

# 天山新疆段及南北麓草地植被覆盖度时空变化特征研究

阿卜杜热合曼·吾斯曼<sup>1</sup>, 阿斯娅·曼力克<sup>3</sup>, 玉素甫江·如素力<sup>1,2\*</sup>,  
张发<sup>1</sup>, 陈以恒<sup>1</sup>

(1. 新疆师范大学 地理科学与旅游学院, 新疆 乌鲁木齐 830054; 2. 新疆干旱区湖泊环境与资源实验室, 新疆 乌鲁木齐 830054;  
3. 新疆畜牧科学院 天山北坡草地生态环境野外定位观测研究站, 新疆 乌鲁木齐 831115)

**摘要:**天山草地分布面积广阔,不仅是新疆畜牧业发展的主要支撑,也在维护生态安全方面具有重要贡献。为了解天山新疆段草地植被覆盖度的动态特征与变化趋势,以2001—2020年MODIS NDVI产品为主要数据源,采用像元二分模型估算植被覆盖度,运用转移矩阵和趋势分析法研究其变化特征,并利用地理探测器模型分析驱动因素。结果表明,研究区草地多年平均植被覆盖度在0.34~0.42波动,主要以中低、中植被覆盖度为主,各等级植被覆盖度大致呈西部高覆盖东部低覆盖的分布特征;从变化趋势来看,研究区草地植被覆盖度总体上有上升趋势,盆地周围覆盖度增加、中部山区其变化基本稳定,增加和基本稳定的区域面积占总面积的10.41%和89.16%;从地理探测器运行结果来看,单因子作用解释最大的是降水量, $q$ 为18%,当降水量与海拔交互作用时对研究区草地植被覆盖度的影响更为明显。研究结果可为天山草地生态安全保护与质量评估提供参考依据。

**关键词:**NDVI;像元二分模型;地理探测器;天山新疆段

**中图分类号:**S127      **文献标志码:**A      **文章编号:**1001-7461(2023)03-0153-09

## Research on Temporal and Spatial Variation Characteristics of Grassland Vegetation Coverage in the Xinjiang Section of Tianshan Mountains

Abudurehman · Wusiman<sup>1</sup>, Asiya · Manlike<sup>3</sup>, Ysufujiang · Rusuli<sup>1,2\*</sup>, ZHANG Fa<sup>1</sup>, CHEN Yi-heng<sup>1</sup>

(1. College of Geography Science and Tourism, Xinjiang Normal University, Urumqi 830054, Xinjiang, China;

2. Xinjiang Key Laboratory of Lake Environment and Resources in Arid Zone, Urumqi 830054, Xinjiang, China;

3. Field Station of Grassland Eco-Environment on the Northern Slope of Tianshan Mountains, Xinjiang Academy of Animal Science and Technology, Urumqi 831115, Xinjiang, China)

**Abstract:** The grassland of the Tianshan Mountains is widely distributed. It is not only the main support for the development of animal husbandry in Xinjiang, but also an important contribution to the maintenance of ecological security. In order to understand the dynamic characteristics and change trends of grassland vegetation coverage in Xinjiang section of the Tianshan Mountains, this study used MODIS NDVI products from 2001 to 2020 as the main data sources, estimated vegetation coverage by using pixel dichotomous model, studied its change characteristics by using transfer matrix and trend analysis method, and analyzed driving factors by using geo-detector model. The results showed that the annual average vegetation coverage of the grassland in the study area fluctuated between 0.34 and 0.42, and the vegetation coverage of each grade was mainly in medium and low levels, with the distribution characteristics of high coverage in the west and low coverage in the east. From the change trend, the coverage of grassland vegetation in the

收稿日期:2022-04-16 修回日期:2022-09-17

基金项目:国家自然科学基金(U1703341);全国大学生创新创业项目(202210762005)。

第一作者:阿卜杜热合曼·吾斯曼。研究方向:资源环境遥感。E-mail:2271558691@qq.com

\*通信作者:玉素甫江·如素力,博士,教授。研究方向:流域水文与生态系统。E-mail:Yusupjan@xjnu.edu.cn

study area generally had an upward trend. The coverage around the basin increased, and the change of vegetation coverage in the central mountainous area was basically stable. The increased and basically stable regional areas accounted for 10.41% and 89.16% of the total area. According to the results of the operation of the geographic detector, the precipitation was the largest explanation of the single factor effect, and the  $q$  value was 18%. When the precipitation interacted with the altitude, the impact on the grassland vegetation coverage in the study area was more obvious. The results of this study provides a reference for ecological security protection and quality assessment of the Tianshan Mountains grassland.

**Key words:** NDVI; dimidiate pixel model; geodetector model; Xinjiang section of the Tianshan Mountains

草地作为陆地最重要的生态系统,不仅有保持水土、防风固沙、调节气候等功能,同时也为发展畜牧业提供物质基础<sup>[1-2]</sup>。植被作为草地生态系统重要的组成部分,强烈影响着土壤圈与大气圈的能量转换与信息传递<sup>[3]</sup>。2015年草原综合植被覆盖度成为生态文明建设一个重要的考核指标<sup>[4]</sup>。因此,及时准确地掌握草地植被覆盖度的动态变化规律,对环境质量评价和生态安全具有重要的科学理论参考价值<sup>[5]</sup>。

植被覆盖度(fractional vegetation cover, FVC)指单位面积内生长的植被(包括枝、茎、叶)在地面上垂直投影占总面积的百分比,是反映地表植被生长势态的重要指标<sup>[6]</sup>。目前,估算植被覆盖度的方法主要有地面测量和遥感监测2种<sup>[7]</sup>。近几年来,在全球变暖、碳排放等全球化背景下植被领域的研究受到大量关注,尤其是关于干旱植被动态与影响因素已成为热点的研究问题之一<sup>[8]</sup>。诸多学者在干旱区植被覆盖度研究领域已证明,通过遥感平台获取的MODIS、Landsat等数据计算结果与实测采样结果之间存在较大的相关性,满足研究的精度要求<sup>[9-10]</sup>。Liu等<sup>[11]</sup>对伊洛盆地植被覆盖空间格局进行遥感监测,发现人类活动频繁的洛宁县出现低植被覆盖;何玉杰等<sup>[12]</sup>利用NDVI分析中国温带草原1982—2015年的草地植被动态并且结合水热因子分3个阶段分析其相关性;杨光华等<sup>[13]</sup>利用MODIS数据和气象卫星数据,分析1998—2007年新疆植被覆盖变化及驱动因素,得出植被覆盖变化是气候变化和人为影响因素综合作用的结果。上述研究

表明,通过植被覆盖度来监测草地动态具有一定的可行性和实际表征意义。

新疆草地分布区域广,不仅是草原畜牧业的主要支撑和丰富的生物基因库,也在维护生态安全,保护绿洲和水源涵养地等方面具有重要的生态作用<sup>[14]</sup>。天山位于准噶尔盆地和塔里木盆地的中间,自然气候和地形有明显的垂直地带性,是新疆重要的生态屏障,也是重要的畜牧基地。新疆气候干旱、生态环境脆弱,草地植被易受自然因素和人文因素的影响<sup>[15-16]</sup>。已有学者对天山带的草地<sup>[17-18]</sup>、植被指数等<sup>[19]</sup>做了研究,但大多集中在天山北坡,对天山南北两侧山麓草地植被覆盖度变化相关研究相对较少,并且多数研究运用相关性分析法来探究草地植被与外界因素的作用关系,无法比较全面地揭示天山草地复杂的空间分异性。本研究以MODIS NDVI产品为主要数据源,结合实测数据,选取新疆天山及其南北两侧山麓的低海拔绿洲区草地,运用像元二分模型和趋势分析法分析植被覆盖度时空分布特征,并运用地理探测器模型研究草地植被覆盖度与不同因子之间的相互作用关系,以期对草地合理利用和维护生态安全提供理论参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

天山新疆段深居欧亚大陆中部,位于中国新疆塔里木盆地北缘与准噶尔盆地南缘之间,是南疆和北疆的天然屏障<sup>[20]</sup>。天山平均海拔4 000 m以上,以天山山脊线为界,分为南坡和北坡两部分(图1),

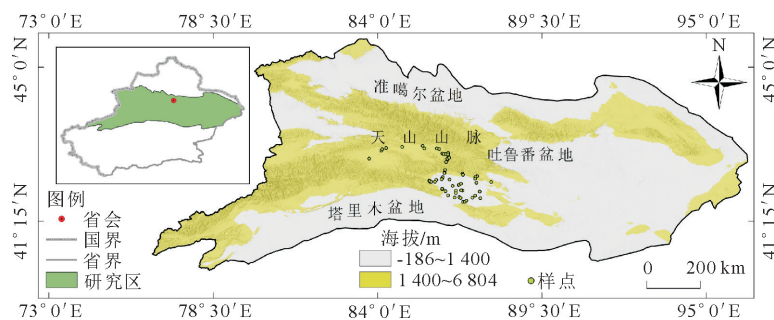


图1 研究区示意

Fig. 1 Sketch map of the research area

并且在土壤、气候、水文、植被类型和覆盖率等自然条件存在明显的差异<sup>[21]</sup>。天山地形地貌复杂多样,因受其独特地理位置的影响,南北坡气温和降水量空间分布差异较大,多年平均气温约为5℃,南坡年平均气温高于北坡;降水主要集中在夏季,年最大降水量为600~800 mm,最小降水量约150 mm,北坡年降水量大于南坡<sup>[22]</sup>。

天山分布有温性荒漠、荒漠草原、温性草原、山地草甸、高寒草原和高寒草甸6种草地类型,相比南坡,天山北坡的草地分布面积更广阔并且植被类型多样。南坡常见的自然植被有麻黄(*Ephedra*)、梭梭(*Haloxydon ammodendron*)、怪柳(*Tamarix chinensis*)、芨芨草(*Achnatherum caragana*)、盐生草(*Haloptylon glomeratus*)、芦苇(*Phragmites australis*)、盐穗木(*Halostachys caspica*)和戈壁藜(*Iljinia regelii*)等;北坡常见的自然植被有羊茅(*Festuca ovina*)、苔草(*Carex* spp.)、针茅(*Stipa capillata*)、珠芽蓼(*Polygonum viviparum*)、铁杆蒿(*Artemisia gmelinii*)、金老梅(*Potentilla fruticosa*)、早熟禾(*Poa annua*)等。基于地形地貌与草地分布范围一定的完整性,本研究选择范围为76°36′—94°40′E、40°10′—45°42′N以及塔里木盆地北部和准噶尔盆地南部海拔较低的部分绿洲区。

## 1.2 材料与方法

1.2.1 数据来源 使用数据包括MODIS NDVI数据、野外实测数据、气候数据、DEM数据和地貌类型数据。

1)MODIS NDVI产品数据:用于天山新疆段草地植被覆盖度时空分布特征及其变化趋势分析,该数据来自美国NASA数据中心提供的MOD13Q1数据,空间分辨率为250 m,时间分辨率为16 d,时间序列为2001—2020年,可通过数据共享平台([https://lpdaac.usgs.gov/products/mod13\\_q1v006/](https://lpdaac.usgs.gov/products/mod13_q1v006/))下载获取。此数据已经过大气校正、辐射定标和几何纠正,因此在处理过程中仅需对数据进行投影转换、影像拼接和裁剪即可。具体处理步骤为,首先将所有影像的投影均设置为WGS\_1984\_UTM\_Zone\_45投影,其后进行拼接和按矢量数据裁剪,最后利用最大值合成法(MVC)将每个月的影像进行合成得到该月最大植被指数合成影像,以此作为该月的植被指数。利用平均值合成法对12月的NDVI进行合成平均,利用像元二分模型合成得到植被覆盖度(FVC),并通过GIS进行空间处理与统计分析。

2)实测数据:野外实测数据用于遥感影像草地植被覆盖度反演结果的验证,数据采集时间为2021

年5月18—24日,地点在巴音郭楞蒙古自治州境内。依据样点的随机性分布原则,结合野外植被覆盖度的目测估计方法,在每个草地类型中设置采样点,布设方法为:地势相对平坦的地区,选择一个250 m×250 m范围的区域作为调查样地,用GPS记录样地中心的地理位置、海拔、草地类型、覆盖度、优势种以及植被生长情况和地貌特征,其后在每个样地内布设1 m×1 m的样方2~3个,取所有小样方植被覆盖度均值作为该样地的最终植被覆盖度。共采集52个采样点数据。

3)气候数据:用于驱动力分析,主要包括年降水量和年平均气温,数据来源于中国科学院资源环境科学与数据中心(<https://www.resdc.cn/>)提供的空间数据集,分辨率为1 km。

4)DEM数据:用于海拔、坡度和坡向等自然因子的提取,数据来源于地理空间数据云(<http://www.gscloud.cn/>),空间分辨率为90 m。

5)地貌类型数据:数据来源于中国土壤普查办公室《中华人民共和国1:100万地貌图集》,分辨率为1 km。

其他辅助数据有研究区矢量数据和MODIS Land CoverMCD12Q2地覆盖数据集,其作为提取草地空间分布范围,对此不做数据统计与分析。在驱动力分析中,为了统一影像空间分辨率,将由MODIS NDVI计算得到的草地植被覆盖度空间数据和DEM数据重采样为1 km×1 km,使之像元大小与气象数据和地貌类型数据保持一致。

1.2.2 植被覆盖度的计算与等级划分 像元二分模型假设在遥感影像中每个像元由有植被和无植被两部分组成,是目前植被覆盖度反演的有效方法<sup>[23-24]</sup>。通过MODIS NDVI数据采用像元二分模型计算得到植被覆盖度,其计算公式如下

$$F_{VC} = \frac{N_{DVI} - N_{DVI\text{Soil}}}{N_{DVI\text{Veg}} - N_{DVI\text{Soil}}} \quad (1)$$

式中: $F_{VC}$ 代表植被覆盖度; $N_{DVI\text{Soil}}$ 代表无植被覆盖像元的NDVI值(在理论上取值接近于0); $N_{DVI\text{Veg}}$ 代表完全被植被所覆盖的像元的NDVI值,即纯植被像元的NDVI值(在理论上取值接近于1)。本研究利用代替法截取像元数量累计百分比为0.5%和95%的NDVI值分别作为 $N_{DVI\text{Soil}}$ 和 $N_{DVI\text{Veg}}$ 的值。

在前人研究成果的基础上<sup>[25]</sup>,将研究区草地植被覆盖度划分5个等级,即: $F_{VC} \leq 10\%$ (低植被覆盖)、 $10\% < F_{VC} \leq 25\%$ (中低植被覆盖)、 $25\% < F_{VC} \leq 45\%$ (中植被覆盖)、 $45\% < F_{VC} \leq 65\%$ (中高植被覆盖)、 $F_{VC} > 65\%$ (高植被覆盖)。



1.2.3 趋势分析法<sup>[26]</sup> 利用趋势分析法分析天山新疆段及其南北麓 2001—2020 年草地植被覆盖度变化趋势,表达式为

$$S_{\text{lope}} = \frac{n \times \sum_{i=1}^n (Y_i \times i) - (\sum_{i=1}^n i)(\sum_{i=1}^n Y_i)}{n \times \sum_{i=1}^n i^2 - (\sum_{i=1}^n i)^2} \quad (2)$$

式中: $S_{\text{lope}}$  表示趋势斜率值; $n$  是总的监测期数,即  $n=20$  a; $i$  表示年份变量; $Y_i$  表示第  $i$  期的植被覆盖度。当趋势斜率取为正值时,表明植被覆盖度呈现上升趋势;当趋势斜率取为负值时,表明植被覆盖度呈现降低趋势。参照前人的研究<sup>[27]</sup>,将  $S_{\text{lope}}$  取值划分为 5 个等级分析研究区植被覆盖度的变化趋势,即:显著减少( $S_{\text{lope}} \leq -0.02$ )、轻微减少( $-0.02 < S_{\text{lope}} \leq -0.01$ )、基本稳定( $-0.01 < S_{\text{lope}} \leq 0.01$ )、轻微增加( $0.01 < S_{\text{lope}} \leq 0.02$ )以及显著增加( $S_{\text{lope}} > 0.02$ )。

1.2.4 地理探测器 王劲峰等<sup>[28]</sup>对地理探测器模型的概念和原理进行了详细的解释,是探求某种地理现象或要素的空间分布驱动因子的统计方法。地理探测器包括风险探测、因子探测、生态探测和交互作用探测 4 种分析方法,本研究选用因子探测和交互作用探测 2 种方法<sup>[29]</sup>。

1) 因子探测 利用因子探测计算各因子对研究区平均植被覆盖度(FVC)空间分异的影响程度大小,即  $q$  值, $q$  值越大表示影响力越强。表达式为

$$q = 1 - \frac{\sum_{h=1}^L N_h \delta_h^2}{N \delta^2} = 1 - \frac{S_{\text{sw}}}{S_{\text{ST}}} \quad (3)$$

$$S_{\text{sw}} = \sum_{h=1}^L N_h \delta_h^2, S_{\text{ST}} = N \delta^2 \quad (4)$$

式中: $h=1, \dots, L$ , 为  $Y$ (FVC)和因子  $X$  的分区; $N_h$  和  $N$  分别是层  $h$  和全区的单元数量; $\delta_h^2$  和  $\delta^2$  分别是层  $h$  与全区的  $Y$ (FVC)值的方差。 $S_{\text{sw}}$  和  $S_{\text{ST}}$  分别是层内(within sum of squares)和全区总方差(total sum of squares)。 $q$  值表示  $X$  解释了  $100 \times q\%$  的  $Y$ ,取值范围为 $[0, 1]$ 。在特殊情况下,当  $q=0$  时,表明  $X$  与  $Y$  没有任何关系, $q=1$  时,表明  $X$  完全控制了  $Y$  的空间分异。

2) 交互作用探测 利用互作用探测评估不同自变量因子在共同作用增加或减少因变量的解释力。评估方法为先分别计算不同 2 种因子如  $X_1$  和  $X_2$  对  $Y$  的解释力  $q(X_1)$  和  $q(X_2)$ ,然后计算这 2 种变量共同作用  $q(X_1 \cap X_2)$ ,最后对  $q(X_1)$ 、 $q(X_2)$  与  $q(X_1 \cap X_2)$  进行比较,2 个因子之间交互作用力比较见表 1。

据相关研究,新疆的年降水量与年平均气温均有上升的趋势<sup>[30]</sup>,这可能对新疆植被带来一定的影响。由于新疆草地生态系统相对脆弱,对周围自然环境的变化十分敏感<sup>[31]</sup>,因此本研究选取降水量( $X_1$ )、气温( $X_2$ )、海拔( $X_3$ )、坡向( $X_4$ )、坡度( $X_5$ )

和地貌类型( $X_6$ )6 种自然因子,定量分析草地植被覆盖度( $Y$ )的驱动力作用。首先经过模拟运算选用自然断点法<sup>[32]</sup>,将坡向划分 10 类,降水量、气温、海拔和坡度划分为 9 类,地貌类型重分 9 类,然后创建  $6 \text{ km} \times 6 \text{ km}$  渔网格,共生成 5 110 个中心点作为采样点,提取各指标对应的  $X$  与  $Y$  属性值,最后导入地理探测器进行处理。

表 1 交互作用类型

Table 1 Type of interaction

评估标准	交互作用类型
$q(X_1 \cap X_2) > q(X_1) \text{ and } q(X_2)$	双因子增强作用
$q(X_1 \cap X_2) < q(X_1) \text{ and } q(X_2)$	非线性减弱
$q(X_1 \cap X_2) = q(X_1) + q(X_2)$	独立
$q(X_1 \cap X_2) < q(X_1) \text{ or } q(X_2)$	单因子非线性减弱
$q(X_1 \cap X_2) > q(X_1) + q(X_2)$	非线性增强

注: $X_1$  和  $X_2$  代表对 FVC 的影响因子,符号“ $\cap$ ”表示  $X_1$  和  $X_2$  之间的交互作用。

## 2 结果与分析

### 2.1 草地植被覆盖度反演结果验证

采用 52 个野外采样点的实际草地植被覆盖度值与对应时间的 MODIS 影像植被覆盖度反演结果进行相关性分析(图 2)。从结果来看, $R^2$  为 0.77,虽然通过像元二分模型反演得到的草地植被覆盖度与实测草地植被覆盖度之间存在差异,但二者有较高的拟合程度。由此可见,MODIS 遥感影像植被覆盖度反演结果与实际植被覆盖度比较贴近,这进一步说明研究区 MODIS 影像采用像元二分模型反演草地植被覆盖度在一定程度上是贴近现实的。

### 2.2 草地植被覆盖时空变化特征

研究区 2001—2020 年平均 FVC 随时间的变化趋势见图 3,天山新疆段及其南北麓草地年平均植被覆盖度在 0.34~0.42,但具有一定年际差异。其中,最低值出现在 2001 年,约为 0.34;最高值出现在 2016 年,约为 0.42;到 2020 年取值约为 0.39。研究区年平均植被覆盖度变化大致分为 3 个阶段:2001—2006 年覆盖度变化幅度较大,存在急速上升和急速降低变化趋势;2006—2016 年覆盖度呈现波浪式上升阶段;2016—2020 年覆盖度呈现波浪式下降阶段。总之,20 a 来草地平均植覆盖度年际变化比较明显,覆盖度总体上呈现波浪式上升变化趋势。

由图 4 可知,2001—2020 年研究区草地植被主要以中低和中覆盖度为主,并且不同等级的植被覆盖度面积均发生了变化。其中:低植被覆盖面积占比 2.2%~10%,2001 年低植被覆盖度面积占比最大,为 10%,2016 年低植被覆盖度跌至最低值为 2.2%,此后逐渐上升,到 2020 年低植被覆盖度面积

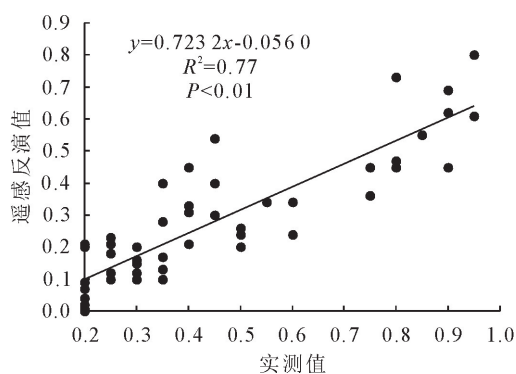


图2 植被覆盖度实测值与反演值相关性分析

Fig. 2 Correlational analysis between measured and inverted vegetative cover values

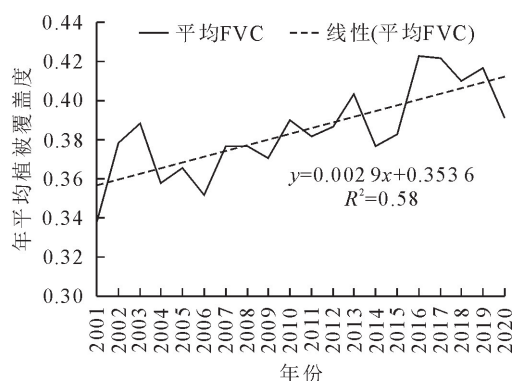


图3 2001—2020年平均植被覆盖度年际变化

Fig. 3 Interannual variation in mean vegetation cover 2001–2020 占比为 8.4%;中低、中植被覆盖度面积呈波动式变化,所占比例稳定在总面积的 51%~65%,2004 年占比最大,约为 64%,2020 年占比最低,约为 51%;中高植被覆盖度在 2001 年所占比例最小,约占 18%,2020 年占比最大,约占 25.9%;高植被覆盖度面积占比 10%~17% 内变动,2001 年所占比例最

小,约为 10%,此后逐步上升,最高值出现在 2017 年,面积约占 16.9%,到 2020 年其占比为 14.4%。总体来看,近 20 a 研究区高植被覆盖度面积增加,低植被覆盖度面积有所减少。

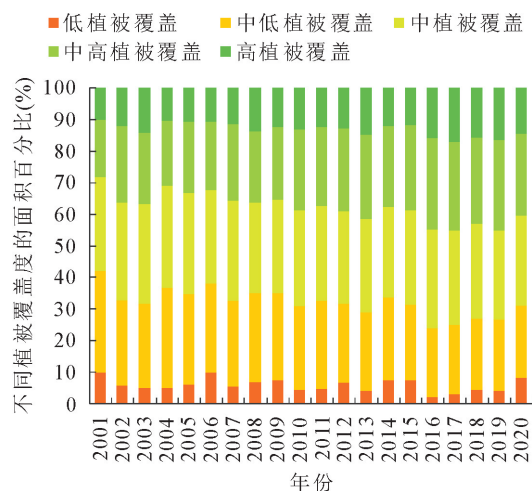


图4 不同等级的植被覆盖度随时间的变化

Fig. 4 Temporal changes in different classes of vegetation cover

由图 5 可见,研究区草地不同等级的植被覆盖度在空间上具有一定的分布规律性:低、中低和中植被覆盖在空间上主要分布在盆地周围,中高和高植被覆盖主要分布在山区,研究区北部草地植被覆盖密集、南部相对较分散,各等级植被覆盖大致呈现西南—东北相间分布特点,整体上西部覆盖度高于东部。在 2001—2005 年,研究区草地植被在空间上主要以中低、中覆盖为主,低覆盖区域主要分布在北部,高植被覆盖区域主要分布在西部;2006—2010 年,研究区北部中高覆盖面积增加,低覆盖面积减少;2011—2020 年,研究区北部和南部的中高、高植被覆盖区呈明显扩大趋势,低植被覆盖区逐渐减少,

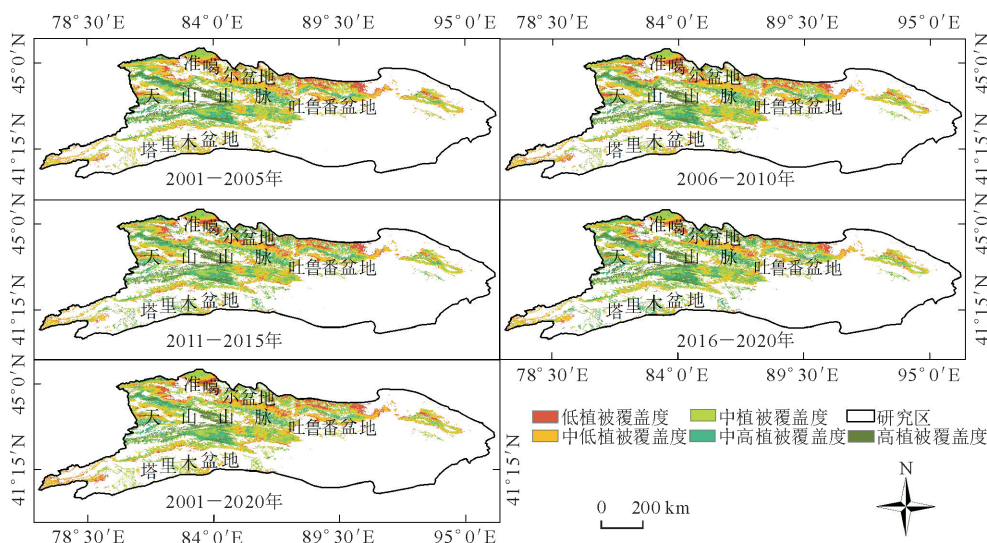


图5 不同等级植被覆盖度空间分布

Fig. 5 Spatial distribution of the different classes of vegetative coverage

中低、中覆盖区变化相对平稳。总体上,2001—2020 年研究区低植被覆盖面积减少,高植被覆盖面积增加,草地植被覆盖质量提高。但低海拔绿洲边缘低植被覆盖度草地面积波动较大,中部山区高植被覆盖度草地面积变化较稳定,说明在短时间内绿洲周围草地植被面积比高海拔山区更容易发生变化。

### 2.3 植被覆盖度时间变化规律分析

为了进一步分析天山新疆段及其南北麓草地不同等级的植被覆盖度面积的变化格局,选取 2001、2016 年与 2020 年 3 个时期的平均植被覆盖度进行空间叠加运算,得到 2001—2016、2016—2020、2001—2020 年不同覆盖度等级面积百分比转移矩阵(表 2—表 4)。可以看出,近 20 a 研究区各等级的覆盖度中,转化为其他覆盖度面积最多的是低覆盖度,而高覆盖度转化的面积最小。

表 2 2001—2016 年植被覆盖度面积百分比转移矩阵

Table 2 The transfer matrix of vegetation coverage area percentage in the study area from 2001 to 2016 (%)

2016 年	2001 年				
	低覆盖度	中低覆盖度	中覆盖度	中高覆盖度	高覆盖度
低覆盖度	13.83	2.19	0.26	0.02	0.00
中低覆盖度	60.96	45.58	4.18	0.24	0.03
中覆盖度	14.05	40.34	52.45	7.35	0.18
中高覆盖度	6.47	8.30	36.71	73.17	14.00
高覆盖度	4.69	3.59	6.40	19.21	85.79

表 3 2016—2020 年植被覆盖度面积百分比转移矩阵

Table 3 The transfer matrix of vegetation coverage area percentage in the study area from 2016 to 2020 (%)

2020 年	2016 年				
	低覆盖度	中低覆盖度	中覆盖度	中高覆盖度	高覆盖度
低覆盖度	58.78	25.68	4.49	0.18	0.08
中低覆盖度	38.23	60.34	26.53	1.63	0.33
中覆盖度	2.31	13.24	58.36	24.18	1.76
中高覆盖度	0.54	0.62	10.07	64.47	25.13
高覆盖度	0.14	0.11	0.56	9.54	72.69

在 2001—2016 年,低覆盖度面积转化比例最高,主要转化为中低覆盖度,占总转化面积的 60.96%;中低覆盖度,主要转化为中覆盖度,占转化面积的 40.34%;中覆盖度,主要转化为中高覆盖度,占转化面积的 36.71%;高覆盖度有 14% 面积转化为中高覆盖度,中高覆盖度主要转化为高覆盖度,占转化面积的 19.21%。

2016—2020 年,研究区低覆盖度转化为中低覆盖度占总转化面积的 38.23%,转化为其他覆盖度的面积最多,但中低覆盖度向低覆盖度、中覆盖度向中低覆盖度、中高覆盖度向中覆盖度、高覆盖度向中

高覆盖度的面积转化比例上升,导致该时段覆盖度从高等级覆盖向低等级覆盖的转化面积增加,因此该时间段内研究区草地植被覆盖整体上呈现下降的变化趋势。

表 4 2001—2020 年植被覆盖度面积百分比转移矩阵

Table 4 The transfer matrix of vegetation coverage area percentage in the study area from 2001 to 2020 (%)

2020 年	2001 年				
	低覆盖度	中低覆盖度	中覆盖度	中高覆盖度	高覆盖度
低覆盖度	47.08	11.39	0.51	0.02	0.00
中低覆盖度	35.99	51.89	9.00	0.45	0.02
中覆盖度	5.99	25.44	57.73	12.96	0.30
中高覆盖度	5.09	6.54	25.64	73.91	21.69
高覆盖度	5.85	4.74	7.12	12.66	77.99

2001—2020 年,低覆盖度转化为其他覆盖度面积最多,主要转化为中低覆盖度,占转化总面积的 35.99%;中低覆盖度向中覆盖度、中覆盖度向中高覆盖度转化各占总转化面积的 25%;中高覆盖度向其他覆盖度的转化面积较小,高覆盖度转化为中高覆盖度占转化总面积的 21.69%。由此可见,该时段内整体覆盖度有上升的变化趋势。总之,近 20 a 内天山新疆段及其南北麓草地不同等级的植被覆盖度均发生了变化,向其他覆盖度转化面积最多的是低覆盖度,主要转化为中低覆盖度,中低、中植被覆盖度面积不断增加,而中高、高植被覆盖度面积变化较小且相对稳定,植被覆盖度整体上呈现增加的变化态势。

### 2.4 植被覆盖度时空变化趋势分析

利用趋势分析法对天山新疆带及其南北麓各像元植被覆盖度随时间的变化趋势进行分析,得到 2001—2020 年逐像元植被覆盖度空间分布的变化趋势(图 6)。从整体的变化趋势来看,近 20 a 里研究区草地植被覆盖度呈现增加趋势。其中,植被覆盖度基本稳定的区域占总面积的 89.16%;覆盖度减少的区域占总面积的 0.43%,植被覆盖度增加的区域占总面积的 10.41%,其中呈显著增加的区域占 4.31%。从空间分布特征来看,植被覆盖度呈增加趋势的区域主要分布在盆地周围的绿洲区,尤其是在准噶尔盆地南部的绿洲边缘覆盖度增加比较明显。相比之下,天山中部山区草地植被覆盖度面积变化基本稳定。总而言之,2001—2020 年天山新疆段及其南北麓草地植被覆盖度在空间分布上呈现增加的趋势,可能是在这一时期草地植被受到气候、水资源、土壤和人类活动等多种因素影响的结果<sup>[33]</sup>。

### 2.5 草地植被覆盖驱动力分析

根据因子探测,计算不同因子对研究区草地植被覆盖度(FVC)的影响力大小。各因子对植被覆



盖度影响程度为: $X_1$ (降水量) $>X_3$ (海拔) $>X_2$ (气温) $>X_6$ (地貌类型) $>X_5$ (坡度) $>X_4$ (坡向)。从各因子对 FVC 的解释力( $q$ )来看,降水量对研究区 FVC 的解释力最大, $q$  值约为 0.18,其次是海拔和气温, $q$  值分别为 0.133 和 0.109,坡度、坡向和地貌类型的  $q$  值分别为 0.032、0.003 和 0.048。其中,

降水量、海拔和气温的因子解释率在 10% 以上,坡向的解释率最小,仅 0.3%,影响不显著。总之,从因子解释力的大小来看,降水量、海拔和气温是影响研究区草地植被覆盖度的主要因子,其中降水量的解释力最大, $q$  值为 18%,由此可见,研究区草地植被覆盖度受降水影响比其他因素更为明显。

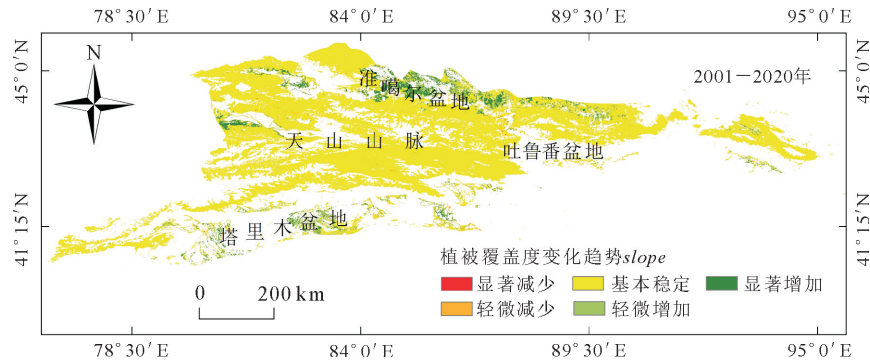


图 6 2001—2020 年植被覆盖度变化趋势  
Fig. 6 Trends of vegetation cover 2001—2020

表 5 交互作用探测结果

Table 5 Result of interaction detection

$X \cap Y$	$q(X)$	$q(Y)$	$q(X \cap Y)$	$q(X)+q(Y)$	交互关系
$X_1 \cap X_2$	0.180	0.109	0.285	0.289	双协同增强作用
$X_1 \cap X_3$	0.180	0.133	0.319	0.313	非线性增强
$X_1 \cap X_5$	0.180	0.032	0.210	0.212	双协同增强作用
$X_1 \cap X_6$	0.180	0.048	0.211	0.228	双协同增强作用
$X_2 \cap X_3$	0.109	0.133	0.195	0.242	双协同增强作用
$X_2 \cap X_5$	0.109	0.032	0.130	0.141	双协同增强作用
$X_2 \cap X_6$	0.109	0.048	0.136	0.157	双协同增强作用
$X_3 \cap X_5$	0.133	0.032	0.161	0.165	双协同增强作用
$X_3 \cap X_6$	0.133	0.048	0.159	0.181	双协同增强作用
$X_5 \cap X_6$	0.032	0.048	0.060	0.080	双协同增强作用

注: $X$ 、 $Y$  分别表示符号“ $\cap$ ”左右两侧不同因子单独作用时的强度。

根据交互作用探测,选取降水量( $X_1$ )、气温( $X_2$ )、海拔( $X_3$ )、坡度( $X_5$ )和地貌类型( $X_6$ )5 个因子并分别用  $X$  和  $Y$  表示,将各因子独立作用时的  $q$  值( $X$ 、 $Y$ )、2 种因子交互作用时的值  $q(X \cap Y)$  和 2 种因子独立作用之和  $q(X+Y)$  值进行统计分析(表 5)。可以看出,各因子交互作用呈双因子协同增强作用或非线性增强效应,不存在互相独立作用的因子。其中,降水量与海拔交互作用时的值大于两者独立作用值的和,呈现非线性增强作用,取值约为 32%;其他因子之间的交互作用均呈现双因子协同增强作用,即二者相互增强了 FVC 空间分布的影响。进一步表明研究区草地植被覆盖度空间分布差异不是由因子简单的叠加关系造成的,而是相互增强或非线性增强的结果。其中,降水量和海拔的交互作用对草地植被覆盖度空间分宜的影响大于其他因素。

3 结论与讨论

1)利用像元二分模型反演得到的植被覆盖度与实测植被覆盖度之间具有较高的拟合程度,其决定系数( $R^2$ )达到 0.77,表明运用该方法研究天山草地植被覆盖度时空特征具有客观性。

2)近 20 a 里研究区草地年平均植被覆盖度在 0.34~0.42,主要以中低、中植被覆盖度为主,空间上西部植被覆盖度高于东部,并且呈现低植被覆盖面积缩小,高植被覆盖面积增加的时空分布特征。

3)从草地植被覆盖度变化趋势来看,2001—2020 年间,研究区植被覆盖度较稳定的区域占总面积的 89.16%,主要分布在中部山区;增加趋势主要分布在盆地周围,占总面积的 10.41%;减少趋势区占总面积的 0.43%,在山区和盆地均有分布,总之,覆盖度增加面积大于覆盖度减少面积,草地植被覆盖度总体上呈增加的变化趋势。

4)从地理探测器运行结果来看,不同因子之间的交互作用呈现双协同增强和非线性增强效应为主。其中,降水量和海拔的交互作用较显著, $q$  值约为 32%;单因子作用解释力最大的是降水量, $q$  值为 18%,这表明研究区草地植被覆盖度受降水量的影响大于其他因素。

在全球气候变化的大背景下,研究草地植被覆盖度时空特征对环境既敏感又脆弱的干旱区生态安全维护具有重要意义<sup>[34]</sup>。本研究得出的 2001—2020 年天山新疆段及其南北麓草地植被覆盖度有上升趋势的结论与新疆近 20 a 的覆盖度变化趋势

大体一致<sup>[35]</sup>。植被覆盖度的变化往往与气候变化和人类活动息息相关,对研究区而言,盆地周围草地植被覆盖度呈现增加趋势,而植被覆盖度下降趋势面积较小且分散,在山区与盆地均有分布,差异可能是由人类活动和气候变化共同影响所导致的<sup>[36]</sup>。

在复杂地形地貌条件下,定量揭示草地植被覆盖度与不同因子的相互作用是草地植被研究的重要内容之一。由于天山地形复杂,气温、降水等自然气候因素空间分布不均,草原植被覆盖度与各种外部环境因素之间的关系十分复杂。采用简单的相关性分析法来研究不同因子与植被覆盖度的关系,很难完全理解天山草原的空间异质性。因此,选择多种人为和自然因素揭示草地植被覆盖度与驱动因素的相互作用规律,对于深入认识天山草地植被空间异质性是十分必要的<sup>[37]</sup>。闫俊杰等<sup>[38]</sup>、张仁平等<sup>[39]</sup>对降水量和气温等自然因子与草地 NPP 和 NDVI 等进行相关性分析,得出降水量的相关性最高。本研究利用地理探测器定量分析了天山新疆段及其南北山麓草地植被覆盖度的驱动力因素,发现降水量因子具有最大的解释力,说明研究区草地植被覆盖度受降水量的影响更明显,此结果与前人研究结果较相近,这为定量确定天山草地植被覆盖度主要的驱动力提供一定的客观参考价值。由于本研究仅选取了 6 个自然因子来探讨草原植被覆盖的驱动力,并未对牲畜量、放牧强度、土地覆盖和围栏数<sup>[40-41]</sup>各种因子进行详细地分析,在内容上缺乏微观尺度的考量,希望在今后的相关研究中能进行深入的研究。

## 参考文献:

- [1] 林慧龙,范迪,冯琦胜,等. 草地综合顺序分类法研究新热点: 2008—2020 年回顾与展望[J]. 草业学报, 2021, 30(10): 201-213.  
LIN H L, FAN D, FENG Q S, *et al.* New focus for the study of the comprehensive sequential classification system for grassland: a review from 2008 to 2020 and prospects for future research[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2021, 30(10): 201-213. (in Chinese)
- [2] 杨静雅,李新国,闫凯,等. 基于遥感与像元二分模型的新疆和静县草地植被覆盖度时空变化特征研究[J]. 西北林学院学报, 2017, 32(1): 210-217.  
YANG J Y, LI X G, YAN K, *et al.* Temporal and spatial variation characteristics of grassland vegetation coverage in Hejing of Xinjiang based on remote sensing and dimidiante pixel model [J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2017, 32(1): 210-217. (in Chinese)
- [3] 张起鹏,王倩,张春花,等. 草地植被覆盖度变化及其驱动力——以甘南藏族自治州玛曲县为例[J]. 中国农业资源与区划, 2014, 35(4): 58-62.  
ZHANG Q P, WANG Q, ZHANG C H, *et al.* Grassland coverage changes and the driving forces—a case study of Maqu County[J]. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning*, 2014, 35(4): 58-62. (in Chinese)
- [4] 杨智,徐斌. 草原综合植被覆盖度的概念与计算方法[J]. 草业科学, 2019, 36(6): 1475-1478.  
YANG Z, XU B. The concept and calculation method for comprehensive vegetation coverage of grasslands[J]. *Pratacultural Science*, 2019, 36(6): 1475-1478. (in Chinese)
- [5] 宋清洁,崔霞,张瑶瑶,等. 基于小型无人机与 MODIS 数据的草地植被覆盖度研究——以甘南州为例[J]. 草业科学, 2017, 34(1): 40-50.
- [6] 朱源,彭光雄,王志,等. 西藏林芝地区近 30a 来的 NDVI 变化趋势研究[J]. 西北林学院学报, 2011, 26(4): 69-74.  
ZHU Y, PENG G X, WANG Z, *et al.* The trend of NDVI during the past 30 years in Linzhi Area, Tibet a utonomous region [J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2011, 26(4): 69-74. (in Chinese)
- [7] 陈建军,黄莹,赵许宁,等. 黄河源区高寒草地植被覆盖度反演模型精度评价[J]. 科学技术与工程, 2019, 19(15): 37-45.  
CHEN J J, HUANG Y, ZHAO X N, *et al.* Accuracy evaluation of vegetation coverage inversion model for alpine grassland in the source region of the Yellow River[J]. *Science Technology and Engineering*, 2019, 19(15): 37-45. (in Chinese)
- [8] 于惠,吴玉峰,金毅,等. 河西干旱区植被覆盖度时空格局分析[J]. 草业科学, 2019, 36(3): 623-631.
- [9] TAO C, NIU R Q, YI W, *et al.* Percentage of vegetation cover change monitoring in Wuhan Region based on remote sensing [J]. *Procedia Environmental Sciences*, 2011, 10(1): 1466-1472.
- [10] XU W, GE D, PANG Z, *et al.* Estimation and dynamic changes analysis of vegetation coverage in the ertan reservoir area based on remote sensing [C]. *International Symposium on Geomatics for Integrated Water Resources Management*. IEEE, 2012.
- [11] LIU J, ZHANG X, ZHANG J, *et al.* Extraction and spatial pattern of vegetation cover fraction of the Yiluo Basin [C]. *International Conference on Geoinformatics*. IEEE, 2013.
- [12] 何玉杰,孔泽,卢晓,等. 水热条件分别控制了中国温带草地 NDVI 的年际变化和增长趋势[J]. 生态学报, 2022, 42(2): 766-777.  
HE Y J, KONG Z, HU X, *et al.* Water and heat conditions separately controlled inter-annual variation and growth trend of NDVI in the temperate grasslands in China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, 42(2): 766-777. (in Chinese)
- [13] 杨光华,包安明,陈曦,等. 1998—2007 年新疆植被覆盖变化及驱动因素分析[J]. 冰川冻土, 2009, 31(3): 436-445.  
YANG G H, BAO A M, CHEN X, *et al.* Study of the vegetation cover change and its driving factor over Xinjiang during 1998 — 2007 [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2009, 31(3): 436-445. (in Chinese)
- [14] 张仁平,郭靖,冯琦胜,等. 新疆地区草地植被物候时空变化[J]. 草业学报, 2018, 27(10): 66-75.
- [15] 刘春静,张丽,周宇,等. 中国新疆及中亚五国干旱区草地覆盖度反演与分析[J]. 草业科学, 2016, 33(5): 861-870.
- [16] 艾则孜提约麦尔·麦麦提,玉素甫江·如素力,姜红,等.



- 2000—2014年博斯腾湖流域NPP时空变化特征及影响因素分析[J]. 草业科学, 2018, 35(7): 1743-1753.
- [17] 冯志敏, 赵玲, 安沙舟, 等. 基于MODIS的天山山区草地类型植被指数变化特征及其与气候因子的关系[J]. 沙漠与绿洲气象, 2015, 9(2): 57-62.
- [18] 茹克亚·萨吾提. 基于多源数据的中国天山中段天然草地动态变化及其驱动因子分析[D]. 乌鲁木齐: 新疆大学, 2019.
- [19] 齐亚霄, 张飞, 陈瑞, 等. 2001—2015年天山北坡植被覆盖动态变化研究[J]. 生态学报, 2020, 40(11): 3677-3687.
- QI Y X, ZHANG F, CHEN R, *et al.* Vegetation coverage dynamics in northern slope of Tianshan mountains from 2001 to 2015[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, 40(11): 3677-3687. (in Chinese)
- [20] 玛地尼亚提·地里夏提, 玉素甫江·如素力, 海日古丽·纳麦提, 等. 天山新疆段植被物候特征及其气候响应[J]. 气候变化研究进展, 2019, 15(6): 624-632.
- [21] 肉克亚木·艾克木, 玉素甫江·如素力, 海日古丽·纳麦提. 2001—2017年天山中段积雪时空变异研究[J]. 灌溉排水学报, 2020, 39(4): 135-144.
- [22] 蔡兴冉, 李忠勤, 张慧, 等. 中国天山冰川变化脆弱性研究[J]. 地理学报, 2021, 76(9): 2253-2268.
- CAI X R, LI Z Q, ZHANG H, *et al.* Vulnerability of glacier change in Chinese Tianshan mountains[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2021, 76(9): 2253-2268. (in Chinese)
- [23] 孟晗, 黄远程, 史晓亮. 黄土高原地区2001—2015年植被覆盖变化及气候影响因子[J]. 西北林学院学报, 2019, 155(1): 211-217.
- MENG H, HUANG Y C, SHI X L. Vegetation coverage change and climate impact factors in the Loess Plateau from 2001 to 2015[J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2019, 34(1): 211-217. (in Chinese)
- [24] 王欣平, 邵凤变, 毛志红, 等. 基于MODIS数据的济南市年最大植被覆盖度动态监测[J]. 地域研究与开发, 2016, 35(1): 150-155.
- [25] 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[J]. 草业科学, 2018, 35(12): 2845-2854.
- [26] 聂桐, 董国涛, 蒋晓辉, 等. 延安地区植被覆盖度时空变化及驱动力[J]. 水土保持研究, 2021, 28(5): 340-346.
- NIE T, DONG G T, JIANG X H, *et al.* Spatiotemporal variation and driving forces of vegetation coverage in Yan'an Area[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2021, 28(5): 340-326. (in Chinese)
- [27] 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.
- [28] 王劲峰, 徐成东. 地理探测器: 原理与展望[J]. 地理学报, 2017, 72(1): 116-134.
- [29] 陶帅, 邝婷婷, 彭文甫, 等. 2000—2015年长江上游NDVI时空变化及驱动力—以宜宾市为例[J]. 生态学报, 2020, 40(14): 5029-5043.
- [30] 吴秀兰, 张太西, 王慧, 等. 1961—2017年新疆区域气候变化特征分析[J]. 沙漠与绿洲气象, 2020, 14(4): 27-34.
- [31] 何宝忠, 丁建丽, 张喆, 等. 新疆植被覆盖度趋势演变实验性分析[J]. 地理学报, 2016, 71(11): 1948-1966.
- [32] 高鹏文, 阿里木江·卡斯木, 赵永玉, 等. 1988—2018年哈密绿洲植被覆盖度时空变化及其驱动力[J]. 水土保持通报, 2020, 40(6): 273-280.
- GAO P W, KASIM A, ZHAO Y Y, *et al.* Spatial and temporal changes and driving forces of vegetation coverage in Hami Oasis during 1988—2018[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2020, 40(6): 273-280. (in Chinese)
- [33] 冯志敏, 赵玲, 安沙舟, 等. 基于MODIS的天山山区草地类型植被指数变化特征及其与气候因子的关系[J]. 沙漠与绿洲气象, 2015, 9(2): 57-62.
- [34] 黄静, 张运, 汪明秀, 等. 近17年新疆干旱时空分布特征及影响因素[J]. 生态学报, 2020, 40(3): 1077-1088.
- [35] 张晋霞, 徐长春, 杨秋萍. 2001—2017年新疆NDVI变化及其对极端气候的响应[J]. 水土保持通报, 2020, 40(5): 250-256.
- ZHANG J X, XU C C, YANG Q P. NDVI variations and its response to extreme climate in Xinjiang uygur autonomous region during 2001—2017[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2020, 40(5): 250-256. (in Chinese)
- [36] 杨阳, 唐晓岚, 李哲惠, 等. 长江流域土地利用景观格局时空演变及驱动因子—以2008—2018年为例[J]. 西北林学院学报, 2021, 36(2): 220-230.
- YANG Y, TANG X L, LI Z H, *et al.* Spatial-temporal evolution of landscape pattern of land use in the Yangtze River basin and analysis of Its driving factors—a case study from 2008 to 2018[J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2021, 36(2): 220-230. (in Chinese)
- [37] 杨致远, 刘琪璟, 秦立厚, 等. 延安市退耕还林工程生态效益评价[J]. 西北林学院学报, 2022, 37(1): 259-266.
- YANG Z Y, LIU Q J, QIN L H, *et al.* Ecological benefit assessment of the grain for green project in Yan'an[J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2022, 37(1): 259-266. (in Chinese)
- [38] 闫俊杰, 张静, 雷雨, 等. 2000—2016年新疆伊犁河谷草地NDVI变化趋势分析[J]. 草地学报, 2018, 26(4): 859-868.
- [39] 张仁平, 郭靖, 张云玲. 新疆草地净初级生产力(NPP)空间分布格局及其对气候变化的响应[J]. 生态学报, 2020, 40(15): 5318-5326.
- [40] CHEN Y L, LONG B J, PAN X B, *et al.* Differences between MODIS NDVI and AVHRR NDVI in monitoring grasslands change[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2011, 15(4): 831-845.
- [41] 陈宽, 杨晨晨, 白力嘎, 等. 基于地理探测器的内蒙古自然和人为因素对植被NDVI变化的影响[J]. 生态学报, 2021, 41(12): 4963-4975.
- CHEN K, YANG C C, BAI L G, *et al.* Effects of natural and human factors on vegetation normalized difference vegetation index based on geographical detectors in Inner Mongolia[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, 41(12): 4963-4975. (in Chinese)