

引用格式: 陈如如, 胡中民, 李胜功, 等. 不同数据源归一化植被指数在中国北方草原区的应用比较[J]. 地球信息科学学报, 2020, 22(9): 1910-1919. [Chen R R, Hu Z M, Li S G, et al. Assessment of normalized difference vegetation index from different data sources in grassland of northern China[J]. Journal of Geo-information Science, 2020, 22(9): 1910-1919. ] DOI: 10.12082/dqxxkx.2020.190237

# 不同数据源归一化植被指数在中国北方草原区的应用比较

陈如如<sup>1,2,3</sup>, 胡中民<sup>4</sup>, 李胜功<sup>1,2,3</sup>, 郭群<sup>1,2,3\*</sup>

1. 中国科学院地理科学与资源研究所 生态系统网络观测与模拟重点实验室, 北京 100101; 2. 国家生态系统科学数据中心, 北京 100101; 3. 中国科学院大学资源与环境学院, 北京 100190; 4. 华南师范大学地理科学学院, 广州 510631

## Assessment of Normalized Difference Vegetation Index from Different Data Sources in Grassland of Northern China

CHEN Ruru<sup>1,2,3</sup>, HU Zhongmin<sup>4</sup>, LI Shenggong<sup>1,2,3</sup>, GUO Qun<sup>1,2,3\*</sup>

1. Key Lab of Ecosystem Network Observation and Modeling, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 2. National Ecosystem Science Data Center, Beijing 100101, China; 3. College of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100190, China; 4. School of Geography, South China Normal University, Shipai Campus, Guangzhou 510631, China

**Abstract:** Productivity of grasslands in northern China plays an important role in regional carbon-water cycle and the development of agriculture and husbandry. Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) has been widely used as an indicator of net primary productivity. However, it still remains unclear about the consistency among numerous NDVI datasets in characterizing the spatial and temporal dynamics of grasslands in Northern China. In this study, taking MODIS NDVI as a benchmark dataset, three NDVI datasets (MODIS NDVI, GIMMS NDVI, and SPOT NDVI) were used to compare and analyze the spatial and temporal consistency of NDVI in the grassland of northern China from 2000 to 2015. The most suitable NDVI datasets were selected to reveal the spatial and temporal patterns of NDVI in the study area. Our results show that in terms of the inter-annual variability and changing trend, GIMMS NDVI and MODIS NDVI presented high consistency over the entire grassland area, especially in alpine grassland area including alpine meadow, alpine grassland, alpine desert, and part of temperate grassland area (i.e., desert steppe), with correlation coefficients of 0.60, 0.47, 0.51, and 0.74 respectively. While SPOT NDVI values were much higher than those of the other two datasets, especially in alpine grasslands on Qinghai-Tibet Plateau, with a higher NDVI of 0.15 on average, which implied that caution should be taken when using SPOT NDVI to analyze vegetation dynamics or model productivity in alpine grasslands. GIMMS NDVI and SPOT NDVI displayed relatively high consistency in both temporal variability and changing trend in part of typical and meadow steppes, with correlation coefficients of 0.85 and

收稿日期: 2019-05-20; 修回日期: 2019-11-17.

基金项目: 国家自然科学基金优秀青年科学基金项目(31922053); 国家重点研发计划项目(2017YFA0604801)。[ **Foundation items:** National Natural Science Foundation of China No.31922053; the National Key R&D Program of China, No.2017YFA0604801. ]

作者简介: 陈如如(1992—), 女, 浙江温州人, 硕士生, 主要从事全球变化生态学研究。E-mail: chenrr.16s@igsnrr.ac.cn

\*通讯作者: 郭群(1984—), 女, 山东临沂人, 博士, 副研究员, 主要从事草地生态系统生态学与全球变化研究。

E-mail: guoq@igsnrr.ac.cn

0.60, respectively, however, all the three NDVI datasets were highly consistent in their variation ranges in this area, with differences of NDVI less than 0.06. Based on GIMMS NDVI datasets, i.e. the one with the longest time series and highest consistency with MODIS NDVI, we further analyzed the spatial and temporal patterns of NDVI in the study area. We found that NDVI increased generally from 1982 to 2015, with 25% of grassland areas (mainly in temperate grassland area) being significant ( $p < 0.05$ ). There was no significant change of NDVI for the entire alpine grassland area though a significant decreasing trend occurred in a small proportion of the region. Our study has implications for model communities to select datasets and provides an advanced understanding of the responses of vegetation to future climate change in the grassland of northern China.

**Key words:** Grassland of northern China; Normalized Difference Vegetation Index; GIMMS NDVI; MODIS NDVI; SPOT NDVI; trend analysis; spatial pattern; temporal dynamic

**\*Corresponding author:** GUO Qun, E-mail: guoq@igsrr.ac.cn

**摘要:**中国北方草原区生产力在区域碳循环、农牧业发展中举足轻重。归一化植被指数(Normalized Difference Vegetation Index, NDVI)广泛应用于生产力的计算,然而目前来源众多的NDVI数据反映中国北方草原植被时空动态的一致性仍未可知。本研究利用2000—2015年3个来源NDVI数据集(MODIS NDVI、GIMMS NDVI和SPOT NDVI)并以国际上公认的数据准确性较高的MODIS NDVI为基准对比分析了中国北方草原区NDVI时空动态的一致性,并选取适宜的NDVI产品揭示研究区NDVI长期的时空格局。结果表明:整个中国北方草原区以及部分草原类型(高寒草甸、高寒草原、高寒荒漠、温带荒漠草原)GIMMS NDVI和MODIS NDVI 2套数据集无论是数值范围,还是年际波动和变化趋势具有较高一致性(二者在高寒草甸、高寒草原、高寒荒漠、温带荒漠草原的相关系数分别为0.60、0.47、0.51、0.74),而SPOT NDVI数值远高于其他2个数据集,尤其是在青藏高原草原区,SPOT NDVI数值每年较另外两套数据集约偏高0.15,表明该区域使用SPOT数据应慎重。部分温带草原类型(典型草原和草甸草原)GIMMS NDVI和SPOT NDVI数据集在年际波动以及变化趋势上具有较高的一致性(相关系数分别为0.85和0.60),但温带草原区3种数据集NDVI数值范围整体相差不大,小于0.06。基于上述结果,本研究进一步采用时间序列最长且与MODIS NDVI一致性最好的GIMMS NDVI分析了研究区NDVI的时空动态,发现1982—2015年中国北方草原区NDVI整体呈增加趋势,25%的区域达显著水平( $p < 0.05$ ),主要集中在温带草原区;高寒草原区NDVI大部分区域变化不显著且有一定比例的区域NDVI呈显著下降趋势。本研究可以为模型数据集选择和预测中国北方草原区植被对未来气候变化的响应提供科学依据。

**关键词:**北方草原区;植被指数;GIMMS NDVI;MODIS NDVI;SPOT NDVI;趋势分析;空间格局;年际动态

## 1 引言

干旱半干旱区的草原约占陆地表面积的37%<sup>[1-4]</sup>,是全球碳源汇年际波动的主要来源<sup>[5]</sup>,而中国北方草原区是全球干旱半干旱区的重要组成部分<sup>[6]</sup>,因此,中国北方草原区植被的时空动态研究是全球变化研究的重要方面。

植被时空动态研究中,归一化植被指数(Normalized Difference Vegetation Index, NDVI)具有植被空间覆盖范围广、植物检测灵敏度高、噪音小、高可比性等特点,多用于反映植被动态和模型模拟生产力<sup>[7-10]</sup>。NDVI数据来源广泛,全球植被指数变化数据(GIMMS NDVI数据集)是最常用的长期植被动态监测数据集之一<sup>[11-13]</sup>。自20世纪90年代末以来,新的传感器,如地球观测系统卫星(SPOT)、Terra中分辨率成像光谱辐射计(MODIS),也提供了全球

不同时空分辨率的NDVI产品。SPOT NDVI由于时间序列相对较长且空间分辨率较高,在生态学中应用较广,而2000年推出的MODIS NDVI由于其专门针对植被指数反演的传感器设计,是目前公认反映植被动态准确性最高的NDVI产品<sup>[14]</sup>。鉴于3种数据集在准确性、应用程度及观测年限等方面均具有各自的优缺点,为了更好地反映陆地植被的长期时空动态,有研究提出以时间序列最长的GIMMS NDVIg数据集为基础,将3种数据集合并使用<sup>[11,15-17]</sup>。然而以往研究发现,GIMMS NDVIg数据集由于传感器或处理方法的原因,植被监测灵敏度较差<sup>[16,18]</sup>。随着GIMMS最新数据产品的推出(GIMMS 3g),Guay等<sup>[19]</sup>发现,欧亚大陆GIMMS NDVI3g数据集比其前身GIMMS NDVIg数据集准确性更高。利用最新的GIMMS NDVI3g数据产品和常用的SPOT NDVI数据集,通过与准确性较高的

MODIS NDVI对比其一致性和差异性从而获得多源数据集反应植被时空动态的可靠性,进而研究植被长期的时空格局不失为一种可行和有用的办法。国内外研究人员已经开展了部分相关的工作<sup>[19-23]</sup>,但针对中国植被系统的研究相对缺乏,尤其是对全球碳循环年际波动影响较大的中国北方草原区。

本研究以整个中国北方草原区及其6种草原类型(草甸草原、典型草原、荒漠草原、高寒荒漠、高寒草甸和高寒草原)为研究区域,对比分析了2000—2015年重叠时段GIMMS NDVI和SPOT NDVI数据集数值范围、年际动态、变化趋势和MODIS NDVI的差异。在此基础上,同时考虑数据的时间序列长短和其可靠性,选取适宜的数据集分析中国北方草原区过去几十年植被的时空动态变化特征。

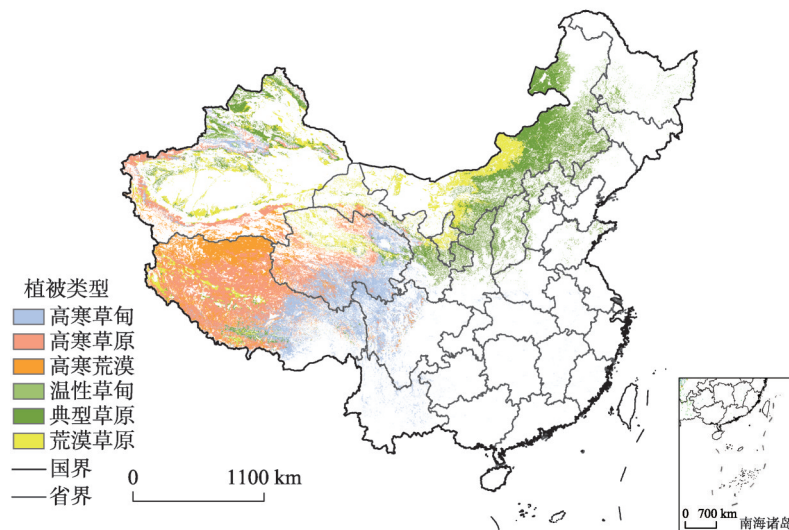
## 2 研究区概况及数据处理

### 2.1 研究区概况

本研究区域集中分布在中国北方温带和高寒草原生态系统(图1),包括青海、西藏、内蒙古、新疆、甘肃和宁夏6个省市地区。根据2000年1:100万草原资源图(<http://www.geodata.cn/>),研究区主要包括6种草原类型,其面积比例分别为草甸草原

3.9%、典型草原22.0%、荒漠草原17.8%、高寒荒漠14.5%、高寒草甸25.2%和高寒草原16.6%。考虑到研究期内植被类型发生转变的影响,本研究利用2000年和2010年2期土地利用数据分析发现10年间99.33%的草原并未发生转变,前人研究结果也显示温带草原区未发生土地利用变化面积占整个草原区的96.14%<sup>[24]</sup>,而青藏高原一级土地利用类型变化面积低于7%<sup>[25]</sup>。因此,本研究中的中国北方草原区范围和不同草原类型的面积均采用2000年1:100万草原资源图。

温带草原主要分布于内蒙古、宁夏、甘肃和青海的一部分和整个新疆,约占国土面积的28.8%。本区降水量由400 mm向西递减到不足50 mm,年平均温度范围为-1.7~7.5℃,属温带半干旱、干旱气候。草原植被类型为温性草原、荒漠草原和草甸草原。高寒草原主要位于青藏高原区,东起横断山区,西抵喀喇昆仑山、帕米尔高原,南至喜马拉雅山,北达祁连山南麓,约占国土面积的25%。太阳年总辐射量5800~8700 MJ/m<sup>2</sup>,年平均温度较低,多在-6~3℃之间。年降水量可达700 mm,自西北逐渐减少,至西北边境地区,年降水量仅30 mm左右。从西北至东南,分布着高寒荒漠、高寒草原和高寒草甸。



注:该图基于自然资源部标准地图服务网站下载的审图号为GS(2016)1591的标准地图制作,底图无修改。

图1 中国北方草原区草原植被类型分布

Fig. 1 Distribution of grassland vegetation types in grassland of northern China



## 2.2 NDVI数据来源与预处理

GIMMS NDVI数据集来源于美国航空航天局全球监测与模拟研究组发布的GIMMS NDVI 3g (<https://ecocast.arc.nasa.gov/data/pub/gimms/>, 时间跨度为1982—2015年, 空间分辨率为8 km)<sup>[26]</sup>。MODIS NDVI数据集来源于国家科技基础条件平台—国家地球系统科学数据共享服务平台(<http://www.geodata.cn>, 时间跨度为2000—2015年, 空间分

辨率为500 m)<sup>[27]</sup>。SPOT NDVI数据集名称为SPOT\_NDVI V2.2 Global (<http://land.copernicus.vgt.vito.be>, 时间跨度为1998—2019年, 空间分辨率为1 km)<sup>[28]</sup>。由于同一来源数据集可有不同分辨率和版本的产品, 本研究以MODIS数据产品为例, 发现中国北方草原区不同版本(MOD13Q1和MOD09A1)数据之间的相关系数可达0.84, 所以本研究对同一数据来源只选择了最常用版本的数据产品(表1)。

表1 归一化植被指数(Normalized Difference Vegetation Index, NDVI)数据来源及优缺点

Tab. 1 Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) data sources, advantages and disadvantages

数据名称	数据来源	时段	分辨率	优点	缺点
GIMMS	<a href="https://ecocast.arc.nasa.gov/data/pub/gimms/">https://ecocast.arc.nasa.gov/data/pub/gimms/</a>	1982—2015	8 km	时间序列长	空间分辨率低
MODIS	<a href="http://www.geodata.cn">http://www.geodata.cn</a>	2000—2015	500 m	空间分辨率高	时间序列短
SPOT	<a href="http://land.copernicus.vgt.vito.be">http://land.copernicus.vgt.vito.be</a>	1998—2019	1 km	空间分辨率较高	时间序列短

由于反映植被生长过程的植被指数受传感器本身性能、观测条件及干扰因素的影响, 得到的观测值含不可预测的噪音。因此所采用3套NDVI数据均已经过去云平滑处理, 采用最大值合成法(Maximum Synthesis Method, MVC)得到月尺度NDVI数据, 以进一步去除云、大气和太阳高度角产生的影响, 并减少物候的影响, 在月尺度NDVI的基础上合成成年尺度NDVI, 以表征当年草原植被生长状况。为保证3种数据集空间分辨率一致从而增加可比性, 将SPOT NDVI数据集和MODIS NDVI数据集均重采样为8 km, 与GIMMS NDVI数据集保持一致。

## 2.3 数据处理与分析

本文采用Pearson相关分析法用于分析2000—2015年期GIMMS NDVI、SPOT NDVI和MODIS NDVI 3个数据集之间的一致性。相关系数( $r$ )数值高表示2个数据集之间的一致性高。

本文采用Sen趋势度分析长时间序列NDVI的年际变化趋势并结合Mann-Kendall(MK)检验进行显著性检验。SEN趋势度分析方法是Sen等<sup>[29]</sup>提出研究长时间变化趋势的方法, 通过计算序列的中值可以很好的减少噪声的干扰, 但其本身不能实现趋势显著性检验, 而MK检验本身对序列分布无要求且对异常值不敏感, 因此引入该方法可完成对趋势显著性的检验。Sen趋势度计算公式如式(1)所示:

$$\beta = \text{Median} \left( \frac{x_j - x_i}{j - i} \right), j > i, i = 1, 2, 3, \dots, n \quad (1)$$

式中: $x_j$ 和 $x_i$ 为NDVI值, $i, j$ 为不同年份且 $j > i$ 。Me-

dian为中位数函数。当计算结果 $\beta$ 大于0时表示NDVI随年份增长而增加, 当计算结果 $\beta$ 小于0时表示NDVI随年份增长而降低, MK检验 $p < 0.05$ 时视该区域为变化显著区域, 反之即为变化不显著区域。

## 3 结果与讨论

### 3.1 不同数据源NDVI产品的时间序列比较

由图2可以看到2000—2015年SPOT NDVI的数据集在整个中国北方草原区域绝对值偏大且波动较大, GIMMS NDVI绝对值略大于MODIS NDVI。无论是数值范围还是年际波动变化, GIMMS NDVI和MODIS NDVI的一致性较高, 相关系数 $r$

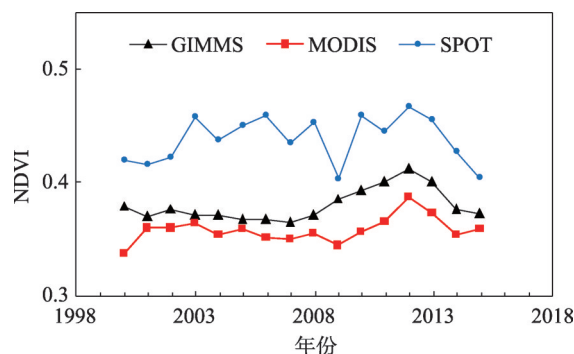


图2 2000—2015年北方草原区不同数据源归一化植被指数年际变化

Fig. 2 Inter-annual variation of Normalized Difference Vegetation Index (NDVI, 2000—2015) from different data sources in the grassland of northern China

为0.61 ( $p < 0.05$ ), 其中GIMMS NDVI波动幅度较MODIS NDVI略小。SPOT NDVI则与GIMMS NDVI、MODIS NDVI数据集差异较大, 其与GIMMS NDVI、MODIS NDVI的相关系数分别只有0.32 ( $p = 0.23$ )和0.54 ( $p = 0.06$ )。

6种草原类型2000—2015年3种来源NDVI的年际波动比较结果表明(图3), GIMMS NDVI和MODIS NDVI无论是在数值范围还是年际波动和变化趋势上, 在高寒草原区3种草原类型(高寒草甸、高寒草原、高寒荒漠)具有较高一致性(相关系数 $r$ 分别为0.60、0.47、0.51), 其中两套数据集数值范围在高寒草原和高寒荒漠几乎一致, 而高寒草原区SPOT NDVI数据集绝对值偏高, 每年较另外2套

数据集约偏高0.15, 这可能是上述SPOT NDVI在整个中国北方草原区数值偏大的原因。温带草原区3种草原类型不同来源NDVI数据集的数值范围和年际变化趋势差异较高寒草原小(温带草原区GIMMS NDVI与MODIS NDVI数值差异在0.02~0.06之间; GIMMS NDVI与SPOT NDVI数值差为0.01~0.02; MODIS NDVI与SPOT NDVI数值差范围为0.01~0.06), 其中温带典型草原和草甸草原区GIMMS NDVI和SPOT NDVI在年际波动以及变化趋势上具有较高的一致性(典型草原相关系数 $r = 0.85$ , 草甸草原相关系数 $r = 0.60$ ), 二者均在数值范围上较MODIS NDVI略低, 而在荒漠草原二者与MODIS NDVI相差不大。GIMMS NDVI和MO-

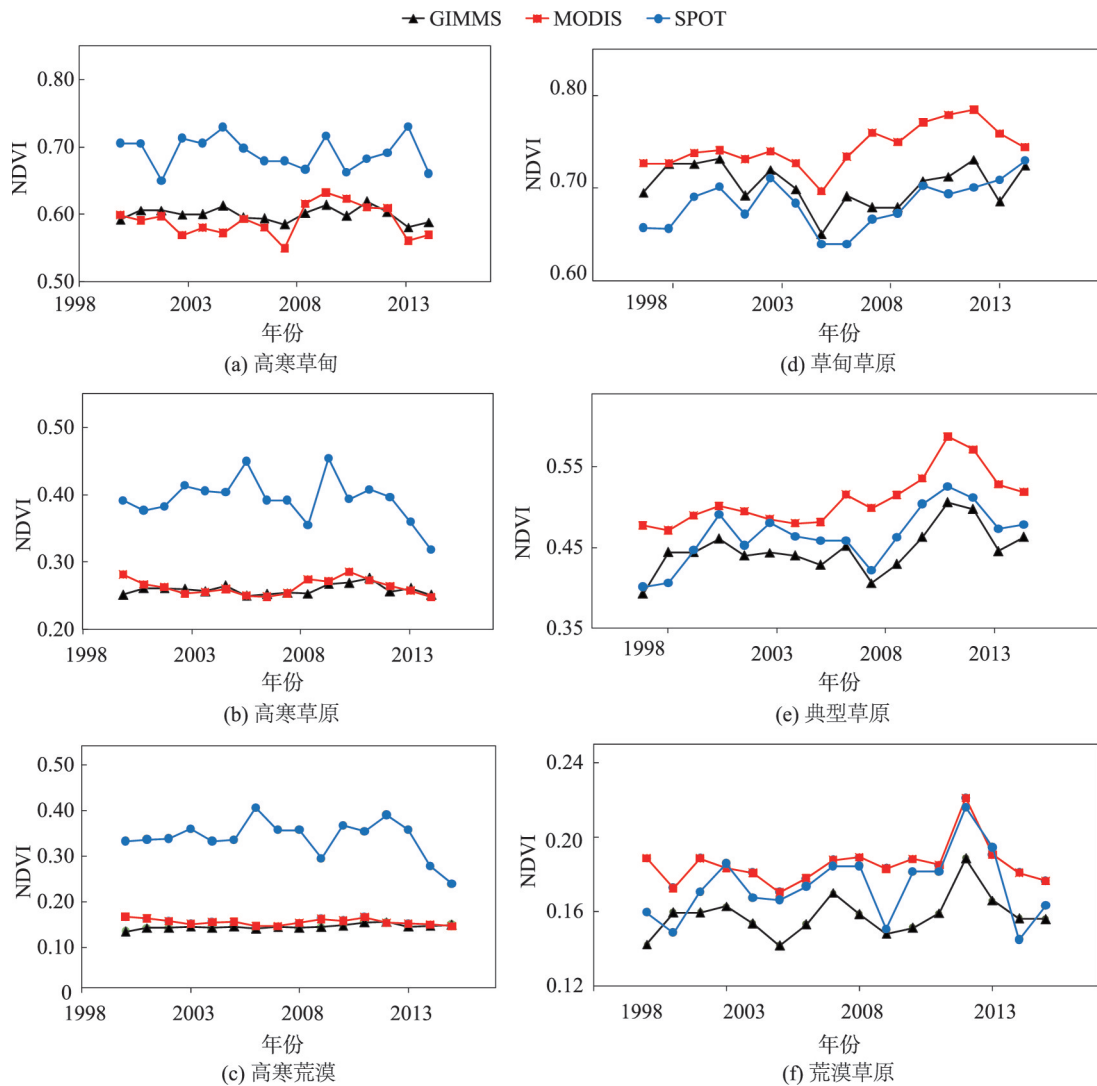


图3 2000—2015年6种草原类型不同来源归一化植被指数数据集年际变化的比较

Fig. 3 Comparisons of inter-annual variation of Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) from 2000 to 2015 among three data sources in different grassland types

DIS NDVI在中国北方草原区大部分区域年际波动及数值范围一致性较高,这一研究结果与Fensholt和Proud比较分析全球尺度GIMMS NDVI和MODIS NDVI 2套数据集的结果一致<sup>[30]</sup>。但Brown等<sup>[22]</sup>对全球8个地区不同NDVI数据集的对比分析结果表明,3套数据集的一致性总体较好,仅在巴西的Tapajos地区一致性较差。由于上述研究均是全球大尺度研究,更多的关注数据值差异较大的区域,对较小尺度如中国北方6个草原类型的关注较少,所以有跟本研究不一致的地方。本文研究发现,由于SPOT NDVI的数值范围在大部分区域远高于MODIS NDVI(尤其是青藏高原区),而整个中国北方草原区GIMMS NDVI和MODIS NDVI的时空动态一致性更高。这与杜家强等在青藏高原草原区及其亚区域、植被类型以及像元尺度GIMMS NDVI和MODIS NDVI数据集一致性较强的对比结果较为一致<sup>[31]</sup>。因此,在青藏高原草原区使用SPOT NDVI数据集时应有所保留。

### 3.2 不同数据源NDVI年际变化趋势分析

由表2可以看出,3套数据在中国北方草原区域均有70%以上的区域无显著的逐年增加或降低的趋势。3套数据集在内蒙中西部均有一部分区域NDVI呈显著增加趋势,GIMMS NDVI和MODIS NDVI在青藏高原小部分地区有显著减小趋势,而SPOT NDVI并未呈现出这种显著减小的趋势。

Fensholt和Proud<sup>[30]</sup>通过地面实测数据的对比研究也表明GIMMS NDVI和MODIS NDVI在反映全球植被变化趋势方面基本一致,尤其是在半干旱地区,与本研究结果相符。但本研究中不同草原类型间,几套NDVI数据集变化趋势并未呈现出这种

一致性,尤其是高寒草原区,3种草原类型显著增加和显著减少的占比结果数值差异最大,而温性草原区3套数据结果一致性最好。总体上,在中国北方草原区,GIMMS NDVI数据集和MODIS NDVI数据集对中国北方草原区NDVI年际变化趋势的预测较为一致,而与SPOT NDVI数据集差异较大。

本研究由于GIMMS NDVI在高寒草原区和温带草原区均与MODIS NDVI具有较高一致,而SPOT NDVI仅在部分温带草原区与MODIS NDVI具有较高一致性,所以GIMMS NDVI可以较好的反映中国北方草原生态系统植被的时空格局。由于其他两类产品仍具有诸如准确性、空间分辨率较高以及过去应用广泛等原因<sup>[15,32]</sup>,因此高寒草原类型,可适当采用MODIS NDVI数据集,而在温带草原类型,可适当采用SPOT NDVI和MODIS NDVI数据集。本研究认为最新GIMMS NDVI3g数据产品在中国北方草原区是可信的,且监测效果好、时间序列长,因此后续分析可直接应用不需要数据融合。

### 3.3 北方草原区NDVI的时空格局

采用中国北方草原区GIMMS NDVI3g数据分析表明,1982—2015年中国北方草原区NDVI多年均值为0.38,其中草甸草原NDVI年均值最高,达到0.73,高寒草甸、高寒草原、典型草原分别为0.57、0.25、0.49,高寒荒漠和荒漠草原分别为0.15和0.20。北方草原区NDVI呈现从东向西数值减小的趋势(图4)。

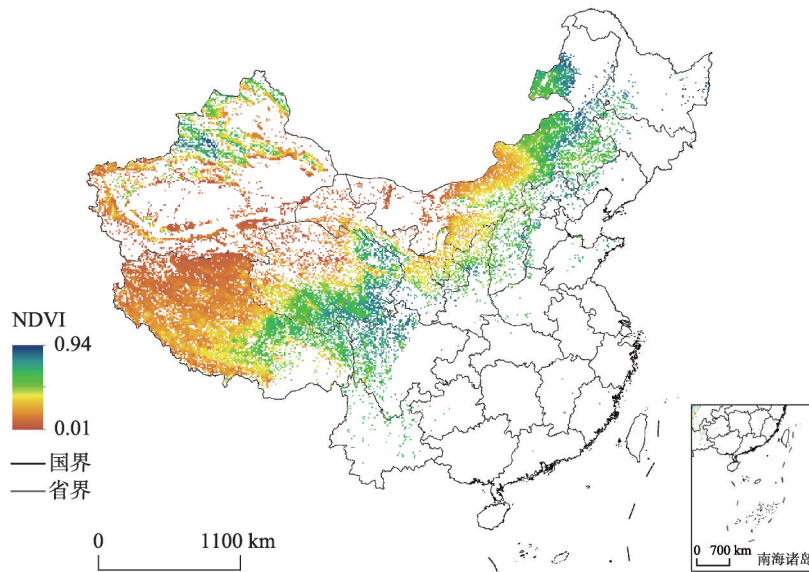
北方草原区植被NDVI总体上呈现增加趋势( $R^2=0.19, p<0.01$ ),每年约增加0.0006,1986年中国北方草原区NDVI最低,为0.35,2012年达到0.41,为34年最大值(图5)。

表2 2000—2015年不同草原类型归一化植被指数年际变化趋势统计

Tab. 2 Statistical table of Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) temporal trend of different grassland types from 2000 to 2015 (%)

变化趋势	NDVI	北方草原	高寒草甸	高寒草原	高寒荒漠	温性草甸	典型草原	荒漠草原
不显著	GIMMS	73.8	83.9	82.8	77.3	76.2	65.8	71.4
	MODIS	79.4	82.8	88.2	75.6	77.9	68.8	82.1
	SPOT	86.4	90.9	92.5	91.8	81.6	78.8	87.6
显著减少	GIMMS	10.6	5.9	12.4	19.6	3.9	2.8	16.2
	MODIS	5.3	10.8	4.2	1.6	12.4	4.1	3.4
	SPOT	2.1	2.8	2.7	2.6	2.3	1.3	1.3
显著增加	GIMMS	15.6	10.2	4.7	3.0	19.9	31.4	12.5
	MODIS	15.3	6.4	7.7	22.8	9.7	27.1	14.5
	SPOT	11.5	6.3	4.8	5.6	16.1	19.9	11.1





注:该图基于自然资源部标准地图服务网站下载的审图号为GS(2016)1591的标准地图制作,底图无修改。

图4 1982—2015年北方草原区年均归一化植被指数空间格局

Fig. 4 Spatial distribution of mean annual Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) from 1982 to 2015 in the grassland of northern China

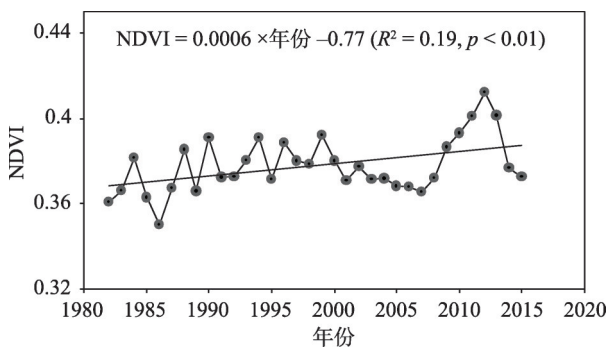


图5 1982—2015年北方草原区归一化植被指数年际变化

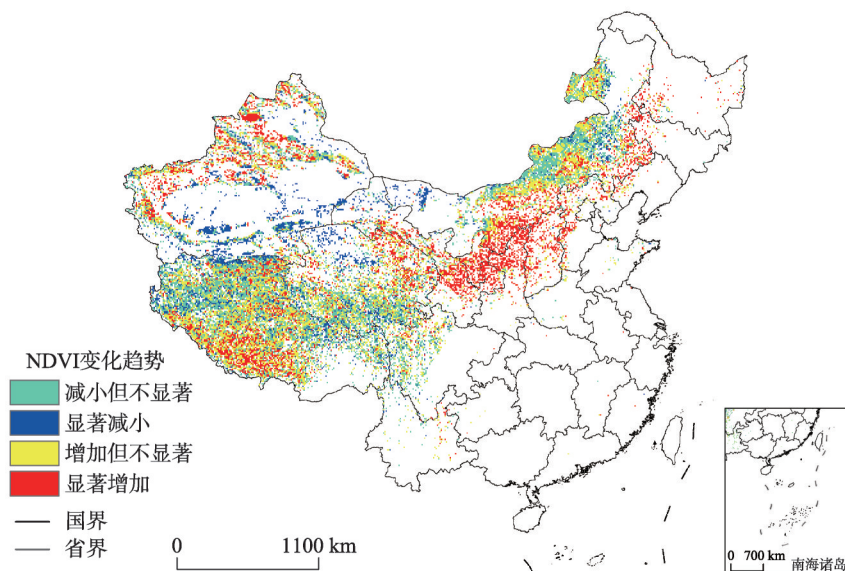
Fig. 5 Inter-annual variations of Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) from 1982 to 2015 in the grassland of northern China

由图6可以看出,1982—2015年中国北方草原区大部分区域NDVI呈增加趋势。其中,25.1%的区域NDVI呈显著增加趋势,12.7%区域NDVI呈显著下降趋势。NDVI显著增加的区域主要集中在温带草原区域,显著减少的区域则分布在塔克拉玛干沙漠和古尔班通古特沙漠周边。

整体上,温带草原区NDVI的变化比高寒草原区显著,尤其是典型草原近40%的区域NDVI显著

增加,草甸草原和荒漠草原NDVI分别有20%左右的区域呈显著增加趋势。在高寒草原区,NDVI显著增加的区域占比均未超过20%,且在高寒荒漠区,NDVI显著减少的区域占比达到15.6%(图7)。

中国北方草原区植被空间分布呈现出由东南向西北逐渐减少的趋势。这种空间分布格局与水热条件相关。在东北部呼伦贝尔草原,湖泊和河流分布较多,水分条件较好,因此植被生长状况较好。而在甘肃和新疆荒漠地区,降水量较低,尤其是高寒荒漠区域蒸散量较大,导致NDVI较低。研究区NDVI整体呈增加趋势,且有25%的区域NDVI显著增加。气候条件及其变化规律对植被指数的时空分布具有重要影响。近年来,全球增温明显<sup>[33]</sup>,年降水量亦呈增加趋势,尤其是温带草原<sup>[34]</sup>。草原生态系统其本身对全球变化的响应十分敏感<sup>[35]</sup>,气温上升可延长高原生态系统植被生长季长度,促进植被生长<sup>[36]</sup>。而降水是温带草原的主要限制因素<sup>[37]</sup>,降水量的增加有利于缓解植被的水分限制,促进植被生长,因此气候变化可能是导致中国北方草原区大部分地区NDVI呈增加趋势的主要原因。另外,中国中西部地区草原围栏封育等生态保护和环境建设措施,也可能是导致温带草原区ND-



注：该图基于自然资源部标准地图服务网站下载的审图号为GS(2016)1591的标准地图制作，底图无修改。

图6 1982—2015年北方草原区归一化植被指数年际变化趋势

Fig. 6 Interannual variation trend of Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) from 1982 to 2015 in the grassland area in northern China

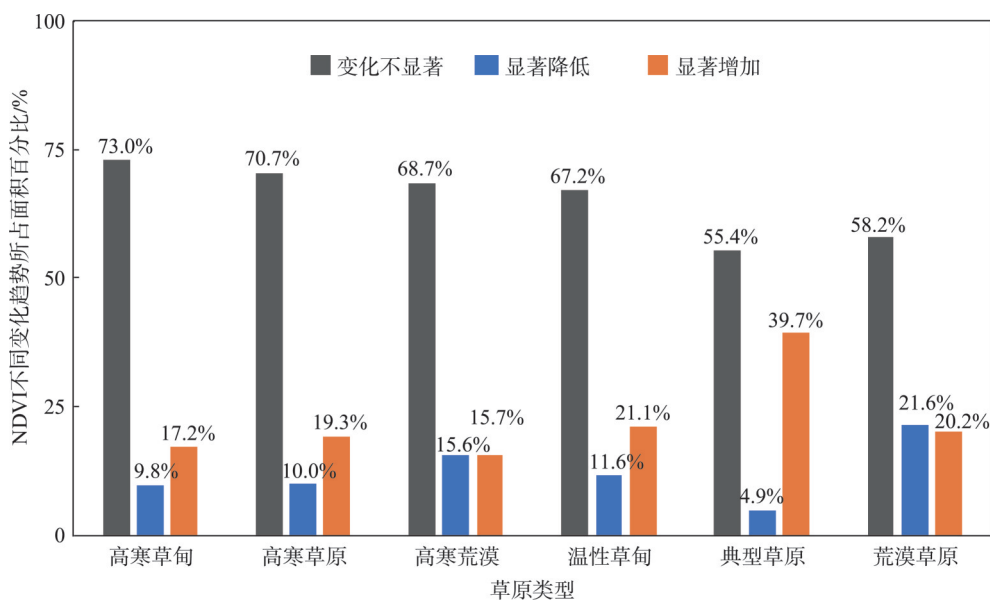


图7 1982—2015年不同草原类型归一化植被指数变化趋势统计

Fig. 7 Proportion of Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) variation trend of different grassland types from 1982 to 2015

VI增加的一个原因。

整体上,温带草原区植被指数的变化比高寒草原区显著,高寒草原区NDVI相对来说变化并不显著且有一定比例的区域NDVI呈显著下降趋势。陆

晴等在青藏高原草原的研究中也表明,温度是高寒草原植被生长的主要制约因子<sup>[38]</sup>。全球温度升高本应促进高寒草原植被生长,而本研究并不完全支持这一结果,可能的原因有以下2点:①青藏高原



环境较温带草原生态系统更为严酷,适应于该种环境,其植被多采取耐受对策型(Stress-tolerators)生活史策略,主要把资源配置到抵御不良环境、维持生存,因此,较小幅度的升温可能会较大的改变土壤微生物的活动,但对植被的影响有限;②虽然温度是青藏高原大部分地区的主要限制因子,但仍有部分地区,如塔克拉玛干沙漠和古尔班通古特沙漠周边,受水分限制,温度的升高加大地表蒸散量<sup>[39]</sup>,反而加剧了这些区域的水分限制程度,降低植被的生长。

## 4 结论

本文以中国北方草原区为研究区域,比较分析了2000—2015年重叠时段GIMMS NDVI、SPOT NDVI与MODIS NDVI数值范围、年际变化趋势等的一致性,进一步采用可靠的长时间序列数据集分析了中国北方草原区过去30年植被指数的空间格局与年际动态变化特征。主要结论如下:

(1)GIMMS NDVI在高寒草原区和温带荒漠草原区均与MODIS NDVI数据集具有较高一致,而SPOT NDVI数据集仅在部分温带草原区(荒漠草原和典型草原)与MODIS NDVI具有较高一致性(SPOT NDVI和MODIS NDVI在典型草原和荒漠草原的相关系数 $r$ 分别为0.78和0.75),所以GIMMS NDVI数据集可以较好地反映中国北方草原生态系统植被长期的时空格局。由于其他2类产品仍具有诸如空间分辨率较高等优势,在高寒草原类型,可适当采用MODIS NDVI数据集,而在温带草原类型,可适当采用SPOT NDVI和MODIS NDVI数据集。但由于SPOT NDVI数据集数值范围(其数值每年较另外两套数据集偏高约0.15)在高寒草原区与MODIS NDVI差异较大,使用时应有所保留。

(2)1982—2015年中国北方草原区植被指数整体呈增加趋势,且有25%的区域NDVI显著增加(主要集中在温带草原区)。高寒草原区NDVI相对来说变化并不显著且有部分区域NDVI呈显著下降趋势。

值得注意的是,长期地面观测数据独立于遥感观测方法,作为遥感数据集的地面验证和评估途径具有不可比拟的优势,后续研究应增加地面NDVI实地检测,从而对NDVI产品做更进一步的校正。

## 参考文献(References):

- [1] Parton W J, Scurlock J M O, Ojima D S, et al. Impact of climate change on grassland production and soil carbon worldwide[J]. *Global Change Biology*, 1995,1(1):13-22.
- [2] Wang Y, Zhou G, Jia B. Modeling SOC and NPP responses of meadow steppe to different grazing intensities in North-east China[J]. *Ecological Modelling*, 2008,217(1):72-78.
- [3] O'Mara F P. The role of grasslands in food security and climate change[J]. *Annals of Botany*, 2012,110(6):1263-1270.
- [4] Hautier Y, Seabloom E W, Borer E T, et al. Eutrophication weakens stabilizing effects of diversity in natural grasslands[J]. *Nature*, 2014,508(7497):521-525.
- [5] Poulter B, Frank D, Ciais P, et al. Contribution of semi-arid ecosystems to interannual variability of the global carbon cycle[J]. *Nature*, 2014,509(7502):600-603.
- [6] Bai Y, Wu J, Xing Q, et al. Primary production and rain use efficiency across a precipitation gradient on the Mongolia plateau[J]. *Ecology*, 2008,89(8):2140-2153.
- [7] Lambin E F, Strahler A H. Indicators of land-cover change for change-vector analysis in multitemporal space at coarse spatial scales[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1994,15(10):2099-2119.
- [8] Carlson T N, Ripley D A. On the relation between NDVI, fractional vegetation cover, and leaf area index[J]. *Remote sensing of Environment*, 1997,62(3):241-252.
- [9] Brinkmann K, Dickhoefer U, Schlecht E, et al. Quantification of aboveground rangeland productivity and anthropogenic degradation on the Arabian Peninsula using Landsat imagery and field inventory data[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2011,115(2):465-474.
- [10] Gang C, Zhang Y, Guo L, et al. Drought-Induced Carbon and Water Use Efficiency Responses in Dryland Vegetation of Northern China[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2019,10:224.
- [11] Zhao J, Zhang H, Zhang Z, et al. Long-term time series of vegetation various and its relationship with climate factors by integrating AVHRR GIMMS and Terra MODIS data[J]. *Fresenius Environ. Bull*, 2015,24:4005-4018.
- [12] Jong R D, Bruin S D, Wit A D, et al. Analysis of monotonic greening and browning trends from global NDVI time-series [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2011,115(2):692-702.
- [13] Jong R D, Verbesselt J, Schaepman M E, et al. Trend changes in global greening and browning: Contribution of short-term trends to longer-term change[J]. *Global Change Biology*, 2012,18(2):642-655.
- [14] Piao S, Wang X, Park T, et al. Characteristics, drivers and feedbacks of global greening[J]. *Nature Reviews Earth & Environment*, 2019, doi.org/10.1038/s43017-019-0001-x.
- [15] Mao D, Wang Z, Luo L, et al. Integrating AVHRR and

- MODIS data to monitor NDVI changes and their relationships with climatic parameters in Northeast China[J]. *International Journal of Applied Earth Observations & Geoinformation*, 2012,18.
- [16] Tucker C J, Pinzon J E, Brown M E, et al. An extended AVHRR 8- km NDVI dataset compatible with MODIS and SPOT vegetation NDVI data[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2005,26(20):4485-4498.
- [17] Song Y, Ma M, Veroustraete F. Comparison and conversion of AVHRR GIMMS and SPOT VEGETATION NDVI data in China[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2010,31(9):2377-2392.
- [18] Van Leeuwen W J D, Orr B J, Marsh S E, et al. Multi-sensor NDVI data continuity: Uncertainties and implications for vegetation monitoring applications[J]. *Remote sensing of environment*, 2006,100(1):67-81.
- [19] Guay K C, Beck P S A, Berner L T, et al. Vegetation productivity patterns at high northern latitudes: A multi-sensor satellite data assessment[J]. *Global Change Biology*, 2014,20(10):3147-3158.
- [20] Fensholt R, Rasmussen K, Nielsen T T, et al. Evaluation of earth observation based long term vegetation trends: Intercomparing NDVI time series trend analysis consistency of Sahel from AVHRR GIMMS, Terra MODIS and SPOT VGT data[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2009,113(9):1886-1898.
- [21] Atzberger C, Klisch A, Mattiuzzi M, et al. Phenological metrics derived over the European continent from NDVI3g data and MODIS time series[J]. *Remote Sensing*, 2014,6(1):257-284.
- [22] Brown M E, Pinzón J E, Didan K, et al. Evaluation of the consistency of long-term NDVI time series derived from AVHRR, SPOT-vegetation, SeaWiFS, MODIS, and Landsat ETM+ sensors[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2006,44(7):1787-1793.
- [23] Tarnavsky E, Garrigues S, Brown M E. Multiscale geostatistical analysis of AVHRR, SPOT- VGT, and MODIS global NDVI products[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2008,112(2):535-549.
- [24] 神祥金,周道玮,李飞等.中国草原区植被变化及其对气候变化的响应[J].*地理科学*,2015,35(5):622-629. [ Shen X J, Zhou D W, Li F, et al. Vegetation change and its response to climate change in Grassland of China[J]. *Geosciences*, 2015,35(5):622-629. ]
- [25] 张懿铨,刘林山,王兆锋,等.青藏高原土地利用与覆被变化的时空特征 [J]. *科学通报*,2019,64(27):2865- 2875. [ Zhang Y L, Liu L S, Wang Z F, et al. Temporal and spatial characteristics of land use and cover change in the Tibetan Plateau[J] *Science Bulletin*, 2019,64(27):2865-2875. ]
- [26] GIMMS NDVI: <https://ecocast.arc.nasa.gov/data/pub/gimms/>.
- [27] MODIS NDVI: Liu R G, Shang R, Liu Y, et al. Globally comparing approaches for gap filling of temporal data to generate the continuous vegetation parameters, submission to *Remote Sensing of Environment*, 2015. <http://www.geodata.cn>
- [28] SPOT\_NDVI V2.2 Global: <http://land.copernicus.vgt.vito.be>.
- [29] Sen P K. Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau[J]. *Journal of the American statistical association*, 1968,63(324):1379-1389.
- [30] Fensholt R, Proud S R. Evaluation of earth observation based global long term vegetation trends: Comparing GIMMS and MODIS global NDVI time series[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2012,119:131-147.
- [31] 杜加强,舒俭民,王跃辉,等.青藏高原MODIS NDVI与GIMMS NDVI的对比[J].*应用生态学报*,2014,25(2):533-544. [ Du J Q, Shu J M, Wang Y H, et al. Comparison of MODIS NDVI and GIMMS NDVI in Qinghai-Tibet Plateau[J]. *Journal of Applied Ecology*, 2014,25(2):533-544. ]
- [32] Pettorelli N, Vik J O, Mysterud A, et al. Using the satellite-derived NDVI to assess ecological responses to environmental change[J]. *Trends in Ecology & Evolution*, 2005,20(9):503-510.
- [33] IPCC, 2016. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). <http://www.ipcc.ch/>.
- [34] Zhao W, Hu Z, Guo Q, et al. Contributions of climatic factors to inter-annual variability of vegetation index in northern China grasslands[J]. *Journal of Climate*, 2019. DOI: 10.1175/JCLI-D-18-0587.1.
- [35] Knapp, A K and M D Smith. Variation among biomes in temporal dynamics of aboveground primary production [J]. *Science*, 2001,291(5503):481-484.
- [36] Piao S, Wang X, Ciais P, et al. Changes in satellite-derived vegetation growth trend in temperate and boreal Eurasia from 1982 to 2006[J]. *Global Change Biology*, 2011,17(10):3228-3239.
- [37] 郭群,李胜功,胡中民,等.内蒙古温带草原典型草地生态系统生产力对水分在不同时间尺度上的响应[J].*中国沙漠*,2015,35(3):616-623. [ Guo Q, Li S G, Hu Z M, et al. Response of typical grassland ecosystem productivity of temperate grassland in Inner Mongolia to water at different time scales[J]. *Desert of China*, 2015,35(3):616-623. ]
- [38] 陆晴,吴绍洪,赵东升.1982-2013年青藏高原高寒草地覆盖变化及与气候之间的关系[J].*地理科学*,2017,37(2): 292-300. [ Lu Q, Wu S H, Zhao D S. The relationship between alpine grassland cover change and climate in Qinghai-Tibet Plateau from 1982 to 2013[J]. *Geographic Science*, 2017,37(2):292-300. ]
- [39] 王青霞,吕世华,鲍艳,等.青藏高原不同时间尺度植被变化特征及其与气候因子的关系分析[J].*高原气象*,2014, 33(2):301-312. [ Wang Q X, Lu S H, Bao Y, et al. Analysis of vegetation change characteristics at different time scales on the Qinghai-Tibet Plateau and its relationship with climate factors[J]. *Plateau Meteorology*, 2014,33(2): 301-312. ]