大兴安岭林草交错带草地退化成因分析及其应对策略

钱芮¹, 段新宇¹, 杨海军², 冯媛媛¹, 徐网谷³, 渠畅³, 王智³, 李贵才⁴, 李昂⁵, 高英志^{1,6*}

1. 东北师范大学草地科学研究所, 植被生态科学教育部重点实验室, 国家环境保护湿地生态与植被恢复重点实验室, 吉林松嫩草地生态系统国家野外科学观测研究站, 长春 130024;

2. 云南大学大理大学共建洱海溪流生态与治理研究中心, 昆明 650504;

3. 生态环境部南京环境科学研究所, 国家环境保护生物安全重点实验室, 国家环境保护武夷山生态环境科学观测研究站, 南京 210042;

4. 国家卫星气象中心, 北京 100081;

5. 中国科学院植物研究所, 植被与环境变化国家重点实验室, 北京 100093;

6. 新疆农业大学草业学院, 西部干旱荒漠区草地资源与生态教育部重点实验室, 乌鲁木齐 830052

* 联系人, E-mail: gaoyz108@nenu.edu.cn

收稿日期: 2021-12-09; 接受日期: 2022-01-30; 网络版发表日期: 2022-05-23

中国生态环境部生物多样性保护重大工程专项(批准号: 8-2-5-11-2)、国家重点研发计划(批准号: 2019YFE0117000)、吉林省科技厅自然科学基金(批准号: 20190201121JC)和国家自然科学基金(批准号: 31870436, U1803110)资助

摘要 近年来随着气候波动和人类农牧业对土地利用强度的增加, 我国北方林草交错带面临严峻的草地退化问题. 然而利用长期气候、放牧和开垦数据分析北方高纬度寒区林草交错带草地退化原因的研究还很薄弱. 本研究利用63年长期数据, 以大兴安岭林草交错带典型区域额尔古纳市和陈巴尔虎旗为研究对象, 分析导致该区域草地退化的主导因素. 结果表明, 自1957年到2019年, 两个地区的年均温都呈现极显著上升, 平均升高 $2.9^{\circ}\text{C}\sim 3.1^{\circ}\text{C}$; 降水量在150~550 mm呈剧烈波动, 但在2000年以后均呈下降趋势. 不同经营主体的家畜放牧密度差异巨大, 国有农场家畜密度由建厂初期不足每公顷1个羊单位上升到现在每公顷2~5个羊单位, 而个人牧户的家畜密度从1980年每公顷0.5个羊单位增至2019年的每公顷7个羊单位, 造成该区域严重的草畜失衡. 随着土地利用政策变化, 国营上库力农场和陶海牧场的播种面积先呈波动式上升, 至2014年剧增至峰值37000和7000 hm^2 , 以后由于退耕还林政策实施播种面积逐年下降. 通过对气候、放牧和开垦数据的主成分分析表明, 在区域气候逐渐变暖和干旱化的背景下, 超载过牧是导致本区域草地退化的主导因素. 因此, 在本区域草地面临气候变化和土地退化的双重压力的背景下, 建议加强对林草交错带土地利用方式的监察和管理, 运用奖补手段, 缓解开垦压力, 降低放牧强度; 强化科技创新, 建立智慧牧场, 利用人工种植优良牧草以及补播改良等科学技术手段, 加大优质牧草生产, 最终实现我国北方高纬度寒区林草交错带草地资源的可持续利用.

关键词 林草交错带, 气候变化, 人为因素, 草地退化, 应对策略

引用格式: 钱芮, 段新宇, 杨海军, 等. 大兴安岭林草交错带草地退化成因分析及其应对策略. 中国科学: 生命科学, 2022, 52: 1883–1896
Qian R, Duan X Y, Yang H J, et al. Analysis of causes of forest-steppe ecotone degradation and countermeasures in the Greater Xing'an Range (in Chinese). Sci Sin Vitae, 2022, 52: 1883–1896, doi: [10.1360/SSV-2021-0303](https://doi.org/10.1360/SSV-2021-0303)

林草交错带是指特定时间和空间尺度下森林与草原生态系统的过渡区域,物种丰富度大,生产力较高但又具有波动性的特点^[1,2]。大兴安岭森林-草原交错带是我国北方最具有代表性的森林与草原生物群落交错带,在行政区上被划为内蒙古根河市、额尔古纳市、陈巴尔虎旗等7个市/旗行政区,总面积约13万平方公里(图1)。近年来由于气候波动和农牧业的土地利用强度增加,本区域植被严重退化,自然景观也日益破碎。目前呼伦贝尔草地植物退化面积高达 $399.3 \times 10^4 \text{ hm}^2$,占可利用草场面积的40.2%,其中重度退化比例达到12.7%^[3]。因此,为实现大兴安岭林草交错带的可持续利用和发展,应该加强导致该区域草地退化机制的研究,这些研究成果对维护区域生态系统多功能性与草地生态系统健康都具有重要意义^[4]。

导致干旱区陆地生态系统退化的因素有自然因素和人为因素,自然因素主要包括干旱、风蚀、水蚀等;人为因素主要包括过度放牧、开垦等。这些因素往往相互交互,导致区域草地退化。大量研究表明,气候的暖干化和不合理的人类活动是引起陆地生态系统退化的两类重要因素。目前我国高纬度寒区正面临更加严峻的干旱化趋势,这与地区降水减少和气温升高密切相关^[5]。气候的暖干化会使生态系统净初级生产力明显下降,从而引起草地生产功能降低,最终导致生物多样性和生态系统服务功能下降^[6]。除气候变暖旱化外,过度放牧和不合理开垦等人为干扰因素也是导致草地退化的重要驱动力^[7]。研究表明,超载放牧通过影响植物群落物种间的竞争关系,进而影响植物群落特征,造成优质牧草物种减少,生产力降低,同时劣质牧草物种比例大大增加,最终导致草地退化^[8]。从呼伦贝尔统计年鉴数据分析可知,2018年呼伦贝尔草原牧区实际载畜密度达到每公顷1.48个羊单位^[9],已超出生态系统所能承载的最大理论载畜密度每公顷1.04个羊单位^[10]。草地滥垦也会导致天然草地面积大幅下降,并造成区域内植物群落多样性降低^[11]。自清末以来,由于人口的增加和粮食生产的需求,到2018年本区域已有近 $189 \times 10^4 \text{ hm}^2$ 的草地被开垦为农田^[12]。该区域日趋严重的草地退化问题已经对我国北方林草交错带的生态环境和社会经济的可持续发展产生了严峻威胁。然而利用长期气候、放牧和开垦数据系统综合分析导致该区域林草交错带草地退化原因,并分析各个因素在退化过程中起到相对作用的研究还鲜有报道。

图1 大兴安岭林草交错带区域地理位置图。土地利用类型数据来源于MODIS 2018年土地利用覆盖数据 (MOD13Q1), 利用ArcGIS Modeler(V10.2 ESRI, 美国)构建模型

Figure 1 Location of the forest-steppe ecotone in the Greater Xing'an Range. Land use data were extracted from the 2018 MODIS land cover product data (MOD13Q1) with ArcGIS modeler (v10.2 ESRI, USA)

本文选取大兴安岭林草交错带的典型牧区陈巴尔虎旗和典型农区额尔古纳市为主要调查区域,分析1957~2019年自然因素(温度和降水)和人为因素(放牧和开垦)对大兴安岭林草交错带草地退化的影响,阐明引起区域内草地退化的主要因素,探讨退化草地的生态恢复对策,以期为我国北方高纬度寒区林草交错带草地资源的可持续利用和农牧业可持续发展提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

研究区域位于大兴安岭林草交错带内的额尔古纳市(北纬 $50^{\circ}01' \sim 53^{\circ}26'$, 东经 $119^{\circ}07' \sim 121^{\circ}49'$)和陈巴尔虎旗(北纬 $48^{\circ}48' \sim 50^{\circ}12'$, 东经 $118^{\circ}22' \sim 121^{\circ}02'$)。两个

区域总天然草地面积达到2.1万公顷, 占整个大兴安岭林草交错带天然草地面积的35.3%。本区域气候季节波动较大, 冬季寒冷漫长, 夏季温凉短促, 春季干燥风大, 秋季气温骤降、霜冻早。植被类型沿区域湿度梯度变化, 由西部以贝加尔针茅(*Stipa baicalensis*)+羊草(*Leymus chinensis*)为优势种的草原群落过渡至东部以白桦(*Betula platyphylla*)为优势种的森林群落。土壤类型为黑钙土, 并有镶嵌分布于林斑内的灰色森林土。

1.2 数据来源与数据统计

气候数据源包括由国家卫星气象中心提供的1957~2019年额尔古纳市和陈巴尔虎旗逐月平均温度和降水数据, 计算年均温、年均降水量以及温度和降水距平。温度季节性距平变化分为春夏季(3~8月)、秋冬季(9~2月)和全年; 降水季节性距平变化分为雨季(6~9月)、非雨季(1~5月, 10~12月)和全年。温度和降水距平计算如下:

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i, \quad (1)$$

$$X_i(X_p) = (X_i - \bar{X}) t(p) = 1, 2, \dots, n, \quad (2)$$

$$\bar{X}_t(\bar{X}_p) = \frac{1}{3} \sum_{n=1}^{n+2} X_m(X_{pn}) n = 1, 4, \dots, n+3, \quad (3)$$

$\bar{X}$ 为年均温和年均降水量, 其中 n 为年份, X_i 为年温度距平, X_p 为年降水距平, $\bar{X}_t$ 为每三年温度距平, $\bar{X}_p$ 为每三年降水距平。

放牧及开垦数据来源于额尔古纳市的上库力农场、陈巴尔虎旗的苏沁农牧场和陶海牧场3家典型国有农场场志^[13-15]。统计自建厂至2019年家畜饲养量和开垦面积的变化, 并在2019年以调查问卷形式随机走访陈巴尔虎旗那吉村和哈吉村40户牧民, 将每户的载畜量进行统计分析。

为了分析1957~2019年交错带草地退化状况, 本研究通过搜集大量文献资料, 获取到6个关键年份(1965年、1985年、2000年、2005年、2010年和2019年)区域草地退化面积数据^[3,16,17], 并通过回归分析方法, 拟合出1957~2019年区域退化草地面积变化趋势, 以此评估草地退化状况。为了弄清导致交错带草地退化的主要因素, 以区域内每年草地退化面积作为草地退化指标, 将额尔古纳和陈巴尔虎旗两个地区的年均降水量、年均温、年均家畜密度以及年均开垦面积分别作

为降水、气温、放牧和开垦指标, 将以上5个指标进行标准化降维处理后, 进行主成分分析(principal component analysis, PCA)。在选择PCA主成分时, 各指标在5个主轴(PC1, PC2, PC3, PC4和PC5)中均有相应解释度, 但在PC3, PC4和PC5这3个主轴的解释度很低, 仅为1%~20%, 在PC1和PC2主轴的解释度达到70%以上(网络版附表1), 因此选择PC1和PC2轴作为第一主成分和第二主成分来分析导致草地退化的主导因素。

利用SPSS软件包20.0对数据进行统计分析。方差齐性检验确定方差齐性($P>0.05$)。使用R语言3.5.2进行主成分分析。使用GraphPad Sigmaplot 12.5软件作图。

2 结果与分析

2.1 自然因素

1957~2019年额尔古纳和陈巴尔虎旗年均温在 -3.5°C ~ 1.1°C (图2), 而且增温趋势显著($P<0.01$)。具体来说, 1957~1989年额尔古纳和陈巴尔虎旗年均温大都位于63年的平均温之下, 而从1990年两个地区年均温都明显高于平均气温, 此后温度呈波动式上升, 且陈巴尔虎旗比额尔古纳增温更加显著(图2)。

1957~2019年陈巴尔虎旗和额尔古纳气温的年代际变化也表现出明显的上升趋势(图3)。其中1957~1989年全年气温以负距平为主, 但已呈增加趋势, 1990~1992年全年气温距平已达到 1.0°C , 此后逐年波动式上升, 至2019年达到最高。季节气温年代际变化中, 与秋季和冬季相比, 春季和夏季的气温距平上升更明显。总的来说, 3年的气温距平从1963~1965年的 -2.2°C 增加到2017~2019年的 1.8°C , 净增温近 4°C 左右。

1957~2019年, 额尔古纳和陈巴尔虎旗年降水量在150~550 mm之间呈剧烈波动变化(图4)。从1957~1975年, 这19年间两个地区年降水量较少, 年降雨量在220~480 mm之间波动, 且陈巴尔虎旗低于额尔古纳地区。而从1980~2000年, 这21年间两个地区降水量的年际变异增大, 1984年陈巴尔虎旗和额尔古纳地区年降水量分别达到峰值539和542 mm, 而1986年两个地区的年降水量突降至最低值150和200 mm; 之后的8年间年降水量在250~450 mm之间波动, 直到1998年区域年降水量再次增至470和490 mm。进入21世纪以来, 两个地区的降水量均波动式下降, 且2015~2019年陈巴尔虎

图2 1957~2019年额尔古纳市和陈巴尔虎旗年平均气温变化趋势

Figure 2 Mean annual temperature (MAT) in Argun city and Chenbarhu Banner from 1957 to 2019

旗地区年降水量下降更明显, 其中2017年降水量仅为182 mm(图4).

额尔古纳和陈巴尔虎旗降水量的年代际变化也表现出明显波动趋势(图5). 从全年降水量距平变化来看, 1957~1968年的降水距平呈明显下降趋势; 1978~1992年全年降水距平高于0, 且上升趋势明显; 而自1992年起全年降水距平呈明显波动式下降, 直到2017~2019年

全年降水距平降到最低值-55 mm. 在季节降水量的年代际变化中, 1957~2019年雨季降水距平表现为先升高再降低的波动式变化, 而非雨季降水距平表现先降低再升高的变化趋势(图5).

2.2 人为因素

(1) 过度放牧. 不同的经营主体草地家畜放牧密度差异巨大(图6). 在额尔古纳市的国有企业上库力农场和苏沁农牧场, 平均家畜密度从建厂初期每公顷0.06个标准羊单位到2019年维持在每公顷2~3个标准羊单位之间. 陈巴尔虎旗的国营陶海牧场从1955年到2004年平均家畜密度维持在每公顷2个标准羊单位以下, 2005年达到每公顷2.5个标准羊单位, 此后逐年波动式上升, 到2019年达到每公顷5个标准羊单位. 不同于国有农场, 从1980年到2001年陈巴尔虎旗个人牧户平均家畜密度维持在每公顷0.5个标准羊单位以下; 而自2002年家畜数量开始高速增长, 到2019年平均家畜密度高达每公顷7个标准羊单位, 比该地区2019年理论载畜密度(每公顷0.8个标准羊单位)高出8.8倍(图6).

(2) 开垦. 1956~2019年, 上库力农场和陶海牧场的总播种面积呈剧烈式波动, 主要经历三次大型开垦时期(图7). 具体来说, 从1956年到1960年, 两个农场的

图3 1957~2019年额尔古纳和陈巴尔虎旗每三年平均气温距平变化

Figure 3 Mean temperature anomaly every three years for spring and summer, autumn and winter, and the entire year in Argun city and Chenbarhu Banner from 1957 to 2019

图 4 1957~2019年额尔古纳和陈巴尔虎旗年降水量变化趋势

Figure 4 Mean annual precipitation (MAP) in Argun city and Chenbarhu Banner from 1957 to 2019

图 5 1957~2019年额尔古纳和陈巴尔虎旗每三年平均降水距平变化

Figure 5 Mean precipitation anomaly every three years for the rainy season, non-rainy season, and the entire year in Argun city and Chenbarhu Banner from 1957 to 2019

总播种面积均表现明显上升趋势,但在1957年陶海牧场播种面积从 800 hm^2 突增至 3000 hm^2 ,1959年下降至 1000 hm^2 。随后两个农场的种植面积均呈波动式增加

趋势,但发生了另外两次大规模的开垦活动。第一次是在1995年,上库力农场和陶海牧场的总播种面积分别从 $2 \times 10^4 \text{ hm}^2$ 和 2500 hm^2 突增至 $2.5 \times 10^4 \text{ hm}^2$ 和

图6 额尔古纳和陈巴尔虎旗国有农场和牧户家畜密度变化趋势

Figure 6 Livestock density of Shangkuli Farm and Suqin Farm in Argun city, Taohai Pasture and 40 herdsmen in Prairie Chenbarhu Banner

4000 hm^2 ; 第二次是在2014年, 两个农场的播种面积分别剧增至峰值 $3.7 \times 10^4 \text{ hm}^2$ 和 7000 hm^2 。从2015年开始, 上库力农场和陶海牧场的播种面积表现逐年波动式下降。从两个农场种植不同作物面积的变化来看, 从1956年到2019年, 小麦和油菜作为两个农场主要播种的农作物, 但其播种面积表现出明显不同的变化趋势。对于上库力农场, 1956~2016年小麦和油菜的播种面积表现逐年波动式增加, 2017年种植面积达到峰值 $3.2 \times 10^4 \text{ hm}^2$; 随后2018年农场加强种植结构的调整, 开始大量种植土豆、甜菜等经济作物, 农作物的播种比例逐年下降, 截至2019年上库力农场小麦和油菜播种面积仅占总播种面积的37%(图7A)。而对于陶海牧场, 1965~2019年一直以小麦和油菜作为主要种植作物, 虽然这期间该牧场也种植土豆、水飞蓟等经济作物, 但近几年经济作物的种植比例明显下降, 截至2019年仅占播种面积的7%^[15](图7B)。

(3) 林草交错带草地退化综合分析。1965~2019年, 大兴安岭林草交错带草地退化状况发生了极显著变化(图8)。1965年, 区域退化草地面积仅占可利用草地面积的12%, 草地植被状态良好。20世纪80及90年代, 区域退化草地面积占可利用草地面积的21%~30%, 主要以轻度退化为主, 且集中在新巴尔虎旗和鄂温克族自治

治旗地区^[3]。但进入21世纪以来, 区域草地退化状况急剧恶化, 2004年草地退化面积达到 $323 \times 10^4 \text{ hm}^2$, 占可利用草地面积的38%, 并出现了小范围的中度和重度退化, 到2019年草地退化面积已增至 $483 \times 10^4 \text{ hm}^2$, 占可利用草地面积的58%, 新巴尔虎旗和陈巴尔虎旗地区草地退化较为严重^[17]。

对两个区域的气候和人为因素与草地退化面积进行主成分分析, 结果表明, 放牧、开垦以及气温各指标在PC1轴上明显分离(图9), 其中放牧在PC1轴的解釋度最高, 分别达到95%和93%, 降水的解釋度最低, 仅为21%和23%。更重要的是, 草地退化面积与温度、开垦和放牧指标均成正相关, 与降水呈负相关, 且相关关系较弱(网络版附图1), 其中放牧在草地退化面积PC1轴的投影长度最大, 且两者极显著相关, 表明该指标对草地退化贡献率最高, 其次是开垦和温度, 而降水对草地退化的影响最小(图9, 网络版附图1)。

3 讨论

3.1 自然因素对林草交错带草地退化的影响

大兴安岭林草交错带气候变化主要体现温度和降水的变化方面(图2, 3和4)。本研究结果表明, 大兴安岭

图 7 1955~2019 年上库力农场(A)和陶海牧场(B)不同作物种植面积变化趋势

Figure 7 Planting areas of different crops in Shangkuli Farm (A) and Taohai Pasture (B) from 1955 to 2019

林草交错带区域气候正朝向暖干旱趋势发展, 年际增温率为 $0.37^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ (图2), 已明显高于全球平均年增长率 $0.2^{\circ}\text{C}\pm 0.1^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ ^[18], 这说明在中国北方高纬度寒区增温更加显著。增温通过影响草地植被光合作用和呼吸作用, 使适应温度和光能力强的优势种在生态系统中占据有利地位, 而不耐高温和强光的物种处于劣势地位, 进而改变草地生态系统群落结构, 使植被群落多样性显著降低, 对草地生态系统功能产生严重的负面影响^[19]。在区域显著增温条件下, 近20年的持续性干旱将进一步加剧草地生态系统结构和功能的失调(图4)。干旱所导致的植物气孔导度降低会限制植被的蒸腾作用, 同时抑制植物光合作用, 使植物初级生产能力显著下降, 最终导致草地生态系统功能降低^[20]。

温度变化还体现在强烈的季节性变化方面。温度的季节不稳定性会影响植物的生长和发育节律, 导致适应性较弱的植物死亡和物种消失^[21,22]。本研究发现, 在交错带内, 春夏季增温幅度比秋冬季更明显(图3), 这与同区域的研究结果一致^[23]。这一变化说明, 交错带气候变暖的影响主要在植物生长早季和旺季。有研究者认为, 在季节性冰冻环境中, 春季大幅度增温会促进融雪和相关地表辐射收支的变化, 这有助于植物叶片的扩张和早期植物的光合作用, 使植物的物候提前, 出叶时间提前, 从而延长植物生长季, 这将有利于植物群落生产力的提高^[24]。但是, 增温使植物物候提前也会强烈受到降雨量和降雨季节分配的限制。这是因为降水在不同季节的重新分配不仅造成植物群落

图 8 从1965~2019年大兴安岭林草交错带草地退化面积(百万公顷)以及未退化草地面积占可利用草地面积比例(%)变化趋势. 曲线采用二项式线性方程拟合($P < 0.01$)

Figure 8 Trends in degraded grassland area (million hectares) and the proportion of undegraded grassland areas to total available grassland areas (%) of the forest-steppe ecotone in the Greater Xing'an Range from 1965 to 2019. The data were fitted using a binomial linear equation ($P < 0.01$)

图 9 额尔古纳(A)和陈巴尔虎旗(B)区域草地退化的主成分分析

Figure 9 PCA of grassland degradation in Argun city (A) and Chenbarhu Banner (B)

水分胁迫和生物量下降, 还会引起植物分蘖延迟和减少等物候变化^[25]. 本研究发现, 63年来大兴安岭林草交错带区域春季和夏季降水量呈明显降低趋势, 而秋季和冬季与之相反(图5). 这与Volder等人^[26]在同纬度地区的研究结果一致, 近年来在欧洲温带草原, 全年降水中有40%的夏季降水被重新分配到秋季和冬季.

这些研究表明, 夏季蒸发量的增加以及降水量的减少会加剧干旱频率的发生, 导致植物光合作用和相对生长率降低, 土壤含水量下降, 最终延缓植物分蘖繁殖, 对植物生长产生不利影响^[27]. 而秋季和冬季降水的增加对植物生长的影响很小或没有影响, 这可能是因为降雨量的减少更多影响植物的生长过程^[28], 说明在大

兴安岭林草交错带区域, 春季和夏季降水减少比秋季和冬季降水增加对植物生长和繁殖的影响更显著.

目前, 增温和干旱等气象灾害的频繁发生是影响区域草地生态系统生产和服务功能实现的关键因素, 该区域气候变化具有难预测性. 针对该问题, 建议职能部门增加区域性气象业务, 提供通过公众气象服务平台对当地气象灾害进行风险管理服务. 当灾害发生的气象条件到达阈值时, 即发出预警, 这种气象预测系统可有助于减轻由于自然灾害对大兴安岭林草交错带草地造成的不利影响, 从而缓解区域草地退化.

3.2 人为因素对林草交错带草地退化的影响

国家一系列土地利用管理政策的实施对恢复北方退化草地有明显的积极作用^[29]. “三北防护林工程”(1979年起实施)、“退耕还林还草工程”(1999年起实施)、“天然林保护工程”(2000年起实施)、“草畜平衡制度”(2005年开始)等生态保护战略的实施^[30], 已初步遏制区域草地严重退化的态势. 在草地环境问题治理过程中, 虽然我国已经形成相应的草地管理法律和行政管理体系, 然而目前本区域仍面临严峻的超载放牧和草地退化问题. 1956–2000年, 本区域载畜密度一直维持在每公顷1.5个标准羊单位以下, 而自2000年以后, 大兴安岭林草交错带区域家畜密度高速增长(图6). 这种家畜种群的长期增长, 是因为牧区基础设施的改善导致冬季饲草资源限制的种群密度制约调控机制瓦解, 从而导致当地家畜种群的长期增长^[31]. 2019年苏沁农牧场和个人牧户的实际家畜密度分别达到每公顷5个羊单位和每公顷7个羊单位, 表明超载过牧的问题仍然非常严重(图6).

造成国有农场和个人牧户超载过牧的原因和解决方案并不相同. 区域国有农场尤其是苏沁农牧场, 是以畜牧业为主的农牧场, 存在管理粗放的严重问题, 无法科学合理地对牧业生产进行监测和安排, 缺少对区域草地生产力、干草产量、载畜量以及载畜平衡的精准管理和实时监控^[32]. 牧场为获取更多利益导致家畜密度高速增长, 加之长期忽略草场生长状况监控和草场管理, 使牧场草地退化问题日益严峻. 现阶段, 农垦集团载畜量及草畜平衡的调控有很多不可控因素, 急需增加大数据信息化监管和调控, 改善牧场面临的监管问题. 有研究者针对农垦集团建立了智慧牧场现代联网技术管理体系^[33], 包括草牧业建设科学规划、草牧业

精细生产智能决策、产品全程质量追溯与主动电商等核心功能. 该管理体系目的是将牧业生产上升到信息化水平, 通过网络监测数据对牧场草地及生产产品进行实时管理, 及时调整过牧农场的家畜数量, 对已退化的草地进行人工修复处理, 从而全面提升呼伦贝尔农垦集团信息化监管水平.

国有农场牧业生产不仅存在过牧问题, 还存在草场退化导致的饲草料短缺问题. 解决饲草料不足的关键在于发展人工草地. 2014年, 方精云院士领衔的中国科学院相关研究团队^[34]提出在草原牧区发展“草牧业”的理念, 通过天然草地管理和人工种草, 经合适的技术加工, 获取优质的饲草料, 进行畜牧养殖和加工生产, 最终实现草-畜结合、草-畜协调和草-畜互为依存的可持续发展目标. 随后, 中央发布一系列有关发展草牧业的文件, 《中华人民共和国草原法》(2021修正)指出, 国家大力支持和鼓励集约化人工草地建设, 天然草原改良和饲草饲料基地建设, 通过先进技术的优化配置以及规模化和更科学的生产方式, 实现畜牧业提质增效, 达到效益最大化, 促进现代草牧业的高效发展, 以稳定和提高草原生产能力, 实现草地生产和生态功能的合理配置与协调发展. 国有农场还可以在东北农区种植耐寒耐旱的牧草, 跨地运输至内蒙古地区, 以减轻内蒙地区秋冬季牧草短缺的限制, 或者可在春冬季节将部分家畜跨区转运到农区进行饲养, 减轻草地放牧压力, 缓解区域草地退化.

与国有农场普遍存在的过度放牧问题相比, 个体农牧民存在的过度放牧问题更为严重, 解决起来更为困难. 从本团队的调查可知, 2019年陈巴尔虎旗个人牧户平均家畜密度高达每公顷7个标准羊单位, 与2002年相比增长了7倍, 已经造成严重的草畜失衡(图6). 在当前的草地产权格局下, 造成牧民家畜数量高速增长主要有两个原因. 其一, 地方政府和当地部门监管执行力较差, 没有对当地牧民进行严格的草畜平衡核查, 导致牧民过度追求短期经济效益而加大牲畜饲养量. 其二, 目前我国禁牧以及草畜平衡等措施的实施仍存在很大问题. 理论上, 减畜所造成的损失和政府给予的经济补偿应该对等, 但当前补贴标准偏低^[35], 奖补标准远远低于草场的流转价格和牲畜市场的交易价格. 同时, 补贴发放方式也存在问题^[36], 据本研究调查的牧户证实, 越是人均草场面积大的地方和牧户, 得到的补贴就越多; 越是人均草场面积小的地区和牧户

得到的补贴越少. 而实际情况是, 超载过牧导致草地沙化退化的恰恰是人均草场面积少的牧户. 因此, 目前一律按面积发放补贴, 恰恰使那些最需休牧禁牧、最需要恢复草地生态的牧户得到的补贴最少. 另外, 牧民领补贴但不减畜的情况也普遍存在, 因此当前草畜平衡奖补政策在很多地方流于形式.

对此, 我们建议当地有关部门给予高度重视, 加大对牧民超载放牧的监管和执法力度, 严格落实地方性草原法规. 此外, 政府必须继续保持和改进现有的草原生态奖补政策, 不仅需要给牧民按时发放草场生态补偿金额, 还应该给予牧民相应的越冬饲草料补助, 在更大程度上减轻牧民的养殖成本. 政府还可以实施差别化奖励, 将奖励资金向中小牧户倾斜, 中小牧户的草畜平衡奖励标准可高于大牧户; 对于一些拿补贴但不减畜的牧民, 地区政府可将奖补资金统筹使用, 集中用于地区草原保护和牧民畜牧业基础设施建设方面. 具体的实施办法还需因地制宜, 结合当地存在的问题, 通过不断实践找到较有效的解决方法.

另外, 近几年本区域畜牧业养殖结构失衡, 不利于畜牧业高质量增长和草地生态持续改善. 当前羊“一畜独大”的单一养殖结构愈加明显, 区域内羊数量是牛数量的7倍. 造成畜牧业养殖结构失衡主要有两个原因. 其一, 养牛成本高而产量低, 导致家庭牧户经营风险高. 养牛不但初始投资过高, 养殖周期长, 且收益存在一定风险, 况且目前我国牛肉成本价过高, 在质量、价格和营销手段上与澳洲和日本等高端市场相比还有较大差距, 这导致大部分牧民选择养羊而很少养牛. 其二, 由于区域气候干旱化趋势严重, 据当地受调查的牧户表示, 在干旱期间, 因为天然牧草的短缺, 牧民们无法留住牛等大型动物, 因此被迫低价出售, 保留绵羊、山羊等小型家畜, 这些牲畜在草少的情况下不但可以生存, 而且灾后繁殖迅速, 便于重建牧群. 研究区域在经历1995和1996年连续干旱之后(图4), 牛的数量直线下降, 而绵羊和山羊的数量则翻了一番. 本团队在调查的40户牧民中发现了类似的趋势. 2019年平均每户家畜饲养数量为23头牛(占总头数的13%)和150头羊(占总头数的87%), 因此造成畜牧业产品供求严重结构性失衡. 面对当前畜牧业生产失衡问题, 政府应积极调节养殖结构, 引进牛奶加工厂以推进奶牛产业的振兴. 同时区域还可以适当增加马的数量, 目前内蒙古马奶产业具有广阔发展前景, 市场价已达到40元/斤, 马奶

易于人体吸收并具有降血脂等较好的生物学价值, 又可加工成酸奶和马奶酒进行销售. 因此区域内可大力发展马产业, 利用马奶乳制品加工厂, 生产出品牌马奶乳制品并推向市场, 不但可推动当地旅游业的发展, 使其创造更大的经济效益, 还可减缓区域内“一畜独大”的局面, 最终推进畜牧业均衡和可持续发展, 缓解区域放牧压力, 进而促进草原恢复.

除了过度放牧的问题, 开垦也是造成草地面积减少和草地退化的重要原因之一. 1956~2019年国有农场开垦面积剧烈波动, 这期间开垦面积的波动与国家农业政策的颁布和实施相吻合(图7). 从1912年到1949年, 大兴安岭林草交错带草地大多为地主所有, 放牧是草地利用的主要形式^[37]. 然而, 从1949年到1956年, 由于本区域工商业发展较快, 城市人口急剧膨胀, 商品粮食短缺, 而且政府粮食调拨体系的调配成本居高不下, 保障能力有限, 不能供应副食和蔬菜^[38]. 因此在1959~1961年间, 本区域大面积开垦草地, 形成了第一次开垦浪潮, 以解决粮食和副食蔬菜自给的问题. 在1995~2013年间, 国家开始大量投资农业基础设施以及实施粮食保护价收购政策^[39], 促进区域经历了第二次开垦浪潮, 导致2013年区域内农业发展水平显著上升至峰值. 2014年, 为加强生态文明建设, 国家出台实施新一轮退耕还林还草的决定, 并要求内蒙古等地退耕还林还草总面积达到 $400 \times 10^4 \text{ hm}^2$ ^[40], 为此农场草地开垦面积开始逐年下降. 虽然近几年两个地区正积极配合国家退耕还林还草生态建设项目, 不断增加草地、森林覆盖率, 降低区域内草地沙化面积, 但到目前为止, 区域内由农田退耕草地、林地的数量还远远弥补不了由于弃耕导致土地退化和水土流失所造成的损失^[41].

3.3 自然因素和人为因素综合影响区域草地退化

大兴安岭林草交错带草地退化是由多种因素及其相互作用或反馈造成的. 本研究确定了交错带草地退化受自然和人为因素的影响, 主要的驱动因素包括气温和降水的变化以及人类活动(放牧和开垦)变化等. 本研究发现, 在气候暖干旱的背景下, 过度放牧是导致区域草地退化的主导因素(图9, 网络版附图1), 这与我国北方其他高寒草地研究结果一致^[42~44]. 具体来说, 区域降水和温度的高变异性在草地退化过程中起着重要作用. 受区域气候暖干旱影响, 有毒、耐

旱杂草生物量会明显增加, 而禾草和莎草地上生物量减少, 杂草逐渐成为群落的优势种^[45], 草地逐渐朝向逆行演替方向发展. 与气候变化相比, 人类活动, 尤其是过度放牧是本交错带区域草地退化的主导因素. 由于交错带生态系统异常复杂, 实现精细的草畜平衡难度较大, 同时由于第三次草地奖补等新推行的政策还需要一定时间才能发生效力等问题, 这些因素都是当前限制大兴安岭林草交错带草地资源可持续利用和农牧业可持续发展的重要因素, 需要政策制定者、行政管理人员和学者的广泛注意、深入思考和认真研究.

4 结论

1957~2019年, 额尔古纳和陈巴尔虎旗年均温在 -3.5°C ~ 1.1°C , 增温趋势显著; 降水量在150~550 mm

呈剧烈式波动, 但2000年以后两个地区降水量呈明显下降趋势. 国有农场的家畜密度由建厂初期不足每公顷1个羊单位上升到现在每公顷2~5个羊单位, 而个人牧户的家畜密度从1980年每公顷0.5个羊单位增至2019年的每公顷7个羊单位. 随着土地利用政策变化, 区域农场的播种面积波动式上升至峰值, 在2015年以后表现逐年下降趋势. 目前在区域内气候逐渐变暖干旱化的背景下, 超载过牧是导致林草交错带草地退化的主要因素. 因此, 政府必须把草地的精准放牧管理提到议事日程, 加强草原监督管理体制建设, 将奖补资金集中统筹用于退耕还林还草和牧民畜牧业生产方面; 大力推进科技创新, 建立智慧牧场, 利用种植优良牧草以及补播改良等科学技术手段, 加大优质牧草生产, 促进区域内草地生态系统的良性循环, 最终实现大兴安岭林草交错带草地资源的可持续利用和农牧业可持续发展.

参考文献

- 1 You G, Liu B, Zou C, et al. Sensitivity of vegetation dynamics to climate variability in a forest-steppe transition ecozone, north-eastern Inner Mongolia, China. *Ecol Indic*, 2021, 120: 106833
- 2 Kitzberger T. Ecotones as complex areas of disturbance, climate, and human impacts: the Trans-Andean forest-steppe ecotone of Northern Patagonia. In: Myer R, ed. *Ecotones Between Forest and Grassland*. New York: Springer, 2012. 59–88
- 3 Li Z H, Bao Y J, Zhang J, et al. Comparative analysis on degradation and its driving factors in Xilin Gol grassland and Hulun Buir grassland (in Chinese). *J Dalian Natl Univ*, 2015, 17: 1–5 [李政海, 鲍雅静, 张靖, 等. 内蒙古草原退化状况及驱动因素对比分析-以锡林郭勒草原与呼伦贝尔草原为研究区域. *大连民族大学学报*, 2015, 17: 1–5]
- 4 Zhang F, Wang Q, Wang W J, et al. Analyzing land use change in ecotone between forest and grassland in Inner Mongolia (in Chinese). *Resour Sci*, 2006, 28: 52–58 [张峰, 王桥, 王文杰, 等. 内蒙古森林草原交错带土地利用变化的区域差异特征分析. *资源科学*, 2006, 28: 52–58]
- 5 Ma Z G, Fu C B. Basic facts of aridity in northern China from 1951 to 2004 (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2006, 51: 2429–2439 [马柱国, 符淙斌. 1951~2004年中国北方干旱化的基本事实. *科学通报*, 2006, 51: 2429–2439]
- 6 Wang Q, Zeng J, Leng S, et al. The effects of air temperature and precipitation on the net primary productivity in China during the early 21st century. *Front Earth Sci*, 2018, 12: 818–833
- 7 Zhang Y, Wang Q, Wang Z, et al. Impact of human activities and climate change on the grassland dynamics under different regime policies in the Mongolian Plateau. *Sci Total Environ*, 2020, 698: 134304
- 8 Li A, Wu J, Zhang X, et al. China's new rural "separating three property rights" land reform results in grassland degradation: evidence from Inner Mongolia. *Land Use Policy*, 2018, 71: 170–182
- 9 Hulun Buir Statistics Bureau. Analysis on annual livestock growth in Hulun Buir in 2016 (in Chinese). Hulun Buir: Bureau of Statistics, 2018 [呼伦贝尔统计局. 呼伦贝尔市2018年畜牧业年度牲畜头数增长情况分析. 呼伦贝尔: 市统计局, 2018]
- 10 Hulun Buir Forestry and Grassland Bureau. Grassland monitoring report of Inner Mongolia Autonomous Region in 2019 (in Chinese). Hulun Buir: Forestry and Grassland Bureau, 2019 [呼伦贝尔林业和草原局. 2019年内蒙古自治区草原监测报告. 呼伦贝尔: 市林业和草原局, 2019]
- 11 Foley J A, Defries R, Asner G P, et al. Global consequences of land use. *Science*, 2005, 309: 570–574
- 12 Hulun Buir Statistics Bureau. Analysis on the sown area of crops in Hulun Buir in 2018 (in Chinese). Hulun Buir: Bureau of Statistics, 2018 [呼伦贝尔统计局. 呼伦贝尔市2018年农作物播种面积. 呼伦贝尔: 市统计局, 2018]

- 13 Bian X M, Zhang J C, Yu X H, et al. Records of Shangkuli Farm of Hailaer Farm Management Bureau (in Chinese). Hailar: Inner Mongolia Culture Press, 2015. 246–310 [边向民, 张建成, 于航航, 等. 海拉尔农场管理局上库力农场场志. 海拉尔: 内蒙古文化出版社, 2015. 246–310]
- 14 Zuo Y G, Zhao Y, Li Z G, et al. Records of Suqin Farm of Hailaer Farm Management Bureau (in Chinese). Hailar: Inner Mongolia Culture Press, 2015. 141–200 [左彦光, 赵艳, 李志刚, 等. 海拉尔农场管理局苏沁农场场志. 海拉尔: 内蒙古文化出版社, 2015. 141–200]
- 15 Hu Y H. Records of Haote Taohai Ranch of Hailaer Farm Management Bureau (in Chinese). Hailar: Inner Mongolia Culture Press, 2015. 196–232 [胡永红. 海拉尔农场管理局浩特陶海牧场场志. 海拉尔: 内蒙古文化出版社, 2015. 196–232]
- 16 Li Y P, Na R S, Liu P T, et al. The remote sensing monitoring of grassland degradation and climate causes in Hulun Buir grassland (in Chinese). *Acta Agric Boreali-Sin*, 2006, 21: 56–61 [李云鹏, 娜日苏, 刘朋涛, 等. 呼伦贝尔草原退化遥感监测与气候成因. 华北农学报, 2006, 21: 56–61]
- 17 Hulunbuir Forestry Bureau. Monitoring report on grassland degradation area in Hulun Buir city in 2019 (in Chinese). Hulun Buir: Forestry Bureau, 2019 [呼伦贝尔市林业局. 2019年呼伦贝尔市草原退化面积监测报告. 呼伦贝尔: 市林业局, 2019]
- 18 IPCC. Special Report on Global Warming of 1.5°C. Cambridge: Cambridge University Press, 2018
- 19 Wu Y, Luo W, Pei H, et al. Climate change and the effect on the biomass growth in steppe communities in Kherlon River Basin, Northern China. *Acta Ecol Sin*, 2012, 32: 215–220
- 20 Weiskopf S R, Rubenstein M A, Crozier L G, et al. Climate change effects on biodiversity, ecosystems, ecosystem services, and natural resource management in the United States. *Sci Total Environ*, 2020, 733: 137782
- 21 Jeong S J, Ho C H, Gim H J, et al. Phenology shifts at start vs. end of growing season in temperate vegetation over the Northern Hemisphere for the period 1982–2008. *Glob Change Biol*, 2011, 17: 2385–2399
- 22 Wolkovich E M, Cook B I, Allen J M, et al. Warming experiments underpredict plant phenological responses to climate change. *Nature*, 2012, 485: 494–497
- 23 Xia J, Wan S. The effects of warming-shifted plant phenology on ecosystem carbon exchange are regulated by precipitation in a semi-arid grassland. *PLoS ONE*, 2012, 7: e32088
- 24 Menzel A, Fabian P. Growing season extended in Europe. *Nature*, 1999, 397: 659
- 25 Misson L, Degueldre D, Collin C, et al. Phenological responses to extreme droughts in a Mediterranean forest. *Glob Change Biol*, 2011, 17: 1036–1048
- 26 Volder A, Briske D D, Tjoelker M G. Climate warming and precipitation redistribution modify tree-grass interactions and tree species establishment in a warm-temperate savanna. *Glob Change Biol*, 2013, 19: 843–857
- 27 Zeppel M J B, Wilks J V, Lewis J D. Impacts of extreme precipitation and seasonal changes in precipitation on plants. *Biogeosciences*, 2014, 11: 3083–3093
- 28 Anwar M R, Liu D L, Farquharson R, et al. Climate change impacts on phenology and yields of five broadacre crops at four climatologically distinct locations in Australia. *Agric Syst*, 2015, 132: 133–144
- 29 Chen C, Park T, Wang X, et al. China and India lead in greening of the world through land-use management. *Nat Sustain*, 2019, 2: 122–129
- 30 Fang J Y. Grassland and pastoral areas in China call for a new model of grassland development (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2016, 61: 137–138 [方精云. 我国草原牧区呼唤新的草业发展模式. 科学通报, 2016, 61: 137–138]
- 31 Wu J, Zhang Q, Li A, et al. Historical landscape dynamics of Inner Mongolia: patterns, drivers, and impacts. *Landsc Ecol*, 2015, 30: 1579–1598
- 32 Sun B Y, Jia X F, Huang H, et al. Decision-making and management system based on internet of things for Hulun Buir State Farm (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2018, 63: 1703–1710 [孙丙宇, 贾秀芳, 黄河, 等. 基于物联网的草牧业管理决策系统在呼伦贝尔农垦的应用. 科学通报, 2018, 63: 1703–1710]
- 33 Chen J G. Application of intelligent management system in pasture (in Chinese). *China Dairy*, 2020, 224: 57–59 [陈继国. 智慧管理系统在牧场的应用. 中国乳业, 2020, 224: 57–59]
- 34 Fang J Y, Jing H C, Zhang W H, et al. The concept of “Grass-based Livestock Husbandry” and its practice in Hulun Buir, Inner Mongolia (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2018, 63: 1619–1631 [方精云, 景海春, 张文浩, 等. 论草牧业的理论体系及其实践. 科学通报, 2018, 63: 1619–1631]
- 35 Liu A J. Analysis on the incentive effect and problems of grassland ecological protection subsidy in Inner Mongolia (in Chinese). *Grassland Pratacult*, 2014, 26: 4–8 [刘爱军. 内蒙古草原生态保护补助奖励效应及其问题解析. 草原与草业, 2014, 26: 4–8]
- 36 Grassland Supervision and Administration of Inner Mongolia. Investigation report on typical herdsmen of grassland ecological protection subsidy and reward mechanism (in Chinese). *Grassland Pratacult*, 2014, 26: 17–22 [内蒙古自治区草原监督管理局. 草原生态保护补助奖励机制典型

牧户调查报告. 草原与草业, 2014, 26: 17–22]

- 37 Hao W M. The History of Inner Mongolia (in Chinese). Beijing: People's Press, 2011 [郝维民. 中文书名. 北京: 人民出版社, 2011]
- 38 Chen D L. An investigation of the “Three Years of Natural Disaster” from the viewpoint of disaster economics (in Chinese). *Contemp China History Stud*, 2004, 1: 83–93 [陈东林. 从灾害经济学角度对“三年自然灾害”时期的考察. 当代中国史研究, 2004, 1: 83–93]
- 39 Wang B, Gao P, Niu X, et al. Policy-driven China's Grain to Green Program: implications for ecosystem services. *Ecosyst Serv*, 2017, 27: 38–47
- 40 Wang Q. In 20 years, China will return 500 million mu of farmland to forest and grassland (in Chinese). *Natl Afforest*, 2019, 7: 5–6 [王琪. 20年, 全国退耕还林还草5亿亩. 国土绿化, 2019, 7: 5–6]
- 41 Lu Z Y, Zhang X Q, Cheng Y C, et al. Analysis of the current situation of farmland degradation and the prospects for application of ecological conservation technology in the north Agro-pasture zigzag zone (in Chinese). *North Agric*, 2018, 46: 93–97 [路战远, 张向前, 程玉臣, 等. 北方农牧交错区农田退化现状及生态保育技术应用前景分析. 北方农业学报, 2018, 46: 93–97]
- 42 Gao Y Z, Giese M, Lin S, et al. Belowground net primary productivity and biomass allocation of a grassland in Inner Mongolia is affected by grazing intensity. *Plant Soil*, 2008, 307: 41–50
- 43 Wang Z, Zhang Y, Yang Y, et al. Quantitative assess the driving forces on the grassland degradation in the Qinghai-Tibet Plateau, in China. *Ecol Inf*, 2016, 33: 32–44
- 44 Gao Y Z, Han X G, Wang S P. The effects of grazing on grassland soils (in Chinese). *Acta Ecol Sin*, 2004, 24: 627–635 [高英志, 韩兴国, 汪诗平. 放牧对草原土壤的影响. 生态学报, 2004, 24: 790–797]
- 45 Gao Y Z, Giese M, Han X G, et al. Land use and drought interactively affect interspecific competition and species diversity at the local scale in a semiarid steppe ecosystem. *Ecol Res*, 2009, 24: 627–635

Analysis of causes of forest-steppe ecotone degradation and counter-measures in the Greater Xing'an Range

QIAN Rui¹, DUAN XinYu¹, YANG HaiJun², FENG YuanYuan¹, XU WangGu³, QU Chang³,
WANG Zhi³, LI GuiCai⁴, LI Ang⁵ & GAO YingZhi^{1,6}

1 Institute of Grassland Science, Key Laboratory of Vegetation Ecology of the Ministry of Education, State Environmental Protection Key Laboratory of Wetland Ecology and Vegetation Restoration, Jilin Songnen Grassland Ecosystem National Observation and Research Station, Northeast Normal University, Changchun 130024, China;

2 Research Center for Ecology and Management of Erhai Streams, Yunnan University and Dali University, Kunming 650504, China;

3 Key Laboratory of Biosafety, State Environmental Protection Scientific Observation and Research Station for Ecology and Environment of Wuyi Mountains, Nanjing Institute of Environmental Sciences, Ministry of Ecology and Environment, Nanjing 210042, China;

4 National Satellite Meteorological Centre, Beijing 100081, China;

5 State Key Laboratory of Vegetation and Environmental Change, Institute of Botany, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100093, China;

6 Key Laboratory of Grassland Resources and Ecology of Western Arid Desert Area of the Ministry of Education, College of Grassland Science, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China

Due to climate fluctuations and increased land-use intensity owing to agriculture and animal grazing in recent years, the grasslands in the forest-steppe ecotone of northern China have dramatically degraded. The impacts of climate change and human activities on grassland degradation in the forest-steppe ecotone have not been adequately documented—especially using long-term data. In this paper, using 63-year long-term land-use change and meteorological data of Argun city and Chenbarhu Banner, we analyzed what factors have led to grassland degradation in the forest-steppe ecotone of the Greater Xing'an Range. Results showed that from 1957 to 2019, the mean annual temperature significantly increased from 2.9°C to 3.1°C in Argun city and Chenbarhu Banner. The mean annual precipitation fluctuated dramatically between 150 and 550 mm, with precipitation exhibiting an overall decreasing trend from 2000 to 2019. The livestock density increased greatly among different business entities. The average livestock density increased from less than 1 standard sheep unit/hm² to 2–5 standard sheep unit/hm² in the state-owned farms, while the average livestock density of individual herdsman increased from 0.5 standard sheep unit/hm² in 1980 to 7 standard sheep unit/hm² in 2019, resulting in a serious grass-livestock imbalance. The reclaimed areas of Shangkuli farm and Taohai pasture fluctuated upward, peaking at 37000 and 7000 hm² respectively in 2014. Since then, the reclaimed areas have decreased due to the policy of returning farmland to forest. The results of principal component analysis (PCA) using climate, grazing, reclamation, and grassland degradation in this area showed that overgrazing was the dominant factor leading to grassland degradation in the ecotone under scenarios of regional climate warming and drought. These findings suggest the need to strengthen the construction of grassland supervision and management systems to cope with the dual pressures of regional climate change and land degradation. The reward and subsidy funds from the central government should be used to return farmland to forest and grassland and herdsman's animal husbandry. Furthermore, we suggest that local governments establish multiple species artificial grasslands and adopt new technologies to restore and reconstruct degraded grassland to achieve sustainable utilization of grassland resources in the forest-steppe ecotone of northern China.

forest-steppe ecotone, climate change, human factors, grassland degradation, countermeasures

doi: 10.1360/SSV-2021-0303