

# 蒙古国植被物候数据集（2001–2019）研发

邵亚婷<sup>1</sup>, 王卷乐<sup>1,2\*</sup>

1. 中国科学院地理科学与资源研究所, 资源与环境信息系统国家重点实验室, 北京 100101;
2. 江苏省地理信息资源开发与利用协同创新中心, 南京 210023

**摘要:** 植被物候可以反映植被的生长状况, 是气候变化的生物学指标之一。蒙古国是蒙古高原的重要组成部分, 是全球生态环境变化的重要响应区域, 其植被物候的变化可以反映全球气候变化。本数据集基于 MOD13Q1 产品中的归一化植被指数数据, 利用动态阈值法获取蒙古国植被物候参数信息。数据集存储为.tif 格式, 空间分辨率为 250 m, 包括蒙古国 2001–2019 年逐年植被返青期、植被枯黄期和植被生长季长度的遥感监测数据。数据集由 60 个文件组成, 数据量为 944 MB (压缩为 3 个文件, 844 MB)。该数据集能够揭示蒙古国植被物候时空分布差异, 为蒙古高原植被物候研究和气候变化研究提供基础参考数据。

**关键词:** 植被物候; 蒙古国; 气候变化; 蒙古高原

**DOI:** <https://doi.org/10.3974/geodp.2022.02.10>

**CSTR:** <https://cstr.science.org.cn/CSTR:20146.14.2022.02.10>

**数据可用性声明:**

本文关联实体数据集已在《全球变化数据仓储电子杂志 (中英文)》出版, 可获取:

<https://doi.org/10.3974/geodb.2022.03.05.V1> 或 <https://cstr.science.org.cn/CSTR:20146.11.2022.03.05.V1>.

## 1 前言

植被物候学是指植被与不同气候因素、地理要素以及其他环境因子之间相互影响的一种季节性现象, 它表示在周围环境条件长时间的影响下, 植被生长发育会呈现出一种特定的周期性规律<sup>[1]</sup>。植被物候学在调节气候-生物圈相互作用中起着至关重要的作用, 是植被变化的敏感和关键特征, 与全球气候变化密切相关, 是研究植被与大气之间碳交换的季节和年际动态变化的一个极为重要的因素, 因此受到越来越多的关注<sup>[2–4]</sup>。在全球气候变化背景下, 蒙古国气候随之也发生变化, 而气候变化必然造成植被物候的剧烈改变, 因此, 获取蒙古国植被物候数据集, 分析其植被物候时空变化, 对深刻理解蒙古国植被生态系统如何应对全球气候环境变化有重大意义。

传统物候数据的获取方式是地面植被物候观测, 该方法可获取准确客观的植被物候数

收稿日期: 2022-03-25; 修订日期: 2022-06-02; 出版日期: 2022-06-25

基金项目: 国家自然科学基金 (32161143025, 41971385); 中国科学院 (XDA2003020302)

\*通讯作者: 王卷乐 R8881-2016, 中国科学院地理科学与资源研究所, wangjl@igsrr.ac.cn

数据引用方式: [1] 邵亚婷, 王卷乐. 蒙古国植被物候数据集 (2001–2019) 研发[J]. 全球变化数据学报, 2022, 6(2): 241–248. <https://doi.org/10.3974/geodp.2022.02.10>. <https://cstr.science.org.cn/CSTR:20146.14.2022.02.10>.

[2] 邵亚婷, 王卷乐. 基于 MOD13Q1 的蒙古国植被物候数据集 (2001–2019) [J/DB/OL]. 全球变化数据仓储电子杂志, 2022. <https://doi.org/10.3974/geodb.2022.03.05.V1>. <https://cstr.science.org.cn/CSTR:20146.11.2022.03.05.V1>.

据，但工作效率低且监测范围比较小，难以在大尺度范围开展监测。遥感技术的飞速发展使利用遥感数据反演植被物候数据成为新兴手段<sup>[5-7]</sup>。遥感技术可以在短时间内动态监测受生态环境制约无法到达地域（包括境外区域）的植物生长状况，实现观测对象从单个植被到植被群落的转变，实现传统对地定点监测向地面大范围区域监测的过渡。在诸多遥感应用中，MODIS 数据产品被更多人证明是研究植被动态演变特征的可靠数据源<sup>[8-10]</sup>。蒙古国野外物候观测站点比较少，缺乏连续、系统的物候观测实测数据，无法为研究蒙古国植被物候时空变化特征、植被物候对全球气候变化的响应提供较准确的参考资料和数据。结合该需求，本数据集基于 MODIS 数据产品，利用遥感技术获取了蒙古国 2001–2019 年逐年植被物候数据集。

2 数据集元数据简介

《基于 MOD13Q1 的蒙古国植被物候数据集（2001–2019）》<sup>[11]</sup>的名称、作者、地理区域、数据年代、时间分辨率、空间分辨率、数据集组成、数据出版与共享服务平台、数据共享政策等信息见表 1。

表 1 《基于 MOD13Q1 的蒙古国植被物候数据集（2001–2019）》元数据简表

条 目	描 述
数据集名称	基于 MOD13Q1 的蒙古国植被物候数据集（2001–2019）
数据集短名	VPD_Mongolia_2001-2019
作者信息	邵亚婷，中国科学院地理科学与资源研究所，shaoyt@lreis.ac.cn 王卷乐 R8881-2016，中国科学院地理科学与资源研究所，wangjl@igsrr.ac.cn
地理区域	41°35'N–52°09'N，87°44'E–119°56'E
数据年代	2001–2019
时间分辨率	年
空间分辨率	250 m
数据格式	.tif
数据量	944 MB（压缩后 844 MB）
数据集组成	数据集包含蒙古国 19 年逐年植被返青期、植被枯黄期、植被生长季长度及其 19 年植被物候期均值，共 60 个文件
基金项目	国家自然科学基金（32161143025，41971385）；中国科学院（XDA2003020302）
数据计算环境	ENVI、ArcGIS
出版与共享服务平台	全球变化科学研究数据出版系统 <a href="http://www.geodoi.ac.cn">http://www.geodoi.ac.cn</a>
地址	北京市朝阳区大屯路甲 11 号 100101，中国科学院地理科学与资源研究所
数据共享政策	全球变化科学研究数据出版系统的“数据”包括元数据（中英文）、通过《全球变化数据仓储电子杂志（中英文）》发表的实体数据集和通过《全球变化数据学报（中英文）》发表的数据论文。其共享政策如下：（1）“数据”以最便利的方式通过互联网系统免费向全社会开放，用户免费浏览、免费下载；（2）最终用户使用“数据”需要按照引用格式在参考文献或适当的位置标注数据来源；（3）增值服务用户或以任何形式散发和传播（包括通过计算机服务器）“数据”的用户需要与《全球变化数据学报（中英文）》编辑部签署书面协议，获得许可；（4）摘取“数据”中的部分记录创作新数据的作者需要遵循 10%引用原则，即从本数据集中摘取的数据记录少于新数据集总记录量的 10%，同时需要对摘取的数据记录标注数据来源 <sup>[12]</sup>
数据和论文检索系统	DOI, CSTR, Crossref, DCI, CSCD, CNKI, SciEngine, WDS/ISC, GEOSS

### 3 数据研发方法

本数据集主要基于 Terra/MODIS NDVI 数据产品（MOD13Q1）而产生的，MOD13Q1 数据产品的空间分辨率是 250 m，时间分辨率为 16 d。蒙古国涉及 h22v03、h23v03、h23v04、h24v03、h24v04、h25v03、h25v04、h26v04、h27v04 共 9 景数据，从美国航空航天局（National Aeronautics and Space Administration, NASA）官网（<https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov>）下载 2001–2019 年的数据，共计 3,933 景数据（19 年×23 期/年×9 景），数据量约 1,071 GB。

#### 3.1 算法原理

##### （1）动态阈值法

为了得到蒙古国物候期数据，采用动态阈值法<sup>[13]</sup>对 NDVI 时间序列数据进行物候参数的提取，公式如下所示：

$$NDVI_{ratio} = (NDVI_t - NDVI_{min}) / (NDVI_{max} - NDVI_{min}) \quad (1)$$

式中， $NDVI_{ratio}$  表示阈值比例， $NDVI_t$  表示  $t$  时间的 NDVI 值， $NDVI_{max}$  表示一年中 NDVI 的最大值， $NDVI_{min}$  表示 NDVI 在上升过程（或下降过程）中的最小值， $NDVI_{max}$  与  $NDVI_{min}$  之差表示植被生长或衰落阶段 NDVI 的变化振幅， $t$  为儒略日（d）。

##### （2）趋势线分析法

采用趋势线分析法对时间和植被物候数据进行分析，得到蒙古国 2001–2019 年植被物候变化趋势<sup>[14]</sup>，公式如下所示：

$$b = \frac{\sum_{i=1}^n [(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})]}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (2)$$

式中， $b$  表示变化趋势的大小， $b < 0$  表示植被物候期提前， $b > 0$  表示植被物候期推迟； $x_i$  表示年份，用数值 1、2、3……19 分别表示 2001、2002、2003……2019 年； $y_i$  表示不同年份的物候期数据； $\bar{x}$  为 10； $\bar{y}$  为物候期数据的多年均值， $n$  为样本数，这里指 19。

#### 3.2 技术路线

数据集研发的主要过程包括：MODIS 数据预处理、时间序列数据拟合重建、植被物候参数提取、植被物候时空变化分析，如图 1 所示。

##### （1）数据预处理

本数据集的原始卫星遥感数据产品 MOD13Q1 是国际标准的 EOS-HDF 格式，利用 MODIS Reprojection Tool（MRT）软件对原始数据产品进行数据格式转换、数据拼接、投影转换等预处理操作，最终提取出 Geotiff 格式的 NDVI 植被指数数据。在开始提取植被物候数据前要去掉 NDVI 值小于 0.1 的像素，NDVI 值过小的区域通常被称为非植被区域<sup>[15]</sup>。

##### （2）时间序列数据拟合重建

为了抑制噪声对 NDVI 时序数据的影响，需要对数据进行滤波平滑处理<sup>[14]</sup>。首先在 TIMESAT 导入数据界面中加载预处理后的 MODIS-NDVI 数据，其次根据蒙古国土地覆盖分类数据<sup>[16]</sup>、Google 影像数据和实地野外考察样点数据，获得不同草地类型样本，最后利用非对称高斯拟合（Asymmetric Gaussians, A-G）对样本区域的 NDVI 时序数据进行滤波平滑实验<sup>[14]</sup>，得到质量较好的植被生长季曲线，进而对蒙古国 NDVI 时序数据进行拟合重建。

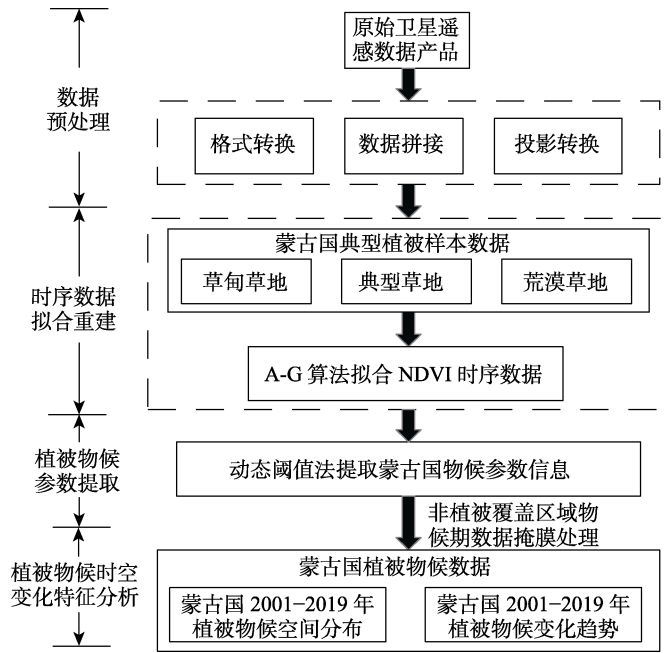


图 1 蒙古国植被物候数据集研发流程

(3) 植被物候参数提取

众多学者常用动态阈值法来提取物候，丛楠和沈妙根<sup>[17]</sup>设阈值为 0.5 提取北半球中高纬度地区植被物候；Zu 等<sup>[18]</sup>发现阈值设为 0.2 和 0.3 能够更好地提取青藏高原植被物候；付阳等<sup>[19]</sup>分别设置 0.2 和 0.5 提取柴达木盆地植被生长季始期和末期；黄伟林等<sup>[20]</sup>通过对比阈值为 0.2、0.3、0.4、0.5 时内蒙古植被物候的提取结果，最终将阈值设为 0.5。由于蒙古国缺乏长时间序列的物候地面观测数据，本数据集在前人研究的基础上，首先将阈值设置为 0.1、0.15、0.2、0.25、0.3、0.35、0.4、0.45、0.5、0.55 分别提取蒙古国典型草地和森林植被物候信息，对比发现阈值为 0.5、0.55 时提取的返青期和枯黄期结果更有效。因此，本数据集基于 TIMESAT 平台，利用动态阈值法，分别设置 0.5 和 0.55 来提取蒙古国植被返青期和枯黄期，即当 NDVI 值达到 NDVI 上升过程中 NDVI 的变化振幅的 50%，植被开始返青，此时该像元值所对应的日期就是植被返青期；当 NDVI 值达到 NDVI 下降过程中 NDVI 变化振幅的 55%，植被开始枯黄，此时认为该像元值所对应的日期为植被枯黄期。由于非植被覆盖地区（包括水体、裸地、沙漠、建筑用地、沙地）对于物候的研究毫无意义，因此结合蒙古国土地覆盖数据掩膜掉所有非植被覆盖区域的物候数据，得到蒙古国植被物候数据。

4 数据结果与验证

4.1 数据集组成

《基于 MOD13Q1 的蒙古国植被物候数据集（2001–2019）》包括植被返青期（start of growing season, SOS）、植被枯黄期（end of growing season, EOS）和植被生长季长度（length of growing season, LOS）在内的 60 个数据文件（表 2）。

表 2 《基于 MOD13Q1 的蒙古国植被物候数据集（2001–2019）》组成文件简表

组成文件	命名方式	数据描述	数据格式	文件个数	数据量
物候栅格数据	VPD_SOSyyyy.tif	植被返青期	.tif	19	280 MB
	VPD_EOSyyyy.tif	植被枯黄期	.tif	19	280 MB
	VPD_LOSyyyy.tif	植被生长季长度	.tif	19	347 MB
	VPD_SOSmean.tif	植被返青期 19 年均值	.tif	1	11.3 MB
	VPD_EOSmean.tif	植被枯黄期 19 年均值	.tif	1	11.0 MB
	VPD_LOSmean.tif	植被生长季长度 19 年均值	.tif	1	12.7 MB

本数据集中植被返青期、植被枯黄期和植被生长季长度三种物候栅格数据名称格式分别为 VPD\_SOSyyyy.tif、VPD\_EOSyyyy.tif 和 VPD\_LOSyyyy.tif。其中，VPD（Vegetation Phenology Dataset）表示数据内容是植被物候数据集；yyyy 表示数据文件的年份。

4.2 数据结果

利用动态阈值法提取得到蒙古国 2001–2019 年逐年植被物候数据集，计算 19 年平均植被物候数据，发现蒙古国的植被大约在四月上旬至五月下旬期间开始返青，在九月中旬至十月下旬期间开始枯黄，与毕哲睿<sup>[21]</sup>、Sun<sup>[22]</sup>等在蒙古国冻土区草地植被返青期和枯黄期研究结果一致。由此可知，蒙古国植被生长季大约平均持续 165 d。通过分析本数据集能够认识蒙古国植被物候空间分布特征，如图 2 所示，其空间分布特征与李晨昊<sup>[23]</sup>、姜康<sup>[24]</sup>对蒙古高原的研究结果相似，在降水、气温、地表温度、地形要素、雪深等地理要素的影响下，不同区域植被物候分布特征有着明显差异。

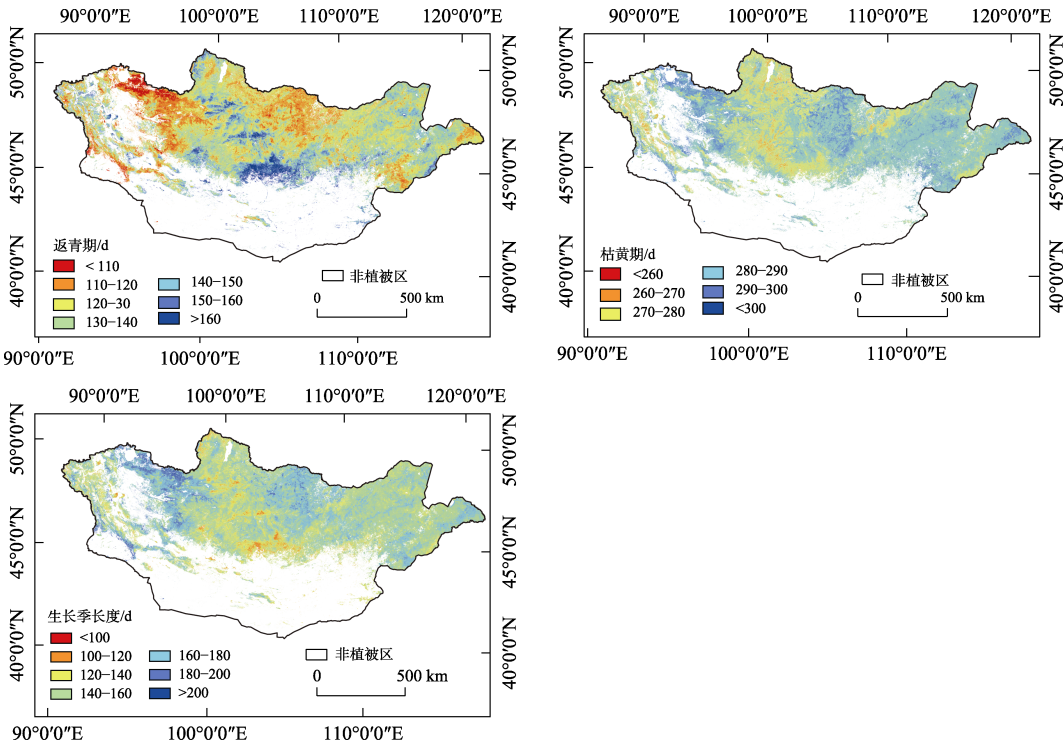


图 2 蒙古国 2001–2019 年植被物候空间分布图

采用趋势线分析法分析蒙古国 2001–2019 年植被物候变化趋势可知，蒙古国植被 SOS 总体呈推迟趋势，其变化趋势与姜康等<sup>[25]</sup>的研究结果相同；植被 EOS 总体呈提前趋势，植被 LOS 总体呈缩短趋势。受极端气候事件的影响，植被物候变化趋势在某个区域某个时间发生突变，蒙古国典型过渡区域草地植被物候差异较大<sup>[7]</sup>。

4.3 数据结果验证

前文 4.2 数据结果分析显示，本数据集与一些学者的研究结果较一致，具有可比性。目前，蒙古国的地面物候野外观测站点比较少且可获得的遥感物候数据产品较少，Terra/MODIS NDVI 的数据产品 MCD12Q2 提供全球范围 500-m 分辨率的地表物候数据集产品，此数据集是当前全球公开发布少有的物候数据集之一。因此基于 MCD12Q2 数据产品以及其他学者在蒙古国的物候研究对本数据集进行数据质量评估。在 NASA 官网下载 MCD12Q2 数据并进行预处理，得到蒙古国植被返青期和枯黄期物候数据，将本物候数据集重采样得到与 MCD12Q2 空间分辨率和投影一致的物候数据，两者进行线性相关分析，结果表明，两者返青期的相关系数为 0.570,86，通过了  $p<0.001$  显著性检验，两者枯黄期的相关系数为 0.550,38，通过了  $p<0.001$  显著性检验，由此可知，本数据集与 MCD12Q2 呈正相关，具有可比性，如图 3 所示。本数据集产品为 16 d 合成空间分辨率为 250 m，而 MCD12Q2 为 8 d 合成，空间分辨率为 500 m，一般来讲，遥感数据产品的精度、时空分辨率、时间连续性以及数据处理方法的不一致性，使得基于遥感数据产品提取的同一位置同一时间的物候值也不能完全一致<sup>[6,26]</sup>，总有一些误差，但其物候期的阈值范围比较一致。

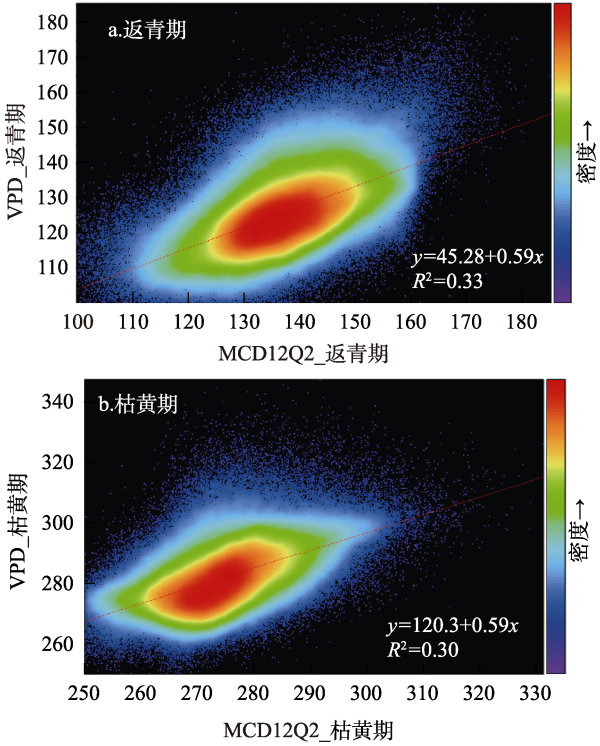


图3 本数据集植被物候数据与 MCD12Q2 物候产品相关性分析  
(注：VPD\_返青期指植被返青期数据，VPD\_枯黄期指植被枯黄期数据)

## 5 讨论和总结

蒙古国处于重要和独特的地理位置，且植被分布长期受蒙古高原气候变化和人类活动影响。基于遥感技术对长时间序列的 MODIS 影像数据进行分析，获取蒙古国 2001–2019 年植被物候数据集，得到蒙古国植被物候 19 年年均分布图，并利用趋势性分析法研究蒙古国植被物候年际变化趋势。分析发现，蒙古国 2001–2019 年植被返青期主要集中在 110–150 d，总体呈推迟趋势；植被枯黄期主要集中在 270–300 d，总体呈提前趋势；植被生长季长度主要集中在 120–200 d，总体呈缩短趋势，且缩短时间最长可达 2 d 以上。不同草地植被物候特征有所不同，其中荒漠草地植被物候生长季持续时间最长。蒙古国植被物候空间分布与地形、降水和地表温度空间分布有一定关系，尤其是温度较高、降水相对较少的蒙古国西南部稀疏植被区，返青期发生时间最早，随着时间的增长，地表温度升高，其返青期呈推迟趋势；降水量增加导致西南部地区植被枯黄期发生时间最晚，从而导致该地区植被生长季长度延长。基于本数据集可全面认识蒙古国植被物候变化特征，并基于该数据分析极端干旱和寒冷气候影响下植被物候对气候变化的响应，为研究蒙古国气候变化提供基础数据。未来可在此基础上，结合更多的遥感和地面数据，形成蒙古高原尺度的更多物候数据集产品。

**作者分工：**王卷乐对数据集的开发做了总体设计；邵亚婷采集和处理了 MODIS13Q1 数据并做了数据验证；王卷乐、邵亚婷共同完成数据论文撰写。

**利益冲突声明：**本研究不存在研究者以及与公开研究成果有关的利益冲突。

## 参考文献

- [1] Wang, Z., Chen, J., Xing, F., *et al.* Response of cotton phenology to climate change on the North China Plain from 1981 to 2012 [J]. *Scientific Reports*, 2017, 7: 6628. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-07056-4>.
- [2] Wang, J., Xi, Z., He, X., *et al.* Contrasting temporal variations in responses of leaf unfolding to daytime and nighttime warming [J]. *Global Change Biology*, 2021, 27(20): 5081–5093. DOI:10.1111/gcb.15777.
- [3] Liu, X., Chen, Y., Li, Z., *et al.* Driving Forces of the Changes in Vegetation Phenology in the Qinghai-Tibet Plateau [J]. *Remote Sensing*, 2021, 13: 4952. <https://doi.org/10.3390/rs13234952>.
- [4] Liu, H., Wang, H., Li, N., *et al.* Phenological mismatches between above- and belowground plant responses to climate warming [J]. *Nature Climate Change*, 2022, 12: 97–102. <https://doi.org/10.1038/s41558-021-01244-x>.
- [5] Miao, L. J., Muller, D., Cui, X. F., *et al.* Changes in vegetation phenology on the Mongolian Plateau and their climatic determinants [J]. *PLoS One*, 2017, 12(12): e0190313. DOI: 10.1371/journal.pone.0190313.
- [6] Dugarsuren, N., Lin, C. Investigation of vegetation dynamics of Mongolia using time series of NDVI in response to temperature and precipitation [J]. *Mongolian Journal of Biological Sciences*, 2011, 9(1/2): 9–17. DOI: 10.22353/mjbs.2011.09.02.
- [7] Dugarsuren, N., Lin, C. Temporal variations in phenological events of forests, grasslands and desert steppe ecosystems in Mongolia: a remote sensing approach [J]. *Annals of Forest Research*, 2016, 59(2): 175–190. DOI: 10.15287/afr.2016.400.
- [8] Schulz, C., Koch, R., Cierjacks, A., *et al.* Land change and loss of landscape diversity at the Caatinga phytogeographical domain: analysis of pattern-process relationships with MODIS land cover products (2001–2012) [J]. *Journal of Arid Environments*, 2017, 136: 54–74.
- [9] Zhou, W., Gang, C., Zhou, L., *et al.* Dynamic of grassland vegetation degradation and its quantitative as-

- ssessment in the northwest China [J]. *Acta Oecologica*, 2014, 55(2): 86–96.
- [10] Zhou, W., Gang, C., Chen, Y., et al. Grassland coverage inter-annual variation and its coupling relation with hydrothermal factors in China during 1982–2010 [J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2014, 24(4): 593–611.
- [11] 邵亚婷, 王卷乐. 基于 MOD13Q1 的蒙古国植被物候数据集 (2001–2019) [J/DB/OL]. 全球变化数据仓储电子杂志, 2022. <https://doi.org/10.3974/geodb.2022.03.05.V1>. <https://cstr.escience.org.cn/CSTR:20146.11.2022.03.05.V1>.
- [12] 全球变化科学研究数据出版系统. 全球变化科学研究数据共享政策 [OL]. <https://doi.org/10.3974/dp.policy.2014.05> (2017 年更新).
- [13] Wu, C., Wang, X., Wang, H., et al. Contrasting responses of autumn-leaf senescence to daytime and night-time warming [J]. *Nature Climate Change*, 2018, 8: 1092–1096. <https://doi.org/10.1038/s41558-018-0346-z>.
- [14] 邵亚婷, 王卷乐, 严欣荣. 蒙古国植被物候特征及其对地理要素的响应[J]. 地理研究, 2021, 40(11): 3029–3045.
- [15] Clinton, N., Yu, L., Fu, H. H., et al. Global-scale associations of vegetation phenology with rainfall and temperature at a high spatio-temporal resolution [J]. *Remote Sensing*, 2014, 6(8): 7320–7338.
- [16] Wang, J., Wei, H., Cheng, K., et al. Updatable dataset revealing decade changes in land cover types in Mongolia [J]. *Geoscience Data Journal*, 2022, 00: 1–14. DOI: 10.1002/gdj3.149.
- [17] 丛楠, 沈妙根. 1982–2009 年基于卫星数据的北半球中高纬地区植被春季物候动态及其与气候的关系 [J]. 应用生态学报, 2016, 27(9): 2737–2746. DOI:10.13287/j.1001-9332.201609.028.
- [18] Zu, J. X., Zhang, Y. J., Huang, K., et al. Biological and climate factors co-regulated spatial-temporal dynamics of vegetation autumn phenology on the Tibetan Plateau [J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2018, 69: 198–205.
- [19] 付阳, 陈辉, 张斯琦等. 基于群落类型的寒区旱区物候特征及其对气候因子的响应: 以 2000–2019 年柴达木盆地为例[J]. 地理研究, 2021, 40(1): 52–66. DOI: 10.11821/dlyj020200327.
- [20] 黄文琳, 张强, 孔冬冬等. 1982–2013 年内蒙古地区植被物候对干旱变化的响应[J]. 生态学报, 2019, 39(13): 4953–4965.
- [21] 毕哲睿. 蒙古高原雪深时空变化及其对草地植被物候影响研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古师范大学, 2020.
- [22] Sun, Z. G., Wang, Q. X., Xiao, Q. G., et al. Diverse responses of remotely sensed grassland phenology to interannual climate variability over frozen ground regions in Mongolia [J]. *Remote Sensing*, 2015, 7(1): 360–377. DOI: 10.3390/rs70100360.
- [23] 李晨昊. 蒙古高原积雪变化及对草地植被物候影响的研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古师范大学, 2019.
- [24] 姜康. 中蒙边境草原带物候变化及其主要影响因子[D]. 呼和浩特: 内蒙古师范大学, 2020.
- [25] 姜康, 包刚, 乌兰图雅等. 2001–2017 年蒙古高原不同植被返青期变化及其对气候变化的响应[J]. 生态学杂志, 2019, 38(8): 2490–2499.
- [26] 李铮, 柏延臣, 何亚倩. 遥感叶面积指数产品提取自然植被物候期对比[J]. 遥感技术与应用, 2015, 30(6): 1103–1112.