



基于遥感监测的天山新疆段草地退化时空特征及其与气候因子的关系

阿卜杜热合曼·吾斯曼 玉素甫江·如素力 张发 茹克亚·萨吾提 张旭辉

Temporal and spatial characteristics of grassland degradation in Xinjiang Section of Tianshan Mountains based on remote sensing monitoring and its relationship with climate factors

Abudurehman · Wusiman , Yusufjiang · Rusuli , ZHANG Fa, Rukeya · Sawuti , ZHANG Xuhui

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11829/j.issn.1001-0629.2022-0442>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

近15年新疆伊犁河谷草地退化时空变化特征

Spatiotemporal dynamics of grassland degradation in Yili Valley of Xinjiang over the last 15 years

草业科学. 2018, 12(3): 508 <https://doi.org/10.11829/j.issn.1001-0629.2017-0476>

基于像元二分模型的艾比湖湿地NDVI指数对微气候的响应

Ebinur Lake Wetland vegetation coverage in response to a micro-climate change

草业科学. 2017, 11(6): 1168 <https://doi.org/10.11829/j.issn.1001-0629.2016-0367>

天山北坡草地盖度高光谱遥感估算

Estimating grassland coverage based on hyperspectral remote sensing in the northern Tianshan Mountains

草业科学. 2017, 11(1): 30 <https://doi.org/10.11829/j.issn.1001-0629.2016-0403>

三江源区高寒草原土壤湿度变化特征及其与气候因子的关系

Alpine grassland soil moisture variation characteristics and its relationship with climate factors in Three River Source

草业科学. 2018, 12(1): 46 <https://doi.org/10.11829/j.issn.1001-0629.2017-0153>

基于灵活的时空融合模型的植被覆盖度与植被指数关系

Research on relationship between vegetation cover fraction and vegetation index based on flexible spatiotemporal data fusion model

草业科学. 2017, 11(2): 264 <https://doi.org/10.11829/j.issn.1001-0629.2016-0256>

基于冗余分析的高寒草原土壤与草地退化关系

Relationships between soil factors and grassland degradation on an alpine grassland based on redundancy analysis

草业科学. 2018, 12(3): 472 <https://doi.org/10.11829/j.issn.1001-0629.2017-0324>



关注微信公众号，获得更多资讯信息

DOI: 10.11829/j.issn.1001-0629.2022-0442

阿卜杜热合曼·吾斯曼, 玉素甫江·如素力, 张发, 茹克亚·萨吾提, 张旭辉. 基于遥感监测的天山新疆段草地退化时空特征及其与气候因子的关系. 草业科学, 2023, 40(7): 1779-1792.

Abudureheman·Wusiman, Yusufujiang·Rusuli, ZHANG F, Rukeya·Sawuti, ZHANG X H. Temporal and spatial characteristics of grassland degradation in Xinjiang Section of Tianshan Mountains based on remote sensing monitoring and its relationship with climate factors. Pratacultural Science, 2023, 40(7): 1779-1792.

基于遥感监测的天山新疆段草地退化时空特征及其与气候因子的关系

阿卜杜热合曼·吾斯曼¹, 玉素甫江·如素力^{1,2}, 张发¹,
茹克亚·萨吾提^{1,2}, 张旭辉¹

(1. 新疆师范大学地理科学与旅游学院, 新疆乌鲁木齐 830054; 2. 新疆干旱湖泊环境与资源实验室, 新疆乌鲁木齐 830054)

摘要: 以植被覆盖度作为草地退化的遥感监测指标, 基于2001–2020年天山新疆段MODIS NDVI和气象遥感资料, 采用像元二分模型、草地退化指数、冷/热点分析、变异系数和相关性分析等方法, 分析草地退化时空特征及其与气候因子的关系, 结果表明: 1) 2001–2020年平均草地退化面积占总面积的34.04%, 草地退化指数为1.67, 处于轻度退化水平。2) 空间上, 轻度退化草地空间分异特征明显, 主要集中分布在天山西部和中段山区, 中度退化和重度退化草地面积较小且不集中, 95%以上的区域草地植被覆盖度变异系数小于0.2, 总体上覆盖度的年际波动小, 变化相对稳定。3) 2001–2020年草地植被覆盖度受气候因子驱动的区域占总面积的44.23%, 主要分布在天山西部和东部, 受非气候因子驱动的区域占总面积的55.77%, 在山区和南北两侧地势较平缓的区域均有分布, 说明非气候因子在天山新疆段草地的变化中起到主导作用。该研究结论可为当地草地资源保护与利用提供科学依据。

关键词: 草地退化; 植被覆盖度; 像元二分模型; 草地退化指数; 冷/热点分析; 变异系数; 天山新疆段

文献标识码: A 文章编号: 1001-0629(2023)07-1779-14

Temporal and spatial characteristics of grassland degradation in Xinjiang Section of Tianshan Mountains based on remote sensing monitoring and its relationship with climate factors

Abudureheman·Wusiman¹, Yusufujiang·Rusuli^{1,2}, ZHANG Fa¹, Rukeya·Sawuti^{1,2}, ZHANG Xuhui¹

(1. School of Geographic Science and Tourism, Xinjiang Normal University, Urumqi 830054, Xinjiang, China;

2. Laboratory of Lake Environment and Resources in Arid Region of Xinjiang, Urumqi 830054, Xinjiang, China)

Abstract: Grassland plays an important role in environmental protection in Xinjiang. Understanding the temporal and spatial characteristics of grassland degradation and revealing the degradation mechanism would be beneficial for promoting and constructing the ecological civilization of Xinjiang. MODIS NDVI data and remote sensing data of the Xinjiang section of the Tianshan Mountains from 2001 to 2020 were used to analyze the relationship between the temporal and spatial characteristics of grassland degradation and climate factors. Vegetation coverage was used as the remote sensing monitoring index for detecting grassland degradation, and analyses were conducted using methods such as the dimidiate pixel model (DPM), grassland degradation index (GDI), cold/hot spot analysis method, coefficient of variation (COV), and correlation

收稿日期: 2022-05-27 接受日期: 2023-02-23

基金项目: 国家自然科学基金 NSFC-联合基金项目“变化环境下干旱区湖泊流域水-生态-经济复合系统的协同进化与发展模式研究”(U1703341)

第一作者: 阿卜杜热合曼·吾斯曼(1997-), 男(维吾尔族), 新疆于田人, 在读硕士生, 研究方向为资源环境遥感。E-mail: 2271558691@qq.com

通信作者: 玉素甫江·如素力(1975-), 男(维吾尔族), 新疆喀什人, 教授, 博士, 研究方向为流域水文与生态遥感。E-mail: Yusupjan@xjnu.edu.cn

analyses. The results showed the following: 1) The average area of degraded grassland was 34.04% of the total area from 2001 to 2020, and this was categorized as being lightly degraded (with a GDI of 1.67). 2) Slightly-degraded grassland had obvious spatial differentiation characteristics, and they were mainly distributed in the western and central areas of the Tianshan Mountains. Areas of moderately and heavily degraded grasslands were small and not concentrated in a particular region. More than 95% of the regional grassland vegetation coverage had a COV of less than 0.2. The variation in overall coverage was relatively steady, with a small inter-annual fluctuation. 3) From 2001 to 2020, the areas of grassland vegetation coverage affected by climate factors accounted for 44.23% of the total area and were mainly distributed in the west and east of the Tianshan Mountains. Areas of grassland vegetation coverage driven by non-climatic factors accounted for 55.77% of the total area, and these were distributed on relatively flat terrain in the central, northern, and southern sections of the Tianshan Mountains. The results show that non-climate factors play a leading role in grassland changes within the Xinjiang section of the Tianshan Mountains, and they provide a scientific basis for planning the protection and utilization of local grassland resources.

Keywords: grassland degradation; fractional vegetation cover; dimidiate pixel model; grassland degradation index; cold/hot spot analysis; coefficient of variation; Xinjiang Section of Tianshan Mountains

Corresponding author: Yusufjiang Rusuli E-mail: Yusupjan@xjnu.edu.cn

草地是面积最大的陆地生态系统,在经济、生态和文化等多方面具有极其重要的功能^[1]。但草地极其脆弱且敏感,容易受到周围环境的干扰^[2]。最新的研究表明,随着全球气候变化与社会经济发展,草地退化现象逐渐成为当今世界诸多突出的生态危机之一^[3]。自2000年我国启动“退牧还草”和“退耕还林”等一系列重大生态工程以来,已有大量关于草地生态恢复的研究,也提出了众多技术措施,但针对性的和因地制宜的退化草地综合治理仍是当前亟待解决的重大难题和艰巨任务^[4]。

目前草地退化通用的定义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^[5]。在地表植被层面,遥感技术能够长时间并在大空间尺度上捕捉到植被覆盖度、高度和生产力等重要信息,为草地退化过程的动态监测和重要评价指标确定提供了方便^[6-7]。Osvaldo等^[8]利用MODIS NDVI时间序列遥感数据、社会经济和降水量等分析了巴西塞拉多草原退化,发现随着降水量的减少,经济较贫穷的区域牧场退化程度提升;韦惠兰和祁应军^[9]用MODIS-EVI数据从草地植被动态来反演玛曲县草地退化时空格局,并选取人口密度、联户比例、草地经营面积、牲畜密度和养羊比容等人类因素分析草地植被退化的影响;张艳珍等^[10]利用NDVI数据反演植被覆盖度,以覆盖度为参考退化指标,定量评估了内蒙古高原草地退化状况,发现2000—2013年

间退化状况好转;邵景安等^[11]基于Landsat系列卫星遥感影像数据,对青海三江源草地退化程度进行分析,发现退化程度呈东南向西北降低格局。基于以上研究,运用遥感监测和分析草地退化时空分布规律已成为当前的主流^[12]。但目前基于遥感对草地退化的研究大多主要集中在青藏高原和内蒙古草原,针对整个天山新疆段及其南北麓草地退化时空格局变化的研究相对较少,并且结合长时间序列时空遥感数据对新疆退化草地的时空分布格局、变化趋势、未来预测、人为干扰以及气候对草地退化的影响研究还比较缺乏。

草地作为天山生态系统的主题,在新疆生态文明建设中扮演着重要的角色^[13]。目前,由于气候变化和人为干扰,天山南北部分区域草地已由传统草地向农业和工业等其他用地转变,草地退化问题越发突出,对新疆生态安全和社会经济可持续发展造成威胁^[14]。据此,本研究针对天山新疆段草地退化问题,选用2001—2020年MODIS NDVI遥感数据反演植被覆盖度(fractional vegetation cover, FVC),以草地植被覆盖度变化视觉来分析草地退化时空分布格局,采用草地退化指数(grassland degradation index, GDI)和冷/热点分析法分析草地退化程度与时空分布,然后利用变异系数和相关性分析综合探究草地植被覆盖度的变化特征及其与气候因子的关系,旨在为天山草地资源保护和利用提供数据参考。

1 数据与研究方法

1.1 研究区概况

天山新疆段(76°36'~94°40' E, 40°10'~45°42' N), 地处新疆准噶尔盆地南部和塔里木盆地北部之间, 东部哈密市到西部伊犁河谷, 天山横贯新疆中部, 将新疆分为南疆和北疆。天山主要地貌类型有天山山地、山地冰川、冲积扇、沙丘以及南北山麓两侧的部分绿洲平原等。天山山脉平均海拔 4 000 m, 气候属于温带大陆性气候, 降水量少、气候干旱、日照时间长, 昼夜温差大, 年均天然降水量少于 180 mm, 年均气温 9~11 °C。天山草地的垂直地带性发育较完整, 从周围海拔较低的绿洲地区到中段高海拔山区分布的天然草地植被类型有温性荒漠、荒漠草原、温性草原、草甸草原、山地草甸和高寒草甸。天山是新疆重要的畜牧业发展

基地。另外, 与南坡相比, 天山北坡的降水量较丰富、植被覆盖质量高, 而且人口多, 社会经济发展相对较好^[15-16]。

1.2 数据来源

1) 野外调查数据: 2022 年 7 月 26 日至 8 月 4 日分别在地处天山北坡伊犁哈萨克自治州和南坡巴音郭楞蒙古自治州境内开展草地植被信息的野外调查采集, 总共获取了 35 个样地数据(图 1)。在实地观测中, 首先每一个样地的大小尽量保证为 250 m × 250 m, 利用 GARMIN 手持 GPS 定位器对每一个样地中心点进行定位, 然后在各样地内选择地势平坦的区域布设 2~3 个 1 m × 1 m 的小样方, 通过目估法获得小样方的植被覆盖度, 最后计算各样方覆盖度的平均值, 用平均值来代替该样地的实际植被覆盖度。

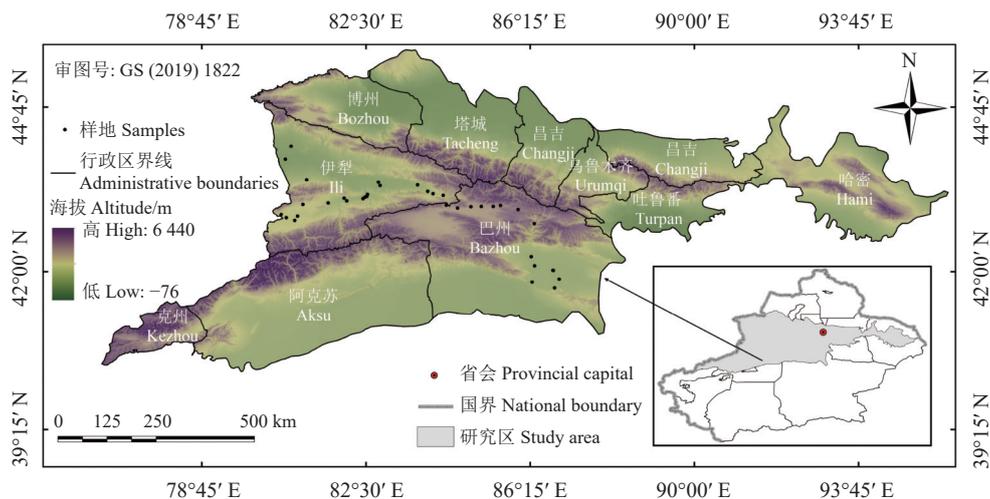


图 1 研究区示意图

Figure 1 Location of study area

2) 遥感数据: 2001 年 1 月至 2020 年 12 月的遥感 NDVI 月合成数据集来源于 NASA 地球观测系统中心发布的 MOD13Q1 产品, 空间分辨率为 250 m, 时间分辨率为 16 d, 对数据进行最大值合成处理后得到逐年 NDVI 数据集; 2001—2020 年月尺度的降水量和平均气温数据来源于国家科技基础条件平台——国家地球系统科学数据中心, 该数据空间分辨率为 0.008 333°(约为 1 km), 该数据已用独立气象观测点数据进行验证, 验证结果可信。本研究利用 GIS 技术做影像合成处理得到年降水量和年平均气

温影像, 并且为了保证空间分辨率的统一, 对 MODIS 数据做重采样处理, 使之各像元大小与降水量与气温影像保持一致。

3) 其他数据: 数字高程模型 (digital elevation model, DEM) 数据来源于地理空间数据云平台 (<http://www.gscloud.cn>), 空间分辨率为 30 m; 矢量数据来自全国地理信息资源目录服务系统提供的 1:1 000 000 公众版的基础地理信息数据; 土地利用数据来自 MODIS Land Cover MCD12Q 地覆盖数据集, 作为提取研究区草地矢量边界的参考。

1.3 研究方法

1.3.1 草地植被覆盖度遥感反演与精度验证

本研究基于像元二分模型^[17], 利用 NDVI (其取值介于-1~1, 0~1 之间表示有植被覆盖并且值越大覆盖度就越大) 估算研究区草地植被覆盖度, 并且选用决定系数 (R^2) 和均方根误差 (root mean square error, RMSE) 对模型估算结果与实地观测得到的 FVC 值进行精度评价。像元二分模型的计算公式如下:

$$FVC = \frac{NDVI - NDVI_{Soil}}{NDVI_{Veg} - NDVI_{Soil}} \quad (1)$$

式中: FVC 表示草地植被覆盖度, 其取值范围为 (0~1) 之间, $NDVI_{Soil}$ 表示影像中纯裸地覆盖像元的 NDVI 值, $NDVI_{Veg}$ 表示影像中纯植被覆盖像元的 NDVI 值^[18]。参考前人的研究^[19], 本研究选取研究区 NDVI 直方图中 5% 和 95% 的值代表 $NDVI_{Soil}$ 和 $NDVI_{Veg}$ 值。

1.3.2 草地退化等级

依据 2003 年国家颁布的天然草地退化、沙化、盐渍化的分级指标 (GB19377-2003)^[20], 为保证数据的全覆盖性, 提高与研究时段内统计数据的可靠性和对比性, 选取 20 世纪 90 年代相同监测区的最大草地植被覆盖度作为“基准”, 将研究区草地退化划分为 4 个等级, 具体划分方法如表 1^[21] 所列。

1.3.3 草地退化指数

在上述草地退化等级划分的基础上, 用草地退化指数 (GDI)^[22] 来评价研究区草地退化状况, 其计算公式为:

$$GDI = \left(\sum_{i=1}^4 A_i \times B_i \right) / B \quad (2)$$

式中: GDI 为草地退化指数; A_i 为草地退化等级为 i 的评分; B_i 为草地退化等级为 i 的分布面积; B 为研究区草地总面积。根据前人的研究^[23], 当 $GDI \leq 1$ 、 $1 < GDI \leq 2$ 、 $2 < GDI \leq 3$ 和 $GDI > 3$ 时, 草地退化水平分别表示未退化、轻度退化、中度退化和重度退化, 综合分析研究区草地退化程度。

1.3.4 冷/热点分析

通过冷/热点分析法能够更加直观地显示草地退化空间分异特征^[24]。本研究利用 Getis-Ord G_i^* 来识别退化草地高值 (热点) 和低值 (冷点) 的空间聚类, 依据 Z 值进行归一化分级处理, 进一步分析天

山新疆段退化空间演变格局。冷/热点分析法计算公式如下:

$$G_i^* = \frac{\sum_{j=1}^n W_{i,j} - \bar{X} \sum_{j=1}^n W_{i,j}}{S \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n W_{i,j}^2 - \left(\sum_{j=1}^n W_{i,j} \right)^2}{n-1}}}; \quad (3)$$

$$\bar{X} = \frac{\sum_{j=1}^n X_j}{n}; \quad (4)$$

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n X_j^2}{n} - \bar{X}^2} \quad (5)$$

式中: X_j 是像元 j 的草地退化代码, $W_{i,j}$ 为像元 i 和 j 之间以距离规则定义的空间权重, 同样空间范围相邻则为 1, 不相邻则为 0; \bar{X} 为 2001-2020 年草地植被覆盖度平均值, n 为像元总数; G_i^* 统计的是 Z 的得分和 P 值, 两者均为统计显著性的度量, 用于逐要素判断是否拒绝零假设, Z 得分越低, 表示低值 (冷点) 像元就越聚集, 相反, 则表示热值像元越聚集, 当 Z 值得分接近于 0 时, 表示像元不存在明显的空间聚类^[25]。

1.3.5 变异系数

通过变异系数分析能够看出研究区植被覆盖度的波动程度, 变异系数越小, 表明变化幅度越小, 意味着草地植被越稳定^[26], 其计算公式如下:

$$c = \frac{1}{d} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (d_i - d)^2}{n-1}} \quad (6)$$

式中: c 表示变异系数, d_i 为第 i 年的草地植被覆盖度, d 为 2001-2020 年草地植被覆盖度均值, n 为年数, 即 n 等于 20 年。

1.3.6 相关性分析

不同地理要素之间相互联系且彼此产生影响, 因此某个要素的变化往往是由多个要素复合作用所引起的, 利用相关性分析可以反映出不同要素之间的复合作用关系^[27], 本研究选用基于像元尺度的偏相关和复相关方法分析草地 FVC 变化与降水量、气温之间的关系, 首先要计算相关性系数, 其

计算公式为:

$$R_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (7)$$

式中: R_{xy} 为两个变量的相关性系数, x_i 、 y_i 分别为 x 和 y 两个变量第 i 年的值, n 为年数, \bar{x} 、 \bar{y} 分别为 x 和 y 两个变量的平均值。利用相关性系数进一步计算偏相关性, 其公式为:

$$R_{xy,z} = \frac{R_{xy} - R_{xz}R_{yz}}{\sqrt{(1-R_{xz}^2)}\sqrt{(1-R_{yz}^2)}} \quad (8)$$

式中: $R_{xy,z}$ 表示将自变量 z 固定之后, 因变量 x 和自变量 y 之间的偏相关性系数, 本研究通过 t 检验法对偏相关性系数的显著性进行检验:

$$t = \frac{R_{xy,z}}{\sqrt{1-R_{xy,z}^2}} \sqrt{n-m-1} \quad (9)$$

式中: n 表示年数, m 为自变量个数, 为了更好地反演各要素之间的综合作用关系, 在偏相关的基础上做复相关性分析, 并用 F 检验法对其进行显著性检验, 其公式为:

$$R_{x,yz} = \sqrt{1 - (1-R_{xy}^2)(1-R_{xz,y}^2)} \quad (10)$$

$$x = \frac{R_{x,yz}^2}{1-R_{x,yz}^2} \frac{n-k-1}{k} \quad (11)$$

式中: $R_{x,yz}$ 表示因变量 x 和自变量 y 、 z 之间的复相关系数, R_{xy} 表示变量 x 与变量 y 之间的相关性系数, $R_{xz,y}$ 为固定自变量 y 之后因变量 x 与自变量 z 的偏相关性系数, n 、 m 分别表示年数和自变量个数。

2 结果与分析

2.1 精度验证

选择研究区与野外观测时间相近时期的 MODIS 遥感数据, 利用像元二分模型估算得到植被覆盖度, 通过野外观测的样地中心点坐标, 提取对应点的遥感反演 FVC 值, 与实测值进行对比验证 (图 2)。结果显示, R^2 为 0.74, RMSE 为 0.15, 虽然实际 FVC 值与遥感反演的得到 FVC 值之间存在一定的误差, 但总体上两者具有较好的一致性, 并且精度相对较好, 因此基于 MODIS NDVI 遥感影像数据, 采用像元二分模型估算得到的 FVC 来分析天山新疆段草地退化时空特征及其与气候因子的关系是可行的。

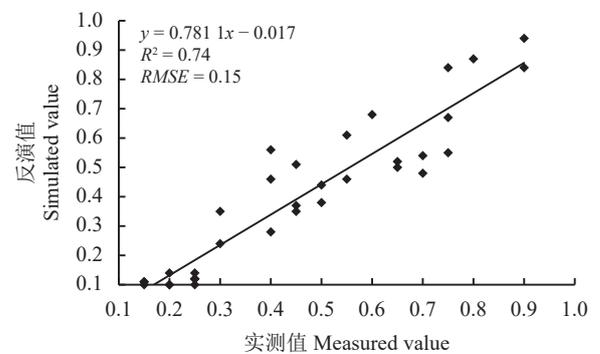


图 2 草地植被覆盖度实测值与模型反演值的关系
Figure 2 Relationships between simulated and measured of FVC

2.2 草地退化时空演变特征

2.2.1 天山新疆段草地退化时空分布特征分析

首先, 利用 GIS 技术计算得到 2001—2020 年天山南北山麓草地植被覆盖度, 然后依据草地退化等级划分标准 (表 1), 利用植被覆盖特征相对于 20 世纪 90 年代的变化程度来度量草地退化状况。

表 1 草地退化等级划分方法与评分
Table 1 Grassland degradation grade and classification standard

| 退化等级 Degradation grade | 草地退化等级划分标准 Grassland degradation classification standard | 等级评分 Grade rating |
|---------------------------------------|--|----------------------|
| 未退化 Undegraded grassland | 植被覆盖度达到未退化草地植被覆盖度的80%以上 Grassland vegetation cover reaches more than 80% of the undegraded. | 1 |
| 轻度退化 Lightly degraded grassland | 植被覆盖度达到未退化草地植被覆盖度的65%~80% Grassland vegetation cover reaches more than 65%~80% of the undegraded. | 2 |
| 中度退化 Moderately degraded grassland | 植被覆盖度达到未退化草地植被覆盖度的40%~65% Grassland vegetation cover reaches more than 40%~65% of the undegraded. | 3 |
| 重度退化 Seriously degraded grassland | 植被覆盖度达到未退化草地植被覆盖度的40%以下 Grassland vegetation cover reaches more than 40% of the undegraded. | 4 |

从时间变化特征来看 (图 3), 2001—2020 研究区平均退化草地面积约为 $8.6 \times 10^6 \text{ hm}^2$, 占草地总面积的 34.04%, 其中轻度退化比例最高, 占 31.43%, 未退化草地面积占总草地面积的 65.96%。研究时段内, 不同等级退化草地面积随时间呈波浪形变化, 其中未退化草地的面积年际波动差异最明显, 总体上呈现增加的变化趋势; 轻度退化草地面积比例介于 29%~41%, 总体呈下降趋势; 中度退化和重度退化草地面积比例均小于总面积的 20%, 2001 年其占

总面积的 8.5% 和 0.5%, 到 2020 年其面积分别为 7% 和 7.35%, 其中重度退化草地面积存在略有上升趋势。

从不同区域来看 (图 4), 2001—2020 年研究区草地退化状况存在明显的空间分布差异, 各时期退化草地主要集中在天山中部和西部; 2001—2005 年未退化和轻度退化草地在空间上相间分布; 2006—2015 年在巴州和伊犁地区轻度退化与中度退化草地分布相对较集中; 2016—2020 年轻度退化和中度退化草地面积在巴州地区逐渐减少, 但在伊犁地区

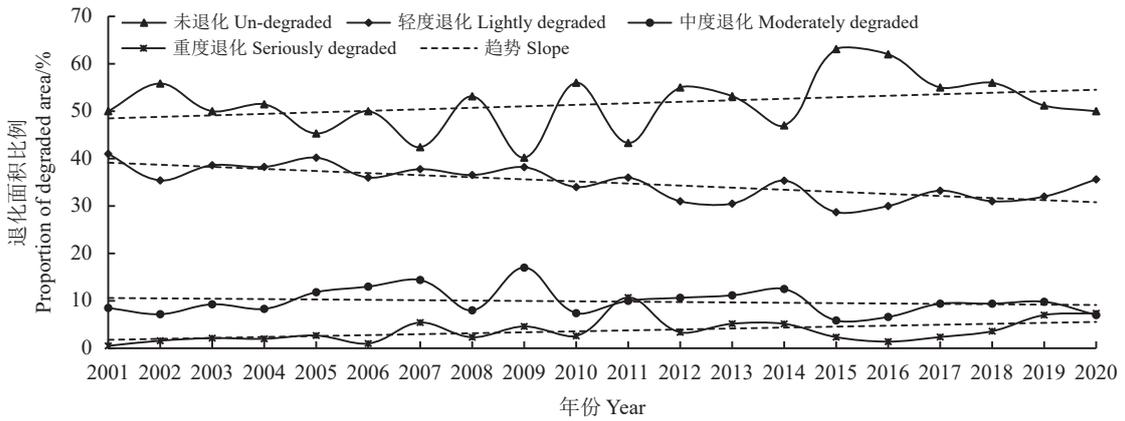


图 3 2001—2020 年草地退化面积比例

Figure 3 Proportion of degraded grassland areas from 2001 to 2020

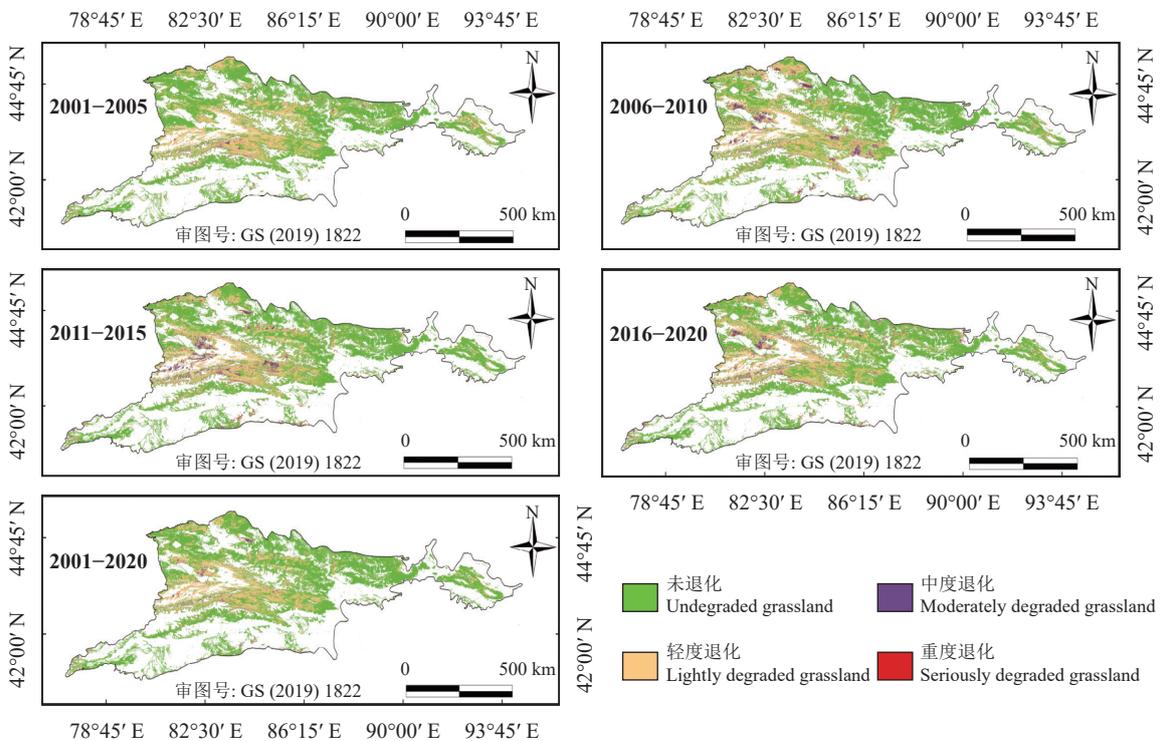


图 4 2001—2020 年草地退化等级图

Figure 4 Maps of grassland degradation categories from 2001 to 2020

占据了很大的范围,使之成为退化草地主体分布区。总而言之,2001—2020年天山新疆段退化草地空间面积先增加后逐渐减少,在空间上表现出草地退化由东部逐渐向西部扩张的变化特征。

2.2.2 研究区草地退化指数变化趋势分析

草地退化指数越大,退化程度就越高。2001—2020年研究区草地退化指数有年际浮动,但变化趋势不明显,GDI平均值约为1.67,整体上处于轻度退化水平(图5)。从分时段情况来看,研究区GDI从2001—2005年间的1.62上升到2006—2010年间的1.7,在2010—2015年间GDI为1.68,2016—2020年间下降至1.62,总体上GDI存在先增加后减少的态势,但变化幅度较低,这表明研究时段内天山新疆段退化草地年际变化较小,退化面积没有表现出明显的差异。

2.2.3 退化草地冷/热点分布格局分析

利用冷/热点分析法进一步分析退化草地的空间变化格局^[28]。根据表1中的4个等级评分代码,利用冷/热点分析法得到天山新疆段2001—2020年间退化草地空间分异特征(图6),可以看出,各时期“冷点”与“热点”在空间上聚类特征明显,其中极冷($Z < -2.58$)与极热($Z > 2.58$)的空间覆盖所占的比例较大,“冷点”主要与退化草地的分布区重叠,“热点”主要与未退化草地的分布区重叠。

2001—2005年极冷区域($Z < -2.58$)占总草地面积的27.12%,极热区($Z > 2.58$)占总草地面积的45.43%,极冷区由轻度退化草地所覆盖的面积可达

到80.23%,主要分布在天山中段和天山西部;极热区内由未退化草地所覆盖面积占据88.7%,主要分布在天山北部和西南部;聚集性不显著变化的($-1.65 \leq Z < 1.65, P > 0.05$)区域占总草地面积的22.5%。在2006—2015年,极冷区域面积不断增加,聚类性不显著变化($P > 0.05$)区域面积呈现缩小趋势;极冷区轻度退化草地面积比例由2006—2010年的65.44%增加到2011—2015年的77.72%,聚类性不显著变化的区域面积减少7.6%。2016—2020年,极冷区和极热区面积比例均呈现减少趋势,不显著变化($P > 0.05$)区域的面积比例增加,在极冷区内轻度退化面积缩小9.87%,中度退化和重度退化草地面积分别增加5.45%和3.28%;在极热区内未退化草地面积减少5.31%;不显著变化($P > 0.05$)区域面积比例由2011—2015年的8.05%增加到2016—2020年的15.36%。2001—2020年,天山新疆段退化草地呈现出“冷点”减弱与“热点”增强的动态演变,极冷区主要分布在研究区中部和西部,极热区主要分布在北部和西南部;极冷区内82%以上的面积主要由轻度退化草地所覆盖;极热区面积占总面积的比例为62.16%,其中未退化草地覆盖面积比例为88.57%;聚类性不显著变化($P > 0.05$)的区域主要分布在研究区西部和中部,其面积均由未退化和退化草地覆盖面积所组成。

总之,通过冷/热点分析法可知,2001—2020年天山新疆段未退化草地与轻度退化草地的空间分异性比较明显,其中未退化草地主要分布在天山北部和西南部,轻度退化草地主要集中分布在天山中

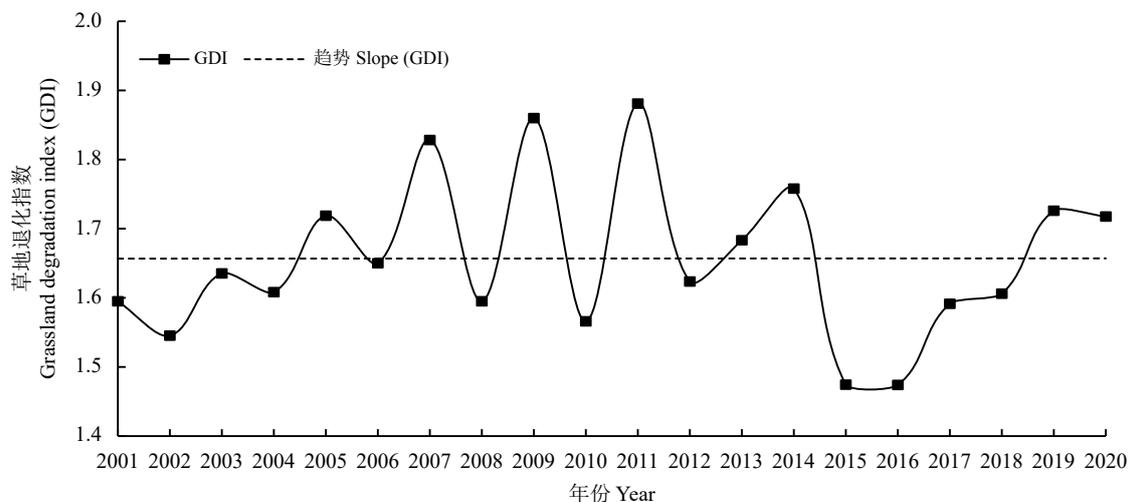


图5 2001—2020年草地退化指数变化特征

Figure 5 Variation characteristics of grassland degradation index from 2001 to 2020

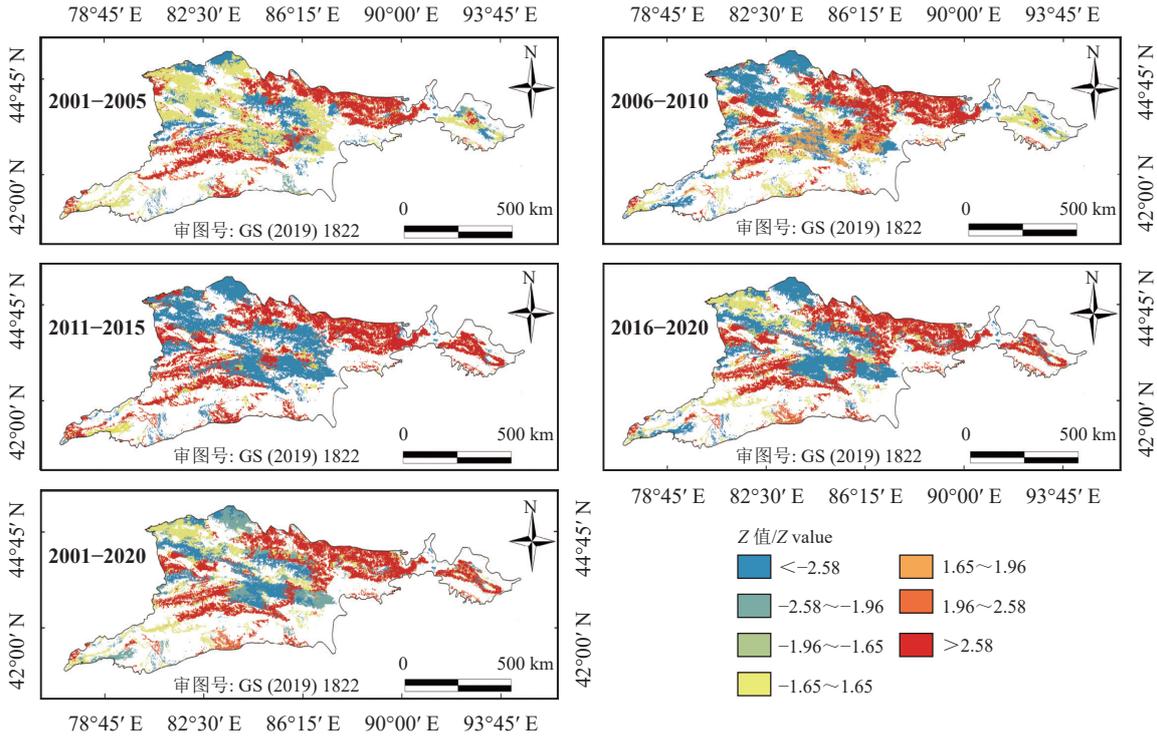


图 6 草地退化冷/热点空间分布

Figure 6 Distribution of cold/hot spot areas of degraded grassland

段山区和西部地势相对平缓的区域,但中度退化和重度退化草地面积较小,分布不集中,没有表现出明显的空间分异特征。

2.3 天山新疆段草地退化与气候因子的关系分析

2.3.1 草地植被覆盖度变异系数时空变化特征分析

通过变异系数分析能够了解天山新疆段草地植

被覆盖度时空变化特征。基于各时期草地植被覆盖度数据,利用 GIS 技术计算覆盖度变异系数并采用自然间断法将变异系数进行分级,得到不同等级变异系数的时空分布图(图 7)。结果显示,2001—2020 年天山新疆段草地植被覆盖度变异系数相对较小,各不同时期变异系数均小于 0.5。从年际变化特征来看,不同时期 95% 以上的区域变异系数均小于

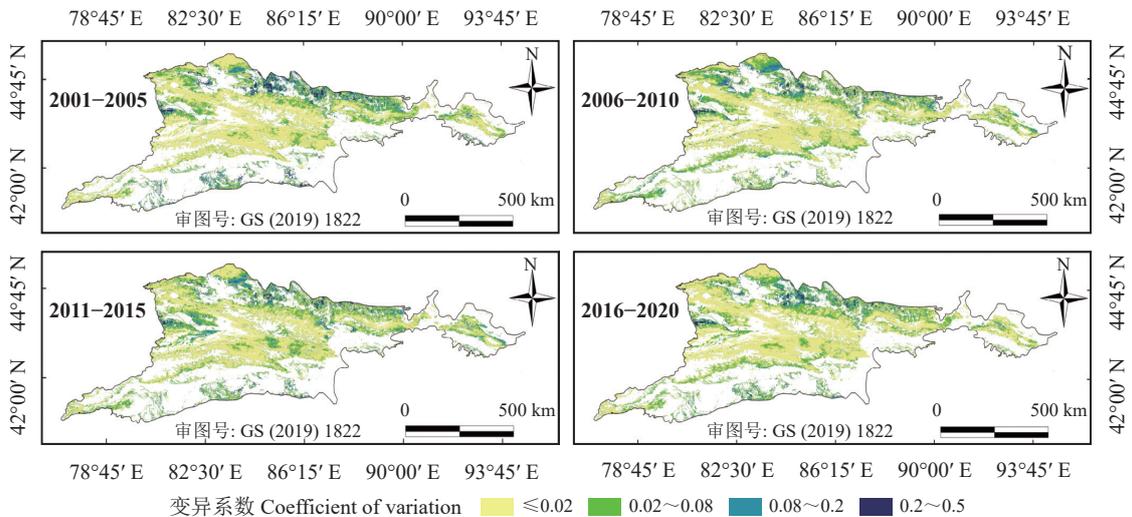


图 7 草地植被覆盖度变异系数时空分布

Figure 7 Spatial and temporal distribution of variation coefficients of grassland fractional vegetation cover

0.2, 变异系数大于 0.2 的区域不超过总面积的 5%; 从空间分布特征上, 变异系数小的区域主要集中分布在天山中段高海拔山区, 在南北两侧地势比较平缓的区域变异系数略高于高海拔山区。总体而言, 天山新疆段大部分区域草地植被覆盖度变异系数小于 0.2, 说明覆盖度的年际变化较小且相对稳定。

2.3.2 草地植被覆盖度与气候因子的关系分析

气候变化会影响草地植被的生长状况和时空分布格局, 因此研究草地植被覆盖度与气候因素之间的相互关系, 有助于更深入地了解草地退化动态规律^[29]。本研究以天山新疆段 2001—2020 年年降水量和平均气温作为自变量, 草地植被覆盖度作为因变量, 在空间尺度上分析植被覆盖度与气候因子之间的关系。首先, 为了定量确定天山新疆段草地 FVC 对降水量、气温的响应, 逐像元尺度计算 2001—2020 年 FVC 与降水量、气温之间的偏相关性, 其结果如图 8 所示。

从图 8 中可以看出, FVC 对气候因子的响应具有一定的差异性, 通过偏相关的 *t* 显著性检验并对

面积做进一步统计计算发现, FVC 与降水量呈正相关关系的区域面积比例占总面积的 75.38%, FVC 与气温呈正相关关系的区域面积比例占总面积的 69.64%, 整体上偏相关性主要表现为不显著正相关 ($P > 0.05$)。其中, FVC 与降水量呈不显著正相关关系 ($P > 0.05$) 的区域面积占总面积的 58.41%, 主要分布在天山西北部, 南部以及东部区域; FVC 与气温呈不显著正相关关系 ($P > 0.05$) 的区域面积占总面积的 63.53%, 主要分布在北部和天山中段山区; 呈负相关关系的区域在空间上没有很明显的分布规律, 复相关性主要表现为不显著负相关 ($P > 0.05$), 在天山中段山区 FVC 与降水量呈负相关关系, 在天山西南部和西北部, FVC 与气温呈负相关关系。总而言之, FVC 与降水量、气温主要呈正相关关系, 其中 FVC 与降水量呈正相关关系的区域面积更大且相关性更强, 这表明与温度相比, 降水量对研究区草地植被覆盖度的影响更大。

采用 GIS 技术, 计算逐像元降水量和气温两个气候因子与草地 FVC 之间的复相关性, 并对结果进

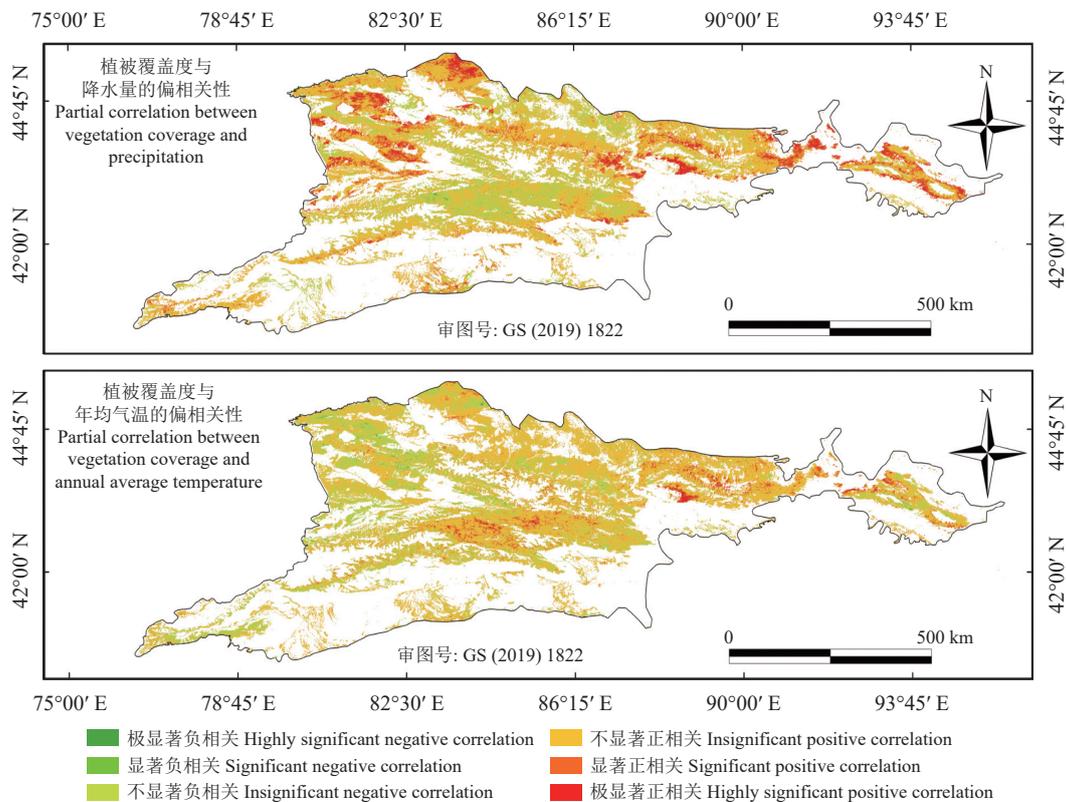


图 8 2001—2020 年天山新疆段草地植被覆盖度与降水量、气温的偏相关性空间分布

Figure 8 Spatial distribution of partial correlations between grassland fractional vegetation cover, annual average temperature, and precipitation in Xinjiang section of the Tianshan Mountains from 2001 to 2020

行 F 显著性检验 (图 9), 可以看出, 研究区降水量、气温与 FVC 之间的复相关性比较弱, 呈不显著复相关关系 ($P > 0.05$)。在空间上, 复相关性存在显著复相关 ($P < 0.05$) 的区域面积零散分布于天山东部和西北部, 面积仅占总面积的 11.05%; 复相关性较弱呈不显著复相关关系 ($P > 0.05$) 的区域主要分布在

天山中段山区和西南部, 面积可达到总面积的 88.95%。

为更深入揭示气候因子与天山新疆段草地退化的复合作用关系规律, 依据前人研究, 基于偏相关和复相关分析显著性检验结果, 对研究区草地 FVC 变化进行驱动分区分析, 分区分类准则如表 2 所列^[30]。

由天山新疆段草地植被覆盖度变化驱动分区结

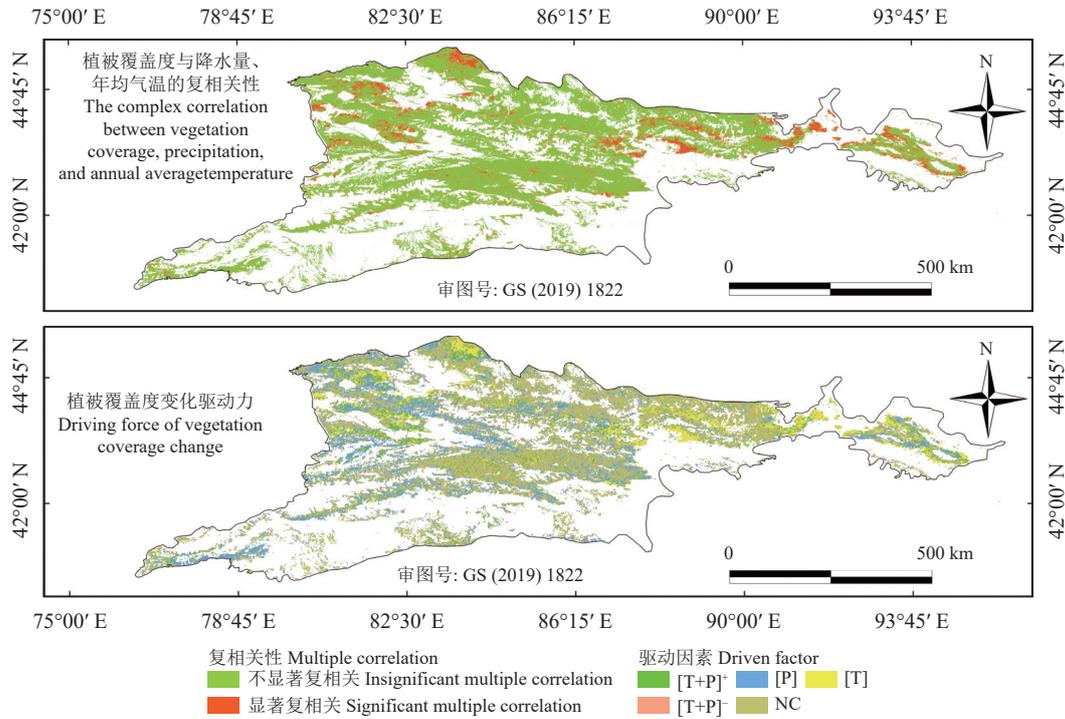


图 9 2001—2020 年天山新疆段草地植被覆盖度与降水量—气温的复相关性分布与驱动力分析
 Figure 9 Spatial distribution of multiple correlations between grassland fractional vegetation cover and precipitation—temperature, and associated changes driven by different factors from 2001 to 2020 in Xinjiang section of the Tianshan Mountains

表 2 草地植被覆盖度 (FVC) 变化影响因子分区规则
 Table 2 Analysis of factors driving grassland fractional vegetation cover

| 因子 Factor | FVC驱动因子 FVC driving factors | 类型 Type | 分区准则 Rule | | |
|------------------------------|---|-------------|---------------------|---------------------|-------------------|
| | | | R_1 | R_2 | R_3 |
| 气候因子 Climate factors | 气温降水强驱动型 Strongly altered by temperature and precipitation | $[T + P]^+$ | $ t > t_{0.01}$ | $ t > t_{0.01}$ | $F > F_{0.05}$ |
| | 降水驱动型 Altered by precipitation | P | | $ t > t_{0.01}$ | $F > F_{0.05}$ |
| | 气温驱动型 Altered by temperature | T | $ t > t_{0.01}$ | | $F > F_{0.05}$ |
| | 气温降水弱驱动型 Slightly altered by temperature and precipitation | $[T + P]^-$ | $ t \leq t_{0.01}$ | $ t \leq t_{0.01}$ | $F > F_{0.05}$ |
| 非气候因子 Non-climate factors | 非气候因子驱动型 Altered by non-climate factors | NC | | | $F \leq F_{0.05}$ |

FVC, 草地植被覆盖度; R_1 , FVC与气温偏相关的 t 显著性检验; R_2 , FVC与降水偏相关的 t 显著性检验; R_3 , FVC与气温、降水复相关的 F 显著性检验。

FVC, fractional vegetation cover; R_1 , t -Test significance of the partial correlations between FVC and temperature; R_2 , t -Test significance of the partial correlations between FVC and precipitation; R_3 , F -Test significance of multiple correlations between FVC and temperature-precipitation.

果表明(图9), 2001—2020年FVC变化受气候因子驱动的区域占44.23%, 其中FVC受降水量驱动的区域面积比例最大, 占22.7%, 在天山东部和西部均有分布; 受气温驱动的区域占10.36%, 主要分布在天山东段和西北部区域; 气温降水共同增强驱动的区域占9.05%, 其面积分布比较零散, 主要分布在天山西部; 气温降水共同弱驱动区域仅占总面积的2.12%; FVC受非气候因子驱动的区域占总面积的55.77%, 空间上面积分布不集中, 在天山中段山区、南北两侧绿洲边缘地带以及西北部地势较平缓的区域均有分布。总之, 气候因子和非气候因子共同影响着天山新疆段草地FVC的变化, 但非气候因子的影响比气候因子更明显。

3 讨论与结论

3.1 讨论

利用遥感技术监测大空间尺度的草地退化变化特征时, 指标获取有限, 可优先选择植被覆盖度、地上生物量和植被高度等指标进行研究^[31]。由于天山新疆段独特的环境特点和地理位置, 针对该区域的主要生态问题——草地退化进行研究, 是掌握环境变化并制定生态安全保护政策和方案的有效手段之一。有关研究显示, 近15年来伊犁河谷草地出现持续退化现象, 整体上主要以轻度退化为主^[32], 本研究发现近20年天山新疆段草地整体上处于轻度退化水平, 并且在空间上退化草地面积逐渐往天山西部扩散, 这与该结果比较相近。研究区重度退化草地面积存在上升趋势, 这对局部区域的生态安全造成威胁, 使得生态系统变得更加脆弱。前人研究表明, 近年来新疆气候存在增暖增湿趋势^[33], 这可能对天山山区和盆地周围的植被生长具有促进作用, 从而使退化得到改善, 但同时也不能忽视有些极端气候现象造成的自然灾害和不合理的人类活动对草地植被的影响。因此, 在全球化大背景下深入探究天山草地退化时空格局变化及其驱动机制对新疆草地资源保护和可持续利用有重要意义。

2001—2020年间, 研究区草地FVC受气候因子驱动的区域占总面积的44.23%, 其中与气温相比, FVC受降水量的影响更明显。FVC受非气候因子

驱动的区域面积比例可达55.77%, 草地受非气候因子的驱动大于气候因素, 这可能是由于研究区包含了天山新疆段整个山区和南坡和北坡的部分绿洲区, 地形地貌复杂, 南坡和北坡地区的气候和人文环境存在比较大的差异所造成的。有关研究表明, 20世纪90年代以来新疆城市化水平不断上升, 南疆和北疆土地覆被类型变化多端且复杂, 其中耕地和人工表面(建设、道路和工矿用地)的面积增加比较明显, 而林地和草地面积有所减少^[34-35]。加上人类活动的影响, 非气候因子进一步增强了天山新疆段草地植被的驱动作用。总之, 本研究发现天山新疆段退化草地变化是气候因素和非气候因素共同作用的结果, 但非气候因素的影响大于气候因素。

本研究的不同之处在于采用复相关分析和驱动分区原则, 定量分析了天山新疆段草地退化驱动因素, 但也存在一定的局限性, 只考虑了降水量和气温两种气候因子, 另外天山新疆段草地植被还会受到地表温度、地形、植被类型、土地利用类型等多种因素的影响, 这些因素也应该被纳入其中^[36]。在今后的相关工作中, 基于不同的退化草地评价指标, 结合人文因素对天山新疆段草地退化驱动机制开展深入的研究很有必要。

3.2 结论

本研究以天山新疆段退化草地作为研究对象, 基于2001—2020年MODIS NDVI和气象遥感数据, 采用像元二分模型、草地退化指数、变异系数、冷/热点分析和相关性分析等方法分析草地退化时空分布特征及其与气候因子的关系, 得到以下结论:

1) 2001—2020年, 天山新疆段退化草地面积约为 $8.6 \times 10^6 \text{ hm}^2$, 占总面积的34.04%, 其中轻度退化草地的面积比例最大, 占31.43%, 草地退化指数为1.67, 处于轻度退化水平。

2) 空间上, 轻度退化草地主要集中分布在天山中段山区和西部地区, 中度退化和重度退化草地面积较小且不集中, 没有表现出明显的空间分异特征, 通过草地FVC变异系数的时空变化特征发现95%以上的区域变异系数小于0.2, 总体上覆盖度的年际变异较小。

3) 天山新疆段草地FVC与降水量、气温之间的偏相关性均呈现不显著正相关关系($P > 0.05$), 复相

关性表现为不显著复相关 ($P > 0.05$), 通过驱动力分析发现, 草地 FVC 受气候因子驱动的区域面积占总面积的 44.23%, 主要分布在天山西部和东部区域, 受非气候因子驱动的区域面积占总面积的 55.77%, 在天山中段高海拔山区和南北两侧地势较平缓的区域均有分布。

参考文献 References:

- [1] HU Y F, HAN Y Q, ZHANG Y Z, ZHUANG Y. Extraction and dynamic spatial-temporal changes of grassland deterioration research hot regions in China. *Journal of Resources and Ecology*, 2021, 8(4): 352-358.
- [2] NEINAVAZ E, SCHLERF M, DARVISHZADEH R. Thermal infrared remote sensing of vegetation: Current status and perspectives. *International Journal of Applied Earth Observations and Geoinformation*, 2021, 102(2): 102415.
- [3] 黄麟, 翟俊, 祝萍, 郑瑜晗. 中国草畜平衡状态时空演变指示的草地生态保护格局. *地理学报*, 2020, 75(11): 2396-2407.
HUANG L, ZHAI J, ZHU P, ZHENG Y H. Spatiotemporal evolution characteristics of livestock-carrying pressure in China and its implications for grassland ecosystem conservation pattern. *Acta Geographica Sinica*, 2020, 75(11): 2396-2407.
- [4] 古琛, 贾志清, 杜波波, 何凌仙子, 李清雪. 中国退化草地生态修复措施综述与展望. *生态环境学报*, 2022, 31(7): 1465-1475.
GU C, JIA Z Q, DU B B, HE L X Z, LI Q X. Reviews and prospects of ecological restoration measures for degraded grasslands of China. *Ecology and Environmental Sciences*, 2022, 31(7): 1465-1475.
- [5] 武爽, 冯险峰, 孔玲玲, 刘子川, 姚玄楚. 气候变化及人为干扰对西藏地区草地退化的影响研究. *地理研究*, 2021, 40(5): 1265-1279.
WU S, FENG X F, KONG L L, LIU Z C, YAO X C. Effects of climate variation and human activities on grassland degradation in Tibet. *Geographical Research*, 2021, 40(5): 1265-1279.
- [6] 王明君, 赵萌莉, 崔国文, 韩国栋. 放牧对草甸草原植被和土壤的影响. *草地学报*, 2010, 18(6): 758-762.
WANG M J, ZHAO M L, CUI G W, HAN G D. Effect of grazing intensities on vegetation and soil in meadow steppe. *Acta Agrestia Sinica*, 2010, 18(6): 758-762.
- [7] 邓燕, 李钊, 姚树冉, 孙颖, 解淑斌, 李海玲, 楚启鹏, 马娟, 魏茂宏, 冉金枝, 田斌, 邓建明. 不同程度退化草地的植被土壤特征及其相互间的关系. *草业科学*, 2021, 38(7): 1260-1269.
DENG Y, LI F, YAO S R, SUN N, JIE S B, LI H L, CHU Q P, MA J, WEI M H, RAN J Z, TIAN B, DENG J M. Vegetation and soil characteristics of degraded grassland and their relationship. *Pratacultural Science*, 2021, 38(7): 1260-1269.
- [8] PEREIRA O, FERREIRA L, PINTO F. Assessing pasture degradation in the Brazilian Cerrado Based on the analysis of MODIS NDVI time-series. *Remote Sens*, 2018, 10(11): 1761.
- [9] 韦惠兰, 祁应军. 玛曲草地植被退化的时空分布及其人文因素分析. *中国草地学报*, 2017, 39(3): 57-64.
WEI H L, QI Y J. The spatial and temporal distribution of grassland vegetation degradation and analysis of anthropogenic factors in Maqu County. *Chinese Journal of Grassland*, 2017, 39(3): 57-64.
- [10] 张艳珍, 王钊齐, 杨悦, 李建龙, 张颖, 章超斌. 蒙古高原草地退化程度时空分布定量研究. *草业科学*, 2018, 35(2): 233-243.
ZHANG Y Z, WANG Z Q, YANG Y, LI J L, ZHANG Y, ZHANG C B. Research on the quantitative evaluation of grassland degradation and spatial and temporal distribution on the Mongolia Plateau. *Pratacultural Science*, 2018, 35(2): 233-243.
- [11] 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. *自然资源学报*, 2008(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. *Journal of Natural Resources*, 2008(4): 643-656.
- [12] 曹旭娟, 干珠扎布, 梁艳, 高清竹, 张勇, 李玉娥, 万运帆, 旦久罗布. 基于NDVI的藏北地区草地退化时空分布特征分析. *草业学报*, 2016, 25(3): 1-8.
CAO X J, Ganzhuzhabu, LIANG Y, GAO Q Z, ZHANG Y, LI Y E, WANG Y F, Danjiuluobu. Temporal and spatial distribution of grassland degradation in northern Tibet based on NDVI. *Acta Prataculturae Sinica*, 2016, 25(3): 1-8.
- [13] 陈宸. 新疆草地时空分布格局及其驱动力分析. 乌鲁木齐: 新疆农业大学硕士学位论文, 2021.
CHEN C. Analysis on spatial and temporal distribution patterns and driving forces of grassland in Xinjiang. Master Thesis. Urumqi:

- Xinjiang Agricultural University, 2021.
- [14] 杨峰, 钱育蓉, 李建龙, 杨齐, 杨智明. 天山北坡典型荒漠草地退化特征及其成因. 自然资源学报, 2011, 26(8): 1306-1314.
YANG F, QIAN Y R, LI J L, YANG Q, YANG Z M. Degradation characteristics and causes of desert grassland in the northern Tianshan Mountains. *Journal of Natural Resources*, 2011, 26(8): 1306-1314.
- [15] 张绘芳, 张景路, 侯晓巍, 高亚琪, 朱雅丽, 郑哲. 新疆天山山区乔木林碳密度变化特征及其影响因素. 水土保持通报, 2021, 41(2): 122-127.
ZHANG H F, ZHANG J L, HOU X W, GAO Y Q, ZHU Y L, ZHENG Z. Variation characteristics and related factors of carbon density of arbor forest in Tianshan Mountains. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2021, 41(2): 122-127.
- [16] 王鹤松, 何敏, 闫薇, 艾金龙, 褚建民. 基于遥感总初级生产力的天山—塔里木绿洲地区生态系统脆弱性研究. 生态学报, 2021, 41(24): 9729-9737.
WANG H S, HE M, YAN W, AI J L, CHU J M. Research on the quantitative evaluation of grassland degradation and spatial and temporal distribution on the Mongolia Plateau. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, 41(24): 9729-9737.
- [17] 郭秀丽, 李旺平, 周立华. 生态政策驱动下的内蒙古自治区杭锦旗植被覆盖变化. 草业科学, 2018, 35(8): 1843-1851.
GUO X L, LI W P, ZHOU L H. Influence of ecological policy on changes in vegetation coverage in Hanggin Banner, Inner Mongolia, China. *Pratacultural Science*, 2018, 35(8): 1843-1851.
- [18] 王丽春, 焦黎, 来风兵. 基于NDVI的新疆玛纳斯湖湿地植被覆盖度变化研究. 冰川冻土, 2018, 40(1): 176-185.
WANG L C, JIAO L, LAI F B. The vegetation coverage change based on NDVI of the wetland by Manas Lake, Xinjiang. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2018, 40(1): 176-185.
- [19] 边慧芹, 王雪梅. 近13年渭干河—库车河绿洲植被覆盖动态变化分析. 草业科学, 2018, 35(12): 2845-2854.
BIAN H Q, WANG X M. Analysis of dynamic change in the past 13 years in vegetation covering the delta oasis of Weigan—Kuqa River. *Pratacultural Science*, 2018, 35(12): 2845-2854.
- [20] 中华人民共和国农业部. 天然草地退化、沙化、盐渍化的分级指标 GB 19377—2003. 北京: 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 2003.
The Ministry of Agriculture of the People's Republic of China. Parameters for degradation, sandification and salification of rangelands GB 19377—2003. Beijing: General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, 2003.
- [21] 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. 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. *Chinese Journal of Grassland*, 2017, 39(4): 86-93.
- [22] 全川. 草地退化指数的研究. 内蒙古大学学报(自然科学版), 2000(5): 508-512.
TONG C. The study on the grassland degradation index. *Journal of Inner Mongolia University (Natural Science Edition)*, 2000(5): 508-512.
- [23] 高清竹, 李玉娥, 林而达, 江村旺扎, 万运帆, 熊伟, 王宝山, 李文. 藏北地区草地退化的时空分布特征. 地理学报, 2005(6): 87-95.
GAO Q Z, LI Y E, LIN E D, Jiangcunwangzha, WAN Y F, XIONG W, WANG B S, LI W. Temporal and spatial distribution of grassland degradation in northern Tibet. *Acta Geographica Sinica*, 2005(6): 87-95.
- [24] 王伟, 买哲, 肖靖, 周新玲, 乔家君. 河南省农区经济的演化特征及发展研究. 地域研究与开发, 2019, 38(4): 142-146.
WANG W, MAI Z, XIAO J, ZHOU X L, QIAO J J. Research on economic evolution characteristics and development strategies of rural areas in Henan Province. *Areal Research and Development*, 2019, 38(4): 142-146.
- [25] 宋洁, 温璐, 王凤歌, 李宽, 吴程, 张宏伟, 张雪峰. 乌兰布和沙漠生态系统服务价值时空动态. 生态学报, 2021, 41(6): 2201-2211.
SONG J, WEN L, WANG F G, LI K, WU C, ZHANG H W, ZHANG X F. Spatiotemporal dynamics of ecosystem service value in Ulan Buh Desert. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, 41(6): 2201-2211.
- [26] 张军, 陶华昉, 李文杰, 任珺. 甘肃省草地生态系统时空变化特征. 草业科学, 2022, 39(6): 1106-1114.

- ZHANG J, TAO H Y, LI W J, REN J. Spatial change of grassland ecosystem in Gansu Province. *Pratacultural Science*, 2022, 39(6): 1106-1114.
- [27] 王强, 张廷斌, 易桂花, 陈田田, 别小娟, 何奕萱. 横断山区2004—2014年植被NPP时空变化及其驱动因子. *生态学报*, 2017, 37(9): 3084-3095.
- WANG Q, ZHANG T B, YI G H, CHEN T T, BIE X J, HE Y X. Tempo-spatial variations and driving factors analysis of net primary productivity in the Hengduan mountain area from 2004 to 2014. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37(9): 3084-3095.
- [28] 王娟娟, 毋兆鹏, 王珊珊, 尹慧慧. 干旱区河谷绿洲土地利用冲突格局分析. *自然资源遥感*, 2021, 33(4): 243-251.
- WANG J J, WU Z P, WANG S S, YIN H H. An analysis of the pattern of land-use conflicts in valley oases in arid areas. *Remote Sensing for Natural Resources*, 2021, 33(4): 243-251.
- [29] 李辉, 红英, 邓国荣, 乌日罕, 张洪岩, 赵建军, 郭笑怡. 1982—2015年气候变化和人类活动对内蒙古草地净初级生产力的影响. *应用生态学报*, 2021, 32(2): 415-424.
- LI H, HONG Y, DENG G R, Wurihan, ZHANG H Y, ZHAO J J, GUO X Y. Impacts of climate change and human activities on net primary productivity of grasslands in Inner Mongolia, China during 1982—2015. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2021, 32(2): 415-424.
- [30] 陈云浩, 李晓兵, 史培军. 1983—1992年中国陆地NDVI变化的气候因子驱动分析. *植物生态学报*, 2001(6): 716-720.
- CHEN Y J, LI X B, SHI P J. Variation in NDVI driven by climate factors across China, 1983—1992. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2001(6): 716-720.
- [31] 朱宁, 王浩, 宁晓刚, 刘娅菲. 草地退化遥感监测研究进展. *测绘科学*, 2021, 46(5): 66-76.
- ZHU N, WANG H, NING X G, LIU Y F. Advances in remote sensing monitoring of grassland degradation. *Science of Surveying and Mapping*, 2021, 46(5): 66-76.
- [32] 闫俊杰, 刘海军, 崔东, 陈晨. 近15年新疆伊犁河谷草地退化时空变化特征. *草业科学*, 2018, 35(3): 508-520.
- YAN J J, LIU H J, CUI D, CHEN C. Spatiotemporal dynamics of grassland degradation in Yili Valley of Xinjiang over the last 15 years. *Pratacultural Science*, 2018, 35(3): 508-520.
- [33] 姚俊强, 李漠岩, 迪丽努尔·托列吾别克, 陈静, 毛炜峰. 不同时间尺度下新疆气候“暖湿化”特征. *干旱区研究*, 2022, 39(2): 333-346.
- YAO J Q, LI M Y, Dilinuer·Tuoliewubieke, CHEN J, MAO W Y. The assessment on “warming-wetting” trend in Xinjiang at multi-scale during 1961—2019. *Arid Zone Research*, 2022, 39(2): 333-346.
- [34] 图尔荪阿依·如孜, 阿里木江·卡斯木, 高鹏文, 赵孟辰. 基于DMSP/OLS和NPP/VIIRS数据的新疆城市扩展时空变化研究. *中国农业大学学报*, 2020, 25(5): 156-165.
- Tuerxunayi·Ruzi, Alimujiang·Kasimu, GAO P W, ZHAO M C. Study on the spatiotemporal changes of Xinjiang urban expansion based on DMSP/OLS and NPP/VIIRS data. *Journal of China Agricultural University*, 2020, 25(5): 156-165.
- [35] 陈曦, 常存, 包安明, 吴世新, 罗格平. 改革开放40 a来新疆土地覆被变化的空间格局与特征. *干旱区地理*, 2020, 43(1): 1-11.
- CHEN X, CHANG C, BAO A M, WU S X, LUO G P. Spatial pattern and characteristics of land cover change in Xinjiang since past 40 years of the economic reform and opening up. *Arid Land Geography*, 2020, 43(1): 1-11.
- [36] 沈贝贝, 魏一博, 马磊超, 徐大伟, 丁蕾, 侯路路, 秦琪, 辛晓平. 内蒙古草原植被覆盖度时空格局变化及驱动因素分析. *农业工程学报*, 2022, 38(12): 118-126.
- SHEN B B, WEI Y B, MA L C, XU D W, DING L, HOU L L, QIN Q, XIN X P. Spatiotemporal changes and drivers of fractional vegetation cover in Inner Mongolia grass land of China. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2022, 38(12): 118-126.

(责任编辑 王芳)