退化面积较少,在4400~4800m处,草地退化面积最大,达到991.16km²(占退化总面积的55.81%),超过4800m后,退化面积与草地面积同步减小。而信息量趋势与退化面积相反,随着高程上升先减少后增加,在4000m左右降至最低点。其原因在于人类活动主要集中于较低海拔区域,随着高度攀升,草地受人为干扰减少,达到最低值,而上升至4000m后,草地生长开始受高海拔恶劣环境条件制约。

在坡度方面(图4b),坡度大小与其提供的信息量值呈显著正相关关系。从坡度>20°开始,信息量值由负转正并不断增大,这是由于山坡变陡加重了水土流失,使土层变薄,土壤养分损失,导致草地退

表3 草地退化驱动因子信息量排名

Table 3 Rank of information quantity value of grassland degradation influencing factors

容易导致草地退化排名				不易导致草地退化排名			
因子名称	分级	信息量	排名	因子名称	分级	信息量	排名
高程/m	>4800	3.349	1	年平均降水量/mm	601~650	-2.298	1
人口密度/(人/km ²)	>100	3.176	2	年累计日照时数/h	2200~2300	-1.806	2
土壤类型	冰川水域	3.011	3	年平均气温/℃	2.6~3.6	-1.774	3
土壤类型	寒冻土	2.344	4	年平均降水量/mm	651~700	-1.768	4
人口密度/(人/km ²)	51~100	1.621	5	土壤类型	灰褐土	-1.757	5
高程/m	2855~3200	1.498	6	年累计日照时数/h	2301~2400	-1.695	6
土壤类型	风沙土	1.476	7	年平均气温/℃	1.6~2.5	-1.537	7
坡度/°	>60	1.404	8	人口密度/(人/km ²)	6~10	-1.373	8
土壤类型	草甸土	1.277	9	高程/m	4001~4400	-1.187	9
坡度/°	51~60	0.937	10	土壤类型	沼泽土	-0.999	10
年平均降水量/mm	451~500	0.928	11	年平均气温/℃	0.6~1.5	-0.966	11
土壤类型	泥炭土	0.921	12	年平均降水量/mm	701~753.3	-0.928	12
人口密度/(人/km ²)	26~50	0.916	13	离公路距离/m	1001~1500	-0.915	13
坡度/°	41~50	0.829	14	离河流湖泊距离/m	1001~1500	-0.894	14
年平均降水量/mm	501~550	0.668	15	离河流湖泊距离/m	1501~2000	-0.882	15
离城镇村及工矿用地的距离/m	≤1000	0.640	16	高程/m	3601~4000	-0.822	16
年累计日照时数/h	2501~2600	0.618	17	离公路距离/m	1501~2000	-0.771	17
高程/m	4401~4800	0.594	18	离城镇村及工矿用地的距离/m	1001~2000	-0.748	18
年平均气温/℃	-1.4~-0.5	0.566	19	土壤类型	草原盐土	-0.731	19
坡度/°	31~40	0.552	20	离城镇村及工矿用地的距离/m	4001~5000	-0.664	20

注:所有因子分级类别共有89类,此处排名仅分别选取信息量最高和最低的前20类。

2022年3月

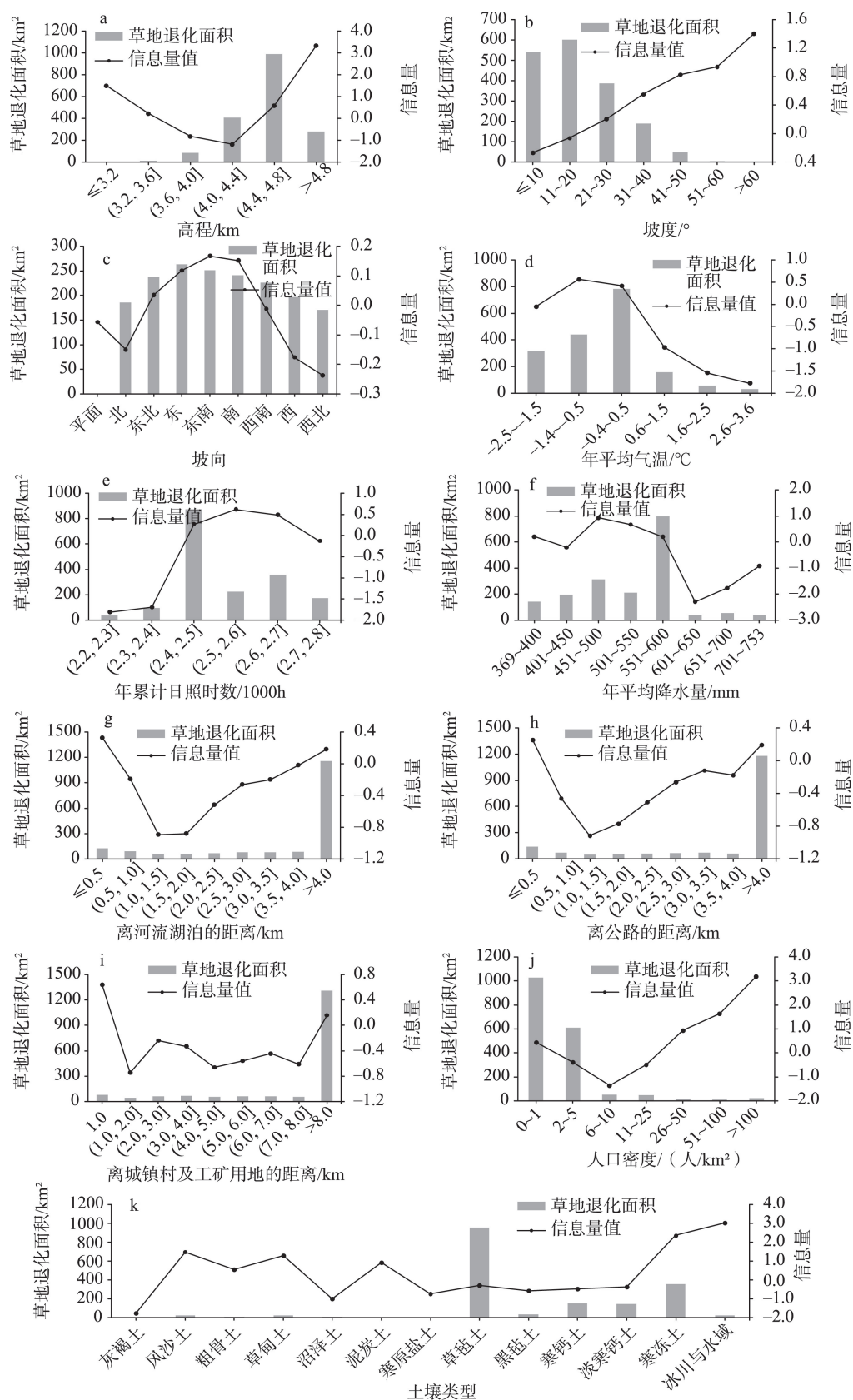


图4 各因子不同分级下草地退化面积及信息量统计图

Figure 4 Grassland degradation area and information quantity value

化更易发生。

在坡向方面(图4c),除了平面(仅0.45 km²)以外的各个方向,草地退化的面积和信息量值差别不大,信息量极差(*R*)仅为0.404,南、东南和东方向更容易发生草地退化。其原因为阳坡太阳辐射较高、土层相对较薄、气温日差较大,进而导致坡面水分蒸发量增大,植被覆盖度减少而发生草地退化。不同于阳坡,阴坡由于露水消退较晚,适宜放牧的时间短,草场利用不充分使得退化较少^[60]。同时,果洛州的地形特征为西、北高,东、南低,西北部高山难以遮挡坡向朝东处所受到的太阳辐射,使得坡向朝东的区域更易发生草地退化。

3.1.2 气象

在气温方面(图4d),86.20%(1533.96 km²)的退化草地分布于年平均气温<0.5℃的区域。年平均气温信息量值随气温升高先增加后降低,在-1.4~-0.5℃达到最大值。而在-2.5~-1.5℃的区域虽然气温较低,但包含扎陵湖、鄂陵湖在内的众多湖泊湿地生态系统,有利于水分的循环与补充,且水的比热容较大,可以起到调节气候的作用,使得周边草地昼夜温差减小,一定程度上减小了草地退化的可能性。随着气温升高,对应的南方区域(如班玛县)与严寒的北部区域相比,其草地发生退化的可能性也更小。

日照时数方面(图4e),年累计日照时数<2400 h时,信息量值偏低,随后信息量在2501~2600 h的范围内达到最大值0.618,再出现下降。原因为日照积累的太阳辐射量越大,水分蒸发量越大,植被根系土壤水分减少,进而易诱发草地退化。而后续信息量回落的原因与气温信息量起初攀升的原因相似,即受到河湖湿地的水循环的作用,弥补了日照蒸发带走的水分。

在降水量方面(图4f),年平均降水量为550~600 mm的地区草地退化面积最大(792.88 km²,占退化总面积的44.65%),当降水量超过600 mm时,信息量值全部为负数,草地退化的面积仅占草地退化总数的7.35%。降水量信息量为“减-增-减-增”波动,但整体上前半段(<550 mm)折线平均水平明显高于后半段,显示了随着降雨量的增多,土壤含水量增加,草地植被根系吸收到的水分相对充足,更有利于草地生长。

3.1.3 人类活动

在公路方面(图4h),在离公路500 m距离内,信息量直接达到峰值(0.253),超过500 m后,信息量为负值并于1000~1500 m达到信息量最低点(-0.915),然后至4000 m信息量有所攀升,但仍然为负,整体上表明离公路越远越不易发生草地退化,其原因在于离公路越远,人类活动干扰越少。直到超过4000 m信息量升至0.190,其深层次原因归结为自然条件变差(人类活动极低区域),草地生长受到抑制。

在与城镇村及工矿用地的距离方面(图4i),信息量值同样在距离其最近的1000 m内达到最大值0.640,然后显著下降并开始波动直到超过8000 m信息量再次升高至0.157,整个1001~8000 m内信息量全部为负值。说明只有最近和最远两个极端情况草地易发生退化,原因和公路因子与草地退化关系相似,近处受人类高频活动侵扰,远处受自然环境制约。

在人口密度方面(图4j),人口密度>5人/km²时,信息量显著上升,并从25人/km²开始信息量为正,超过100人/km²,信息量高达3.176。说明当人口密度超过25人/km²时,人类活动对草地退化作用愈发明显。在人口密度极低的0~5人/km²范围内出现了信息量由正到负的转换,原因在于人口极低区域往往伴随着恶劣环境,同样不利于草地生长。

3.1.4 水文

在河流湖泊方面(图4g),由于河湖对草地退化的影响范围有限,设定离河湖距离最大分级间断阈值为4000 m,超过4000 m的区域归为远离河湖一类。在离河湖距离<500 m时,信息量值相对其他分级较高(0.323),超过500 m立即降为负值,并于1000~2000 m处达到低谷(-0.890左右),之后缓慢上升直到>4000 m,信息量值才攀升至0.180。说明离河湖500 m内,受人类活动、并行公路等因素影响,反而易发生退化,离河湖500~1000 m时,其他干扰因素影响降低,河湖的生态正反馈效应开始彰显,退化易发性减弱。离河湖1500~4000 m,随着离河湖距离变远,河湖的水分对草地退化的抑制效应逐步减少,直至距离超过4000 m,河湖的抑制退化作用消失,由于缺乏水源,草地退化开始变得易发。

3.1.5 土壤

在土壤类型方面(图4k),草毡土与寒冻土内草

地退化面积较多,容易导致草地退化的土类主要有冰川与水域、寒冻土、风沙土,而生长在灰褐土、沼泽土等土壤上的草地不易退化。其原因在于冰川与水域由于常年冰雪覆盖或者河湖淹没,草地植被难以生存,易发生退化,而寒冻土和风沙土由于本身土壤理化性质和营养条件较差,同样不利于草地植被生长发育。反观灰褐土,是气候较凉爽湿润的山地森林灌丛植被下发育的土壤,主要分布于青海省重要林业基地和旅游区,林下草灌茂盛,土壤条件相对其他土类较好。沼泽土富含大量有机质,具有季节性或常年的停滞性积水,多生长湿生植被,不易发生退化。

3.2 草地退化易发性分区与精度评价

根据公式(5)计算各评价单元总信息量值(易

发性指数),参考易发性指数分段方法^[61,62],将易发性指数从大到小的顺序做累计面积统计直方图,并将草地易退化指数分成5个区间:极易退化区(10%)、较易退化区(20%)、中易退化区(20%)、低易退化区(20%)、不易退化区(30%),进而刻画 outcomes 洛州草地退化易发性区域分布。结果显示(表4):2008—2018年,果洛州共有68.34%的退化草地分布于高易发区(极易与较易退化区),高易发区主要集中于玛沁县中部,玛多县南、北部,达日县西部以及甘德县西北部与东南部。15.92%的草地退化发生于中易发区,而在以班玛、久治县为主的低易发区(不易与低易退化区)内,草地退化面积则占总数的15.74%,统计结果表明模型的预警效果良好。

图5a–5e从空间上显示大部分草地退化范围落

表4 果洛州各县草地退化易发性评价情况

Table 4 Assessment of grassland degradation susceptibility in each county

行政区	状态	极易退化区/km ²	较易退化区/km ²	中易退化区/km ²	低易退化区/km ²	不易退化区/km ²	总面积/km ²
玛沁县	评价	1585.13	2378.76	2952.82	2908.20	1458.59	11283.50
		(14.05)	(21.08)	(26.17)	(25.77)	(12.93)	(100.00)
	实际	309.95	162.99	100.69	49.05	18.61	641.29
玛多县	评价	2922.53	5909.68	5331.64	4114.63	1198.49	19476.97
		(15.01)	(30.34)	(27.37)	(21.13)	(6.15)	(100.00)
	实际	278.93	205.62	111.21	62.63	11.50	669.90
甘德县	评价	365.60	839.08	1389.34	2120.08	1845.25	6559.35
		(5.57)	(12.79)	(21.18)	(32.32)	(28.13)	(100.00)
	实际	72.70	57.20	32.01	15.57	7.31	184.79
达日县	评价	1297.68	3104.33	2451.91	2110.83	3874.85	12839.59
		(10.11)	(24.18)	(19.10)	(16.44)	(30.18)	(100.00)
	实际	60.53	48.26	27.67	18.20	17.92	172.58
久治县	评价	21.56	61.29	116.77	530.85	6286.57	7017.03
		(0.31)	(0.87)	(1.66)	(7.57)	(89.59)	(100.00)
	实际	6.89	6.74	7.66	12.62	49.05	82.97
班玛县	评价	10.55	115.11	163.11	635.77	3957.74	4882.29
		(0.22)	(2.36)	(3.34)	(13.02)	(81.06)	(100.00)
	实际	2.32	1.58	3.44	3.78	13.31	24.42
		(9.48)	(6.49)	(14.07)	(15.47)	(54.48)	(100.00)

注:表4中状态类别中,“评价”为各县极易、较易等5类草地退化易发区的面积,“实际”为各县极易、较易等5类易发区内部实际发生草地退化的面积,括号内数值代表该类别面积占县域各类别总面积的百分数/%。

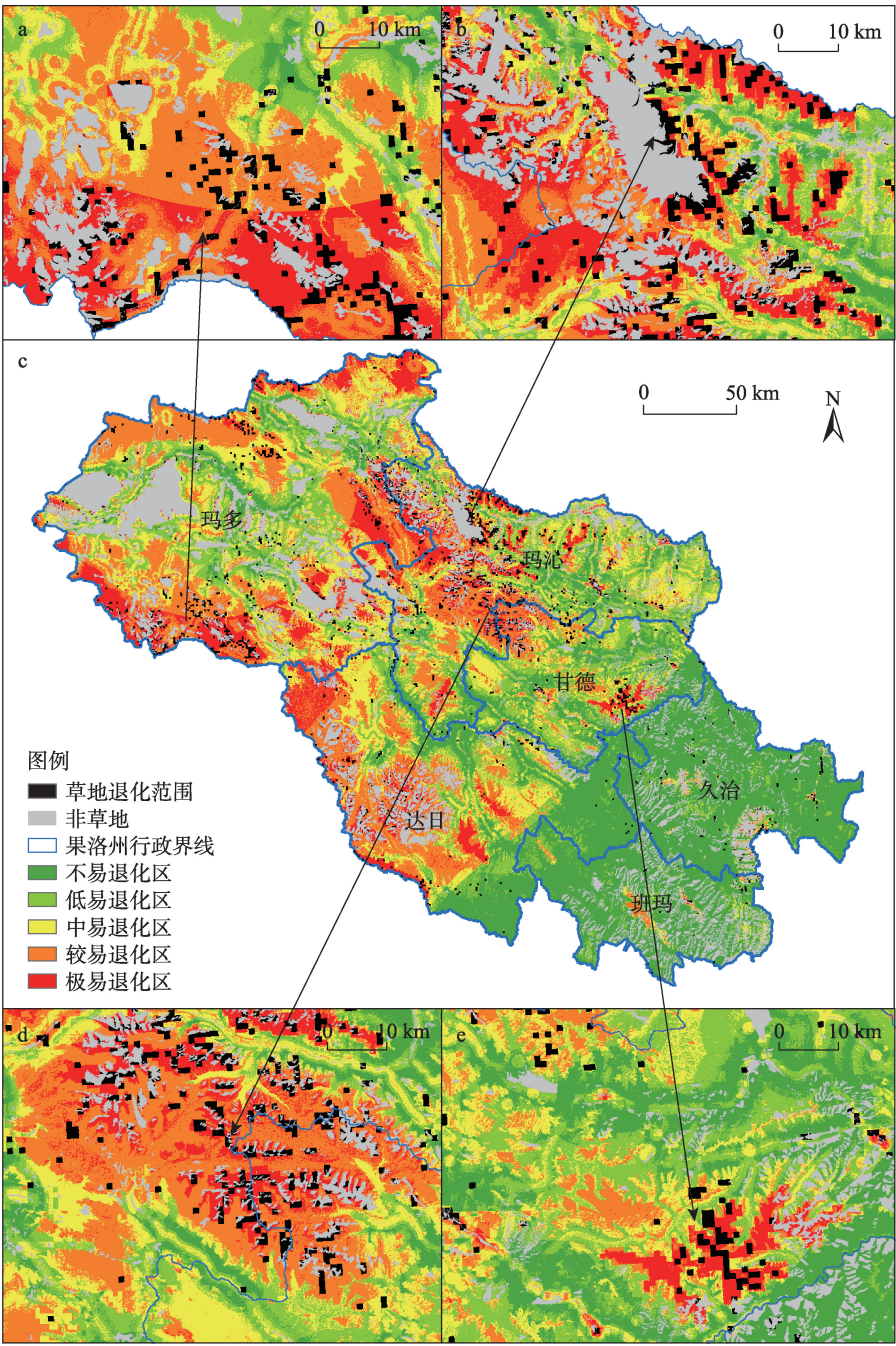


图5 果洛州草地退化范围与易发性分区对比图

Figure 5 Comparison of grassland degradation range and susceptibility assessment zoning

在高易发区内。为验证分区的有效性,通过统计果洛州草地退化的易发性评价和实际情况(表2,表4)可以发现,玛沁、玛多、甘德、达日四县分别有73.75%、72.33%、70.30%、63.04%的实际退化草地落在四县评估的草地退化高易发区内部。虽然久治、班玛县退化面积相对较少,两县高易发区面积仅占

各县总易发性分区面积的1.18%与2.58%,但县域内仍然有16.44%和15.97%的实际退化草地落入两县高易发区中。评价出玛沁、玛多、达日、甘德四县的草地退化高易发区面积占各自县域草地总面积的比值分别为35.13%、45.35%、18.36%及34.29%。四县草地退化总面积达到果洛州草地退化总面积的

2022年3月

93.95%, 县域草地退化风险较高。而班玛、久治两县不易、低易退化区之和均达到 94.08% 以上, 相对不容易发生草地退化。

利用成功率曲线进一步评定模型精度, 结果显示(图 6), 43.42% 的退化草地分布在草地退化易发性评价中总信息量值(易发性)大小为前 10.00% 的区域内部。超过 76.30% 的退化草地分布于草地退化易发性为前 40.00% 的草地区域, 预测评估效果较好。整体上, 对拟合曲线方程求定积分得出曲线下面积(AUC 值)为 0.764。草地退化易发性分区统计以及成功率曲线表明, 果洛州草地退化易发性评价模型预测预警的结果是可靠的。

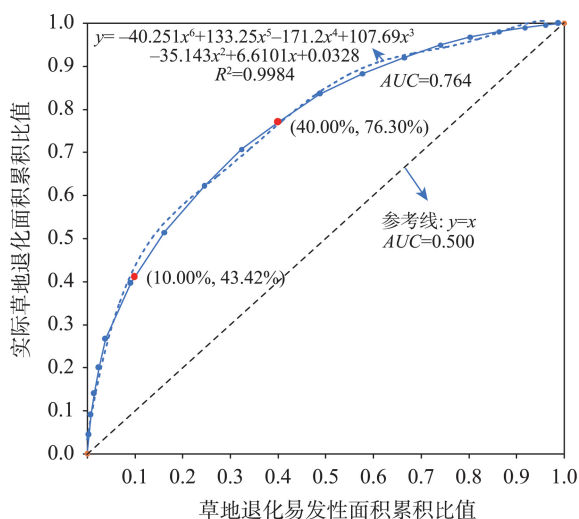


图6 成功率曲线图

Figure 6 Success rate curve

4 结论与讨论

4.1 结论

本文将像元二分模型与信息量模型结合, 构建草地退化易发性评价指标体系, 并进行了退化驱动机理分析与易发性分区, 主要研究结论如下:

(1) 果洛州 2008—2018 年草地退化的面积为 1775.94 km², 占草地总面积的 2.73%, 共有 93.95% 的退化草地分布于玛沁、玛多、达日、甘德四县, 草地退化区与草地退化高风险区分布特点一致, 集中于玛沁县中部、玛多县南部、达日县西部以及甘德县西北部与东南部。

(2) 高程、坡度、人口密度、土壤类型、气候因子是影响果洛州草地退化分布的主要因素, 人类活动

频繁且自然环境恶劣情况下草地易发生退化, 气温、日照适宜、降水量充足且土壤肥沃地区的草地不易发生退化。具体表现为: 处于超过 4400 m 的高程, 高于 25 人/km² 的人口密度, 大于 30° 的坡度, 土壤类型为冰川冻土、风沙土等以及距离城镇村及工矿用地小于 1000 m 等位置的草地易退化。而位于年平均气温超过 0.5℃, 年平均降水量大于 600 mm, 年累计日照时数小于 2400 h, 依附土壤类型为灰褐土、沼泽土等区域的草地具有更好的抗逆性。

(3) 信息量模型应用于草地退化易发性评价的效果良好, 果洛州共有 68.34% 的退化草地分布于极易退化区和较易退化区, 15.92% 分布于中易发区, 15.74% 分布于不易退化区和低易退化区内。在精度验证中, 模型 AUC 值达到 0.764。由此说明, 在像元二分模型、GIS 空间分析等方法支持下, 信息量模型能够客观且较为准确地完成草地退化易发性评价。此方法功能较全面, 在草地退化监测、易发性评价、驱动力分析等方面皆可兼顾, 为草地退化预警提供了新的技术方法。

4.2 结论

本研究的不足之处在于: ①较依赖于遥感指数 NDVI 数据的准确性, 缺少专家知识对土地退化特征的辅助识别^[29], 精度有待提升。②像元二分模型受 NDVI 易饱和以及绿植和裸土 NDVI 参数选择影响, 为草地退化监测带来了不确定性^[14]。③草地退化包含生产力下降、生物多样性降低等方面^[63], 利用 NDVI 以及植被覆盖度减少代表草地退化具有一定的片面性^[29], 但由于草地退化位置的可达性、人员时间、配套资源等实际情况限制, 我们在短期内难以进行实地调研验证。④退化驱动因子的最佳组合以及因子分级梯度的选择较难把握。且各退化驱动因子间相互作用, 量化单因子对草地退化的影响规律性不明显。未来研究可基于更精确的基础数据, 采取置信区间结合土地利用现状图的方式选择更好的绿植和裸土 NDVI 参数, 以去除部分异常值, 减小草地退化监测中的不确定性; 同时, 可将遥感技术与专家经验结合^[29]、丰富草地退化检测指标来对像元二分模型进行进一步矫正。此外, 考虑草地退化的动态变化、筛选配合表现更优秀的因子组合、进行科学的因子赋权和分级、剥离单因子^[48]影

响分析等方式将会使未来草地退化的易发性评价及预测预警研究更加完善。

参考文献(References):

- [1] Eddy I, Gergel S E, Coops N C, et al. Integrating remote sensing and local ecological knowledge to monitor rangeland dynamics[J]. *Ecological Indicators*, 2017, 82(11): 106–116.
- [2] 谢高地, 张钰铨, 鲁春霞, 等. 中国自然草地生态系统服务价值[J]. *自然资源学报*, 2001, 16(1): 47–53. [Xie G D, Zhang Y L, Lu C X, et al. Study on valuation of rangeland ecosystem services of China[J]. *Journal of Natural Resources*, 2001, 16(1): 47–53.]
- [3] 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.]
- [4] 李治国, 王占义, 屈志强, 等. 中国草地等级划分体系回顾与新体系构建[J]. *资源科学*, 2021, 43(11): 2192–2202. [Li Z G, Wang Z Y, Qu Z Q, et al. Review of grassland classification and grading and construction of a new system in China[J]. *Resources Science*, 2021, 43(11): 2192–2202.]
- [5] 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.]
- [6] 刘伟, 周立, 周华坤, 等. 嵩草草甸退化预测模型的初步研究[J]. *草地学报*, 2004, 12(1): 60–65. [Liu W, Zhou L, Zhou H K, et al. A preliminary study on Kobresia meadow degradation forecast model[J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2004, 12(1): 60–65.]
- [7] 李素英, 李晓兵, 王丹丹. 基于马尔柯夫模型的内蒙古锡林浩特典型草原退化格局预测[J]. *生态学杂志*, 2007, 26(1): 78–82. [Li S Y, Li X B, Wang D D. Prediction of grassland degradation in Xilinhaote of Inner Mongolia based on Markov process model[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2007, 26(1): 78–82.]
- [8] Chen Y, Wang W, Guan Y, et al. An integrated approach for risk assessment of rangeland degradation: A case study in Burqin County, Xinjiang, China[J]. *Ecological Indicators*, 2020, DOI: 10.1016/j.ecolind.2020.106203.
- [9] 李学玲, 林慧龙. 江河源区高寒草甸退化序列上“秃斑”连通效应的元胞自动机模拟[J]. *生态学报*, 2012, 32(9): 2670–2680. [Li X L, Lin H L. Cellular automata simulation of barren patch connectivity effect in degradation sequence on alpine meadow in the source region of the Yangtze and Yellow Rivers, Qinghai-Tibetan Plateau, China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32(9): 2670–2680.]
- [10] 毛飞, 张艳红, 侯英雨, 等. 藏北那曲地区草地退化动态评价[J]. *应用生态学报*, 2008, 19(2): 278–284. [Mao F, Zhang Y H, Hou Y Y, et al. Dynamic assessment of grassland degradation in Naqu of Northern Tibet[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2008, 19(2): 278–284.]
- [11] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 天然草地退化、沙化、盐渍化的分级指标(GB 19377-2003)[M]. 北京: 中国标准出版社, 2004. [General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Classification Index of Natural Grassland Degradation, Desertification and Salinization (GB 19377-2003)[M]. Beijing: China Standard Press, 2004.]
- [12] 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.]
- [13] 曹旭娟, 干珠扎布, 胡国铮, 等. 基于NDVI3g数据反演的青藏高原草地退化特征[J]. *中国农业气象*, 2019, 40(2): 86–95. [Cao X J, Ganjurjav H, Hu G Z, et al. Characteristics of grassland degradation in the Qinghai Tibetan Plateau, based on NDVI3g Data[J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2019, 40(2): 86–95.]
- [14] 朱宁, 王浩, 宁晓刚, 等. 草地退化遥感监测研究进展[J]. *测绘科学*, 2021, 46(5): 66–76. [Zhu N, Wang H, Ning X G, et al. Advances in remote sensing monitoring of grassland degradation[J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2021, 46(5): 66–76.]
- [15] Nacun B, Wieland R, Lakes T, et al. Using Shapley additive explanations to interpret extreme gradient boosting predictions of grassland degradation in Xilingol, China[J]. *Geoscientific Model Development*, 2021, 14(3): 1493–1510.
- [16] 阮沈勇, 黄润秋. 基于GIS的信息量法模型在地质灾害危险性区划中的应用[J]. *成都理工学院学报*, 2001, 28(1): 89–92. [Ruan S Y, Huang R Q. Application of GIS-based information model on assessment of geological hazards risk[J]. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 2001, 28(1): 89–92.]
- [17] 王佳佳, 殷坤龙, 肖莉丽. 基于GIS和信息量的滑坡灾害易发性评价: 以三峡库区万州区为例[J]. *岩石力学与工程学报*, 2014, 33(4): 797–808. [Wang J J, Yin K L, Xiao L L. Landslide susceptibility assessment based on GIS and Weighted information value: A case study of Wanzhou district, Three gorges reservoir[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2014, 33(4): 797–808.]
- [18] 蒋树, 王义锋, 刘科, 等. 滑坡灾害空间预测方法研究综述[J]. *人民长江*, 2017, 48(21): 67–73. [Jia S, Wang Y F, Liu K, et al. Review on landslide hazard spatial prediction methods[J]. *Yangtze River*, 2017, 48(21): 67–73.]
- [19] 高克昌, 崔鹏, 赵纯勇, 等. 基于地理信息系统和信息量模型的滑坡危险性评价: 以重庆万州为例[J]. *岩石力学与工程学报*, 2006, 25(5): 991–996. [Gao K C, Cui P, Zhao C Y, et al. Land-

2022年3月

- slide hazard evaluation of Wanzhou based on GIS Information Value method in the Three Gorges reservoir[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(5): 991–996.]
- [20] 朱良峰, 吴信才, 殷坤龙, 等. 基于信息量模型的中国滑坡灾害风险区划研究[J]. 地球科学与环境学报, 2004, 26(3): 52–56. [Zhu L F, Wu X C, Yin K L, et al. Risk zonation of landslide in China based on information content model[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2004, 26(3): 52–56.]
- [21] 丛威青, 潘懋, 李铁锋, 等. 基于GIS的滑坡、泥石流灾害危险性区划关键问题研究[J]. 地学前缘, 2006, 13(1): 185–190. [Cong W Q, Pan M, Li T F, et al. Key research on landslide and debris flow hazard zonation based on GIS[J]. Earth Science Frontiers, 2006, 13(1): 185–190.]
- [22] 吴柏清, 何政伟, 刘严松. 基于GIS的信息量法在九龙县地质灾害危险性评价中的应用[J]. 测绘科学, 2008, 33(4): 146–147. [Wu B Q, He Z W, Liu Y S. Application of GIS-based information method to assessment of geohazards risk in Jiulong County[J]. Science of Surveying and Mapping, 2008, 33(4): 146–147.]
- [23] 王根绪, 程国栋. 江河源区的草地资源特征与草地生态变化[J]. 中国沙漠, 2001, 21(2): 101–107. [Wang G X, Cheng G D. Characteristics of grassland and ecological changes of vegetations in the Source regions of Yangtze and Yellow Rivers[J]. Journal of Desert Research, 2001, 21(2): 101–107.]
- [24] 尹礼唱, 王晓峰, 张琨, 等. 国家屏障区生态系统服务权衡与协同[J]. 地理研究, 2019, 38(9): 2162–2172. [Yin L C, Wang X F, Zhang K, et al. Trade-offs and synergy between ecosystem services in National Barrier Zone[J]. Geographical Research, 2019, 38(9): 2162–2172.]
- [25] 赵成章, 贾亮红. 黄河源区退牧还草工程生态绩效与问题[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2009, 45(1): 37–41. [Zhao C Z, Jia L H. Ecological performance and sustainable problems with the grazing forbidden project in the resource regions of the Yellow River [J]. Journal of Lanzhou University (Natural Sciences), 2009, 45(1): 37–41.]
- [26] 韩艳莉, 陈克龙, 汪诗平. 黄河源区高寒草地植被碳储量研究: 以果洛藏族自治州为例[J]. 国土与自然资源研究, 2010(5): 93–94. [Han Y L, Chen K L, Wang S P. Study on carbon stock of alpine grassland in the Source Regions of the Yellow River: In case of Guoluo Tibetan Autonomous Prefecture in Qinghai Province[J]. Territory & Natural Resources Study, 2010(5): 93–94.]
- [27] 果洛藏族自治州地方志编纂委员会. 果洛年鉴(2019)[M]. 西宁: 青海人民出版社, 2019. [Golog Local Annals Compilation Committee. Golog Almanac (2019)[M]. Xining: Qinghai People's Publishing House, 2019.]
- [28] Runnstrom M C. Rangeland development of the Mu Us sandy land in semiarid China: An analysis using Landsat and NOAA remote sensing data[J]. Land Degradation & Development, 2003, 14(2): 189–202.
- [29] 阿荣, 毕其格, 董振华. 基于MODIS/NDVI的锡林郭勒草原植被变化及其归因[J]. 资源科学, 2019, 41(7): 1374–1386. [A R, Bi Q G, Dong Z H. Change of grassland vegetation and driving factors based on MODIS / NDVI in Xilingol, China[J]. Resources Science, 2019, 41(7): 1374–1386.]
- [30] 吴喜芳, 李改欣, 潘学鹏, 等. 黄河源区植被覆盖度对气温和降水的响应研究[J]. 资源科学, 2015, 37(3): 512–521. [Wu X F, Li G X, Pan X P, et al. Response of vegetation cover to temperature and precipitation in the source region of the Yellow River[J]. Resources Science, 2015, 37(3): 512–521.]
- [31] 朱长明, 李均力, 沈占锋, 等. 基于MODIS密集时间序列数据的塔里木河下游植被活动过程监测[J]. 资源科学, 2019, 41(3): 591–600. [Zhu C M, Li J L, Shen Z F, et al. Spatiotemporal dynamics of vegetation activities in the lower reach of the Tarim River based on MODIS intensive time series data[J]. Resources Science, 2019, 41(3): 591–600.]
- [32] 周伟, 刚成诚, 李建龙, 等. 1982–2010年中国草地覆盖度的时空动态及其对气候变化的响应[J]. 地理学报, 2014, 69(1): 15–30. [Zhou W, Gang C C, Li J L, et al. Spatial-temporal dynamics of grassland coverage and its response to climate change in China during 1982–2010[J]. Acta Geographica Sinica, 2014, 69(1): 15–30.]
- [33] 张志强, 刘欢, 左其亭, 等. 2000–2019年黄河流域植被覆盖度时空变化[J]. 资源科学, 2021, 43(4): 849–858. [Zhang Z Q, Liu H, Zuo Q T, et al. Spatiotemporal change of fractional vegetation cover in the Yellow River Basin during 2000–2019[J]. Resources Science, 2021, 43(4): 849–858.]
- [34] Rundquist B C. The influence of canopy green vegetation fraction on spectral measurements over native tallgrass prairie[J]. Remote Sensing of Environment, 2002, 81(1): 129–135.
- [35] 李苗苗, 吴炳方, 颜长珍, 等. 密云水库上游植被覆盖度的遥感估算[J]. 资源科学, 2004, 26(4): 153–159. [Li M M, Wu B F, Yan C Z, et al. Estimation of vegetation fraction in the upper basin of Miyun reservoir by Remote Sensing[J]. Resources Science, 2004, 26(4): 153–159.]
- [36] 马梅, 张圣微, 魏宝成. 锡林郭勒草原近30年草地退化的变化特征及其驱动因素分析[J]. 中国草地学报, 2017, 39(4): 86–93. [Ma M, Zhang S W, Wei B C. Temporal and spatial pattern of grassland degradation and its determinants for recent 30 years in Xilingol[J]. Chinese Journal of Grassland, 2017, 39(4): 86–93.]
- [37] 闫玉春, 唐海萍. 草地退化相关概念辨析[J]. 草业学报, 2008, 17(1): 93–99. [Yan Y C, Tang H P. Differentiation of related concepts of grassland degradation[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2008, 17(1): 93–99.]
- [38] 王志旺, 李端有, 王湘桂. 区域滑坡空间预测方法研究综述[J]. 长江科学院院报, 2012, 29(5): 78–85. [Wang Z W, Li D Y, Wang X G. Review of researches on regional landslide susceptibility mapping model[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2012, 29(5): 78–85.]
- [39] 殷坤龙, 晏同珍. 滑坡预测及相关模型[J]. 岩石力学与工程学报, 1996, 15(1): 1–8. [Yin K L, Yan T Z. Landslide prediction and

- relevant models[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1996, 15(1): 1-8.]
- [40] 宁娜, 马金珠, 张鹏, 等. 基于GIS和信息量法的甘肃南部白龙江流域泥石流灾害危险性评价[J]. 资源科学, 2013, 35(4): 892-899. [Ning N, Ma J Z, Zhang P, et al. Debris flow hazard assessment for the Bailongjiang River, Southern Gansu[J]. Resources Science, 2013, 35(4): 892-899.]
- [41] 邓辉, 何政伟, 陈晔, 等. 信息量模型在山地环境地质灾害危险性评价中的应用: 以四川泸定县为例[J]. 自然灾害学报, 2014, 23(2): 67-76. [Deng H, He Z W, Chen Y, et al. Application of information quantity model to hazard evaluation of geological disaster in mountainous region environment: A case study of Luding County, Sichuan Province[J]. Journal of Natural Disasters, 2014, 23(2): 67-76.]
- [42] Fawcett T. An introduction to ROC analysis[J]. Pattern Recognition Letters, 2006, 27(8): 861-874.
- [43] Lee S, Pradhan B. Landslide hazard mapping at Selangor, Malaysia using frequency ratio and logistic regression models[J]. Landslides, 2007, 4(1): 33-41.
- [44] 解明礼, 巨能攀, 赵建军, 等. 区域地质灾害易发性分级方法对比分析研究[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2021, 46(7): 1003-1014. [Xie M L, Ju N P, Zhao J J, et al. Comparative analysis on classification methods of geological disaster susceptibility assessment[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2021, 46(7): 1003-1014.]
- [45] Evans J, Geerken R. Discrimination between climate and human-induced dryland degradation[J]. Journal of Arid Environments, 2004, 57(4): 535-554.
- [46] Polley W H, Briske D D, Morgan A J, et al. Climate change and North American rangelands: Trends, projections, and implications [J]. Rangeland Ecology & Management, 2013, 66(5): 493-511.
- [47] Zhao X W, Gao Q, Yue Y J, et al. A system analysis on steppe sustainability and its driving forces: A case study in China[J]. Sustainability, 2018, 10(1): 233-233.
- [48] Zhuge W Y, Yue Y J, Shang Y R. Spatial-temporal pattern of human-induced land degradation in northern China in the past 3 decades-RESTREND approach[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2019, DOI: 10.3390/ijerph16132258.
- [49] 张懿铨, 刘林山, 摆万奇, 等. 黄河源地区草地退化空间特征[J]. 地理学报, 2006, 61(1): 3-14. [Zhang Y L, Liu L S, Bai W Q, et al. Grassland degradation in the source region of the Yellow River [J]. Acta Geographica Sinica, 2006, 61(1): 3-14.]
- [50] 杜悦悦, 彭建, 赵士权, 等. 西南山地滑坡灾害生态风险评价: 以大理白族自治州为例[J]. 地理学报, 2016, 71(9): 1544-1561. [Du Y Y, Peng J, Zhao S Q, et al. Ecological risk assessment of landslide disasters in mountainous areas of Southwest China: A case study in Dali Bai Autonomous Prefecture[J]. Acta Geographica Sinica, 2016, 71(9): 1544-1561.]
- [51] 葛美玲, 封志明. 中国人口分布的密度分级与重心曲线特征分析[J]. 地理学报, 2009, 64(2): 202-210. [Ge M L, Feng Z M. Population distribution of China based on GIS: Classification of population densities and curve of population gravity centers[J]. Acta Geographica Sinica, 2009, 64(2): 202-210.]
- [52] 陈斌, 李海东, 曹学章, 等. 基于SPOT-VGT NDVI的雅鲁藏布江流域植被动态变化[J]. 山地学报, 2016, 34(2): 249-256. [Chen B, Li H D, Cao X Z, et al. Dynamic changes in vegetation coverage in the Yarlung Zangbo River Basin based on SPOT-VGT NDVI[J]. Mountain Research, 2016, 34(2): 249-256.]
- [53] 李国荣, 李希来, 陈文婷, 等. 黄河源区退化草地水土流失规律[J]. 水土保持学报, 2017, 31(5): 51-55. [Li G R, Li X L, Chen W T, et al. Experimental study on soil erosion rule of degraded grassland in Source area of Yellow River[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2017, 31(5): 51-55.]
- [54] 邵景安, 芦清水, 张小咏. 近30年青海三江源西部干旱区草地退化特征的遥感分析[J]. 自然资源学报, 2008, 23(4): 643-656. [Shao J A, Lu Q S, Zhang X Y. Remote sensing-based characteristics of grassland degradation in the arid western Three-River Sources regions of Qinghai in the past 30 years[J]. Journal of Natural Resources, 2008, 23(4): 643-656.]
- [55] Piao S L, Mohammad A, Fang J Y, et al. NDVI-based increase in growth of temperate grasslands and its responses to climate changes in China[J]. Global Environmental Change, 2006, 16(4): 340-348.
- [56] Gao Q Z, Wan Y F, Xu H M, et al. Alpine grassland degradation index and its response to recent climate variability in Northern Tibet, China[J]. Quaternary International, 2010, 226(1): 143-150.
- [57] 陈琼, 张懿铨, 刘峰贵, 等. 黄河流域河源区土地利用变化及其影响研究综述[J]. 资源科学, 2020, 42(3): 446-459. [Chen Q, Zhang Y L, Liu F G, et al. A review of land use change and its influence in the source region of the Yellow River[J]. Resources Science, 2020, 42(3): 446-459.]
- [58] 余建英, 何旭宏. 数据统计分析与SPSS应用[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2003. [Yu J Y, He X H. Data Statistical Analysis and Application of SPSS[M]. Beijing: Posts and Telecom Press, 2003.]
- [59] 凌子燕, 刘锐. 基于主成分分析的广东省区域水资源紧缺风险评估[J]. 资源科学, 2010, 32(12): 2324-2328. [Ling Z Y, Liu R. Risk assessment on regional water scarcity in Guangdong Province based on principal component analysis[J]. Resources Science, 2010, 32(12): 2324-2328.]
- [60] 杨凯, 高清竹, 李玉娥, 等. 藏北地区草地退化空间特征及其趋势分析[J]. 地球科学进展, 2007, 22(4): 410-416. [Yang K, Gao Q Z, Li Y E, et al. Spatial distribution of grassland degradation and trend in northern Tibet[J]. Advances in Earth Science, 2007, 22(4): 410-416.]
- [61] Biswajeet P, Saro L, Manfred F B. A GIS-based back-propagation neural network model and its cross-application and validation for landslide susceptibility analyses[J]. Computers, Environment and Urban Systems, 2010, 34(3): 216-235.

- [62] Pradhan B. A comparative study on the predictive ability of the decision tree, support vector machine and neuro-fuzzy models in landslide susceptibility mapping using GIS[J]. Computers & Geosciences, 2012, 51(2): 350–365.
- [63] 李博. 中国北方草地退化及其防治对策[J]. 中国农业科学, 1997, (6): 2–10. [Li B. The rangeland degradation in North China and its preventive strategy[J]. Scientia Agricultura Sinica, 1997, (6): 2–10.]

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

ZHANG Zhong¹, GONG Jian^{1,2}, LI Jingye¹, ZHANG Ziyu³, ZHANG Muqian¹

(1. School of Public Administration, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China;

2. Key Laboratory of Rule of Law Research, Ministry of Natural Resources, Wuhan 430074, China;

3. School of Transportation, Southeast University, Nanjing 211189, China)

Abstract: Early warning of grassland degradation is of great significance for maintaining the stability of grassland ecosystem and for ensuring the property security of herding households. This study explored and validated the feasibility of applying the information quantity model to assess grassland degradation susceptibility, which can provide some guidance for grassland degradation management. Taking Golog Tibetan Autonomous Prefecture in the eastern area of the Three Rivers Source region as the study area, this research coupled the dimidiate pixel model and the information quantity model to assess the grassland degradation susceptibility by taking into consideration topography, climate, human activities, hydrology, and soil types. The results show that: (1) The identified distribution characteristics of grassland degradation are consistent with the grassland degradation high-risk areas in the prefecture, mainly concentrated in the central part of Maqin County and the south and north of Maduo County. (2) Locations such as those with elevation higher than 4400 m, population density above 25 people/km², or slope greater than 30° can easily be susceptible to grassland degradation. In contrast, grasslands with average annual precipitation more than 600 mm, annual cumulative sunshine hours less than 2400 h, or soil types such as grey cinnamon soil and boggy soil have higher resilience. (3) A total of 68.34% of the degraded grasslands are distributed in areas extremely or highly prone to degradation, 15.92% are in areas moderately prone to degradation, and 15.74% are in areas unlikely or not prone to degradation and the area under the curve (*AUC*) value of the evaluation is 0.764. Therefore, it is reliable to combine the dimidiate pixel model with the information quantity model to evaluate grassland degradation susceptibility, and the method has reference values for the assessment of grassland degradation susceptibility in other areas.

Key words: grassland degradation; susceptibility assessment; information quantity model; dimidiate pixel model; Golog Tibetan Autonomous Prefecture; eastern area of the Three Rivers Source region