

引用格式: Shen Beibei, Zhang Jing, Li Ming, *et al.* The Spatiotemporal Pattern of Leaf Area Index and The Influence of Water and Heat in Inner Mongolia Grassland[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2022, 37(1): 253-261. [沈贝贝, 张景, 李明, 等. 内蒙古草原叶面积指数时空格局与水热影响[J]. 遥感技术与应用, 2022, 37(1): 253-261.]

DOI: 10.11873/j.issn.1004-0323.2022.1.0253

内蒙古草原叶面积指数时空格局与水热影响

沈贝贝¹, 张景², 李明³, 丁蕾¹, 王旭¹, 辛晓平¹

(1. 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所/

呼伦贝尔草原生态系统国家野外科学观测研究站, 北京 100081;

2. 国家遥感中心, 北京 100036;

3. 中国地质调查局自然资源综合调查指挥中心, 北京 100055)

摘要: 叶面积指数(Leaf Area Index, LAI)是表征植被状况的重要参数,与植被的生长和变化状况密切相关。探究内蒙古草原LAI长时间序列时空格局特征及水热条件对LAI的影响,可为准确掌握内蒙古草原分布与生长状况差异提供数据支撑,对了解内蒙古草原生产能力的空间分布特征具有参考价值。基于2000~2019年GEOV2 LAI产品数据集,结合气温和降水资料,选取变化斜率、变异系数和相关性系数3个指标对内蒙古草原LAI展开分析。结果显示,内蒙古草原LAI由东北向西南递减,多年均值为 $1.34 \text{ m}^2/\text{m}^2$,在不同草原类型中,荒漠草原($0.28 \text{ m}^2/\text{m}^2$) < 典型草原($0.96 \text{ m}^2/\text{m}^2$) < 草甸草原($2.27 \text{ m}^2/\text{m}^2$) < 草甸($2.60 \text{ m}^2/\text{m}^2$),且与变异系数呈反比,荒漠草原年际间波动最剧烈。近20 a内蒙古草原LAI呈波动中上升趋势($0.02 \text{ m}^2/\text{m}^2/\text{a}$),67.08%区域草原LAI与年降水显著相关,仅4.98%区域草原LAI与年均温显著相关。表明内蒙古草原LAI空间分布具有地带性特征,不同草原类型LAI之间存在明显差异,降水是内蒙古草原LAI的主要影响因素。

关键词: 叶面积指数; GEOV2 LAI; 时空格局; 降水; 温度; 内蒙古草原

中图分类号: S812; TP79 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-0323(2022)01-0253-09

1 引言

叶片作为植被内部与外界物质、能量交换的重要器官,在控制植被冠层的许多生物物理过程中发挥着关键作用^[1],叶片的生长状况不同会造成干物质积累产生差异^[2]。叶面积指数(Leaf Area Index, LAI)是对植被叶片的定量描述,LAI的定义最早由Watson在作物学领域提出^[3],后经不断完善,目前应用最为广泛的定义为单位地表面上总叶面积的一半^[4]。LAI不仅是描述植被结构特征的重要指

标,而且是许多生态系统生产力模型,作物生长模型和生态学模型的关键输入参数^[5-7]。传统测量LAI的方法主要是通过地面观测,这种方法耗时费力、操作复杂,在长时间和大范围内不易开展。遥感卫星数据具有大范围、多尺度、多时相的特点,是一种获取全球尺度全天候连续观测LAI的重要数据源,使大范围反演LAI和分析大区域LAI时空变化特征成为可能^[8]。

区域内LAI时空分布特征可以反映植被生长状况,长时间序列LAI的变化能够揭示区域生态的

收稿日期: 2021-06-15; 修订日期: 2021-12-23

基金项目: 国家重点研发计划项目“草地碳收支监测评估技术合作研究”(2017YFE0104500),国家自然科学基金“基于全生命周期分析的多尺度草甸草原经营景观碳收支研究”(41771205),财政部和农业农村部国家现代农业产业技术体系,中央级公益性科研院所基本科研业务费专项(Y2020YJ19、1610132021016)资助。

作者简介: 沈贝贝(1992—),女,河北辛集人,博士研究生,主要从事草原生态遥感研究。E-mail: 82101191163@caas.cn

通讯作者: 辛晓平(1970—),女,甘肃天水人,研究员,主要从事草地生态学研究。E-mail: xinxiaoping@caas.cn

演化过程,目前有关LAI时空分布与变化的研究涉及森林^[9]、作物^[10]、草原等多种类型植被^[11-12],结果可以指示区域内植被数量和质量特征及其变化^[6, 13]。同时,植被对气候变化的响应非常敏感,LAI作为植被生态系统的重要参数,也能间接反映气候变化^[14],张佳华等^[5]探究了全球植被LAI对温度和降水的响应,Reygadas等^[15]阐述了年内和季节内LAI与地表温度的变化关系。水热条件是决定植被空间分布及其变化的主要非生物因素,分析LAI与温度和降水的相关关系,对研究植被对气候的特征响应具有一定的意义^[14, 16-18]。

草原在区域气候变化及全球碳循环中扮演着重要角色,LAI在复杂多样的草原生态系统中存在较大的时空变异性^[19-20]。内蒙古草原位于干旱半干旱区过渡带,植被类型丰富但生态环境脆弱,是全球气候变化的敏感区。以内蒙古草原作为研究对象,基于2000~2019年GEOV2 LAI产品数据集,通过变化斜率和变异系数两个指标分析了LAI时空变化特征,同时结合气温和降水资料探究了水热条件对LAI的影响。研究结果对准确掌握内蒙古草原分布与生长状况差异和探究气候变化对植被生长的影响具有指示意义,对了解内蒙古草原生产能力空间分布特征具有参考价值。

2 研究区与数据

2.1 研究区概况

内蒙古草原(37.4°~53.38°N, 97.2°~126.07°E)地处我国北部,地域辽阔,东西长达2 400 km,是欧亚大陆斯太普草原的组成部分,有着中国最佳的天然牧场之一,是我国北方重要的生态安全屏障,对维护京津乃至整个华北地区的生态安全都具有重要作用^[21]。大部分区域属大陆性季风气候,年均温0~8℃,由大兴安岭向东南、西南方向递减;年降水在50~450 mm,自东向西递减;地势由南向北逐渐倾斜。从东到西依次分布着著名的呼伦贝尔草原、锡林郭勒草原、科尔沁草原、乌兰察布草原和鄂尔多斯草原,受水热条件为主的综合因素的控制,内蒙古草原的水平地带性比较明显,由草甸草原过渡到荒漠草原。草甸草原集中分布在大兴安岭东西两侧的低山丘陵地带,以中旱生或广旱生的多年生草本植物为建群种;典型草原是此区天然草原的主体,分布范围最广;荒漠草原分布在锡林郭勒高原西北部、乌兰察布高原和巴彦淖尔高原北部、鄂尔

多高原中西部;草甸为隐域性植被,与森林同带,沿河、湖分布。

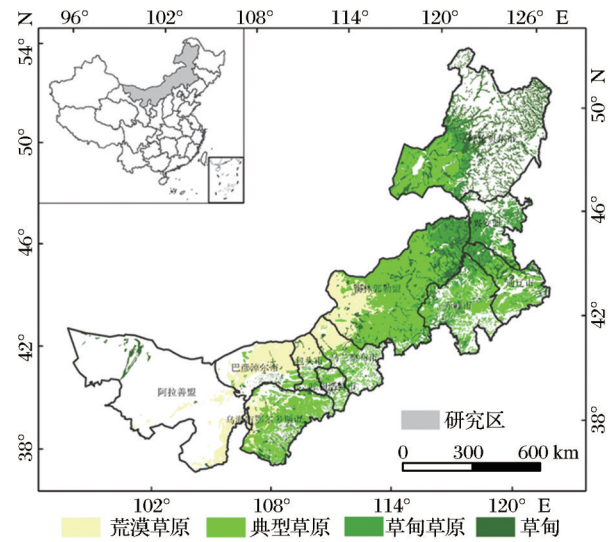


图1 研究区地理位置及草原类型分布图

Fig.1 The location and grassland types of the study area

2.2 数据来源及处理

2.2.1 产品数据

GEOV2 LAI产品数据在<http://land.copernicus.eu/global/>网站下载得到,产品数据集通过SPOT/VEGETATION传感器数据反演,利用CYCLOPE和MODIS LAI产品得到融合的LAI,将融合得到的LAI作为训练样本,基于神经网络方法得到GEOV2 LAI^[22]。时间范围为1999年以来至今,空间分辨率为1 km,时间分辨率为10 d,通过最大值合成(Maximum Value Composites, MVC)方法处理得到2000~2019年内蒙古草原逐年LAI数据,投影坐标使用Albers Conical Equal Area,用于内蒙古草原LAI时空格局分析。

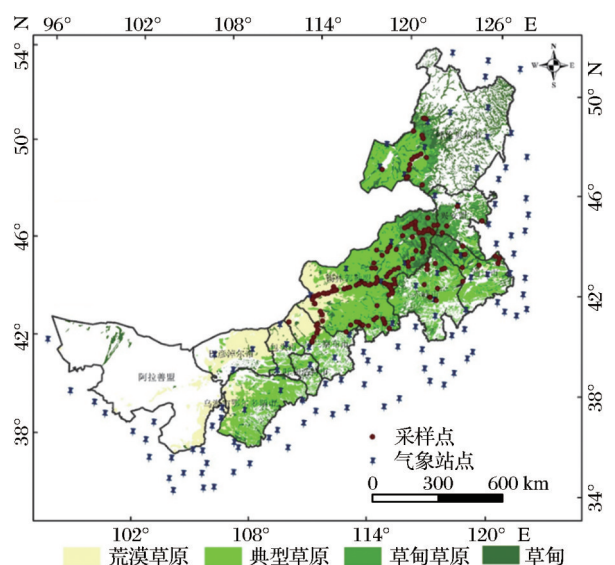
2.2.2 实测数据

LAI地面实测数据是2016、2018和2019年在内蒙古草原进行野外调查采集得到,共166个样点,样点空间分布位置见图2,野外测量使用美国LI-COR公司生产的LAI-2200冠层分析仪,沿途选择分布均匀的样地布设30 m×30 m的ESU(Elementary Sampling Units,基本采样单元)^[23],在每个ESU按“十”字状获取5个LAI值,取5个LAI的平均值作为采样点的LAI值。所有地面实测的LAI值用于GEOV2 LAI产品精度验证。

2.2.3 气象数据

气象数据在中国气象数据网<http://data.cma>.

cn上下载得到,选取中国地面气候资料月值数据集中 20~20 时降水量(即全天降水量)和平均气温两个指标,包括内蒙古自治区及其周边省份在内的共 114 个气象站点,利用 ArcGIS 软件对其进行 Kriging 插值处理,形成与 LAI 数据像元大小一致,投影相同的逐年气象数据,用于分析 LAI 与降水和温度之间的关系。



审图号:GS(2021)7692

图 2 研究区气象站点及 LAI 采样点分布图

Fig.2 The distribution of meteorological stations and LAI sample points

3 分析方法

3.1 产品精度验证

产品精度选用决定系数(R^2)和均方根误差(RMSE)两个指标进行评价, R^2 越大, RMSE 越小,说明产品模拟效果越好。

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (LAI_i - LAI'_i)^2}{\sum_{i=1}^n (LAI_i - \overline{LAI_i})^2}$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum (LAI_i - LAI'_i)^2}{n}}$$

其中: LAI_i 为实测值; LAI'_i 为 GEOV2 LAI 产品数据值; $\overline{LAI_i}$ 为实测 LAI 所有样点平均值; n 为野外 LAI 采样点数量, $n=166$ 。

3.2 LAI 变化斜率分析方法

利用一元线性回归法分析内蒙古草原 2000~2019 年的 LAI 变化状况,利用变量序列和时间序列的相关性来判断 LAI 的年际变化趋势, $\theta_{slope} > 0$,表示该像元 LAI 多年间呈上升趋势,否则呈下降

趋势。

$$\theta_{slope} = \frac{n \times \sum_{i=1}^n i \times LAI_i - \sum_{i=1}^n i \sum_{i=1}^n LAI_i}{n \times \sum_{i=1}^n i^2 - \left(\sum_{i=1}^n i \right)^2}$$

其中: θ_{slope} 为单个像元多年回归的趋势斜率, LAI_i 为第 i 年内蒙古草原 LAI 的最大值合成值。 $i=1, 2, 3 \dots 20, n=20$ 。

3.3 LAI 变异性计算方法

根据变异系数(Coefficient of Variation, CV)值的大小(CV 值越大,波动越大,则表示数据越稳定)分析内蒙古草原 2000~2019 年 LAI 的波动程度。

$$CV = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (LAI_i - \overline{LAI_i})^2}{n-1}} / \overline{LAI_i}$$

其中: LAI_i 为第 i 年内蒙古草原 LAI 的最大值合成值, $\overline{LAI_i}$ 为 20 年 LAI 年均值。 $i=1, 2, 3 \dots 20, n=20$ 。

3.4 LAI 与水热因子相关性计算方法

基于像元计算 LAI 与年降水和年均温之间的皮尔逊相关性系数,探讨水热因子对 LAI 的影响,根据相关系数的大小,依照显著性检验结果,将相关性关系划分为不显著相关,显著相关,极显著相关三级。

$$R_{xy} = \frac{\sum_{i=0}^n [(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})]}{\sqrt{\sum_{i=0}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=0}^n (y_i - \bar{y})^2}}$$

其中: R_{xy} 为 x, y 两变量的相关系数; x_i 为第 i 年草原 LAI 的最大值合成值; y_i 为第 i 年的年降水或年均温; \bar{x} 为多年 LAI 的平均值; \bar{y} 为多年年降水和年均温度的平均值。 $i=1, 2, 3 \dots 20, n=20$ 。

4 结果与分析

4.1 产品精度验证结果

GEOV2 LAI 产品精度验证结果如图 3。将野外采集的样点 LAI 值与 GEOV2 LAI 产品值之间进行时空匹配,产品的时间分辨率为 10 d,将采样时间分为上中下旬与每个月的 3 期数据对应。通过点对点对比验证,结果显示, GEOV2 LAI 产品与所有地面实测采集的 LAI 值之间 R^2 为 0.61,同时 RMSE 为 $0.46 \text{ m}^2/\text{m}^2$,产品精度满足用于分析区域内 LAI 特征的要求。从所有样点产品 LAI 值与实测 LAI 值

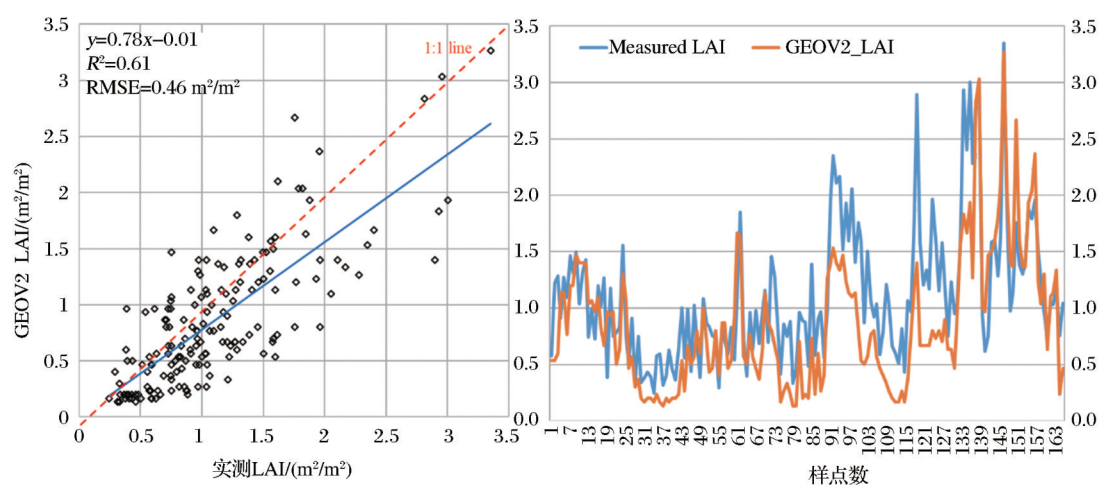


图3 GEOV2 LAI产品精度验证结果图

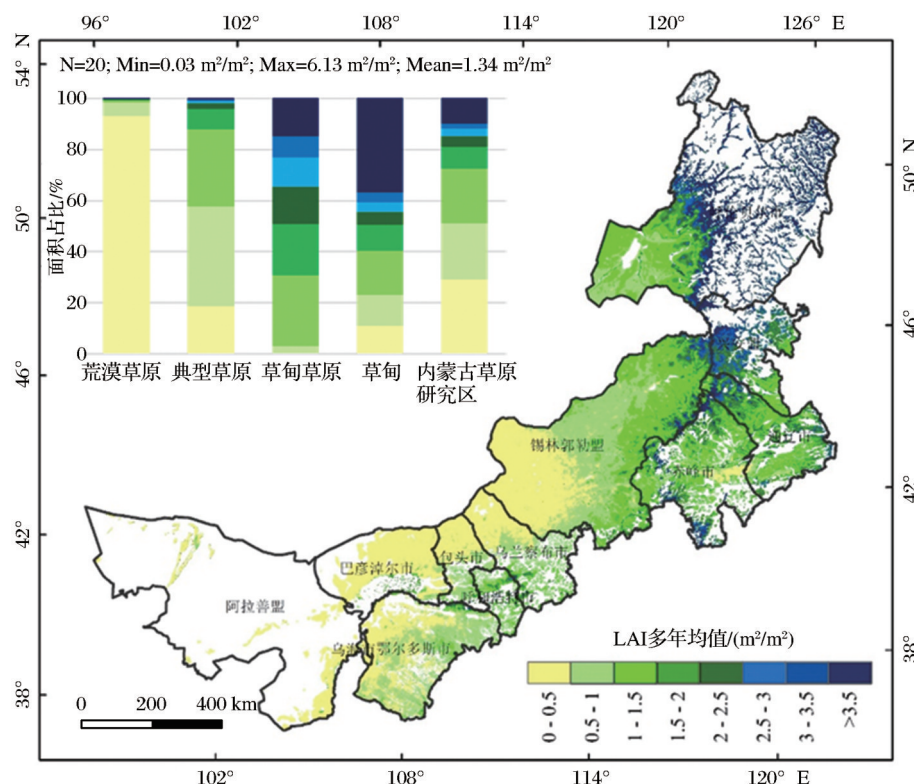
Fig.3 The results of GEOV2 LAI product accuracy verification

变化趋势来看,虽然存在低估和高估的现象,但是两者之间具有较好的一致性,用于分析内蒙古草原LAI的时空格局变化是可行的。

4.2 内蒙古草原叶面积指数空间分布状况

2000~2019年内蒙古草原整体及不同草原类型LAI多年均值空间分布及面积统计如图4。内蒙古草原LAI整体上呈由东北向西南逐步递减的地带性规律,空间差异比较明显。20 aLAI平均值为

1.34 m²/m²,从值的分布上来看,LAI处于0~0.5 m²/m²的面积分布占比最大,为28.15%,主要集中在连片分布在锡林郭勒盟西南侧和乌兰察布和包头北侧以及巴彦淖尔市草原区域。分布在0.5~1 m²/m²和1~1.5 m²/m²的面积相近,分别为21.71%和21.80%,高于3.5 m²/m²的面积占比为10.40%,分布区域主要集中在内蒙古草原的东北方向,草原类型以草甸为主。典型草原是分布面积最大的草原



审图号:GS(2021)7692

图4 内蒙古草原整体及不同草原类型LAI多年均值空间分布及面积统计

Fig.4 Spatial distribution of average annual LAI in Inner Mongolia grassland and all of the grassland types

类型,占比46.21%,草甸和荒漠草原面积分布占比相近,分别为19.92%和19.69%,草甸草原(14.18%)分布面积最小。不同草原类型LAI值差异较大,荒漠草原中,LAI值处于 $0\sim 1\text{ m}^2/\text{m}^2$ 的面积占比为98.76%。典型草原中,LAI值处于 $0\sim 1.5\text{ m}^2/\text{m}^2$ 的面积占比为88.28%。草甸草原LAI值分布范围较广,73.78%的区域LAI在 $1\sim 3\text{ m}^2/\text{m}^2$ 之间,22.78%的草甸草原LAI值在 $3\text{ m}^2/\text{m}^2$ 以上。草甸LAI值在不同区间均有分布,其中LAI值高于 $3.5\text{ m}^2/\text{m}^2$ 的区域面积占比最大,为36.60%,其次是17.52%区域的LAI值处于 $1\sim 1.5\text{ m}^2/\text{m}^2$ 之间。

4.3 内蒙古草原叶面积指数年际变化状况

内蒙古草原整体LAI及不同草原类型LAI逐年变化如图5。结果表明,2000~2019年LAI呈波动中上升的趋势,增长速率为 $0.02\text{ m}^2/\text{m}^2/\text{a}$,从内蒙古草原全区域LAI均值来看,20年中LAI值最低值出现在2000年和2007年,为 $1.06\text{ m}^2/\text{m}^2$,同时,LAI值最高值出现在2012年和2018年,为 $1.64\text{ m}^2/\text{m}^2$ 。不同草原类型2000~2019年逐年LAI均值的变化趋势具有很好的一致性,与内蒙古草原整体变化一致,其中草甸最高,LAI均值在 $2\sim 3\text{ m}^2/\text{m}^2$ 之间波动,其次是草甸草原,波动范围比较大,在 $1.5\sim 3\text{ m}^2/\text{m}^2$ 之间,典型草原在 $0.5\sim 1.5\text{ m}^2/\text{m}^2$ 之间波动,荒漠草原最低,在 $0\sim 0.5\text{ m}^2/\text{m}^2$ 之间波动。

基于像元计算CV和变化斜率进一步描述2000~2019年内蒙古草原LAI变化状况如图6。结果表明,内蒙古草原LAI大部分区域CV变化值在 $0.1\sim 0.6$ 之间(91.40%),其中 $0.3\sim 0.4$ 区间内面积

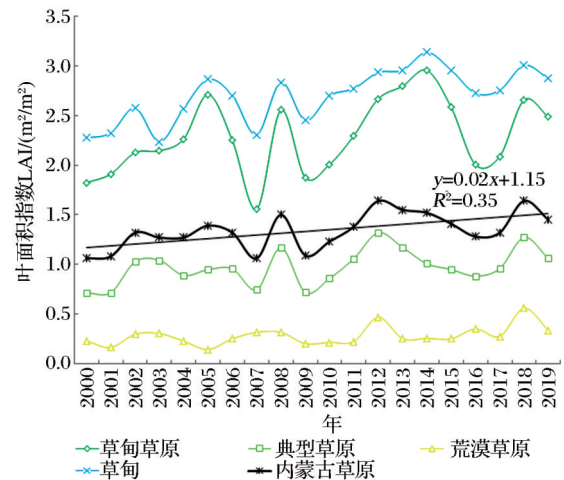


图5 2000~2019年内蒙古草原及不同草原类型逐年LAI均值

Fig.5 The line graphs of average LAI for different grassland types in Inner Mongolia from 2000 to 2019

占比最大为26.10%,在内蒙古草原均有分布。CV值高于0.6的区域分布在内蒙古草原中部,草原类型以荒漠草原为主。内蒙古草原变化斜率在 $-0.25\sim 0.3\text{ m}^2/\text{m}^2$ 之间,其中,近20 a LAI值处于升高趋势的区域面积高达85%,处于降低趋势的区域主要分布在大兴安岭两侧以及兴安盟草原区域。内蒙古草原不同草原类型变化斜率及CV统计见表1。结果表明,不同草原类型变化斜率表现为荒漠草原<典型草原<草甸草原<草甸,但是变化斜率较小。变异系数与LAI值大小在不同草原类型之间趋势相反,荒漠草原变异系数最大为0.490,其次是典型草原为0.366,草甸变异系数最小为0.260,LAI越高的草原类型抵御外界环境变化的能力更强,波动性越小。

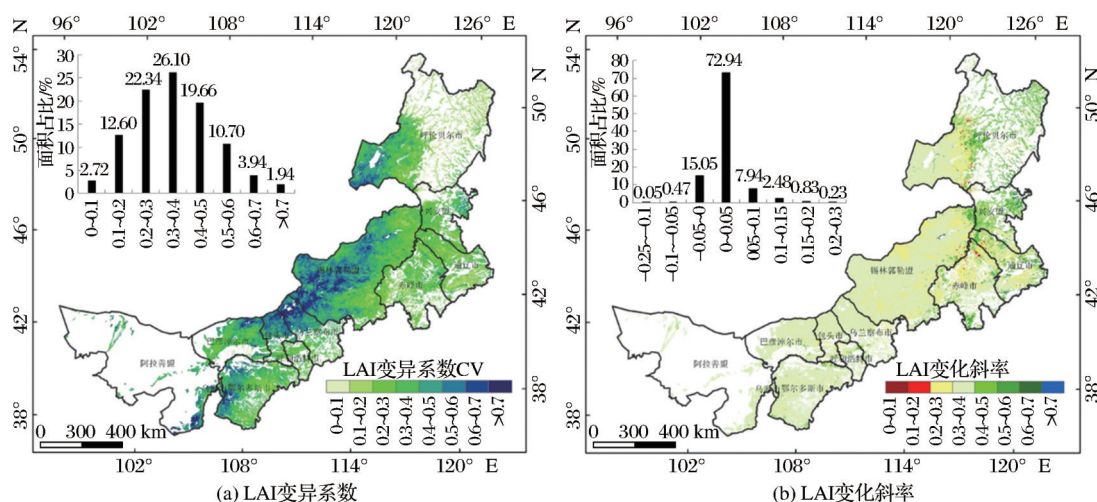


图6 内蒙古草原LAI值变异系数及变化斜率分布图

Fig.6 The distribution of LAI coefficient and slope in Inner Mongolia grassland

表 1 不同草原类型变化斜率及变异系数

Table 1 Statistical analysis of slope and coefficient of LAI variation for different grassland types

草原类型	均值 Mean		
	LAI (m ² /m ²)	变化斜率(m ² /m ²)	变异系数 CV
荒漠草原	0.28	0.008	0.490
典型草原	0.96	0.014	0.365
草甸草原	2.27	0.028	0.285
草 甸	2.60	0.032	0.265
总 计	1.34	0.017	0.354

4.4 叶面积指数变化气候影响因素分析

对内蒙古草原 LAI 和温度,降水依照皮尔逊相关性系数做相关性分析,根据显著性($P<0.05$, $P<$

0.01)检验结果,将相关性划分为 5 级:极显著负相关,显著负相关,不显著相关,显著正相关和极显著正相关。内蒙古草原 LAI 与年降水和年均温的相关关系如图 7。结果表明,内蒙古草原 LAI 与降水的相关性较强,并且呈现出显著较强的正相关,42.79% 的草原区域 LAI 与年降水极显著正相关,集中分布在乌兰察布草原、鄂尔多斯草原及部分锡林郭勒盟草原和呼伦贝尔草原,显著正相关草原面积占比为 24.22%,32.92% 的区域不显著相关。内蒙古草原大部分区域 LAI 与年均温不显著相关,面积高达 95.02%,说明温度不是限制 LAI 变化的主要因子。

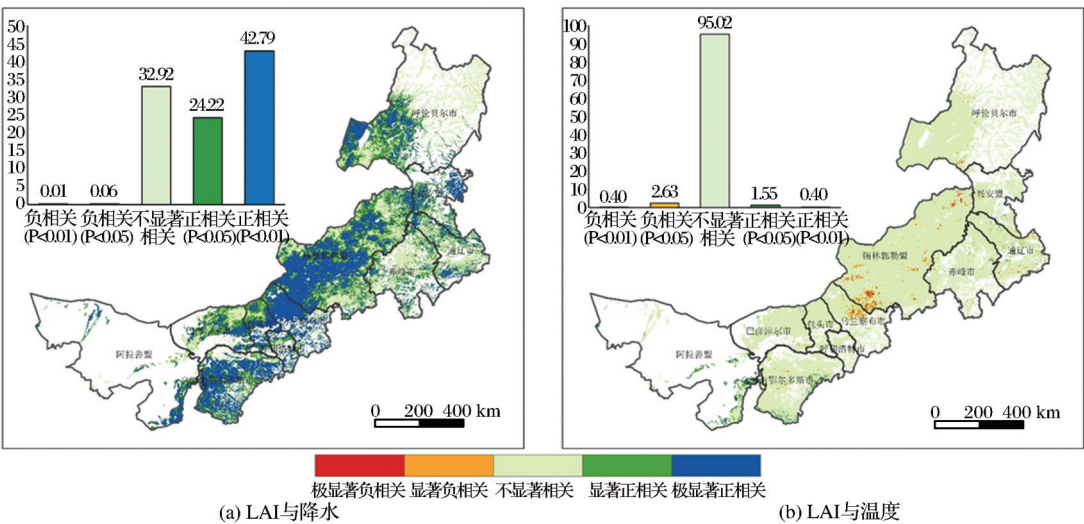


图 7 内蒙古草原 LAI 与降水和温度相关性空间分布

Fig.7 Correlation between LAI and precipitation and LAI and temperature in Inner Mongolia grassland

审图号:GS(2021)7692

内蒙古草原不同草原类型 LAI 与年降水与年均温的相关性统计见表 2 和表 3。荒漠草原是所有草原类型中 LAI 与年降水相关性表现最明显的,其中,正相关关系更强烈,显著相关或极显著相关所占的比重较大,分别为 23.78% 和 56.51%。其次是典型草原、草甸草原,草甸 LAI 与年降水相关性表现最弱,20.98% 的区域呈显著相关,极显著正相关

表 2 不同草原类型 LAI 与年降水相关系数

Table 2 Statistical analysis of coefficient between LAI and precipitation for different grassland types

草原类型	负相关		不显著 相关	正相关	
	$P<0.01^{**}$	$P<0.05^{*}$		$P<0.05^{*}$	$P<0.01^{**}$
荒漠草原	-	-	19.71	23.78	56.51
典型草原	-	0.01	28.43	25.22	46.34
草甸草原	-	0.04	40.02	26.11	33.83
草 甸	0.05	0.25	51.36	20.98	27.36

表 3 不同草原类型 LAI 与年均温相关系数

Table 3 Statistical analysis of coefficient between LAI and temperature for different grassland types

草原类型	负相关		不显著 相关	正相关	
	$P<0.01^{**}$	$P<0.05^{*}$		$P<0.05^{*}$	$P<0.01^{**}$
荒漠草原	0.19	2.84	91.64	3.68	1.65
典型草原	0.36	2.79	95.62	1.15	0.09
草甸草原	0.51	2.09	97.07	0.32	0.02
草 甸	0.61	2.46	95.54	1.24	0.15

的面积占比 27.36%, 这明降水是内蒙古草原 LAI 的主要气候影响因素。内蒙古草原不同草原类型 LAI 与年均温之间不显著相关区域面积占比均在 90% 以上。荒漠草原 LAI 与年均温呈相关关系的区域面积占比在所有草原类型中最大,为 8.36%,荒漠草原较其他草原类型更容易受到降水和温度变化共同影响。

5 讨 论

在分析内蒙古草原 LAI 的时空变化特征中, GEOV2 LAI 产品虽然存在低估和高估的现象,但是两者之间具有较好的一致性,相关研究表明 GEOV1 LAI 产品在模拟草原 LAI 时效果较好,相对 MODIS LAI 和 GLASS LAI 精度较高^[24-26]。同时,该数据集更新速度快,实时性强,因此选取了该产品数据集作为数据源展开分析。但是,产品的时间分辨率为 10 d,野外时间是在某一天,虽验证时选取的与产品是同期的数据,时间并非完全同步,对精度验证结果会造成一定影响。

内蒙古草原 LAI 呈由东北向西南逐步递减地带性分布规律,并且不同草原类型 LAI 之间具有明显差异, LAI 在值的分布上表现为草甸 ($2.60 \text{ m}^2/\text{m}^2$) > 草甸草原 ($2.27 \text{ m}^2/\text{m}^2$) > 典型草原 ($0.96 \text{ m}^2/\text{m}^2$) > 荒漠草原 ($0.28 \text{ m}^2/\text{m}^2$)。草原类型的分布具有较强的规律性,具有水平地带性,随着各种热量带的分布差异植被类型呈带状从南到北依次更替。草甸作为隐域性植被,分布范围较广且多是在中度湿润条件下形成,因此 LAI 值变化范围较大,以高 LAI 值分布区域最大。荒漠草原波动性最大,荒漠草原物种多样性少,抵抗气候变化能力弱,更容易受到外界环境影响。

在水热因子中,降水是引起内蒙古草原 LAI 变化的主导因子,这与黄玫等 (2010)^[12] 和彭飞等 (2017)^[27] 研究结果具有一致性。通过分析内蒙古草原 LAI 与降水的年际变化发现,20 a 中 LAI 值最低值和最高值出现的年份与降水量的最高值和最低值出现的年份具有很强的吻合性。本文只分析了水热因子对内蒙古草原 LAI 变化的影响,草原植被变化会受到气候变化和人类活动的共同驱动,光照条件、地形因子、放牧强度以及国家政策等因素^[28-31] 都会影响,量化其他因素对内蒙古草原 LAI 变化的影响有待深入探究。

6 结 论

研究基于 2000~2019 年 GEOV2 LAI 产品数据集,借助气象数据对内蒙古草原整体以及不同草原类型 20 a 间 LAI 空间分布、变化趋势和 LAI 与温度降水的关系展开分析,结果表明:

(1) 空间分布上,内蒙古草原 LAI 整体呈由东北向西南逐步递减的地带性规律,空间差异比较明显,多年均值为 $1.34 \text{ m}^2/\text{m}^2$ 。内蒙古草原 LAI 值在

不同草原类型之间存在明显差异,荒漠草原、典型草原、草甸草原和草甸 LAI 平均值分别为 $0.28 \text{ m}^2/\text{m}^2$ 、 $0.96 \text{ m}^2/\text{m}^2$ 、 $2.27 \text{ m}^2/\text{m}^2$ 和 $2.60 \text{ m}^2/\text{m}^2$ 。

(2) 变化趋势上,内蒙古草原 LAI 在 20 a 间呈波动上升趋势,增长速率为 $0.02 \text{ m}^2/\text{m}^2/\text{a}$ 。20 a 中 LAI 值最低值出现在 2000 年和 2007 年,为 $1.06 \text{ m}^2/\text{m}^2$,同时, LAI 值最高值出现在 2012 年和 2018 年,为 $1.64 \text{ m}^2/\text{m}^2$ 。不同草原类型 LAI 变化趋势与整体变化一致。

(3) 相关性分析上,内蒙古草原 LAI 与温度相关性不大,降水是影响 LAI 变化的主要因素。

参考文献 (References):

- [1] Chen J M, Rich P M, Gower S T, *et al.* Leaf area index of boreal forests: theory, techniques, and measurements [J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 1997, 102(D24): 29429-29443. DOI: 10.1029/97JD01107.
- [2] Huang Jingfeng, Wang Yuan, Wang Fumin, *et al.* Red edge characteristics and leaf Area Index estimation model using hyperspectral data for rape [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2006, 22(8): 22-26. [黄敬峰, 王渊, 王福民, 等. 油菜红边特征及其叶面积指数的高光谱估算模型 [J]. *农业工程学报*, 2006, 22(8): 22-26.]
- [3] Watson D J. Comparative and physiological studies on growth of field crops variation in net assimilation rate and Leaf Area between species and varieties and within years [J]. *Annals of Botany*. 1947, 11(41): 40-76.
- [4] Chen J M, Black T A. Defining Leaf Area index for non-flat leaves [J]. *Plant, Cell and Environment*. 1992, 15(4): 421-429. DOI: 10.1111/j.1365-3040.1992.tb00992.x.
- [5] Zhang Jiahua, Fu Zongbin, Yan Xiaodong, *et al.* Global response analysis of LAI versus surface air temperature and precipitation variations [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2002, 45(5): 631-637. [张佳华, 符淙斌, 延晓冬, 等. 全球植被叶面积指数对温度和降水的响应研究 [J]. *地球物理学报*, 2002, 45(5): 631-637.]
- [6] Li Kaili, Jiang Jianjun, Mao Rongzheng, *et al.* The modeling of vegetation through Leaf Area Index by means of remote sensing [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(6): 1491-1496. [李开丽, 蒋建军, 茅荣正, 等. 植被叶面积指数遥感监测模型 [J]. *生态学报*, 2005, 25(6): 1491-1496.]
- [7] Myneni R B, Hoffman S, Knyazikhin Y, *et al.* Global products of vegetation Leaf Area and fraction absorbed PAR from year one of MODIS data [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2002, 83(1-2): 214-231. DOI: 10.1016/S0034-4257(02)00074-3.
- [8] Li Xinchuan, Xu Xingang, Bao Yansong, *et al.* Retrieving LAI of winter wheat based on sensitive vegetation index by the segmentation method [J]. *Scientia Agricultura Sinica*,

- 2012, 45(17): 3486-3496.[李鑫川, 徐新刚, 鲍艳松, 等. 基于分段方式选择敏感植被指数的冬小麦叶面积指数遥感反演[J]. 中国农业科学, 2012, 45(17): 3486-3496.]
- [9] Liu F, Wang C K, Wang X C. Sampling protocols of specific Leaf Area for improving accuracy of the estimation of forest Leaf Area Index [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2021, 298-299: 108286. DOI: 10.1016/j. agrformet. 2020. 108286.
- [10] Yang P, Wu W B, Tang H J, *et al.* Mapping spatial and temporal variations of Leaf Area index for winter wheat in North China[J]. *Agricultural Sciences in China*, 2007, 6(12):1437-1443. DOI: 10.1016/S1671-2927(08)60005-X.
- [11] Wang Yuqi, Shen Runping, Huang Anqi, *et al.* Spatiotemporal dynamic analysis of MODIS LAI reconstructed in different cultivation areas in China from 2001 to 2017 [J]. *Journal of Geo-information Science*, 2021, 23(4): 658-669.[王宇琦, 沈润平, 黄安奇, 等. 2001~2017 年中国不同耕作区重建 MODIS LAI 时空动态[J]. 地球信息科学学报, 2021, 23(4): 658-669.]
- [12] Huang Mei, Ji Jinjun. The spatial-temporal distribution of Leaf Area Index in China: a comparison between ecosystem modeling and remote sensing reversion[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(11): 3057-3064.[黄玫, 季劲钧. 中国区域植被叶面积指数时空分布—机理模型模拟与遥感反演比较[J]. 生态学报, 2010, 30(11): 3057-3064.]
- [13] Lv Yuliang. Simulation of ecological and hydrological processes in a small sub-alpine dark coniferous forest catchment in western sichuan province [D]. Beijing: Chinese Academy of Forestry, 2007.[吕瑜良. 川西亚高山暗针叶林小流域生态水文过程耦合及模拟[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2007.]
- [14] Thomas N, Chase, *et al.* Sensitivity of a general circulation model to global changes in Leaf Area Index [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 1996, 101(D3): 7393-7408. DOI: 10.1029/95jd02417.
- [15] Reygadas Y, Jensen J, Moisen G G, *et al.* Assessing the relationship between vegetation greenness and surface temperature through granger causality and impulse-response coefficients: a case study in mexico[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2020, 41 (10) : 3761-3783. DOI: 10.1080/01431161. 2019.1711241.
- [16] Piao Shilong, Fang Jingyun. Seasonal changes in vegetation activity in response to climate changes in China between 1982 and 1999[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2003, 58(1): 119-125.[朴世龙, 方精云. 1982~1999 年我国陆地植被活动对气候变化响应的季节差异[J]. 地理学报, 2003, 58(1): 119-125.]
- [17] Wang Zheng, Yan Xiaodong, Hou Meiting. An overview of vegetation change impacts on climate [C]// Beijing: Proceedings of the 27th Annual Meeting of Chinese Meteorological Society, 2010.[王筝, 延晓冬, 侯美亭. 植被对气候的反馈效应研究进展[C]//北京: 第 27 届中国气象学会年会论文集, 2010.]
- [18] Tian Y, Dickinson R E, Zhou L, *et al.* Comparison of seasonal and spatial variations of Leaf Area Index and fraction of absorbed photosynthetically active radiation from Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) and common land model [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2004, 109 (D01103) : 1-14. DOI: 10.1029/2003 JD003777.
- [19] Liu Yibo, Ju Weimin, Zhu Gaolong, *et al.* Retrieval of Leaf Area Index for different grasslands in inner mongolia prairie using remote sensing data[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31 (18) : 5159-5170.[柳艺博, 居为民, 朱高龙, 等. 内蒙古不同类型草地叶面积指数遥感估算[J]. 生态学报, 2011, 31(18): 5159-5170.]
- [20] Geng Yuanbo, Dong Yunshe, Qi Yuchun. Review about the carbon cycle researches in grassland ecosystem[J]. *Progress in Geography*, 2004, 23(3): 74-81.[耿元波, 董云社, 齐玉春. 草地生态系统碳循环研究评述[J]. 地理科学进展, 2004, 23(3): 74-81.]
- [21] Ji Hongwei. Legal regulation of Inner Mongolia Grassland ecological protection [D]. Lanzhou: Northwest Minzu University, 2011.[纪宏伟. 内蒙古草原生态保护的法律规制[D]. 兰州: 西北民族大学, 2011.]
- [22] Camacho F, Cernicharo J, Lacaze R, *et al.* GEOV1: LAI, FAPAR essential climate variables and FCOVER global time series capitalizing over existing products. part 2: validation and intercomparison with reference products [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2013, 137(2013): 310-329. DOI: 10.1016/j.rse.2013.02.030.
- [23] Morisette J T, Baret F, Privette J L. Validation of global moderate-resolution LAI products: a framework proposed within the CEOS land product validation subgroup [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2006, 44 (7): 1804-1817. DOI: 10.1109/TGRS.2006.872529.
- [24] Yang Fan, Li Zhenwang, Bao Yuhai, *et al.* Comparison of different LAI products in Hulunber Meadow Steppe [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2016, 32(Sup.1): 153-160.[杨帆, 李振旺, 包玉海, 等. 不同叶面积指数遥感产品在呼伦贝尔草甸草原的应用对比[J]. 农业工程学报, 2016, 32(增刊1): 153-160.]
- [25] Yang F, Yang J, Wang J, *et al.* Assessment and validation of MODIS and GEOV1 LAI with ground-measured data and an analysis of the effect of residential area in mixed pixel [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations & Remote Sensing*, 2015, 8(2): 763-774. DOI: 10.1109/JSTARS.2014.2340452.
- [26] Li Zhenwang. Retrieval and validation of grassland key photosynthetic parameters using remote sensing data in Northern China [D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2018.[李振旺. 中国北方草原关键光合参数遥感反演与验证方法研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2018]
- [27] Peng Fei, Sun Guodong. Variation of Leaf Area index in China from 1982 to 1999 and its relationship with climate change [J]. *Climatic and Environmental Research*, 2017, 22 (2) :

- 162-176.[彭飞,孙国栋.1982~1999年中国地区叶面积指数变化及其与气候变化的关系[J].气候与环境研究,2017,22(2):162-176.]
- [28] Duan Limin, Li Wei, Luo Yanyun, *et al.* Spatiotemporal variations of vegetation Leaf Area Index and its response to topographical factors in Xilin River basin[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2019, 26(3): 224-231.[段利民,李玮,罗艳云,等.锡林河流域植被叶面积指数时空变化特征及其对地形因子的响应[J].水土保持研究,2019,26(3):224-231.]
- [29] Hu Yuetong, Wu Shuang, Feng Xianfeng, *et al.* Topographic correction of Leaf Area Index product derived from remote sensing data [J]. Remote Sensing Technology and Application, 2020, 35(5): 1070-1078.[胡月童,武爽,冯险峰,等.面向遥感叶面积指数产品的地形校正研究[J].遥感技术与应用,2020,35(5):1070-1078.]
- [30] Wei Jianzhou. Grassland vegetation change and its driving force in the Loess Plateau of China [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2020.[魏建洲.黄土高原草地植被变化及其驱动力分析[D].兰州:兰州大学,2020.]
- [31] Tian H, Cao C, Chen W, *et al.* Response of vegetation activity dynamic to climatic change and ecological restoration programs in inner mongolia from 2000 to 2012[J]. Ecological Engineering, 2015, 82(2015): 276-289. DOI: 10.1016/j.ecoeng.2015.04.098.

The Spatiotemporal Pattern of Leaf Area Index and The Influence of Water and Heat in Inner Mongolia Grassland

Shen Beibei¹, Zhang Jing², Li Ming³, Ding Lei¹, Wang Xu¹, Xin Xiaoping¹

(1.National Hulunber Grassland Ecosystem Observation and Research Station / Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China;

2.National Remote Sensing Center of China, Beijing 100036, China;

3.Natural Resources Comprehensive Survey Command Center, China Geological Survey, Beijing 100055, China)

Abstract: Leaf area index (LAI) is an important parameter to characterize the vegetation condition, which is closely related to the growth and change of vegetation. The investigation of the spatiotemporal pattern of LAI in Inner Mongolia grassland over a long time series and the influence of water and heat conditions on LAI can provide data to support an accurate understanding of the differences in the distribution and growth conditions of Inner Mongolia grassland, meanwhile, it is helpful for understanding the spatial distribution characteristics of the production capacity of Inner Mongolia grassland. Based on the GEOV2 LAI product dataset from 2000 to 2019, three indicators, namely slope of variation, coefficient of variation and correlation coefficient, were selected to analyse the grassland LAI in Inner Mongolia in combination with the data of temperature and precipitation. The results show that the LAI of Inner Mongolia grassland decreases from northeast to southwest with a multi-year mean value of $1.34 \text{ m}^2/\text{m}^2$, and among different grassland types, desert grassland ($0.28 \text{ m}^2/\text{m}^2$) < typical grassland ($0.96 \text{ m}^2/\text{m}^2$) < meadow grassland ($2.27 \text{ m}^2/\text{m}^2$) < meadow ($2.60 \text{ m}^2/\text{m}^2$), and is inversely proportional to the coefficient of variation, with desert grassland showing the sharpest inter-annual fluctuations. Over the past 20 years, the LAI of Inner Mongolia grassland showed an increasing trend in fluctuation ($0.02 \text{ m}^2/\text{m}^2/\text{a}$), 67.08% of regional grassland LAI was significantly correlated with annual precipitation, and only 4.98% of regional grassland LAI was significantly correlated with annual mean temperature. These indicate that the spatial distribution of grassland LAI in Inner Mongolia has zonal characteristics, and there are significant differences between different grassland types, and precipitation is the main influencing factor of grassland LAI in Inner Mongolia.

Key words: Leaf Area Index (LAI); GEOV2 LAI; Spatiotemporal changes; Precipitation; Temperature; Inner Mongolia grassland