

doi: 10.6046/zrzyyg.2023235

引用格式: 刘文慧, 李欣焯, 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.)

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

刘文慧, 李欣焯, 李晓燕

(吉林大学地球科学学院, 长春 130012)

摘要: 草地生态系统是陆地生态系统中最重要、分布最广的生态系统类型之一, 分析草地退化及其影响因素, 对草地资源保护与利用、退化生态系统恢复与重建具有极其重要的指导意义。该文采用面向对象分类和多层次决策树方法提取了松嫩平原西部草地分布信息, 综合考虑植被和土壤退化情况, 基于 Landsat TM 影像数据构建了 2000—2020 年偶数年份共 11 年的草地退化综合遥感指数, 对草地退化程度进行了时空动态评价; 以标准化降水蒸散指数(standardized precipitation evapotranspiration index, SPEI)作为评价干旱的指标, 分析草地退化程度对气候干旱时空变化的响应。结果表明: 2000—2020 年松嫩平原西部草地由 105.17 万 hm^2 减少到 102.47 万 hm^2 , 年减少率为 0.1%。草地退化趋势表现为不显著下降, 81.7% 的草地退化趋势表现为保持稳定或趋于减轻; 春、夏季 SPEI 均呈上升趋势, 干旱程度趋于减轻且区域差异性显著; 草地退化指数与春、夏季 SPEI 整体呈不显著正相关。此研究结果可为松嫩平原西部草地保护及可持续利用提供数据支撑, 对松嫩平原西部草地生态效益及经济效益的调控具有积极的意义。

关键词: 草地退化; 综合遥感指数; SPEI; 干旱程度; 松嫩平原西部

中图法分类号: TP 79 **文献标志码:** A **文章编号:** 2097-034X(2025)01-0232-11

0 引言

草地生态系统是陆地生态系统中最重要、分布最广的生态系统类型之一, 在碳素固持、水源涵养方面发挥着重要的作用^[1-2]。由于气候变化和人类活动的影响, 草原退化成为全球性的环境生态问题之一^[3]。在我国, 20 世纪 60 年代以来, 草原生态系统普遍出现了退化现象, 约有 90% 以上草原处于不同程度的退化之中^[4]。相关研究表明, 2000—2013 年间, 全球近 39.6% 的草原面积经历了退化, 退化面积为 $2.29 \times 10^7 \text{ km}^2$ ^[3]。草地退化会改变植物的生存策略, 影响草地群落的结构、功能和生态稳定性^[5-6]。区域尺度草地退化监测与评价、草地恢复与重建已成为全球变化和可持续性科学研究的重要内容。深入研究草地退化及其驱动因素是国家生态安全屏障建设的关键之一, 具有重要的理论价值和现实意义。

草地退化是一个复杂的生态过程^[7], 传统草地

退化研究主要是依靠野外考察与定点观测, 往往需要耗费巨大的人力物力, 不适用于大尺度区域的研究且时效性较差。遥感技术的发展为区域尺度草地退化的监测提供了新的手段, 但现有研究中多采用单一植被指标如净初级生产力(net primary productivity, NPP)^[8]或单一的土壤指标^[9]来反映草地退化的程度和趋势。由于草地退化类型和表现的复杂性, 单一指标不能全面、科学地反映草地的退化, 考虑植被、土壤因素的综合遥感指标在草地退化研究中的应用正处于探索阶段^[10]。

草地退化受到气候变化和人类活动等多方面的影响, 有研究表明干旱的发生会对草本植物的生长造成严重影响^[11]。随着全球气候变暖, 气候干旱对草地退化的影响受到了更多的关注。国内外学者在草地退化对干旱的响应方面进行了不同程度的研究, 但多集中在单一气候因子(气温和降水)与植被的相关关系分析上^[8, 12], 且研究的时间尺度单一, 不能综合反映气象干旱的变化。帕默尔干旱强度指数(Palmer drought severity index, PDSI)和标准化降水

收稿日期: 2023-08-02; 修订日期: 2023-11-21

基金项目: 国家自然科学基金项目“综合植被与土壤信息的松嫩平原西部草地退化遥感评价模型研究”(编号: 42171328)资助。

第一作者: 刘文慧(2001-), 女, 硕士研究生, 主要从事土地资源管理研究。Email: liuwenhui_w@163.com。

通信作者: 李晓燕(1975-), 女, 博士, 教授, 主要从事土地资源遥感及地理信息系统应用研究。Email: lxyan@jlu.edu.cn。

指数(standardized precipitation index, SPI)等干旱指数先后被提出,这些干旱指数能够综合反映气候变化和干旱程度,但都具有一定的局限性。标准化降水蒸散指数(standardized precipitation evapotranspiration index, SPEI)考虑了温度和降水对干旱的共同影响,计算简便且具有多尺度特征^[13],在气象干旱的表征上精度明显优于PDSI和SPI等干旱指数,在区域干旱的研究中被广泛应用。

松嫩平原西部草地位于我国东北,处于欧亚草原的最东部,是东北黑土区重要的绿色生态屏障和我国北方重要的牧草产区之一。由于该区纬度较高,对全球气候变化比较敏感,且地处水汽辐射区,同时易受孟加拉湾和日本海的水汽带影响,易发生干旱事件^[14]。干旱成为影响松嫩平原西部草地退化的重要因素,不仅影响着该地区草地的生态功能,也影响着草地资源的可持续利用和牧草生产的稳定发展,松嫩平原西部草地退化及气候变化的影响成为学者们关注的焦点。当前松嫩平原西部草地的研究主要集中在退化草地恢复演替特征^[15]、不同管理措施下草地恢复特征^[16]及多源遥感下草地景观结构与功能变化^[17]、草地植被变化及退化监测^[18]。本研究采用面向对象分类方法提取了2000年、2005年、2010年、2015年、2020年的草地分布信息,以草地不变区域为范围,基于2000—2020年偶数年份共11 a的Landsat TM数据,综合考虑植被与土壤退化情况,构建了草地退化综合遥感指数(grassland degradation index, GDI),对草地退化程度进行了时空动态分析;并以SPEI作为评价干旱的指标,分析草地退化程度对气候干旱时空变化的响应。研究可为松嫩平原西部草地保护及可持续利用提供数据支撑,对松嫩平原西部草地生态效益及经济效益的调控具有积极意义。

1 研究区概况及数据源

1.1 研究区概况

松嫩平原西部草地位于中国东北地区中部(N44°00′~48°35′, E121°36′~126°36′),包括黑龙江、吉林2省西部地区共22个县市,区域土地总面积为1 015.12万 hm^2 (图1)。该平原主要由松花江、嫩江及其支流常年冲积而形成,周围漫岗低丘和岗丘间洼地组成其平原地貌。松嫩平原地处中国湿润季风区与内陆干旱区之间的过渡带,属于半干旱半湿润气候,为气候变化敏感区。年平均气温4~6℃,年平均降水量300~600 mm,80%的降雨集中在5—9月,且蒸发量大于降水量。研究区内草地面

积约占土地总面积的32.5%,是全国八大牧区之一。地带性植被属于温带草甸草原,草地类型主要有典型草原和草甸草原(其中典型草原占比46.5%,草甸草原占比53.5%),以中旱生根茎植物和丛生禾草为主^[8]。

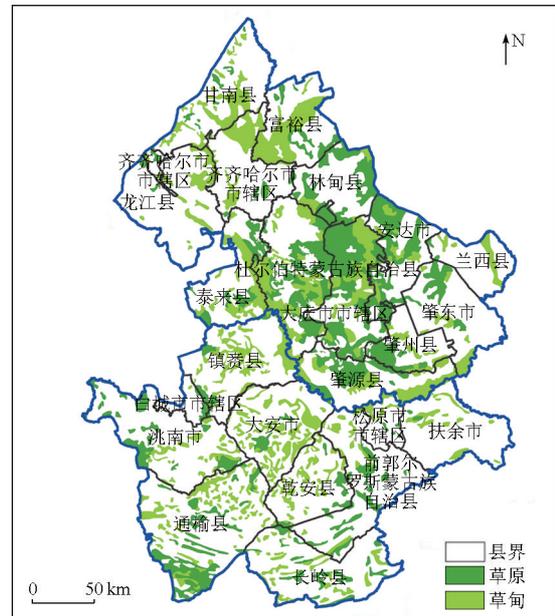


图1 研究区位置

Fig.1 Geographical location of the study region

1.2 数据源及其预处理

影像数据来源于美国地质调查局(United States Geological Survey, USGS)(<https://earthexplorer.usgs.gov/>),选择2000—2020年偶数年份生长季覆盖研究区域的Landsat TM影像共22景,云量小于3%,空间分辨率为30 m。基于ENVI 5.3平台,对数据进行了条带去除、辐射定标、大气校正等预处理,对同期数据拼接后采用研究区边界进行了裁剪,得到研究区11期影像数据,用于草地退化综合指数的构建。此外,下载了2005年和2015年的影像用于草地及信息的提取。

NPP为MOD15A2H数据产品,该数据为年合成产品,空间分辨率为500 m,单位为 $\text{kg} \cdot \text{C}/\text{m}^2$ 。基于ArcGIS软件,对数据批量去除无效值,并裁剪至研究区域。植被类型数据为1:100万全国植被类型矢量数据,来源于中国科学院植物科学数据中心(<https://www.plantplus.cn/cn/dataset/615148B31E9C1F17>),对数据根据研究区范围进行裁剪后提取了不同草地类型。

气温、降水数据来源于中国气象数据网(<http://data.cma.cn>),为2000—2020年逐月数据,空间分辨率为1 km。在ArcGIS中,将栅格转为点数据,在

R语言中计算了干旱指数 SPEI。

2 研究方法

2.1 草地范围提取

选择 2000 年、2005 年、2010 年、2015 年、2020 年这 5 a 的 Landsat TM 遥感影像数据,基于 eCognition 8.9 平台,通过多尺度分割方法对遥感影像进行分割,对各个对象进行特征提取,使用决策树算法对训练样本进行自动知识挖掘,然后利用建立的分类模型和决策树进行面向对象分类,分割尺度为 20,得到 5 个年份的草地分布数据,精度分别为 90.2%,

$$GDI = PCA((1 - NPP), SI, albedo, (1 - LSM)) , \quad (1)$$

$$SI = \sqrt{\rho_{Red} \rho_{Green}} , \quad (2)$$

$$albedo = 0.356 \rho_{Blue} + 0.130 \rho_{Red} + 0.373 \rho_{NIR} + 0.085 \rho_{SWIR1} + 0.072 \rho_{SWIR2} - 0.01 , \quad (3)$$

$$LSM = 0.0315 \rho_{Blue} + 0.2021 \rho_{Green} + 0.3102 \rho_{Red} + 0.1594 \rho_{NIR} - 0.6806 \rho_{SWIR1} - 0.6109 \rho_{SWIR2} , \quad (4)$$

式中: $PCA()$ 为主成分分析; ρ_{Blue} , ρ_{Red} , ρ_{NIR} , ρ_{SWIR1} 和 ρ_{SWIR2} 分别为 Landsat TM 影像的蓝色、红色、近红外和 2 个短波红外波段反射率。

NPP 是评估植被生态系统的重要指标,能够有效反映植物群落在自然环境状态下的生产能力。其本质是绿色植物在单位面积和时间积累的有机物数量,表现为光合作用固定的有机碳扣除植物本身呼吸消耗部分^[21]。一般认为,NPP 越大,草地退化程度越轻^[22]。SI 指数可以反映土壤盐碱化程度,SI 越大,草地退化程度越重。地表反照率体现了地表吸收的太阳辐射量,是与土壤暴露有关的一个关键物理参数,一般来说,由于植被稀疏和土壤裸露,裸地或盐碱化地区的反照率较高,而植被覆盖率高的地区反照率较低。LSM 对调节植被生产力至关重要,可通过缨帽变换获得,它直接影响区域土地退化。

研究使用主成分分析方法综合 NPP, SI, albedo 和 LSM 来构建 GDI。首先对各指标采用极差法进行标准化,其中 NPP 和 LSM 为逆向指标,标准化后采用 $(1-NPP)$ 和 $(1-LSM)$ 的方法进行计算,然后以各指标的公因子方差作为权重系数,构建 GDI。GDI 值越大,表明草地退化程度越严重。

2.3 SPEI

SPEI 由 Vicente-Serrano 等提出^[13],该指数通过计算月降水量与潜在蒸散的差值并使用三参数的 Log-logistic 概率分布处理得到。SPEI 可以在不同时间尺度上进行计算,并且考虑了气温和降水对干旱的综合影响,能够提供有关气候干旱条件的客观信息。

92.4%, 89.9%, 93.6% 和 92.8%。提取 2000—2020 年间草地不变的范围作为草地退化及气候变化分析的区域。

2.2 GDI 指数的构建

草地退化是指气候或人为干扰超出草地生态系统本身的自我调节阈值,使其难以恢复并出现逆向演替变化的现象^[19]。盐碱化是限制研究区草地生产力的重要因素之一。参考已有研究^[20]并考虑研究区的实际情况,选择 NPP、盐碱指数 (salinized index, SI)、地表反照率 (albedo)、地表土壤水分指数 (land surface soil moisture index, LSM) 构建 GDI。计算公式如下:

研究以 3 个月为尺度,分别计算了春季和夏季的 SPEI 指数。SPEI 值越小,表明干旱越严重。一般情况下,SPEI 表征的干旱程度分级见表 1。

表 1 基于 SPEI 指数的干旱分级

Tab.1 Drought classification based on SPEI

SPEI	>-0.5	(-1, -0.5]	(-1.5, -1]	(-2, -1.5)	≤-2
分级	无旱	轻度干旱	中度干旱	重度干旱	极度干旱

2.4 趋势分析

采用一元线性回归分析的方法对区域内草地退化趋势和干旱趋势在时间尺度上的变化进行分析。其中,回归方程的斜率 $slope$ 代表研究时段内每个栅格点的 GDI 或 SPEI 的变化趋势。若 $slope > 0$, 代表该栅格内草地退化加重或 SPEI 增加,且数值越大说明草地退化程度和 SPEI 值增加的速度越快;若 $slope < 0$, 则表明该栅格内草地退化程度和 SPEI 值减小;若 $slope = 0$, 则表示草地退化和干旱状况无变化^[23], 计算公式为:

$$slope = \frac{n \sum_{i=1}^n (i \theta_i - \sum_{i=1}^n i \sum_{i=1}^n \theta_i)}{n \sum_{i=1}^n i^2 - (\sum_{i=1}^n i)^2} , \quad (5)$$

式中: $slope$ 为趋势线的斜率; n 为时间序列的长度; i 为第 i 年; θ_i 为第 i 年 GDI 指数或第 i 年 SPEI 指数。

2.5 空间相关分析

Pearson 相关分析常用于检验变量间的相互关系,本文将 GDI 分别与春季和夏季的 SPEI 进行逐

像元空间相关性分析,结合 t 检验(p 值),以比较 GDI 与春季、夏季干旱的相关关系,使用 MATLAB 和 ArcGIS10.8 软件进行数据处理和计算,分析草地退化对干旱的响应,空间相关性计算公式为:

$$R_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}}, \quad (6)$$

$$t = \frac{R}{\sqrt{\frac{1-R^2}{n-R}}}, \quad (7)$$

式中: R_{xy} 为 GDI 与 SPEI 的相关系数; n 为时间序

列的长度,本研究中为 2000—2020 年中的偶数年份,共 11 a; x_i 和 y_i 分别表征第 i 年每个像元的 GDI 与 SPEI; t 为检验统计量。

3 结果与分析

3.1 2000—2020 年间草地时空变化

研究区域内草地的分布表现出显著的空间异质性,草地主要分布在南部以及东北部,且吉林省草地面积大于黑龙江省。其中,大安市草地分布最为广泛,其次是通榆县、镇赉县、安达市和大庆市,5 个县市草地面积之和占区域草地总面积的一半以上,其余县市内草地分布较为分散(图 2)。

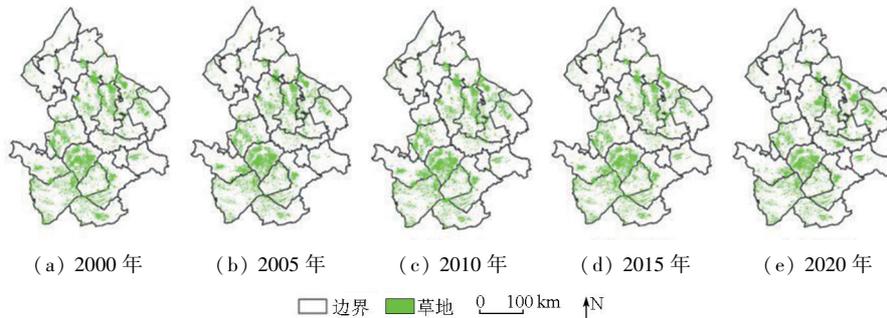


图 2 松嫩平原西部草地分布图

Fig.2 Grassland distribution in western Songnen Plain

2000—2020 年松嫩平原西部草地面积变化如图 3 所示。2000 年以来,草地面积变化具有波动性,2005 年草地面积最大,为 113.28 万 hm^2 ,占区域总面积的 11.2%,2015 年草地面积最小,为 101.21 万 hm^2 ,占区域总面积 10.0%。2000—2020 年间草地面积呈现增大—减小—增大的趋势:2000—2005 年间,草地面积大幅度增加,增加面积为 8.11 万 hm^2 ,年增长率为 1.5%;2005—2015 年间草地面积逐年减少,共减少面积 12.07 万 hm^2 ,年减小率为 1.1%;2015—2020 年间草地面积增加了 1.26 万 hm^2 ,年增长率为 0.3%。总体来看,2000—2020 年松嫩平原西部草地由 105.17 万 hm^2 减少到 102.47 万 hm^2 ,年

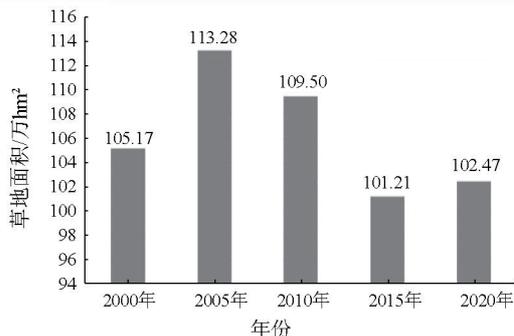


图 3 2000—2020 年草地面积

Fig.3 Statistic of grassland area during 2000—2020

减少率为 0.1%。

3.2 GDI 时空分布

3.2.1 GDI 空间分布特征

通过计算 2000—2020 年松嫩平原西部 GDI 指数均值(图 4),得到各像元退化程度。2000—2020 年草地退化指数在区域内整体水平较高,在空间上呈差异分布。GDI 最高为 0.73,高 GDI 主要分布在研究区南部吉林省大安市、洮南市、通榆县、乾安县内;GDI 最低为 0.25,低 GDI 主要分布在研究区

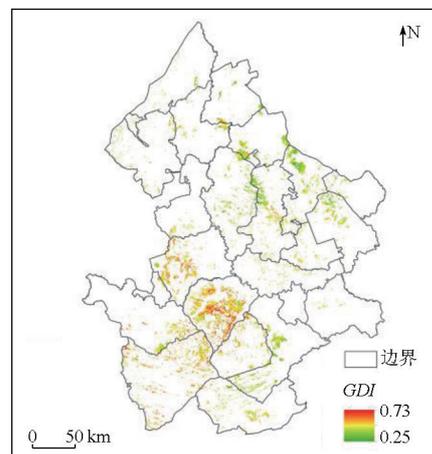


图 4 GDI 空间分布

Fig.4 Spatial distribution of GDI

北部黑龙江省大庆市、安达市内。研究区内草地退化程度总体上较高,且吉林省草地退化程度大于黑龙江省。

3.2.2 GDI 时间变化特征

计算各年 GDI 均值并进行统计分析(图 5)。2000—2020 年松嫩平原草地退化程度总体呈下降趋势,分为明显的 2 个阶段:2000—2010 年草地退化程度整体呈上升趋势,2010—2020 年草地退化程度整体呈下降趋势。各年 GDI 在 0.361~0.697 之间变化,均值为 0.497,最高值和最低值分别发生在 2010 年和 2014 年。

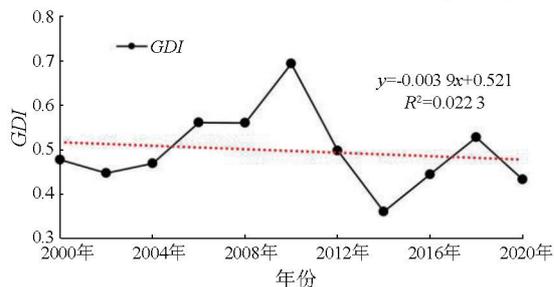


图 5 GDI 年际变化

Fig.5 Interannual variation of GDI

根据 2000—2020 年逐像元草地退化动态演变趋势,将退化程度分为 5 级(图 6):快速减轻(<-0.01)、缓慢减轻($[-0.01, -0.005)$)、保持稳定($[-0.005, 0.005)$)、缓慢加重($[0.005, 0.01)$)、快速加重(≥ 0.01)。整体来看, $2.61 \times 10^5 \text{ hm}^2$ 的草地退化程度保持在一个稳定状态,占研究区草地总面积的 41.7%,在整个研究区域内广泛分布;其次是退化程度快速减轻和缓慢减轻的草地,分别占比 23.4%

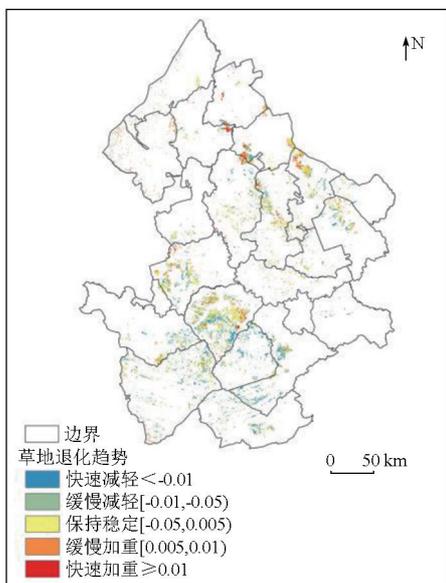


图 6 草地退化趋势空间分布图

Fig.6 Spatial distribution for grassland degradation trend

和 16.6%,主要分布在研究区域南部吉林省大安市、洮南市、通榆县、乾安县等县市内;草地退化程度缓慢加重和快速加重的区域占比较小,分别为 11.5% 和 6.8%,分布比较分散,在研究区域北部黑龙江省齐齐哈尔市市辖区、林甸县、杜尔伯特蒙古族自治县内有连片分布。从整个研究区来看,草地退化趋势减轻和稳定面积最大,为 $5.12 \times 10^5 \text{ hm}^2$,占草地总面积的 81.7%,表明近年来,研究区内草地退化情况呈现稳定或者良性的改善趋势。具体数据见表 2。

表 2 草地退化趋势各级别面积及占比

Tab.2 Area and proportion of grassland degradation trend for each level

草地退化趋势	面积/hm ²	占比/%
快速减轻	146 514.90	23.40
缓慢减轻	104 126.90	16.60
保持稳定	260 866.10	41.66
缓慢加重	72 053.55	11.50
快速加重	42 453.63	6.78

3.3 SPEI 时空变化特征

3.3.1 干旱空间分布特征

以 1 个月为时间尺度,逐像元统计 2000—2020 年松嫩平原西部春夏 2 季轻旱、中旱、重旱、极旱发生的次数并计算其发生干旱的概率,得到研究区春夏 2 季干旱频率空间分布图(图 7)。研究区内不同等级干旱发生频率表现出较大的差异性。

春季轻旱发生频率为 9.1%~27.3%,频率平均值为 17.8%,其中白城市市辖区干旱频率均达到 21%以上,研究区东北部轻旱发生频率显著高于西南部;中旱发生频率在 0~15.15%,频率平均值为 5.6%,主要集中在龙江县和扶余市,北部整体低于南部;重旱发生频率在 1.51%~12.12%,频率平均值为 8.4%,其中频率为 2%~6%的区域呈斑块状分布在龙江县、洮南市和扶余市;极旱发生频率在 0~3.0%,平均为 0.2%,极旱频率 3%的仅分布在肇源县和龙江县区域,其余大部分区域无极旱发生。

夏季轻旱发生频率为 4.6%~18.7%,平均值为 11.2%,其中白城市市辖区干旱频率均达到 21%以上;中旱发生频率在 3.0%~23.0%,平均值为 12.2%,龙江县和扶余市为 2 个明显的高频极值中心,由此向外频率逐级递减;重旱发生频率在 0~12.1%,平均值为 6.4%,齐齐哈尔市市辖区为极低值中心,由此向外频率逐级递增;极旱发生频率在 0%~3.0%,平均为 0.1%。

除个别地区外,春季和夏季极度干旱发生频率极低。春季重度干旱发生频率显著高于夏季,中度干旱发生频率整体低于夏季,轻度干旱发生频率整

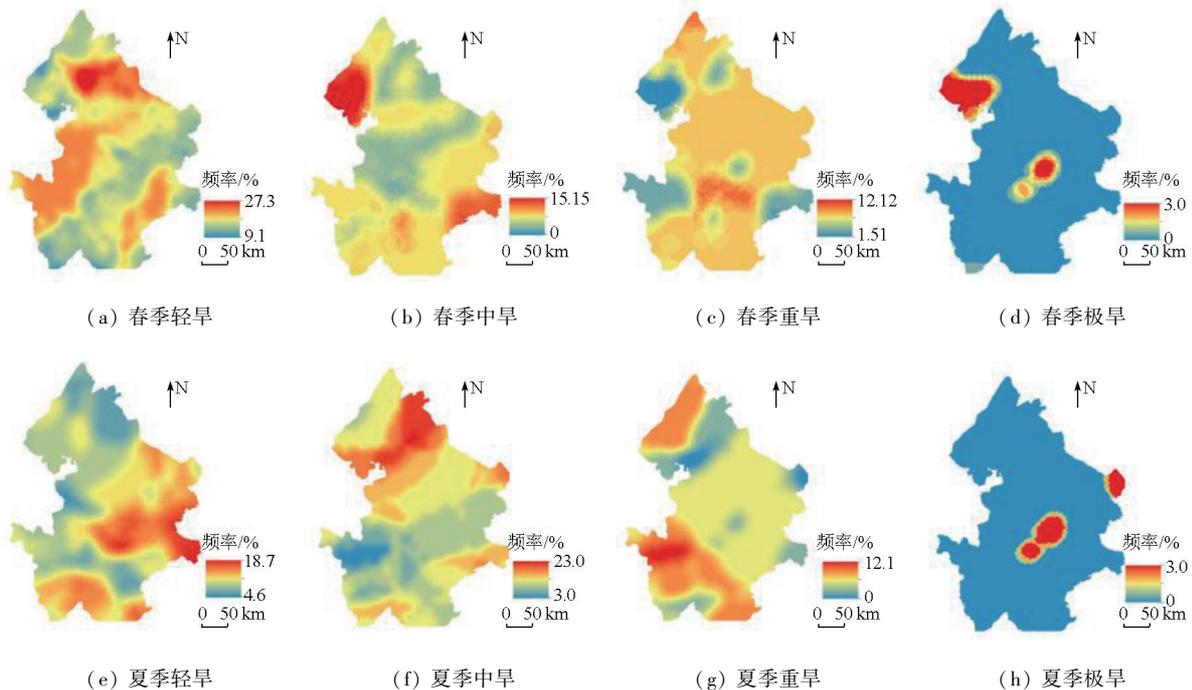


图 7 2000—2020 年松嫩平原西部干旱频率空间分布

Fig.7 Spatial distribution of drought frequency in western Songnen Plain during 2000—2020

体高于夏季。综合来看,松嫩平原西部春季轻旱、重旱发生频率均高于中旱、极旱频率;夏季轻旱、中旱发生频率均高于重旱、极旱频率。

3.3.2 干旱时间变化特征

为揭示研究区气象干旱的时间演化特征和干旱在不同季节的年际变化,以 3 个月为时间尺度,对 2000—2020 年偶数年份春、夏季 SPEI 进行了计算(图 8)。春季和夏季 SPEI 多年均值分别为 0.059 和 0.025,呈不显著上升趋势,上升速率分别为

0.037 4/a 和 0.096 5/a。春季 SPEI 指数波动幅度较大,但波动次数少,2000—2006 年间变化相对平稳, SPEI 最高值为 1.81,出现在 2010 年,最低值为-1.58,出现在 2014 年;2002 和 2006 年呈轻度干旱,2014 年出现重度干旱,其余年份均为无旱。夏季 SPEI 指数波动较频繁, SPEI 最高值为 1.57,出现在 2018 年,最低值为-1.25,出现在 2000 年;2004,2010,2014 和 2016 年为轻度干旱,2000 年为中度干旱,其余年份均为无旱。

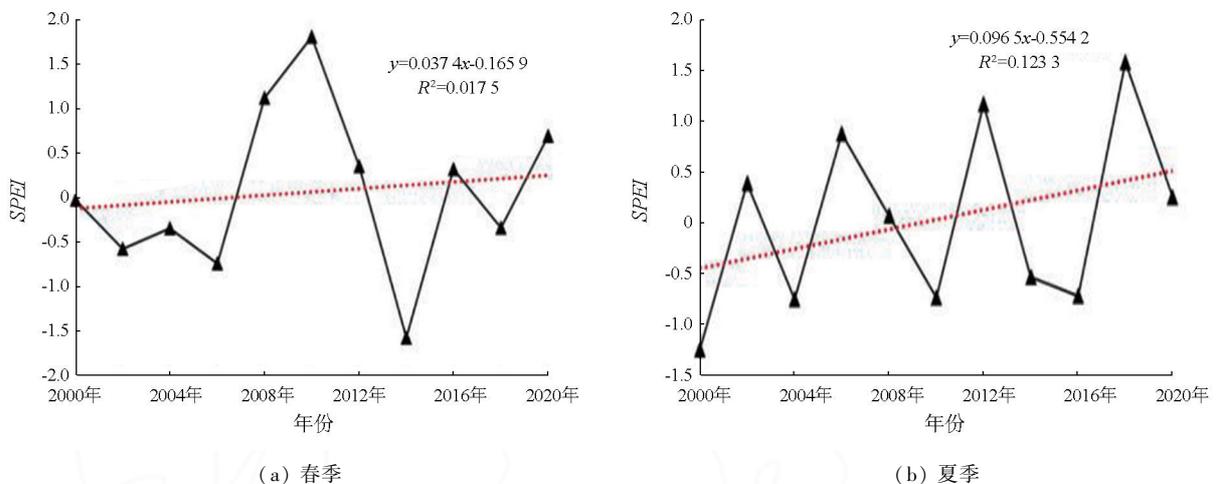
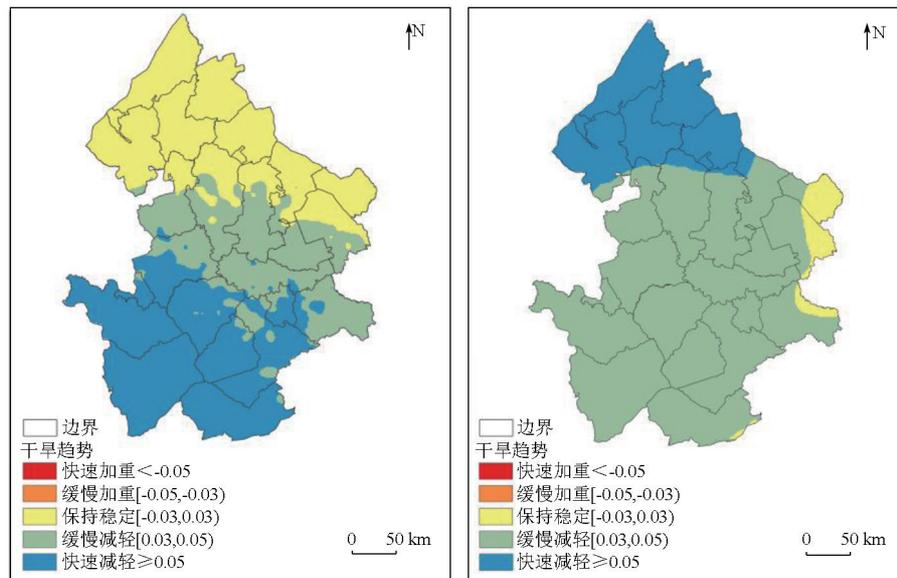


图 8 春季、夏季 SPEI 随时间变化

Fig.8 Temporal changes of SPEI in spring and summer

逐像元计算干旱空间趋势分布情况(图 9)。研究区春季、夏季干旱趋势均为保持稳定和减轻类型。春季研究区自北至南干旱减轻速度加快:北部干旱

保持稳定、中部干旱缓慢减轻,南部干旱快速减轻。夏季,研究区北部干旱快速减轻,中部和南部干旱缓慢减轻,只有极小部分干旱保持稳定。



(a) 春季干旱趋势空间分布

(b) 夏季干旱趋势空间分布

图 9 春季、夏季干旱趋势空间分布

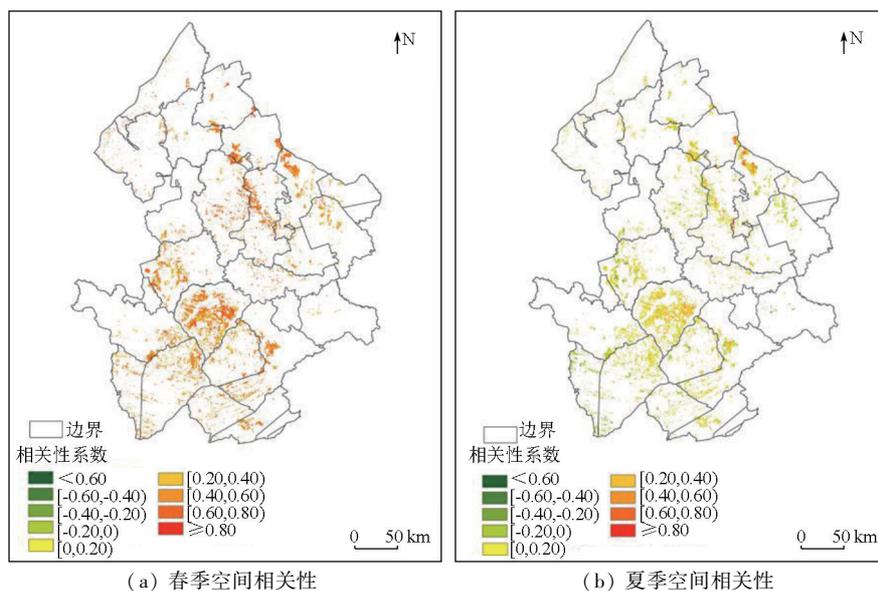
Fig.9 Spatial distribution of drought trend in spring and summer

3.4 草地退化与干旱相关性分析

逐像元计算 GDI 与春季、夏季 2 个季节 $SPEI$ 的相关性, 相关系数和相关性显著性空间分布见图 10, GDI 和 $SPEI$ 相关显著类型面积比例统计见表 3。从图中可以看出, 春季 GDI 和 $SPEI$ 整体呈正相关, 呈负相关的区域占松嫩平原的极少部分。其中, 正相关占总面积的 95.8%, 显著正相关占 36.3%; 负相关占 4.2%, 显著负相关占 0.5%。夏季相关系数大部分为正相关, 占总面积的 69.0%, 显著正相关占 1.2%; 负相关占总面积的 31.1%, 显著负相关占 0.1%。

基于植被分类数据, 分别将草原和草甸区域

GDI 的倾斜率在 ArcGIS 中栅格转点, 各自提取 10% 的样本点, 分别为 5 402 和 5 016 个样本, 进行 GDI 倾斜率与 $SPEI$ 倾斜率的相关分析。由表 4 可知, 草原和草甸倾斜率与春季 $SPEI$ 倾斜率均为极显著负相关, 相关性系数分别为 -0.265 和 -0.374 , 与夏季 $SPEI$ 倾斜率均为极显著正相关, 分别为 0.243 和 0.296 , 上述相关系数都通过了 0.01 水平的显著性检验。表明松嫩平原西部春季干旱程度越严重, 草地退化越严重, 而夏季干旱越严重, 草地退化趋势却有所改善。不同草地类型的退化对于干旱的响应差别显著, 草甸 GDI 的趋势与 $SPEI$ 趋势相关性总体大于草原。



(a) 春季空间相关性

(b) 夏季空间相关性

图 10-1 2000—2020 年松嫩平原西部 GDI 与春、夏 $SPEI$ 指数空间相关性和相关显著性空间分布

Fig.10-1 Spatial correlation and correlation significance of GDI and $SPEI$ in spring and summer in western Songnen Plain during 2000—2020

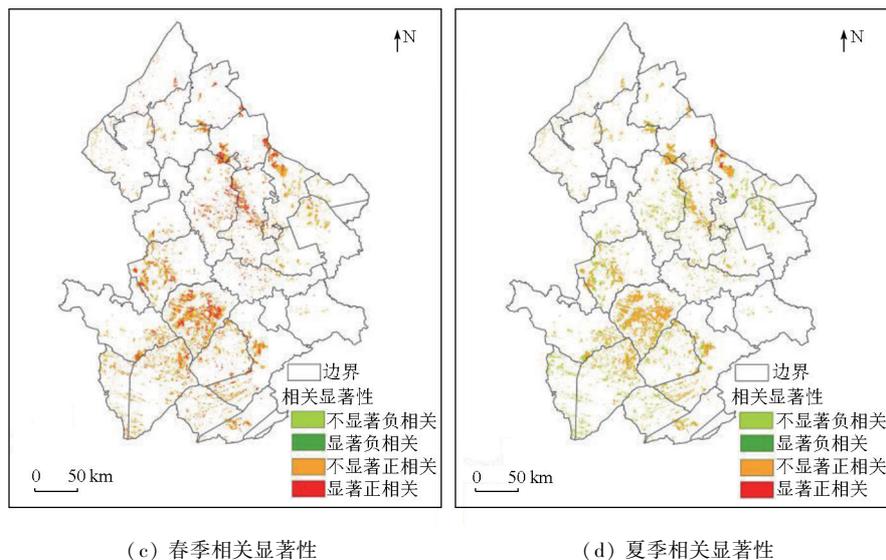


图 10-2 2000—2020 年松嫩平原西部 GDI 与春、夏 SPEI 指数空间相关性和相关显著性空间分布
Fig.10-2 Spatial correlation and correlation significance of GDI and SPEI in spring and summer in western Songnen Plain during 2000—2020

表 3 GDI 与春、夏季 SPEI 相关显著类型面积统计

Tab.3 Ratio of correlation significance for SPEI and GDI in spring and summer

季节	不显著负相关 ($p>0.05$)	显著负相关 ($p<0.05$)	不显著正相关 ($p>0.05$)	显著正相关 ($p<0.05$)
春季	3.4	0.8	59.5	36.3
夏季	31.0	0.1	67.7	1.2

表 4 不同草地类型 GDI 与春、夏季 SPEI 趋势变化相关系数

Tab.4 Correlation between GDI and SPEI for steppe and meadow in spring and summer

相关分析	春季 SPEI	夏季 SPEI	样本数
草原 GDI	-0.265 ** ^①	0.243 **	5 402
草甸 GDI	-0.374 **	0.296 **	5 016

① ** 表示 $p<0.01$ (相关系数在 0.01 水平上显著)。

4 讨论与结论

4.1 讨论

4.1.1 松嫩平原西部草地退化

由于气候变化和人类的无序利用,松嫩平原西部草地从 20 世纪 50 年代到 2000 年左右一直处于退化状态,草地面积以每年 1.1% 的速率持续减少^[24],大面积的草原转变为农田和盐碱化的荒地^[25]。本研究表明,2000—2020 年间,松嫩平原西部草地面积呈现波动减少趋势,由 105.17 万 hm^2 减少到 102.47 万 hm^2 ,年减少率为 0.1%,相比 2000 年以前草地面积年减少速率显著下降,这是近年来松嫩平原西部干旱情况的改善和草地保护修复各项措施实施综合作用的结果。

草地退化不仅表现在由于过渡放牧、不适宜开

垦、管理不当使草地转为其他土地覆被类型而导致草地面积减少,还表现在草地生产力降低、覆盖度减小、优势种减少、土壤退化及生态系统稳定性下降等方面。石明明等^[26]和康振山等^[27]分别采用植被指数 NDVI 和 NPP 对草地退化时空变化特征进行了分析;Torresani 等^[28]通过土壤侵蚀指标分析了草地退化的程度,这些研究使用的单一指标不能全面、科学地反映草地的退化。本研究综合考虑植被与土壤的退化情况,耦合 NPP, SI, 地表反照率和 LSM 构建了 2000—2020 年 GDI 指数。较已有研究能更全面、更快速地反映区域尺度草地退化程度及其变化。2000—2020 年 21 a 间,研究区内草地退化程度总体较高,但是约有 $5.12 \times 10^5 \text{ hm}^2$ 的草地退化情况呈现减轻或稳定状态,占草地总面积的 81.7% (表 3),草地退化程度总体呈良性改善趋势 (图 6)。这与 Li 等^[29]的研究结果一致。研究区内吉林省草地多年平均退化程度总体上较黑龙江省严重,这与 20 世纪 70 年代以来吉林省西部土壤盐碱化剧烈恶化密切相关,2010 年吉林省盐碱化结构指数已达 70%,而黑龙江省只有 30%^[30]。但从退化趋势来看,2000—2020 年间黑龙江省草地退化加重的区域面积明显大于吉林省,吉林省草地退化多呈减轻或稳定趋势 (图 6)。吉林省草地退化的改善主要是由于吉林省西部土壤盐碱化的治理和各种生态修复措施的实施^[25,31]。满卫东等^[32]的研究也表明,1990—2015 年间黑龙江省草地变化更剧烈,草地生态系统稳定性较差,而吉林省草地生态系统较稳定。

这在一定程度上表明,过去几十年中,脆弱和退化草地的修复、保护受到了高度重视也取得了一定

成效,但忽略了退化较轻的草地的保护,导致退化较轻的草地出现了较快的退化趋势,从而形成了“退化-治理-再退化-再治理”的恶性循环。厘清草地退化类型与退化程度的空间格局与演变规律,因地制宜建立健全现代草牧业体系和管理模式,是未来草地可持续保护与发展的关键。

4.1.2 草地退化对干旱的响应

草地退化是一个复杂的生态过程,是自然与人类因素共同作用的结果^[3]。其中气候变暖、变干是草地退化的主要自然因素^[32]。人类活动已导致全球的环境问题日益突出,特别是干旱趋势的加剧。人类的过度农垦、放牧以及水资源的不当利用加速了草地的退化^[33]。

本研究中大部分 *GDI* 与春季、夏季 *SPEI* 呈不显著正相关关系,2010年和2018年 *SPEI* 出现相对极大值时,当年 *GDI* 出现相对极大值。这一方面可能是因为适度湿润的环境会促进植被生长,极端湿润条件则会降低其生产^[34]。Jha等^[35]的研究也表明,当植被光合作用所需水分达到最大值时,降水增加会降低植被生产力,而温度上升会促进光合作用,促进植被生产力。短期的降水和气温变化所引起的植被环境湿润化或干旱化会导致植被生产力反向变化,因此过高的湿润程度可能会加重草地的退化,使其与 *SPEI* 呈正相关。另一方面曹旭娟^[36]、李传新^[37]的研究也表明,气候变化对草地退化的影响具有滞后性,导致当年的退化程度与干旱情况相关性显著程度较低。

笔者对2000—2020年间不同草地类型的退化倾斜率与干旱倾斜率进行了分类相关性分析。结果表明草甸和草原 *GDI* 倾斜率与春季 *SPEI* 倾斜率呈显著负相关,与夏季 *SPEI* 倾斜率显著正相关,且与春季 *SPEI* 倾斜率的相关系数高于夏季。春季干旱对草地退化具有促进作用且影响显著,充分表明植被对干旱的响应具有一定的滞后效应,多位学者的研究都证明了这种滞后效应的存在^[38-40],且滞后的时间尺度不尽相同^[41]。此外,*SPEI* 具有多尺度特征^[13],植被对不同尺度的干旱水平具有不同的响应特征。本研究只选择了3个月尺度的春、夏季 *SPEI* 与 *GDI* 进行相关分析,没有考虑到时间尺度的多样性,因此具有一定的局限性,在干旱的时间尺度和滞后性方面有待进一步研究。研究中也表明草甸 *GDI* 的倾斜率在春、夏2季与 *SPEI* 的倾斜率相关性均高于草原,表明草甸退化对干旱的敏感性更高,Zhao等^[42]在对新疆草地植被变化对干旱的响应中的研究中也得到了同样的结论。

4.2 结论

研究分析了2000—2020年间松嫩平原西部退化指数和 *SPEI* 时空演变及二者之间的相关性,研究结果可为该地区草地退化及其干旱影响的定量化评估提供科学依据。研究以 *NPP*, *SI*, 地表反照率和 *LSM* 为指标,综合考虑植被与土壤的退化情况,构建了 *GDI*,在区域尺度草地退化程度及其变化研究方面具有较好的应用前景。研究表明:

1)2000—2020年间研究区草地退化总体趋向改善,但总体退化程度较轻的黑龙江省西部草地退化趋势有所加重。

2)春、夏季 *SPEI* 变化均呈现不显著上升趋势,干旱情况有所减轻。

3)由于草地退化对干旱响应的滞后性,*GDI* 与 *SPEI* 空间上呈不显著正相关,但二者倾斜率相关性显著,且春旱对草地退化影响更显著。

4)松嫩平原西部退化较轻的草地,其退化趋势有增大趋势,对该区的保护与恢复刻不容缓。

草地退化对气候的响应具有多尺度性,研究只分析了季尺度干旱的影响,更精细尺度的响应研究有待进一步开展。

参考文献 (References):

- [1] Scurlock J M O, Johnson K, Olson R J. Estimating net primary productivity from grassland biomass dynamics measurements[J]. *Global Change Biology*, 2002, 8(8): 736-753.
- [2] Heath M E, Barnes R F, Metcalfe D S. Forages: The science of grassland agriculture[M]. Ames, Iowa, USA: Iowa State University Press, 1985.
- [3] Liu Y, Zhang Z, Tong L, et al. Assessing the effects of climate variation and human activities on grassland degradation and restoration across the globe[J]. *Ecological Indicators*, 2019, 106: 105504.
- [4] Liu M, Dries L, Heijman W, et al. Land tenure reform and grassland degradation in Inner Mongolia, China[J]. *China Economic Review*, 2019, 55: 181-198.
- [5] 王合云, 郭建英, 李红丽, 等. 短花针茅荒漠草原不同退化程度的植被特征[J]. *中国草地学报*, 2015, 37(3): 74-79.
Wang H Y, Guo J Y, Li H L, et al. Vegetation characteristics of *Stipa breviflora* desert steppe in different degradation degree[J]. *Chinese Journal of Grassland*, 2015, 37(3): 74-79.
- [6] 秦金萍, 刘颖, 马玉寿, 等. 返青期休牧对退化高寒草甸植被生长及其优势植物垂穗披碱草光合作用的影响[J]. *草地学报*, 2020, 28(4): 1068-1075.
Qin J P, Liu Y, Ma Y S, et al. Effects of rest grazing during greenup period on plant growth of degraded alpine meadow and photosynthesis of its dominant plant *Elymus nutans* Griseb[J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2020, 28(4): 1068-1075.
- [7] 刘晓光. 阴山北麓草原植被不同退化程度特征分析[J]. *内蒙古农业大学学报(自然科学版)*, 2015, 36(6): 65-69.
Liu X G. Analysis of grassland vegetation characteristics at different degraded degree in the north foot region of Yinshan Mountain[J]. *Journal of Inner Mongolia Agricultural University (Natural Science)*

- Edition), 2015, 36(6): 65-69.
- [8] 罗玲,王宗明,毛德华,等.松嫩平原西部草地净初级生产力对气候变化及人类活动的响应[J].生态学杂志, 2012, 31(6): 1533-1540.
Luo L, Wang Z M, Mao D H, et al. Responses of grassland net primary productivity in western Songnen Plain of Northeast China to climate change and human activity[J]. Chinese Journal of Ecology, 2012, 31(6): 1533-1540.
- [9] Wang L, Zheng S, Wang X. The spatiotemporal changes and the impacts of climate factors on grassland in the northern Songnen Plain (China) [J]. Sustainability, 2021, 13(12): 6568.
- [10] 薛鹏飞. 高寒草地退化遥感监测与综合评价——以甘南地区为例[D]. 兰州: 兰州大学, 2022.
Xue P F. Remote sensing monitoring and comprehensive evaluation of alpine grassland degradation [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2022.
- [11] 陈曦. 中国干旱区自然地理[M]. 北京: 科学出版社, 2010: 7-9.
Chen X. Physical geography of arid land in China [M]. Beijing: Science Press, 2010: 7-9.
- [12] 乌尼图, 刘桂香, 杨勇, 等. 基于光能利用率模型的内蒙古天然草原植被净初级生产力动态监测与气候因子的响应[J]. 草业学报, 2020, 29(11): 1-10.
Wu N T, Liu G X, Yang Y, et al. Dynamic monitoring of net primary productivity and its response to climate factors in native grassland in Inner Mongolia using a light-use efficiency model [J]. Acta Prataculturae Sinica, 2020, 29(11): 1-10.
- [13] Vicente-Serrano S M, Beguería S, López-Moreno J I, et al. A new global 0.5° gridded dataset (1901-2006) of a multiscalar drought index; Comparison with current drought index datasets based on the palmer drought severity index [J]. Journal of Hydrometeorology, 2010, 11(4): 1033-1043.
- [14] 郭嘉豪, 王会肖, 赵茹欣, 等. 基于多维 Copula 函数的松嫩平原干旱特征分析[J]. 节水灌溉, 2020(12): 57-63, 67.
Guo J H, Wang H X, Zhao R X, et al. Analysis of drought characteristics in Songnen Plain with multidimensional Copula function [J]. Water Saving Irrigation, 2020(12): 57-63, 67.
- [15] 杨帆, 黄庆阳, 谢立红, 等. 松嫩平原草原退化原因及其生态恢复方法[J]. 国土与自然资源研究, 2021(4): 90-92.
Yang F, Huang Q Y, Xie L H, et al. Causes of grassland degradation and ecological restoration methods in Songnen Plain [J]. Territory & Natural Resources Study, 2021(4): 90-92.
- [16] 李强. 不同恢复措施对松嫩平原退化草地的作用[D]. 长春: 东北师范大学, 2010.
Li Q. The effect of different restoration measures on degraded grassland in Songnen Plain [D]. Changchun: Northeast Normal University, 2010.
- [17] Li F, Jiang L, Wang X, et al. Estimating grassland aboveground biomass using multitemporal MODIS data in the West Songnen Plain, China [J]. Journal of Applied Remote Sensing, 2013, 7(1): 073546.
- [18] Chen H, Liu X, Ding C, et al. Phenology-based residual trend analysis of MODIS-NDVI time series for assessing human-induced land degradation [J]. Sensors, 2018, 18(11): 3676.
- [19] 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.
- [20] Yu T, Jiapaer G, Bao A, et al. Using synthetic remote sensing indicators to monitor the land degradation in a salinized area [J]. Remote Sensing, 2021, 13(15): 2851.
- [21] Zhang M, Lal R, Zhao Y, et al. Spatial and temporal variability in the net primary production of grassland in China and its relation to climate factors [J]. Plant Ecology, 2017, 218(9): 1117-1133.
- [22] 江笑薇. 黄土高原地区干旱及土地利用变化对植被净初级生产力影响的量化研究[D]. 西安: 陕西师范大学, 2021.
Jiang X W. Quantitative study on the influence of drought and land use change on net primary productivity of vegetation in loess plateau [D]. Xi'an: Shaanxi Normal University, 2021.
- [23] 张颖, 章超斌, 王钊齐, 等. 三江源 1982—2012 年草地植被覆盖度动态及其对气候变化的响应[J]. 草业科学, 2017, 34(10): 1977-1990.
Zhang Y, Zhang C B, Wang Z Q, et al. Spatiotemporal dynamics of grassland coverage in response to climate change from 1982 to 2012 in the Three Rivers Source region, China [J]. Pratacultural Science, 2017, 34(10): 1977-1990.
- [24] Huang F, Wang P, Zhang J. Grasslands changes in the northern Songnen Plain, China during 1954-2000 [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2012, 184(4): 2161-2175.
- [25] 王静, 郭锐, 蔡迪花, 等. 玛曲县草地退牧还草工程效果评价[J]. 生态学报, 2009, 29(3): 1276-1284.
Wang J, Guo N, Cai D H, et al. The effect evaluation of the program of restoring grazing to grasslands in Maqu County [J]. Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(3): 1276-1284.
- [26] 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.
- [27] 康振山, 张莎, 白云, 等. 内蒙古草地净初级生产力时空变化及其对干旱的响应[J]. 草地学报, 2021, 29(1): 156-165.
Kang Z S, Zhang S, Bai Y, et al. Spatio-temporal changes of grassland net primary productivity (NPP) in inner Mongolia and its response to drought [J]. Acta Agrestia Sinica, 2021, 29(1): 156-165.
- [28] Torresani L, Wu J, Masin R, et al. Estimating soil degradation in montane grasslands of north-eastern Italian Alps (Italy) [J]. Helvion, 2019, 5(6): e01825.
- [29] Li H, Huang F, Hong X, et al. Evaluating satellite-observed ecosystem function changes and the interaction with drought in Songnen Plain, Northeast China [J]. Remote Sensing, 2022, 14(22): 5887.
- [30] 王浩男. 松嫩平原盐碱地景观格局演化及驱动力分析[D]. 长春: 吉林大学, 2021.
Wang H N. The saline-alkali land analysis of landscape pattern evolution and driving forces in Songnen plain [D]. Changchun: Jilin University, 2021.
- [31] 李叶. 松嫩平原盐碱地植被状况时空变化精细化模型构建[D]. 长春: 吉林大学, 2022.
Li Y. Construction of refined model of temporal and spatial variation of vegetation status in saline alkali land of Songnen Plain [D]. Changchun: Jilin University, 2022.
- [32] 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.
- [33] 牛书丽, 蒋高明. 人工草地在退化草地恢复中的作用及其研究现状 [J]. *应用生态学报*, 2004, 15(9): 1662–1666.
- Niu S L, Jiang G M. Function of artificial grassland in restoration of degraded natural grassland and its research advance [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2004, 15(9): 1662–1666.
- [34] 张世喆, 朱秀芳, 刘婷婷, 等. 气候变化下中国不同植被区总初级生产力对干旱的响应 [J]. *生态学报*, 2022, 42(8): 3429–3440.
- Zhang S Z, Zhu X F, Liu T T, et al. Response of gross primary production to drought under climate change in different vegetation regions of China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, 42(8): 3429–3440.
- [35] Jha S, Srivastava R. Impact of drought on vegetation carbon storage in arid and semi-arid regions [J]. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 2018, 11: 22–29.
- [36] 曹旭娟. 青藏高原草地退化及其对气候变化的响应 [D]. 北京: 中国农业科学院, 2017.
- Cao X J. Grassland degradation and its response to climate change in the Qinghai-Tibet Plateau [D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2017.
- [37] 李传新. 基于遥感的锡林河流域草地退化及影响因素分析 [D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2016.
- Li C X. Analysis of grassland degradation and influencing factors based on remote sensing [D]. Beijing: China University of Geosciences, 2016.
- [38] Liu S, Zhang Y, Cheng F, et al. Response of grassland degradation to drought at different time-scales in Qinghai Province: Spatio-temporal characteristics, correlation, and implications [J]. *Remote Sensing*, 2017, 9(12): 1329.
- [39] 邹杰. 中亚地区生态系统水分利用效率时空分布及其干旱抗逆效应 [D]. 乌鲁木齐: 新疆大学, 2020.
- Zou J. Spatial and temporal distribution of ecosystem water use efficiency and drought tolerance effect in central Asia [D]. Urumqi: Xinjiang University, 2020.
- [40] Liu S L, Wang T, Kang W P, et al. Vegetation change and its response to drought in Inner Mongolia of Northern China from 1998 to 2013 [J]. *Sciences in Cold and Arid Regions*, 2019, 11(6): 448–460.
- [41] Bai Y, Li S. Growth peak of vegetation and its response to drought on the Mongolian Plateau [J]. *Ecological Indicators*, 2022, 141: 109150.
- [42] Zhao W K, Jing C Q. Response of the natural grassland vegetation change to meteorological drought in Xinjiang from 1982 to 2015 [J]. *Frontiers in Environmental Science*, 2022, 10: 1047818.

Grassland degradation and its response to drought in the western Songnen Plain based on comprehensive remote sensing index

LIU Wenhui, LI Xinye, LI Xiaoyan

(College of Earth Sciences, Jilin University, Changchun 130012, China)

Abstract: The grassland ecosystem is one of the most important and widely distributed terrestrial ecosystems. Analyzing the grassland degradation and its influential factors holds great significance for guiding the conservation and sustainable use of grassland resources, as well as the restoration and reconstruction of degraded ecosystems. This study extracted information on the distribution of grassland in western Songnen Plain using an object-oriented classification method and a multi-layer decision tree while comprehensively considering the degradation of vegetation and soils. Using Landsat TM image data, this study constructed a comprehensive grassland degradation index (GDI) for 11 even years from 2000 to 2020, followed by the assessment of the spatiotemporal dynamics of grassland degradation. Using the standardized precipitation evapotranspiration index (SPEI) as an indicator of drought, this study analyzed the responses of grassland degradation to the spatiotemporal changes in climate-induced drought. The results indicate that from 2000 to 2020, grassland in the western Songnen Plain decreased to 1 024 700 hm² from 1 051 700 hm², with an annual decreasing rate of 0.1%. The grassland degradation showed a nonsignificant downward trend, with 81.7% of the grassland exhibiting a stable or downward degradation trend. The SPEI exhibited an increasing trend in both spring and summer, representing a downward drought trend with significant regional differences. Besides, there was a nonsignificant weak positive correlation between GDI and SPEI in both spring and summer. The results of this study will provide data support for the conservation and sustainable use of grasslands in the western Songnen Plain, while also holding active significance for managing and controlling the ecological and economic benefits of grasslands in this region.

Keywords: grassland degradation; comprehensive remote sensing index; SPEI; drought degree; western Songnen Plain

(责任编辑: 李瑜)