

内蒙古西乌珠穆沁旗退化草原生态经济损失 空间分异规律及驱动因子

猛克

(加州大学 圣地亚哥分校, 美国 加利福尼亚 92122)

摘要: [目的] 研究内蒙古西乌珠穆沁旗退化草原生态经济损失的空间分异规律, 识别主要驱动因子, 为草原生态保护与恢复决策提供科学依据。[方法] 以西乌珠穆沁旗为研究区, 基于 2021—2023 年草原监测资料、Landsat 8 OLI 和 Sentinel-2 遥感影像, 采用“遥感识别+地面验证”技术路线识别不同退化等级草原空间分布, 构建包含产能损失和生态服务功能损失的经济损失评估模型, 运用主成分分析和空间自相关分析等方法, 系统测算草地退化经济损失规模及其空间异质性。[结果] 截至 2023 年, 西乌珠穆沁旗草原退化面积达 $8.28 \times 10^5 \text{ hm}^2$, 其中轻度退化 $4.28 \times 10^5 \text{ hm}^2$ (28.3%)、中度退化 $2.66 \times 10^5 \text{ hm}^2$ (17.6%)、重度退化 $1.34 \times 10^5 \text{ hm}^2$ (8.8%), 尚未突破不可逆退化临界点。草原退化造成的生态经济损失总额达 2.62×10^9 元, 其中, 生态系统服务功能损失 1.50×10^9 元, 牧草减产直接经济损失 1.12×10^9 元。重度退化草原单位面积损失最高 (6 433 元/ hm^2), 中度退化区对总损失贡献最大 (40.4%)。主成分分析表明, 单位产草量、退化面积和市场价格是主导驱动因子, 累计贡献率达 89.6%。经济损失呈显著空间集聚特征 (Moran's $I=0.426$), 高损失区主要分布在人类活动强度较高的东北部、中西部和南部地区。[结论] 西乌珠穆沁旗草原退化呈现明显的空间分异特征, 中度退化草原是经济损失的主要贡献源, 人类活动强度是主导驱动因子。应采取差异化的保护与治理策略, 优化区域生态治理体系, 实现草原生态系统可持续管理。

关键词: 内蒙古西乌珠穆沁旗; 草原退化; 经济损失; 生态系统服务; 生态经济

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2025)06-0419-10

中图分类号: F062.2

文献参数: 猛克. 内蒙古西乌珠穆沁旗退化草原生态经济损失空间分异规律及驱动因子[J]. 水土保持通报, 2025, 45(6): 419-428. Meng Ke. Spatial differentiation patterns and driving factors of ecological and economic loss in degraded grassland of West Ujimqin Banner, Inner Mongolia [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2025, 45(6): 419-428.

DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2025.06.039

CSTR: 32312.14.stbctb.2025.06.039

Spatial differentiation patterns and driving factors of ecological and economic loss in degraded grassland of West Ujimqin Banner, Inner Mongolia

Meng Ke

(University of California San Diego, San Diego, California 92122, USA)

Abstract: [Objective] The spatial differentiation patterns of ecological and economic losses in degraded grasslands of West Ujimqin Banner, Inner Mongolia Autonomous Region were studied and identify the primary driving factors were identified, in order to provide a scientific basis for decision-making in grassland ecological protection and restoration. [Methods] Taking West Ujimqin Banner as the study area, and based on grassland monitoring data from 2021 to 2023, Landsat 8 OLI, and Sentinel-2 remote sensing images, this study employed a “remote sensing identification + ground verification” technical approach to identify the spatial distribution of grasslands under different degradation levels. An economic loss assessment model incorporating productivity loss and ecosystem service function loss was constructed. Subsequently, methods including principal component analysis and spatial autocorrelation analysis were employed to systematically calculate the scale of economic loss

收稿日期: 2025-08-05

修回日期: 2025-10-25

采用日期: 2025-10-25

资助项目: 国家重点研发计划青年科学家项目“鄂尔多斯盆地植被恢复适应机制与调控技术”(2022YFC3205200-03); 内蒙古自治区科技计划“乌珠穆沁沙地生态脆弱区植被恢复与重建技术研究”(2020GG0077)

第一作者: 猛克(1997—), 男(蒙古族), 内蒙古包头市人, 硕士研究生, 研究方向为生态经济学及会计。Email: kemeng0928@163.com。

caused by grassland degradation and its spatial heterogeneity. [Results] As of 2023, the degraded grassland area in West Ujimqin Banner reached $8.28 \times 10^5 \text{ hm}^2$, including lightly degraded grassland of $4.28 \times 10^5 \text{ hm}^2$ (28.3%), moderately degraded grassland of $2.66 \times 10^5 \text{ hm}^2$ (17.6%), and severely degraded grassland of $1.34 \times 10^5 \text{ hm}^2$ (8.8%), which had not exceeded the critical threshold of irreversible degradation. The total ecological and economic loss caused by grassland degradation reached 2.62×10^9 yuan, including ecosystem service function loss of 1.50×10^9 yuan and direct loss from forage yield reduction of 1.12×10^9 yuan. The loss per unit area was highest in severely degraded grasslands (6,433 yuan/ hm^2), while moderately degraded areas contributed the most to the total loss (40.4%). Principal component analysis revealed that forage yield per unit area, degradation area, and market prices were the dominant driving factors, with a cumulative contribution rate of 89.6%. Economic loss exhibited significant spatial clustering characteristics (Moran's $I=0.426$), with high-loss areas mainly distributed in the northeastern, central-western, and southern regions characterized by high intensity of human activities. [Conclusion] Grassland degradation in West Ujimqin Banner exhibits distinct spatial differentiation characteristics. Moderately degraded grasslands are the primary contributors to economic loss, and human activity intensity is the dominant driving factor. Differentiated protection and governance strategies should be adopted to optimize the regional ecological governance system and achieve sustainable management of grassland ecosystems.

Keywords: West Ujimqin Banner, Inner Mongolia Autonomous Region; grassland degradation; economic loss; ecosystem services; ecological economy

内蒙古自治区锡林郭勒盟东部西乌珠穆沁旗地处中蒙边境线,是中国北方重要的生态安全屏障^[1]。该地区总面积22 434.5 km^2 ,草原面积达22 132 km^2 ,拥有典型的温带草甸草原生态系统,在调节区域气候、防风固沙、水源涵养等方面发挥着不可替代的生态功能^[2],同时可提升中蒙边界脆弱生态系统的生态服务功能,减缓周边地区沙漠化的扩展,增强区域脆弱环境的稳定性,对保障京津冀地区,甚至中国“三北”地区的生态安全具有重要战略意义。近年来,受气候变化和人类活动双重影响,西乌珠穆沁草原退化现象严重。超载放牧、不合理利用、采矿活动等因素导致草原植被覆盖度下降,土壤风蚀加剧,生物多样性减少。该地区草原退化面积已达40%以上,严重影响了区域生态安全和牧民生计,亟需用科学的评估方法来量化退化造成的经济损失。

草原生态服务功能主要包括气候调节、水源涵养、土壤保持、生物多样性维持、碳储存及畜牧业生产等。在国外,Schirpke等^[3]基于植物性状量化了6种草地生态系统服务;Quétier等^[4]通过植物数量性状模型证明草地生态系统服务对变化敏感;Manlike等^[5]评估了土拨鼠对草原生态系统服务的影响。国内学者借鉴国外经验开展了相关研究。谢高地等^[6]采用当量因子法建立了中国陆地生态系统服务价值评估体系,赵同谦等^[7]运用物质质量评估法对草地生态系统服务功能进行量化,两种方法在评估精度和适用范围方面各有特点。针对特定区域,白永飞等^[8]评估了中国北方草原生态系统服务,提出了生态安全建议;童李霞等^[9]发现三江源草地生态系统服务价值

高达1 572~1 762亿元。内蒙古草原作为重要畜牧业基地受到广泛关注,穆松林等^[10]估算其年服务价值达1.6万亿元;王爱玲等^[11]利用遥感数据评估6项服务价值为6 273.3亿元。放牧影响方面,王舒新等^[12]评估了不同放牧强度下短花针茅荒漠草原的总生态系统服务价值;Fan Jiangwei等^[13]评估了放牧对多种生态系统服务的影响。然而,由于过度放牧、开垦及气候变化等因素影响,全球约25%的草原出现退化,导致其生态服务能力下降。综上所述,国内外学者对草地生态系统服务价值开展了多角度研究,但现有研究在草原退化经济损失的空间分异规律和多因子驱动机制方面仍有待深入,针对特定区域退化损失空间异质性的定量分析和综合驱动因子识别研究相对不足,特别是在自然-社会-经济多维驱动因子协同作用机制方面,缺乏系统性的实证研究。

基于此,本研究以西乌珠穆沁退化草原为对象,采用包含产能损失和生态服务功能损失的经济损失测算模型,分析其生态经济损失的空间分异规律及驱动因子,定量评估不同退化等级草原的经济损失规模,通过量化退化草原的经济损失并揭示其空间异质性,可弥补现有研究在草原退化经济损失精细化评估方面的不足。本研究通过构建产能损失与生态服务功能损失相结合的综合评估模型,弥补了传统研究仅考虑单一维度损失的不足;同时,采用“遥感识别+地面验证”的技术路线,提高了草原退化等级识别的精度和可靠性,揭示经济损失的空间分异规律,识别“自然-市场-生态”多维驱动机制,为差异化的草原保护策略和生态补偿标准制定提供科学依据。

1 材料与方 法

1.1 研究区概况

研究区(图1)位于内蒙古中部锡林郭勒东部的西乌珠穆沁旗(43°57′—45°23′N, 116°21′—119°31′E), 海拔835~1 957 m。该区属温带干旱半干旱大陆性气候, 夏季温热, 冬季寒冷且漫长。年平均气温1.2℃, 年降水量345.0 mm, 主要集中于6—8月, 日照时长2 893.9 h。草原主要包括山地草甸草原、河泛地湖盆低地草甸草原、低山丘陵草甸草原、沙丘沙地草原和波状高平原草甸草原。主要土壤类型有黑土、栗钙土和暗钙土。优势物种包括羊草(*Leymus chinensis*)、西北针茅(*Stipa sareptana* var. *krylovii*)、短花针茅(*Stipa breviflora*)、糙隐子草(*Cleistogenes squarrosa*), 并伴有冰草(*Agropyron cristatum*)、冷蒿(*Artemisia frigida*)、二裂委陵菜(*Potentilla bifurca*)、银灰旋花(*Convolvulus ammannii*)等。研究区草地总面积 1.51×10^6 hm², 其中可利用草地面积 1.43×10^6 hm²。2023年全旗总人口8.6万人, 其中牧业人口6.2万人, 占72.1%。产业结构以畜牧业为主导, 畜牧业产值占农牧业总产值的85.3%。主要养殖牲畜有羊(8.56×10^5 只, 以乌珠穆沁羊为主)、牛(3.20×10^4 头, 主要为西门塔尔牛和当地黄牛)、马(1.80×10^4 匹)。2023年末牲畜存栏总量折合标准羊单位约 9.54×10^5 羊单位, 平均载畜量6.7羊单位/hm²。

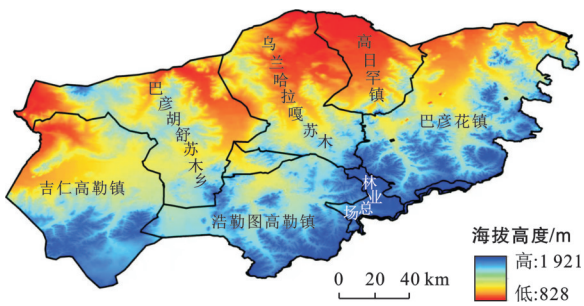


图1 内蒙古西乌珠穆沁旗概况

Fig.1 Overview of West Ujimqin Banner of Inner Mongolia

1.2 数据来源与处理

1.2.1 数据来源

(1) 草原资源调查数据。数据来源于2021—2023年西乌珠穆沁旗草原监测资料。虽然时间序列相对较短, 但通过与历史调查数据对比验证, 研究期内的退化空间格局与长期趋势基本一致, 并获取不同退化等级草原的面积和产草量数据。

(2) 遥感数据。采用 Landsat 8 OLI 影像和 Sentinel-2 影像, 时间跨度为2021—2023年, 空间分辨率为30 m, 通过NDVI时间序列分析识别退化区域。

(3) 统计数据。来源于西乌珠穆沁旗统计年鉴和农牧部门调查数据。本研究中用于划分放牧强度的载畜量数据, 其计算与核定依据国家标准《天然草原合理载畜量的计算》(GB/T 29384—2012)。

(4) 市场价格数据。通过实地调研获取当年草料市场价格信息。

1.2.2 退化草原遥感识别与地面验证

采用“遥感识别+地面验证”的技术路线获取退化草原空间分布。首先, 基于多年NDVI时间序列数据, 计算植被覆盖度年际变化趋势, 初步识别疑似退化区域; 其次, 结合2021—2023年地面调查数据, 建立遥感指标与地面退化等级的定量关系, 构建退化等级遥感识别模型; 最后, 通过野外实地验证修正遥感分类结果, 确保分类精度达到85%以上。

基于 Landsat 8 OLI 和 Sentinel-2 影像, 采用像元二分模型计算植被覆盖度, 公式为

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

式中: FVC 为植被覆盖度; $NDVI_{soil}$ 为裸土 NDVI 值(取 0.05); $NDVI_{veg}$ 为完全植被覆盖的 NDVI 值(取 0.70)。

结合表1所示的地面调查标准, 建立植被覆盖度与退化等级的对应关系。未退化: $FVC \geq 0.75$; 轻度退化: $0.60 \leq FVC < 0.75$; 中度退化: $0.45 \leq FVC < 0.60$; 重度退化: $FVC < 0.45$ 。

通过315个地面调查样点验证, 遥感分类总体精度为87.3%, kappa系数为0.83, 满足研究精度要求。各退化等级的生产者精度分别为: 未退化91.2%, 轻度退化85.7%, 中度退化86.1%, 重度退化84.6%。用户精度分别为: 未退化89.5%, 轻度退化83.2%, 中度退化84.8%, 重度退化82.1%。

基于遥感解译和地面调查相结合的方法, 以采样点形式展示不同退化等级草原的空间分布特征。每个采样点代表周边 $3 \text{ km} \times 3 \text{ km}$ 网格范围内的主导退化类型, 共布设采样点315个, 采样密度为1.4个/100 km²。点状符号采用不同颜色和形状区分退化等级(图2)。样本密度1.4个/100 km²的设置基于以下考虑: ①根据 Cochran 抽样理论, 在95%置信度和5%误差范围内, 最小样本量为315个; ②基于研究区地貌类型和退化等级的空间异质性, 采用分层随机抽样, 确保各类型区域均有足够样本; ③考虑野外调查的时间成本和交通条件, 样本点间距约8 km, 便于实地验证; ④该密度符合《草原资源调查技术规程》(NY/T 635—2015)中大尺度草原调查的样本密度要求。

1.3 草原退化等级划分

依据《天然草地退化、沙化、盐渍化的分级指标》(GB 19377—2003)和实地调查结果,将草原退化程度划分为4个等级(表1)。

1.4 草原退化等级面积及经济损失测算方法

草原退化造成的生态经济损失是指草原生态系统功能退化导致的直接经济价值损失和间接生态服务价值损失的总和。

草地产能损失测算主要为草地生产功能(如牧草产量、载畜能力)的经济损失,属于直接使用价值;而生态系统服务功能损失测算涵盖调节、支持、文化等综合服务价值。

产能损失是生态服务功能损失的组成部分,草地退化既降低直接生产价值,也削弱间接生态服务能力。全面评估草地退化影响需两者结合,以揭示经济与生态系统的整体损失。

表1 草地利用程度及植被现状划分标准

Table 1 Classification criteria for grassland utilization intensity and vegetation status

退化程度	植被盖度/%	草群高度/cm	生物量/(g·m ⁻²)	植被特征	土壤特征
未退化	≥75	≥25	≥240	群落结构完整,优势种为禾草类	土壤结构完整
轻度退化	60~75	15~25	180~240	群落结构轻微变化	土壤有轻微侵蚀
中度退化	45~60	10~15	120~180	杂类草比例增加	土壤侵蚀明显
重度退化	<45	小于10	<120	—	土壤侵蚀严重,出现大面积裸地或沙斑

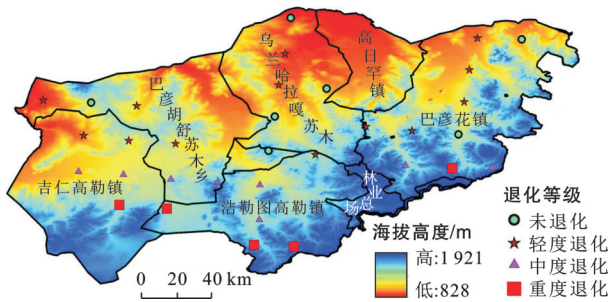


图2 西乌珠穆沁旗草原退化等级采样点分布

Fig.2 Distribution of sampling points for grassland degradation levels in West Ujimqin Banner

1.4.1 草原退化等级面积测算

草原退化等级面积计算公式^[4]为

$$A_i = A_{\text{total}} \times P_i \quad (2)$$

式中: A_i 为第*i*类退化等级草地面积(hm²); A_{total} 为草原总面积(hm²); P_i 为该退化等级草地比例。

1.4.2 草地产能损失测算

草地产能损失采用替代成本法计算^[4],公式为

$$L_p = \sum_{i=1}^n A_i \times (Y_0 - Y_i) \times P \quad (3)$$

式中: L_p 为草地产能损失总量(元); A_i 为第*i*级退化草地面积(hm²); Y_0 为未退化草地单位面积产草量(kg/hm²); Y_i 为第*i*级退化草地单位面积产草量(kg/hm²); P 为草料市场均价(元/kg)。

畜牧业损失计算公式为

$$E_{\text{livestock}} = \Delta L \times V_{\text{animal}} \quad (4)$$

式中: ΔL 为因草场退化减少的牲畜承载量(羊单位/年); V_{animal} 为每羊单位的经济价值(元/羊单位)。

1.4.3 生态系统服务功能损失测算

参考谢高地等^[6]的生态系统服务价值评估方法,

计算草原生态系统服务功能损失,计算公式为

$$L_e = \sum_{i=1}^n A_i \times \sum_{j=1}^m V_j \times D_i \quad (5)$$

式中: L_e 为生态服务功能损失总量(元); V_j 为第*j*种生态服务功能的单位价值(元/hm²); D_i 为第*i*级退化草地的功能损失比例; A_i 为第*i*级退化草地面积(hm²); n 为退化等级总数(本研究 $n=3$,分别为轻度、中度、重度退化); m 为生态服务功能类型总数(本研究 $m=4$,包括固碳释氧、水源涵养、土壤保持、生物多样性维持)。

1.4.4 经济损失密度(E_c)计算

计算公式为

$$E_c = (L_p + L_e + E_{\text{livestock}}) / A_{\text{total}} \quad (6)$$

式中: E_c 为经济损失密度(元/km²); L_p 为草地产能损失总量(元); L_e 为生态系统服务功能损失总量(元); $E_{\text{livestock}}$ 为畜牧业损失(元); A_{total} 为退化草原总面积(hm²)。

1.4.5 Moran's I 计算

Moran's I 用于识别局部空间聚集或异常点,计算公式为

$$I_i = \frac{(X_i - \bar{X})}{S^2} \sum_{j=1}^n w_{ij} (X_j - \bar{X}) \quad (7)$$

$$S^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2$$

式中: n 为空间单元总数(如栅格、行政区等); X_i 和 X_j 分别为单元*i*和*j*的观测值(如草原退化密度、GDP等); \bar{X} 为所有单元观测值的均值; w_{ij} 为空间权重矩阵(定义单元*i*和*j*的空间关系)。

1.5 统计分析

采用SPSS 26.0进行数据统计分析;运用主成分

分析(PCA)识别影响经济损失的主导因子;利用ArcGIS 10.8进行空间分析;运用Moran's *I*指数分析经济损失的空间自相关性;采用热点分析(Getis-Ord G_i^*)识别经济损失的空间集聚区。

2 结果与分析

2.1 草原退化现状与空间分布

西乌珠穆沁旗草原退化面积达 $8.28 \times 10^5 \text{ hm}^2$, 占总草原面积的 54.7%。其中,轻度退化草原面积最大(表 2),为 $4.28 \times 10^5 \text{ hm}^2$ (28.3%);中度退化草原 $2.66 \times 10^5 \text{ hm}^2$ (17.6%);重度退化草原 $1.34 \times 10^5 \text{ hm}^2$ (8.8%);未退化草原 $6.85 \times 10^5 \text{ hm}^2$ (45.3%)。西乌珠穆沁旗草原退化呈现明显的结构性特征,轻度退化草原面积最大,占退化草原总面积的 51.7%,表明多数退化草原仍处于可逆转的初期阶段;中度和重度退化草原合计 $4.00 \times 10^5 \text{ hm}^2$,占草原总面积的 26.4%,虽然比例不是最高,但这部分草原的生态功能严重受损,修复难度大,成本高。

表 2 退化草原面积统计结果

Table 2 Statistical results of degraded grassland area

草原退化等级	面积/ 10^4 hm^2	占草原比例/%
非退化	68.5	45.3
轻度退化	42.8	28.3
中度退化	26.6	17.6
重度退化	13.4	8.8
合计	151.3	100

基于 2021—2023 年放牧强度调查数据,按照载畜量将研究区划分为适度放牧区(载畜量 ≤ 8 只羊单位/ hm^2 , 面积 $4.23 \times 10^5 \text{ hm}^2$)、过度放牧区(载畜量 8~12 只羊单位/ hm^2 , 面积 $3.87 \times 10^5 \text{ hm}^2$)、严重超载区(载畜量 > 12 只羊单位/ hm^2 , 面积 $1.58 \times 10^5 \text{ hm}^2$)。空间叠加分析显示,适度放牧区中轻度退化草原占 71.2%,过度放牧区中中度退化草原占 65.8%,严重超载区中重

度退化草原占 78.4%。同时,距离道路 1 km 以内区域的重度退化比例为 23.4%,1~3 km 为 12.7%,3 km 以上仅为 4.2%,呈现明显的距离衰减效应。

西乌珠穆沁草原退化在空间分布上呈现显著的地域差异,主要是自然条件与人类活动综合作用的结果。从自然因素看,中部和南部地势较为平缓,生态系统抗干扰能力较强,以轻度退化为主;而东部和西北部受风力侵蚀和坡地径流影响,土壤较为贫瘠,呈现中度退化。人为因素则表现出明显的强烈梯度效应,适度放牧区呈现轻度退化,过度放牧导致东部和西北部中度退化,而交通沿线及居民点周边因车辆碾压、土地开垦等高强度干扰形成重度退化核心区。值得注意的是,重度退化区(8.8%)虽未突破 10% 的生态不可逆阈值,但局部已出现生态功能衰退。这种空间分异规律表明人类活动强度是退化程度的主导驱动力,而自然条件通过调节系统脆弱性影响退化格局,二者协同作用形成了“轻度—中度—重度”的同心圆式退化梯度。

2.2 草地产能损失

西乌珠穆沁草原不同退化等级草原的单位产草量差异显著($p < 0.01$)。表 3 表明,未退化草原平均产草量为 3 200 kg/hm^2 ,轻度、中度、重度退化草原的产草量分别为 2 600, 1 800, 900 kg/hm^2 ,较未退化草原分别下降 18.8%, 43.8%, 71.9%。

基于 2021—2023 年草料市场均价(1.2 元/ kg),计算得出西乌珠穆沁草原草地产能损失总量为 $9.37 \times 10^8 \text{ kg}$,直接经济损失 11.25 亿元。从表 3 可知,中度退化草原的经济损失最大(4.47×10^8 元),占总损失的 39.7%,主要是因为其单位减产幅度较大(1 400 kg/hm^2),且分布面积较广。

重度退化草原虽然单位减产幅度最大(2 300 kg/hm^2),但由于面积相对较小,总经济损失(3.70 亿元)位居第二。轻度退化草原面积最大,但减产幅度较小,经济损失较低。

表 3 不同退化等级草原产能损失及经济损失估算结果(基于 2021—2023 年平均数据)

Table 3 Estimation results of productivity loss and economic loss of grassland under different degradation levels (based on average data during 2021—2023)

草原退化等级	草地面积/ 10^4 hm^2	平均产草量/ $(\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2})$	减产量/ $(\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2})$	总减产量/ 10^8 kg	草料均价/ $(\text{元} \cdot \text{kg}^{-1})$	经济损失/ (10^8 元)
非退化草原	—	3 200	—	—	—	—
轻度退化草原	42.8	2 600	600	2.568	1.2	3.08
中度退化草原	26.6	1 800	1 400	3.724	1.2	4.47
重度退化草原	13.4	900	2 300	3.082	1.2	3.70
合计	82.8	—	—	9.374	—	11.25

2.3 生态系统服务功能损失评估

基于西乌珠穆沁旗2021—2023年平均数据,生态功能损失比例的确定基于以下依据:①参考《天然草地健康评价技术规范》(NY/T 2998—2016)中不同退化等级的生态功能衰减标准;②借鉴谢高地等^[6]的生态系统服务价值当量表退化草地的功能折减系数;③结合本研究区315个地面调查样点的实测数据,及植被盖度、生物量、土壤理化性质等指

标,综合确定轻度退化区各项生态服务功能保持在80%,中度退化区保持在50%,重度退化区保持在20%。依据生态系统服务价值评估标准,草原主要生态服务功能的单位价值^[4]为固碳释氧2100元/hm²,水源涵养1000元/hm²,土壤保持900元/hm²,生物多样性维持600元/hm²,合计4600元/hm²。不同退化等级草原的生态功能损失比例分别为轻度退化20%,中度退化50%,重度退化80%(表4)。

表4 不同退化等级草原生态系统服务功能损失及经济损失估算(基于2021—2023年平均数据)

Table 4 Estimation of ecosystem service function loss and economic loss of grassland under different degradation levels (based on average data during 2021—2023)

草原退化等级	草地面积/ 10 ⁴ hm ²	功能损失比例	单位生态价值/ (元·hm ²)	总生态价值损失/ (10 ⁸ 元)
轻度退化草原	42.8	20%	4 600	3.94
中度退化草原	26.6	50%	4 600	6.12
重度退化草原	13.4	80%	4 600	4.92
合计	82.8	—	—	14.98

基于2021—2023年平均数据,西乌珠穆沁旗退化草原造成的生态系统服务功能总损失为14.98亿元。其中,中度退化草原的生态损失最大(6.12×10⁸元),占总生态损失的40.9%,主要因为中度退化面积较大且功能损失比例较高(50%)。重度退化草原虽然面积最小,但生态损失贡献率达32.8%,反映了重度退化对生态系统的严重破坏。单位面积生态损失方面,重度退化草原最为严重,达3680元/hm²,是轻度退化草原(920元/hm²)的4.0倍。生态功能的丧失主要表现为区域水土流失加剧、沙化蔓延、生物种群锐减等系统性退化,这些变化不仅破坏生态系统的稳定性,还可能进一步影响区域可持续发展。

2.4 生态经济损失驱动因子分析

驱动因子指标选择基于生态经济学理论框架和国内外相关研究,指标选择的依据主要围绕草原退化的直接物理影响、市场波动和生态功能价值3个核心维度。本研究选择产草量减少(物理损害)、退化面积(空间范围)、市场价格(经济放大)和生态服务价值(功能损失)作为核心驱动因子。

2.4.1 主成分分析结果

主成分分析结果(表5)表明,前3个主成分的累计贡献率达89.6%,能够较好地解释经济损失的变异特征。第一主成分(PC₁)贡献率为52.3%,主要由单位产草量减少量(载荷系数0.89)和退化面积(载荷系数0.85)决定,反映了草原退化的直接物理影响;第二主成分(PC₂)贡献率为23.8%,主要体现市场价格因素(载荷系数0.92)的作用,说明经济损失受市场波动

影响显著;第三主成分(PC₃)贡献率为13.5%,主要反映生态服务价值系数(载荷系数0.83)的影响,体现了生态功能损失的重要性。

表5 生态经济损失驱动因子主成分分析结果

Table 5 Results of principal component analysis of driving factors of ecological and economic loss

主成分	贡献率/ %	累计贡献 率/%	主要影响因子	载荷 系数
PC ₁	52.3	52.3	单位产草量减少量	0.89
			退化面积	0.85
PC ₂	23.8	76.1	市场价格因素	0.92
			草料价格波动	0.78
PC ₃	13.5	89.6	生态服务价值系数	0.83
			功能损失比例	0.76

2.4.2 影响因子回归分析

由表6可知,退化面积是影响经济损失的主导因素,回归系数为0.892($p < 0.001$),说明退化面积每增加1万hm²,经济损失将增加8.92×10⁷元。市场价格的影响系数最高(1.15),反映了价格波动对草原经济损失的敏感性,表明草料价格每上涨1元/kg,退化草原的经济损失将增加1.15倍。单位减产量的影响系数为0.67($p < 0.01$),体现了产能下降的直接经济影响。生态功能损失比例虽然影响系数相对较小(0.43),但仍达到显著水平,说明生态功能损失在经济损失形成中不可忽视。可以看出,各因子通过不同路径影响经济损失,其中,退化面积是基础驱动因子,通过直接扩大物理损害范围发挥作用;市场价格

是放大因子,通过货币化机制将物理损失转化为经济损失,价格波动对损失规模具有杠杆效应;单位减产量是强度因子,直接反映草原生产力衰退程度,系数0.67表明减产对经济损失贡献显著;生态功能损失比例虽然系数相对较小,但代表了长期累积的生态价值流失,具有不可逆性特征。

2.5 生态经济损失评估

由表7可知,Moran's I 指数为0.426($p < 0.001$),经济损失在空间上呈现显著的正自相关性,表明西乌珠穆沁旗草原退化经济损失呈现显著的空间分异特征,表现出明显的空间集聚趋势,热点区主要分布在人类活动强度较高的东北部、中西部和南部地区。其中,东北部热点区主要由中度退化草原构成,经济损失密度达到 2.50×10^4 元/ km^2 ,中西部热点区以轻度和中度退化为主,经济损失密度 2.10×10^4 元/ km^2 ,

南部热点区是重度退化草原集中分布区,单位面积损失最高但总量相对较小。冷点区主要分布在研究区北部和东南部,这些区域草原退化程度较轻,经济损失密度低于 1.00×10^4 元/ km^2 。经济损失的空间分布与人类活动强度、自然环境条件密切相关。

表6 生态经济损失影响因子回归分析

Table 6 Regression analysis of influencing factors of ecological and economic loss

影响因子	回归系数	标准误	t 值	p 值	显著性
退化面积	0.892	0.045	19.82	< 0.001	***
单位减产量	0.67	0.089	7.53	< 0.01	**
市场价格	1.15	0.156	7.37	< 0.01	**
功能损失比例	0.43	0.087	4.94	< 0.05	*

注: p 值表示统计显著性概率。***表示 $p < 0.001$,**表示 $p < 0.01$,*表示 $p < 0.05$ 。

表7 西乌珠穆沁旗草原退化经济损失空间分异特征

Table 7 Spatial differentiation characteristics of economic loss from grassland degradation in West Ujimqin Banner

空间区域	地理位置	经济损失密度/ (10^4 元· km^{-2})	损失等级	占总面积 比例/%	主要退化类型	主要驱动因子
东北部热点区	研究区东北部	2.5	极高损失	12.5	中度退化为主	人类活动强度大
中西部热点区	研究区中西部	2.1	高损失	18.3	轻度-中度退化	放牧强度较高
南部重度退化区	研究区南部	2.8	极高损失	8.8	重度退化	过度利用、采矿
中部过渡区	研究区中部	1.4	中等损失	15.2	轻度退化为主	气候变化影响
东部低损失区	研究区东部	0.8	低损失	14.7	轻微退化	保护措施得当
西部边缘区	研究区西部边界	1.2	中等损失	11.6	局部退化	地形因素
北部冷点区	研究区北部	0.3	极低损失	10.2	未退化-轻微退化	人类干扰少
东南部冷点区	研究区东南部	0.4	极低损失	8.7	未退化-轻微退化	自然条件稳定

东北部热点区和南部重度退化区经济损失密度最高(分别为 2.50×10^4 元/ km^2 和 2.80×10^4 元/ km^2),均属高损失等级,但退化类型与驱动因子存在差异,东北部以中度退化为主,受人类活动高强度影响,南部则出现重度退化,主因是过度利用和采矿活动。中西部热点区虽经济损失密度略低(2.10×10^4 元/ km^2),但面积占比最大(18.3%),其轻度-中度退化与高放牧压力密切相关。中部过渡区和西部边缘区属中等损失等级,分别受气候变化和地形因素影响。值得注意的是,东部低损失区(0.8 万元/ km^2)和北部、东南部冷点区($0.3 \sim 0.4$ 万元/ km^2)因保护措施得当或人类干扰较少,退化程度轻微。空间格局显示,经济活动密集区与生态脆弱区叠加地带退化最严重,而自然条件稳定区域保存较好,反映出人类活动强度与政策干预是决定草原退化经济损失的关键因素。

2.6 不同退化等级综合损失对比

表8综合展示了基于2021—2023年平均数据计

算的不同退化等级草原生态经济损失对比情况。其中,面积数据采用2023年调查结果。由表8可知,不同退化等级的综合经济损失呈现显著的分异特征。中度退化草原经济损失最大,综合损失为 1.06×10^9 元,占总损失的40.4%,主要是因为中度退化草原不仅面积较大(2.66×10^5 hm^2),而且正处于生态系统快速退化的临界期,产能损失和生态损失均较为显著。重度退化草原虽然面积最小(1.34×10^5 hm^2),但综合损失达 8.62×10^8 元,占总损失的32.8%,单位面积损失最高(6433 元/ hm^2),是轻度退化草原的3.9倍,反映了重度退化对草原生态经济系统影响较大。

轻度退化草原面积最大(4.28×10^5 hm^2),但由于仍处于生态系统相对稳定的状态,综合损失相对较低(7.02×10^8 元),占总损失的26.8%,单位面积损失为 1640 元/ hm^2 。这一结果表明,轻度退化草原仍具有较大的修复潜力,应作为预防性保护的重点对象。

表8 不同退化等级生态经济损失对比(基于2021—2023年平均数据)
Table 8 Comparison of ecological and economic loss under different degradation levels (based on average data during 2021—2023)

退化等级	面积/ (10^4 hm^2)	产能损失/ (10^8 元)	生态损失/ (10^8 元)	综合损失/ (10^8 元)	占总损失 比例/%	单位面积损失/ (元· hm^2)
轻度退化	42.8	3.08	3.94	7.02	26.8	1 640
中度退化	26.6	4.47	6.12	10.59	40.4	3 982
重度退化	13.4	3.70	4.92	8.62	32.8	6 433
合计	82.8	11.25	14.98	26.23	100.0	3 168

3 讨论

3.1 研究区草原退化状况

本研究识别出西乌珠穆沁旗草原退化面积为 $8.28 \times 10^5 \text{ hm}^2$, 占可利用草原面积的 40.8%, 这一结果与国内外同类研究具有良好的可比性。常虹等^[14]采用样方调查法对东乌珠穆沁草原的研究发现, 该地区草原退化面积约占 35%~45%, 与本研究结果高度一致。李岩等^[15]运用遥感技术对西乌珠穆沁典型草原植被盖度的研究也得出类似结论。这种一致性验证了本研究评估方法的可靠性。从退化等级结构来看, 本研究发现轻度退化面积占退化草原的 51.7%, 中度退化占 32.1%, 重度退化占 16.2%, 呈现典型的金字塔型分布。这种分布格局与国际草原退化研究高度吻合。Reynolds等^[16]在全球干旱区草地退化研究中发现, 约 70% 的退化草地仍处于轻中度退化阶段, 重度退化面积相对较小。Akiyama等^[17]在中国北方草原退化监测中也观察到类似现象, 认为这种分布特征反映了草原生态系统的自我调节能力。与全国草原退化状况相比, 据农业农村部统计^[18], 全国草原综合植被盖度为 56.1%, 而本研究区域约为 59.2%, 说明该地区草原整体状况相对较好。国际比较方面, 美国大平原草地退化比例约为 35%~50%^[19], 澳大利亚东南部草地退化比例约为 30%~40%^[20], 本研究区域的退化程度与发达国家草原区基本相当, 说明草原退化是全球性问题。

3.2 经济损失量化的生态与经济效应

本研究构建的经济损失测算模型综合考虑了产能损失 (1.13×10^9 元) 和生态服务功能损失 (14.98 亿元) 两个维度, 总损失达 2.62×10^9 元。与传统研究仅考虑产能损失的研究相比, 本研究的评估更为全面。苏大学等^[21]在草地退化经济损失评估中主要关注牧草减产, 未充分考虑生态服务价值, 导致经济损失被严重低估。从产能损失来看, 本研究发现中度退化草原贡献了最大的经济损失 (4.47×10^8 元, 占 39.7%), 这一结果具有重要的生态学意义。根据状

态转换模型理论^[22], 草原生态系统在中度退化阶段往往处于临界转换期, 此时生态系统的生产力下降最为剧烈。Briske等^[23]在北美草原研究中发现, 中度退化导致产草量下降 40%~55%, 与本研究结果 (43.8%) 基本一致。生态系统服务价值评估方面, 本研究参考谢高地等^[4]建立的中国陆地生态系统服务价值当量表, 测算的生态服务价值损失占总经济损失的 57.1%, 这一比例显著高于 Wang等^[24]在青藏高原草地研究中的结果 (45%)。Daily等^[25]指出, 生态系统服务价值往往被严重低估, 实际价值可能是直接经济价值的 2~5 倍, 本研究结果验证了这一观点。与国际同类研究对比, Nkonya等^[26]对全球土地退化经济损失的评估表明, 草地退化的年经济损失约占区域 GDP 的 1%~3%。本研究测算的西乌珠穆沁旗草原退化经济损失约占当地 GDP 的 12.1%, 这一比例明显高于全球平均水平, 反映了草原生态系统在当地经济社会发展中的重要地位。

3.3 经济损失的空间分异格局与驱动机制

本研究主成分分析显示, 单位产草量、退化面积和市场价格是影响草原经济损失的主导因子, 累计贡献率达 89.6%。这一结果与国内外相关研究高度一致。空间分异方面, 经济损失呈现显著的集聚特征 (Moran's $I=0.426$), 高损失区主要分布在人类活动强度较高的区域。这种空间格局的形成是自然因素和人文因素共同作用的结果。Prishchepov等^[27]研究发现, 距离道路每增加 1 km, 草原退化概率下降约 8%~12%, 本研究中重度退化草原主要分布在交通干线附近, 验证了这一规律。

4 结论与建议

4.1 结论

(1) 截至 2023 年, 西乌珠穆沁旗草原退化面积达 $8.28 \times 10^5 \text{ hm}^2$, 其中轻度退化面积 $4.28 \times 10^5 \text{ hm}^2$, 占退化草原面积的 51.7%; 中度退化面积 $2.66 \times 10^5 \text{ hm}^2$, 占退化草原面积的 32.1%; 重度退化面积 $1.34 \times 10^5 \text{ hm}^2$, 占退化草原面积的 16.2%。

(2) 草原退化使产草量下降18.8%~71.9%,直接经济损失 1.12×10^9 元(中度退化贡献39.7%)。生态系统服务功能损失 1.50×10^9 元,其中中度退化生态损失占比最高(40.9%),而重度退化单位损失达3680元/hm²,是轻度退化的4倍。两类损失合计 2.62×10^9 元,凸显退化对草原生态经济系统的复合影响。

(3) 主成分分析表明,单位产草量、退化面积和市场价格累计解释为89.6%。回归分析显示退化面积影响最显著($\beta=0.892, p<0.001$),市场价格敏感性最高($\beta=1.15$),生态功能损失比例($\beta=0.43$)也具有显著性,验证了“自然-市场-生态”多维驱动机制。

(4) 经济损失呈现显著的空间集聚特征(Moran's $I=0.426$),高损失区主要分布在西乌珠穆沁旗人类活动强度较高的东北部、中西部和南部地区,经济损失密度分别为 $2.50 \times 10^4, 2.10 \times 10^4$ 元/km²和 2.80×10^4 元/km²,低损区主要分布在研究区的北部和东南部,经济损失密度低于 1.00×10^4 元/km²。经济损失的空间分布与人类活动强度、自然环境条件密切相关,热点区主要分布在人口密度较高、放牧强度大的区域。基于以上研究结果,本研究针对西乌珠穆沁旗草原退化的空间分异特征和驱动机制,提出相应的政策建议和管理启示。

4.2 建议

基于上述研究结论,结合西乌珠穆沁旗草原退化治理的实际需求,提出以下政策建议与管理启示。

(1) 基于退化分级的草原生态修复与经济补偿联动机制。针对西乌珠穆沁旗草原退化程度差异大的特点,建议构建分级治理与生态补偿联动体系。对 4.28×10^5 hm²轻度退化区以自然恢复为主, 2.66×10^5 hm²中度退化区采取工程与生物相结合的综合治理, 1.34×10^4 hm²重度退化区实行严格禁牧封育。基于单位面积经济损失测算值3,168元/hm²,按照国际经验(覆盖生态价值损失的60%~80%),建议将重度、中度、轻度退化草原的补偿标准分别调整为30 003 750, 15 002 250, 7 501 200元/(hm²·a),远高于现行标准[90~112.5元/(hm²·a)]。同时推广节水灌溉和测土施肥技术提升产草量20%~30%,建立草原生态产品价值核算体系,探索草原碳汇交易和生态银行机制,完善草产品价格形成机制,将退化率纳入地方政府绩效考核,实现生态保护与牧民增收的协同发展。

(2) 基于退化空间异质性的分区治理方案。Ostrom^[28]在制度分析框架中强调,有效的资源管理需要多元化的价值实现机制。发展草原碳汇交易,

通过碳市场实现生态价值货币化;推进草原生态旅游,发展多元化收入来源;加强草原产品深加工和品牌建设,提高产品附加值;建立草料价格保险制度,降低市场风险。Forest^[29]的国际经验显示,多元化的生态产品价值实现机制是实现草原可持续利用的重要途径。针对经济损失的空间集聚特征,建议实施分区精准治理。高损失热点区(东北部、中西部和南部)严格实行草畜平衡,推行“季节性禁牧+舍饲圈养”模式;中等损失区推广轮牧等科学放牧模式;低损失区(北部和东南部)发展现代化生态牧场。构建“三区三线”管控体系,划定生态修复区、适度利用区和产业发展区,建立跨区域生态补偿机制,鼓励低损区承接高损区牲畜转移,运用智慧畜牧业技术实时监测,实现区域协同发展。

参考文献(References)

- [1] 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 Yuchun, Tang Haiping. Differentiation of related concepts of grassland degradation [J]. Acta Prataculturae Sinica, 2008,17(1):93-99.
- [2] 李博.中国北方草地退化及其防治对策[J].中国农业科学,1997,30(6):30-33.
Li Bo. Grassland degradation in northern China and its control countermeasures [J]. Scientia Agricultura Sinica, 1997,30(6):30-33.
- [3] Schirpke U, Kohler M, Leitinger G, et al. Future impacts of changing land-use and climate on ecosystem services of mountain grassland and their resilience [J]. Ecosystem Services, 2017,26:79-94.
- [4] Quétiér F, Thébault A, Lavorel S. Plant traits in a state and transition framework as markers of ecosystem response to land-use change [J]. Ecological Monographs, 2007,77(1):33-52.
- [5] Manlike A, Sheng J D, Suryabhan A, et al. Effects of plateau pika (*Ochotona curzoniae*) on alpine grassland ecosystem services [J]. Journal of Applied Ecology, 2019,56(4):905-915.
- [6] 谢高地,鲁春霞,冷允法,等.青藏高原生态资产的价值评估[J].自然资源学报,2003,18(2):189-196.
Xie Gaodi, Lu Chunxia, Leng Yunfa, et al. Ecological assets valuation of the Tibetan Plateau [J]. Journal of Natural Resources, 2003,18(2):189-196.
- [7] 赵同谦,欧阳志云,郑华,等.我国草地生态系统服务功能价值评估[J].自然资源学报,2004,19(5):644-651.
Zhao Tongqian, Ouyang Zhiyun, Zheng Hua, et al. Valuation of grassland ecosystem services in China [J]. Journal of Natural Resources, 2004, 19(5): 644-651.
- [8] 白永飞,张丽华,赵建宁,等.中国北方草原生态系统服务功能评估[J].生态学报,2014,34(22):6294-6303.

- Bai Yongfei, Zhang Lihua, Zhao Jianning, et al. Assessment of ecosystem service functions of the grasslands in northern China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34(22): 6294-6303.
- [9] 童李霞,王钊.三江源区草地生态系统服务价值评估[J].草业学报,2015,24(6):58-68.
- Tong Lixia, Wang Zhao. Valuation of grassland ecosystem services in the three-river source region [J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2015, 24(6): 58-68.
- [10] 穆松林,王显国,李建东,等.内蒙古草原生态系统服务功能价值评估[J].生态学杂志,2006,25(11):1289-1295.
- Mu Songlin, Wang Xianguo, Li Jiandong, et al. Valuation of grassland ecosystem services in Inner Mongolia [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2006, 25(11): 1289-1295.
- [11] 王爱玲,卓义,刘良云,等.基于遥感的内蒙古草原生态系统服务价值评估[J].草业学报,2018,27(9):155-164.
- Wang Ailing, Zhuo Yi, Liu Liangyun, et al. Assessment of ecosystem service value in Inner Mongolia grasslands based on remote sensing [J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2018, 27(9): 155-164.
- [12] 王舒新,赵萌莉,韩国栋,等.不同放牧强度对短花针茅荒漠草原生态系统服务价值的影响[J].草业科学,2019,36(8):2098-2108.
- Wang Shuxin, Zhao Mengli, Han Guodong, et al. Effects of different grazing intensities on ecosystem service value of *Stipa breviflora* desert steppe [J]. *Pratacultural Science*, 2019, 36(8): 2098-2108.
- [13] Fan Jiangwen, Shao Quanqin, Liu Jiyuan, et al. Assessment of effects of climate change and grazing activity on grassland yield in the three rivers headwaters region of Qinghai-Tibet Plateau, China [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2010, 170(1): 571-584.
- [14] 常虹,孙海莲,刘亚红,等.东乌珠穆沁草甸草原不同退化程度草地植物群落结构与多样性研究[J].草地学报,2020,28(1):184-192.
- Chang Hong, Sun Hailian, Liu Yahong, et al. Community structure and diversity under different degrees of degraded grassland in East Wuzhumuqin meadow [J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2020, 28(1): 184-192.
- [15] 李岩,尚士友,王晓娟,等.西乌珠穆沁典型草原植被盖度空间异质性研究[J].江苏农业科学,2017,45(22):283-288.
- Li Yan, Shang Shiyu, Wang Xiaojuan, et al. Study on spatial heterogeneity of vegetation coverage in typical grassland of West Ujimqin [J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2017, 45(22): 283-288.
- [16] Reynolds J F, Smith D M S, Lambin E F, et al. Global desertification: Building a science for dryland development [J]. *Science*, 2007, 316(5826): 847-851.
- [17] Akiyama T, Kawamura K. Grassland degradation in China: Methods of monitoring, management and restoration [J]. *Grassland Science*, 2007, 53(1): 1-17.
- [18] 中华人民共和国农业农村部.全国草原综合植被盖度达到56.1% [EB/OL] [2023-06-05]. <http://www.moa.gov.cn>.
- Ministry of Agriculture and Rural Affairs of the People's Republic of China. The comprehensive vegetation coverage of national grassland reaches 56.1% [EB/OL] [2023-06-05]. <https://www.moa.gov.cn>.
- [19] Fuhlendorf S D, Engle D M. Restoring heterogeneity on rangelands: Ecosystem management based on evolutionary grazing patterns [J]. *BioScience*, 2001, 51(8): 625.
- [20] Stafford Smith D M, McKeon G M. Assessing the historical frequency of drought events on grazing properties in Australian rangelands [J]. *Agricultural Systems*, 1998, 57(3): 271-299.
- [21] 苏大学,钟华平,姚爱兴.草地退化的经济损失评估方法研究[J].草业学报,2005,14(6):89-95.
- Su Daxue, Zhong Huaping, Yao Aixing. Study on economic loss assessment method for grassland degradation [J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2005, 14(6): 89-95.
- [22] Westoby M, Walker B, Noy-Meir I. Opportunistic management for rangelands not at equilibrium [J]. *Journal of Range Management*, 1989, 42(4): 266.
- [23] Briske D D, Fuhlendorf S D, Smeins F E, et al. State-and-transition models, thresholds, and rangeland health: A synthesis of ecological concepts and perspectives [J]. *Rangeland Ecology & Management*, 2005, 58(1): 1-10.
- [24] Wang Zhaoqi, Zhang Yanzen, Yang Yue, et al. Quantitative assess the driving forces on the grassland degradation in the Qinghai-Tibet Plateau, in China [J]. *Ecological Informatics*, 2016, 33: 32-44.
- [25] Daily G C, Matson P A. Ecosystem services: From theory to implementation [J]. *PNAS*, 2008, 105(28): 9455-9456.
- [26] Nkonya E, Mirzabaev A, von Braun J. Economics of land degradation and improvement: A global assessment for sustainable development [M]. Cham: Springer International Publishing, 2016.
- [27] Prishchepov A V, Radeloff V C, Baumann M, et al. Effects of institutional changes on land use [J]. *Global Environmental Change*, 2012, 22(1): 76-88.
- [28] Ostrom E. A general framework for analyzing sustainability of social-ecological systems [J]. *Science*, 2009, 325(5939): 419-422.
- [29] Forest Trends. State of watershed payments: An emerging marketplace [R]. Washington, DC: Forest Trends, 2008.