

乌兰察布市植被叶面积指数时空变化及 对气候因子的响应

皇彦¹, 宋海清², 孙小龙², 李云鹏², 胡琦³

(1.乌兰察布市气象局, 内蒙古 乌兰察布 012000; 2.内蒙古自治区生态与
农业气象中心, 内蒙古 呼和浩特 010051; 3.中国农业大学 资源与环境学院, 北京 100193)

摘要: [目的] 研究乌兰察布市植被叶面积指数(LAI)动态变化及对气候因子的响应, 为该地区资源合理分配和生态保护提供科学依据。[方法] 基于2000—2019年7—8月哥白尼气候变化服务项目 PROBA-V LAI数据, 结合气象数据, 利用趋势分析、变异系数法、相关性分析方法等探讨了乌兰察布市 LAI时空变化及与气温、降水、土壤湿度的关系。[结果] ① 2000—2019年7—8月乌兰察布市 LAI整体呈波动上升趋势, 速度为0.01/a, LAI空间分布差异明显, 呈东南高西北低的特征。② LAI增加的区域占88.3%, 兴和县大部、丰镇市东部、凉城县西部、四子王旗西南部及察哈尔右翼中旗中北部等地显著增加, 阴山以北的后山大部分地区 LAI上升速度较缓慢或出现下降, 研究期内植被 LAI变化相对不稳定。③ LAI与同期气温呈显著负相关, 与降水和土壤湿度呈极显著正相关, 且与土壤湿度的相关性高于降水和气温。④ LAI与气温、降水、土壤湿度的相关系数空间分布差异不显著, 大部分区域植被 LAI与气温呈负相关, 45.4%的区域相关性显著; 与降水和土壤湿度呈显著正相关, 呈极显著正相关的区域土壤湿度大于降水。[结论] 2000—2019年, 乌兰察布市植被 LAI整体上升, 空间异质性明显, 土壤湿度是影响植被生长的决定性因素。

关键词: 乌兰察布市; 叶面积指数; 时空变化; 气候因子

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2022)02-0338-09

中图分类号: P49, Q94

文献参数: 皇彦, 宋海清, 孙小龙, 等. 乌兰察布市植被叶面积指数时空变化及对气候因子的响应[J]. 水土保持通报, 2022, 42(2): 338-346. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2022.02.045; Huang Yan, Song Haiqing, Sun Xiaolong, et al. Spatiotemporal variation of leaf area index and its response to climatic factors in Ulanqab City [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2022, 42(2): 338-346.

Spatiotemporal Variation of Leaf Area Index and Its Response to Climatic Factors in Ulanqab City

Huang Yan¹, Song Haiqing², Sun Xiaolong², Li Yunpeng², Hu Qi³

(1. Ulanqab Meteorological Bureau, Ulanqab, Inner Mongolia 012000, China;

2. Inner Mongolia Autonomous Region Center for Ecology and Agrometeorology, Hohhot, Inner Mongolia

010051, China; 3. China Agricultural University, College of Resources and Environmental Sciences, Beijing 100193, China)

Abstract: [Objective] The dynamic change of leaf area index (LAI) and its response to climatic factors in Ulanqab City were studied in order to provide a scientific basis for rational resource allocation and ecological conservation. [Methods] Based on the Copernicus Climate Change Service PROBA-V LAI data and meteorological data from July to August during the period of 2000—2019, the spatiotemporal variation of LAI and its relationship with temperature, precipitation, and soil moisture in Ulanqab City were explored using linear trend analysis, coefficient of variation analysis and correlation analysis. [Results] ① Average LAI showed a

收稿日期: 2021-09-07

修回日期: 2021-11-30

资助项目: 国家重点研发计划重大自然灾害监测预警与防范专项“实况融合产品在智能网格预报中的应用”(2018YFC1506606)

第一作者: 皇彦(1989—), 女(汉族), 内蒙古自治区乌兰察布市人, 硕士, 工程师, 主要从事应用气象与气象服务方面的工作。Email: yan304@163.com。

通讯作者: 李云鹏(1970—), 男(汉族), 内蒙古自治区乌兰察布市人, 学士, 研究员, 主要从事应用气象与气象服务方面的研究。Email: lyp5230@163.com。

fluctuating upward trend at a growth rate of 0.01 per year in Ulanqab City during the study period. Significant differences were found in the spatial distribution of LAI, which was characterized by high LAI in the southeast and low LAI in the northwest. ② Although 88.3% of the study area showed an increasing trend for LAI, the change of LAI was relatively unstable during the study period. A significant increasing trend was found in most of Xinghe County, the east of Fengzhen City, the west of Liangcheng County, the southwest of Siziwang Banner, and the central and northern parts of Chahar Right Middle Banner, while a slowly increasing or decreasing trend was found in most areas of Houshan Mountain in the north of Yinshan Mountain. ③ LAI showed a significant negative correlation with temperature, and a highly significant positive correlation with precipitation and soil moisture. The correlation of LAI with soil moisture was higher than that of precipitation and temperature. ④ No significant difference was found in the spatial distribution of correlation coefficients between LAI and temperature, precipitation, and soil moisture. Most areas had negative correlations between LAI and temperature, with 45.4% of the study area showing significant negative correlations. LAI had significant positive correlations with precipitation and soil moisture, and the area of significant correlation between LAI and soil moisture was larger than that of precipitation. [Conclusion] During 2000—2019, the LAI of vegetation in Ulanqab City showed an increasing trend and obvious spatial heterogeneity. Soil moisture was the decisive factor affecting vegetation growth.

Keywords: leaf area index (LAI); spatiotemporal variation; climatic factors; Ulanqab City

乌兰察布市地处中国北方农牧交错带中部地区,在构筑北方重要生态安全屏障中具有不可替代的地位^[1]。由于该地区地表物质结构脆弱、气候干旱多风等自然原因,导致其对气候变化极其敏感^[2],加之长期以来毁林开荒、过度放牧等人类活动的干扰,生态环境问题更加突出,给当地居民生活及经济发展造成了极大影响,已成为中国典型的干旱、沙尘等极端天气频发的生态脆弱区^[3]。因此,合理地开发自然资源、实现可持续利用是当前亟待解决的问题之一。研究该地区植被变化及其对气候因子的响应,对该地资源合理分配和生态文明建设具有重要的理论指导意义。

目前,基于遥感监测的归一化植被指数(NDVI)被广泛应用于全球和区域尺度上植被与气候之间的相关关系研究。但 NDVI 是一种谱植被指数,而非生物物理变量^[4]。因此,将 NDVI 数据当作植被生物量的指示值进行相关研究存在一定的误差^[5]。叶面积指数(leaf area index, LAI)定义为单位地表面上的植物叶片总面积大小^[6],其作为生态系统的重要结构参数之一^[7],在植被—陆表—大气间的物质和能量交换中发挥着重要作用,是反映全球变化的基础气候变量之一^[8]。与 NDVI 相比, LAI 具有更明显的生态学意义^[4],能清楚地给出植被的结构参数和数量特征^[9],因而能更真实地反映植被动态变化^[10]以及植被与气候的相互作用^[9]。传统的地面测量难以获取大范围 LAI 数据,而遥感技术具有灵敏准确、经济高效等优点,为植被 LAI 反演提供了有力的支撑^[11]。Dusseux 等^[12]基于 SPOT 和 Quickbird 遥感影像提

取 LAI 信息,利用 LAI 的时间演变特征来判别草地的实际动态变化状况。董金芳^[13]、韩思琪^[10]、王力等^[14]利用 MOD15 遥感数据分别对陕西省、黄河源和黑河流域的植被 LAI 时空变化及影响因素进行了分析,发现不同土地利用类型的植被变化趋势不一致,气候因素是导致 LAI 波动变化的直接原因。而张宇佳等^[15]利用 MOD15 数据在河北省的研究发现,降水、气温、植被类型等因子均对 LAI 的变化有显著影响,且影响程度有所不同。彭飞等^[4]利用 AVHRR Pathfinder 卫星遥感观测 LAI 资料研究了中国不同地区植被年、季节、生长季变化及与同期气候因子的关系,结果表明受气候的区域和季节差异影响, LAI 变化存在明显的空间异质性和季节非均一性。然而,在乌兰察布市地区开展的类似研究并不多见,且对该地区植被的变化规律及其对气候的响应等方面的研究不够深入。例如,以往的研究一般采用相关统计等方法分析该地区植被变化与气温、降水的关系,土壤湿度作为直接影响植被生长的重要气候因素之一,其变化特征对植被的影响却未被考虑在内。因此,本研究利用 2000—2019 年 7—8 月哥白尼气候变化服务项目 PROBA-V LAI 数据,同时结合中国区域地面气象要素驱动数据集(CMFD)的气温和降水数据,内蒙古自治区气象局提供的土壤湿度资料,探讨了乌兰察布市植被叶面积指数时空变化特征及其与气温、降水、土壤湿度的关系,以进一步了解气候变化背景下该地区植被动态变化及其对气候因子的响应程度,为该地区生态保护提供理论参考和科学依据。

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

乌兰察布市地处内蒙古自治区中部,总面积为 $5.45 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。地形自北向南由蒙古高原、乌兰察布丘陵、阳山山脉、黄土丘陵组成。习惯上将属于阴山山脉的大青山支脉以南部分称为前山地区(集宁区、察哈尔右翼前旗、凉城县、卓资县、兴和县、丰镇市),温暖多雨,以北部分称为后山地区(商都县、化德县、察哈尔右翼后旗、察哈尔右翼中旗、四子王旗),干旱多风。乌兰察布市属于中温带干旱和半干旱大陆性季风气候,四季分明。该市年平均气温为 $2.1 \sim 5.7 \text{ }^\circ\text{C}$,年降水量为 $312.0 \sim 371.5 \text{ mm}$ 。该市土地利用类型主要包括草地、耕地、林地等(图 1),草地所占面积最大。

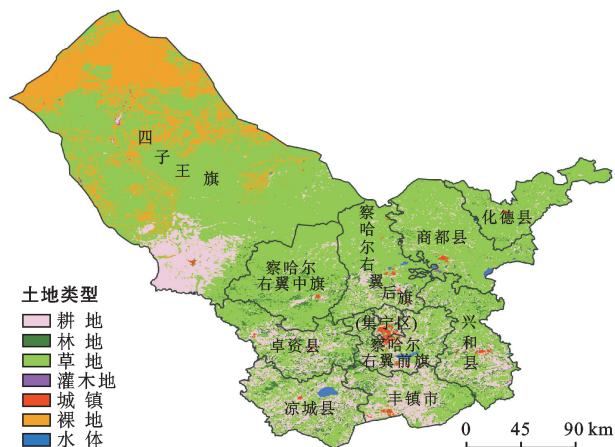


图 1 乌兰察布市 2019 年土地利用类型分布

1.2 数据来源

本文选取的 2000—2019 年 7—8 月 PROBA-V LAI 数据和年土地利用分类数据均来源于哥白尼气候变化服务产品,下载网址: <https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp/dataset/satellite-land-cover?tab=overview>。LAI 时间分辨率为 10 d,空间分辨率为 1 km。使用 NCAR 命令语言 NCL 编程将奇异值去除。土地利用分类数据空间分辨率为 300 m,在原有分类基础上按耕地、林地、草地等 7 类合并相似土地利用类型。所采用的气温、降水数据来源于 He 等人^[16]发展的中国区域地面气象要素驱动数据集(CMFD)逐月气温和降水,该数据集是以国际上现有的 Princeton 再分析资料、GLDAS 资料、GEWEX-SRB 辐射资料、以及 TRMM 降水资料为背景场,融合了中国气象局常规气象观测数据制作而成,空间分辨率为 0.1° 。精度介于气象观测数据和卫星遥感数

据之间,好于国际上已有再分析数据的精度。选取的 0—20 cm 土壤湿度数据来源于内蒙古自治区气象局,该数据利用 CMFD 资料驱动改进下垫面的 NCAR 陆面水文模式 CLM3.5 获取^[17],时间分辨率为 1 d,空间分辨率为 $0.03^\circ \times 0.03^\circ$,将逐日土壤湿度数据取平均值,得到逐月土壤湿度数据。利用双线性插值法将 LAI 数据和格点气温、降水资料插值到与土壤湿度空间分辨率相同的网格上,然后进行空间相关性分析。

1.3 研究方法

1.3.1 均值法 乌兰察布市植被生长旺盛阶段主要集中在 7—8 月。因此本文选取 7—8 月的 LAI 为研究对象,采用均值法提取 7—8 月的 LAI 平均值,得到研究期间年际变化的规律特征。

$$\overline{\text{LAI}}_i = \sum_{k=1}^6 \text{LAI}_k / 6 \quad (1)$$

式中: $\overline{\text{LAI}}_i$ 是第 i 年 7—8 月的 LAI 平均值; k 的取值范围为 1~6,即第 184 d 到第 234 d。

1.3.2 趋势分析法 趋势分析法是通过对所有像元进行一元线性回归分析,来反映空间上不同时期植被的变化趋势^[18]。利用趋势线分析法分析乌兰察布市 2000—2019 年 7—8 月 LAI 年际变化趋势。其计算公式为:

$$\theta_{\text{slope}} = [n \times \sum_{i=1}^n i \times \text{LAI}_i - \sum_{i=1}^n i \times \sum_{i=1}^n \text{LAI}_i] / [n \times \sum_{i=1}^n i^2 - (\sum_{i=1}^n i)^2] \quad (2)$$

式中: n 为研究期的年数; i 为 1— n 年中的第 i 年; LAI_i 为第 i 年的 LAI 值; θ_{slope} 为趋势线的斜率, $\theta_{\text{slope}} > 0$,说明研究期内该地区的 LAI 呈增加趋势,反之呈减少趋势。

1.3.3 变异系数法 变异系数可以反映一组数据的相对变化(波动)程度^[19]。利用变异系数(C_v)表述叶面积指数变化的稳定性, C_v 计算公式为:

$$C_v = \sqrt{\sum_{i=1}^n (\text{LAI}_i - \overline{\text{LAI}})^2 / (n-1) / \overline{\text{LAI}}} \quad (3)$$

式中: $\overline{\text{LAI}}$ 代表 20 a 乌兰察布市 LAI 平均值; C_v 值反映了 LAI 变化程度, C_v 值越大,表示 LAI 变化越大,反之表示 LAI 变化较小,较为平稳。

1.3.4 相关性分析 相关系数表示两组变量的线性相关关系^[20],利用相关系数分析 LAI 与同期平均气温、降水、土壤湿度的相关性,计算公式为:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y}) / \sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (4)$$

式中: x_i, y_i 分别为第 i 年的 LAI 值与同期气温、降水、土壤湿度数据; \bar{x}, \bar{y} 分别为多年 LAI 与气温、降水、土壤湿度的平均值; r 为相关系数, 取值范围 $[-1, 1]$, 其绝对值越大表示相关性越强, 反之表示相关性越弱。

2 结果与分析

2.1 乌兰察布市 LAI 时空变化特征

2.1.1 LAI 年际变化特征 由图 2 可以看出, 2000—2019 年 7—8 月乌兰察布市 LAI 年际变化波动性较大, 整体呈上升趋势, 速度为 $0.01/a$ 。LAI 值介于 $0.29 \sim 0.93$, 多年平均值为 0.61 。具体来看, 研究期间内 LAI 共有 3 个明显上升阶段, 2000—2003 年是第一个明显上升阶段, 2004—2009 年 LAI 波动下降; 2010—2013 年是第 2 个明显上升阶段, 2013 年 LAI 值达近 20 a 最大值, 2014 年 LAI 显著下降; 2015—2019 年是第 3 个明显上升阶段, 此阶段 LAI 呈波动上升趋势。该地区 LAI 之所以波动较大是因为地处生态脆弱区^[2], 且植被类型以草原植被为主(图 1), 生态系统对自然环境变化和人类活动干扰特别敏感^[1-2]。

2001 年、2009 年 7—8 月 LAI 值明显低于线性回归模拟值, 2001 年 LAI 值为近 20 a 最小值, 这两年乌兰察布市发生了严重的干旱灾害^[21-22]。2001 年春夏连旱, 入春后气温偏高, 降水特少, 土壤失墒快, 造成春旱, 部分地区无法下种, 干旱逐渐加重, 5 月底开始出现近 50 d 的高温少雨天气, 使农作物出苗受阻; 入夏后气温持续偏高, 降水偏少且分布不均匀, 日照时数多, 严重影响了作物生长, 产量难以提高^[21]。2009 年降水少于历年同期, 6 月后连续高温少雨, 出现了严重的干旱^[21-22]。其中四子王旗 6 月中旬至 8 月上旬总降水量为 60.1 mm , 比历史同期偏少 1.3 倍, 发生了建站以来 50 a 不遇的特大干旱灾害^[21]。

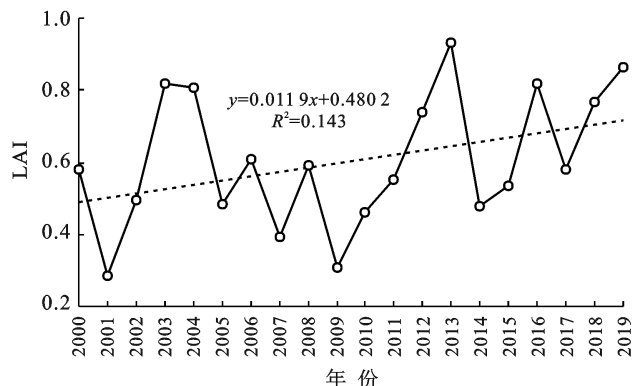


图 2 乌兰察布市 2000—2019 年 7—8 月 LAI 年际变化

2.1.2 LAI 空间分布特征 2000—2019 年 7—8 月乌兰察布市 LAI 整体上呈现由东南向西北递减的分布特征(图 3), 地域分异明显。这一结果与乌兰察布市生长季植被 NDVI 变化研究结果较为一致^[1]。LAI 低值区分布在四子王旗的大部分区域, 尤其是四子王旗北部, LAI 值集中在 0.2 以下, 占研究区面积的 21.2% 。四子王旗西南部、察哈尔右翼中旗北部、察哈尔右翼后旗和商都县大部、化德县北部等地的 LAI 值主要集中在 $0.4 \sim 0.8$, 占研究区面积的 25.0% 。前山地区及后山地区南部的 LAI 值集中在 $0.8 \sim 1.2$, 占研究区面积的 25.1% 。LAI 高值区主要零散分布在察哈尔右翼中旗南部和卓资县、凉城县、察哈尔右翼前旗、丰镇市、兴和县等地, 可达 $1.2 \sim 2.0$, 卓资县西部和凉城县北部甚至达到 2.0 以上, 共占研究区面积的 11.5% 。结合图 1 可知, LAI 低值区荒漠分布范围较广, 加之降水稀少、气候干燥等因素^[23], 非常不利于植物生长; 而 LAI 高值区除草地外还分布有耕地、林地, 气候环境适宜、水热等条件良好^[23], 是全市植被覆盖较高的地区。

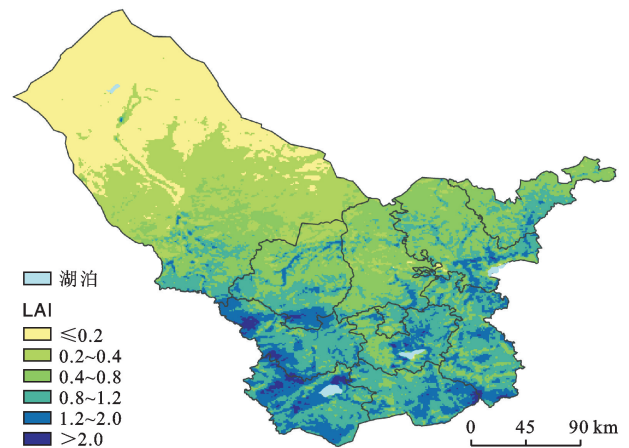


图 3 乌兰察布市 2000—2019 年 7—8 月平均 LAI 空间分布

2000—2019 年 7—8 月乌兰察布市大部分地区 LAI 呈增加趋势(图 4), 变化率(slope, 斜率) > 0 的区域约占研究区总面积的 88.3% , 特别是兴和县大部、丰镇市东部、凉城县西部、四子王旗西南部及察哈尔右翼中旗中北部等地 LAI 增加幅度较大, 在 $0.03/a$ 以上, 部分区域甚至可达 $0.05/a$ 以上, 这些地区耕地、林地分布相对较密集(图 1), 且都通过了 95% 的显著性检验; 而化德县、商都县、察哈尔右翼后旗和察哈尔右翼中旗北部及四子王旗东北部 LAI 呈减少趋势, 土地利用类型以草地、裸地居多(图 1); 集宁区南部和察哈尔右翼前旗交界处 LAI 显著减少, 在 $-0.03/a$ 以下, 并通过了 95% 的显著性检验, 该区近几年城市化、工业化进程加快^[24], 致使原有植被遭到破坏。

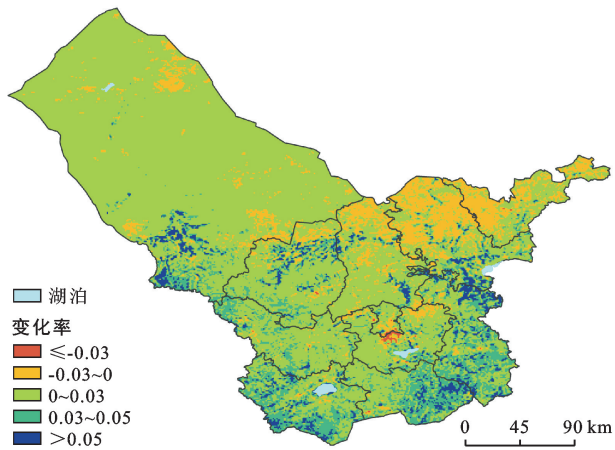


图 4 乌兰察布市 2000—2019 年 7—8 月 LAI 年均变化率分布

将研究期分成 4 个阶段,进一步分析每个阶段内乌兰察布市 LAI 空间分布趋势。可以看出,2000—2004 年 7—8 月乌兰察布市 LAI 整体呈增加趋势(图 5), $\text{slope} > 0$ 的区域约占总面积的 99.2%, $\text{slope} < 0$ 的区域只零星分布在四子王旗南部和察哈尔右翼中旗北部,说明这 5 a 全市植被整体生长状况得到改善,该时段降水量和土壤体积含水量总体呈上升趋势,均值分别为 164.73 mm, $0.218 \text{ m}^3/\text{m}^3$, 高于 20 a 的平均水平,对植被生长十分有利;另一方面,2000—2004 年乌兰察布市草地面积比例较其他土地利用类型增加最多(表 1),这说明 2000 年以来实施的退牧还草生态工程及禁牧、休牧等措施对生态改善也起到了促进作用。

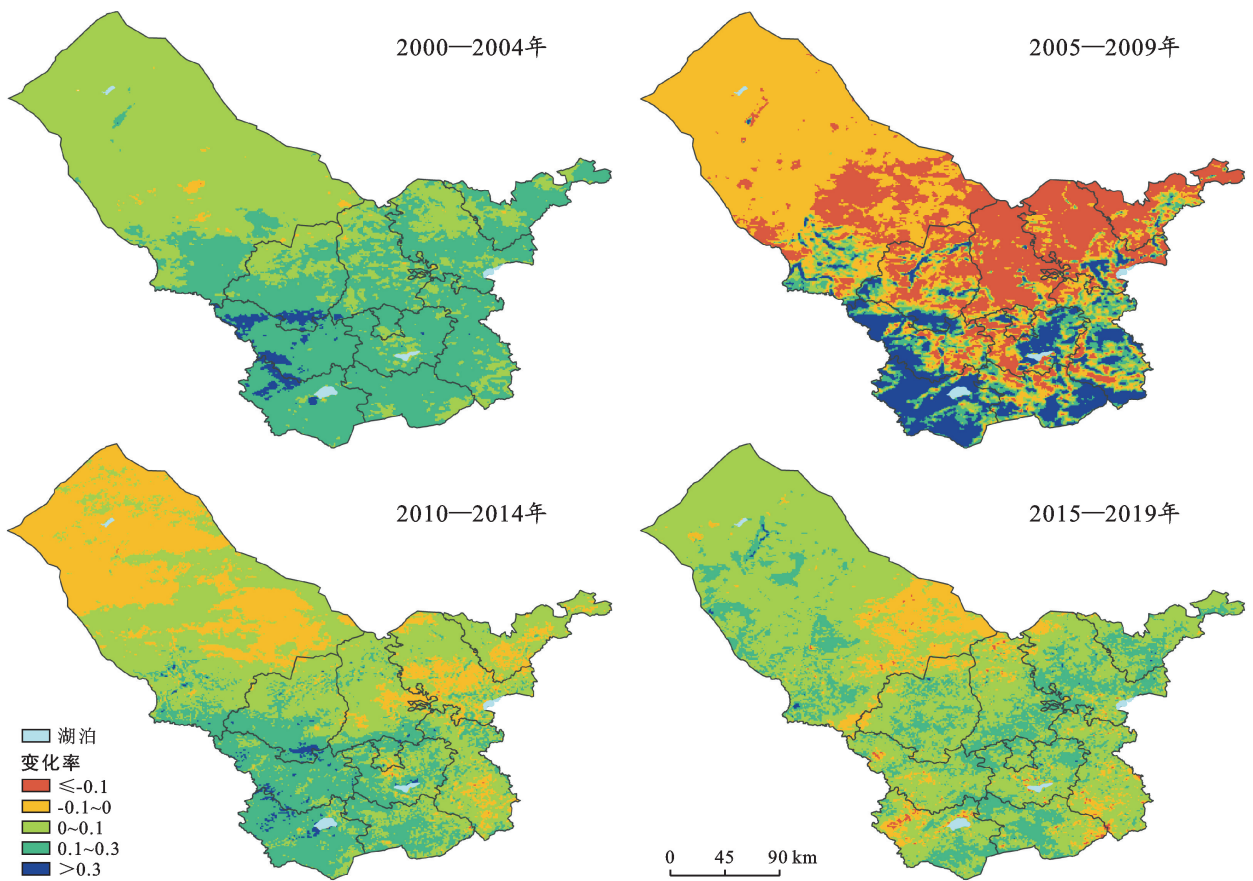


图 5 乌兰察布市不同时期 7—8 月 LAI 年均变化率分布

2005—2009 年 7—8 月乌兰察布市 LAI 年均变化率空间分布差异显著(图 5),整体呈减少趋势, $\text{slope} < 0$ 的区域约占总面积的 72.1%,集中分布在阴山以北的后山地区,面积大约是呈增加趋势的 2.6 倍,该时段降水量和土壤体积含水量的均值(126.33 mm , $0.202 \text{ m}^3/\text{m}^3$)明显低于 20 a 的平均水平,平均气温($19.81 \text{ }^\circ\text{C}$)高于其他时段,特别是 2009 年出现了严重的干旱灾害,导致受影响地区植被生长偏差^[21];除此之外,2000 年以来该市城镇用地面积占比

持续增加(表 1),其对植被造成的影响也不可忽略。与前 5 a 相比,2010—2014 年 7—8 月植被退化地区的 LAI 有所增加(图 5), $\text{slope} < 0$ 的区域面积减少了 58.8%,该时段降水量和土壤体积含水量的均值(153.18 mm , $0.209 \text{ m}^3/\text{m}^3$)较 2005—2009 年偏高,有利于植被恢复生长;但由于前期植被退化区多处于后山风蚀沙化和草原地带,加之近年来城镇化水平不断提高(表 1),所以植被高度退化后在短期内难以快速完全恢复。

2015—2019 年 7—8 月乌兰察布市植被改善区面积进一步增加(图 5), $\text{slope} > 0$ 的区域约占该市总

面积的 89.1%, 与 2005—2009 年相比, 四子王旗西北部植被改善较为明显。

表 1 乌兰察布市不同土地利用类型变化

%

| 时期 | 土地利用类型 | | | | | | |
|-----------|--------|--------|-------|-------|-------|--------|--------|
| | 耕地 | 林地 | 草地 | 灌木地 | 城镇 | 裸地 | 水体 |
| 2000—2019 | -0.185 | -0.773 | 3.107 | 0.006 | 0.504 | -2.624 | -0.036 |
| 2000—2004 | 0.006 | -0.181 | 0.123 | 0.002 | 0.049 | 0.021 | -0.019 |
| 2005—2009 | -0.030 | -0.150 | 0.295 | 0.001 | 0.049 | -0.160 | -0.005 |
| 2010—2014 | -0.026 | -0.264 | 0.090 | 0.001 | 0.076 | 0.124 | -0.001 |
| 2015—2019 | -0.126 | -0.145 | 2.580 | 0 | 0.286 | -2.595 | 0 |

通过计算 2000—2019 年 7—8 月逐个像元的变异系数, 参照王雅鑫等^[9] 已有研究并结合乌兰察布市实际情况, 将变异系数分为 7 个等级, 来评估乌兰察布市植被 LAI 变化的稳定性。由表 2 可知, $C_v \leq 0.2$ 的区域仅占研究区总面积的 0.9%, $C_v \leq 0.3$ 区域占研究区总面积的 11.9%, C_v 值主要集中在 0.3~0.6 之间, 占研究区总面积的 75.3%, 整个研究区平均 C_v 为 0.38, 这表明研究期内该地区植被 LAI 变化稳定性较差。

表 2 变异系数等级划分

| 变异系数 C_v | 像元个数 | 比例/% |
|----------------------|--------|------|
| $C_v \leq 0.2$ | 696 | 0.9 |
| $0.2 < C_v \leq 0.3$ | 7 355 | 10.0 |
| $0.3 < C_v \leq 0.4$ | 21 757 | 29.5 |
| $0.4 < C_v \leq 0.5$ | 21 535 | 29.2 |
| $0.5 < C_v \leq 0.6$ | 12 227 | 16.6 |
| $0.6 < C_v \leq 0.7$ | 5 777 | 7.8 |
| $C_v > 0.7$ | 4 420 | 6.0 |

从空间分布来看(图 6), LAI 变异系数整体上呈东南低、西北高的特征, 空间差异明显。 $C_v \leq 0.2$ 的区域仅分布在丰镇市东南部、兴和县南部、凉城县中北部及察哈尔右翼前旗中部, C_v 值在 0.2~0.4 的区域主要集中分布在前山地区以及后山的察哈尔右翼中旗、商都县、化德县这 3 个地区的南部, C_v 值在 0.4 以上的区域集中分布在后山大部分地区, 其中四子王旗西北部 C_v 值可达 0.7 以上, 说明该区域 LAI 的年度波动大, 植被变化十分不稳定。结合图 5 可知, C_v 值较小的区域对应的年均变化率在 4 个阶段基本保持稳定, C_v 值较大的区域对应的 LAI 年均变化率也不稳定。

2.2 气候因子变化特征

2000—2019 年乌兰察布市气候呈暖湿化趋势, 气温和降水的高值集中在 7—8 月。由图 7 可以看出, 7—8 月平均气温在波动中维持稳定; 其中平均最高气温出现在 2010 年, 为 20.57 °C, 平均最低气温出

现在 2004 年, 为 18.03 °C; 20 a 平均气温为 19.56 °C。7—8 月降水量呈波动上升趋势, 但变化幅度不大; 其中降水量最多的年份出现在 2018 年, 为 255.44 mm, 2009 年降水量最少, 为 92.35 mm; 20 a 平均降水量为 153.57 mm, 变化率为 1.30 mm/a。土壤湿度对气温和降水的变化较为敏感^[25], 其作为地表水的重要组成部分, 能够直接影响植被的生长和分布^[26]。2000—2019 年 7—8 月乌兰察布市土壤湿度亦在波动中维持稳定, 土壤湿度最高值出现在 2004 年, 与气温变化恰好相反, 为 0.235 m^3/m^3 ; 土壤湿度最低值出现在 2009 年, 与降水变化一致, 为 0.176 m^3/m^3 ; 20 a 平均土壤湿度为 0.211 m^3/m^3 。

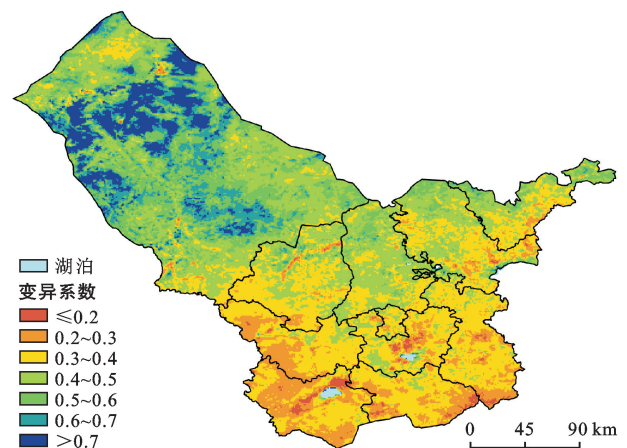


图 6 乌兰察布市 2000—2019 年 7—8 月 LAI 变异系数空间分布

2.3 LAI 对气候因子的响应

将 2000—2019 年 7—8 月的 LAI 和同期的温度、降水、土壤湿度进行相关性分析(图 8), LAI 与气温呈显著负相关, R^2 为 0.291, 通过 95% 的显著性检验; LAI 与降水、土壤湿度均呈极显著正相关, R^2 分别为 0.655 和 0.736, 通过了 99.9% 的显著性检验。这说明乌兰察布市植被生长受气温、降水、土壤湿度三重因素的共同作用, 但土壤湿度对 LAI 的影响相对更强。

可见,土壤湿度对该地区植被生长起到了决定性的作用。在干旱半干旱地区,土壤水分是限制植被生长和分布的关键因素^[4,26],持续的高温会增加水分的蒸发,导致土壤含水量降低,从而使植被生长受限制^[1]。

将 LAI 与气温、降水、土壤湿度在空间格点上进行相关性分析,对比植被受气候因子影响的区域性差异。图 9 中 LAI 与气温在绝大多数区域呈负相关,在凉城县、卓资县、察哈尔右翼中旗西部等 45.4% 的区域相关系数绝对值达到 0.5 以上,并且通过了 95% 的

显著性检验;其他区域相关系数相对较小。图 9 中 LAI 与降水在绝大多数区域呈正相关,69.8% 的区域相关系数集中在 0.5~0.8,通过了 95% 的显著性检验;在四子王旗西北部、商都县南部及兴和县西部等少数分布较为零散的区域相关系数可达 0.8 以上,并且通过了 99.9% 的显著性检验。图 9 中 LAI 与土壤湿度的相关系数分布同降水类似,不同之处在于相关系数高达 0.8 及以上(通过了 99.9% 的显著性检验)的区域占比更多,约占总面积的 28.0%。

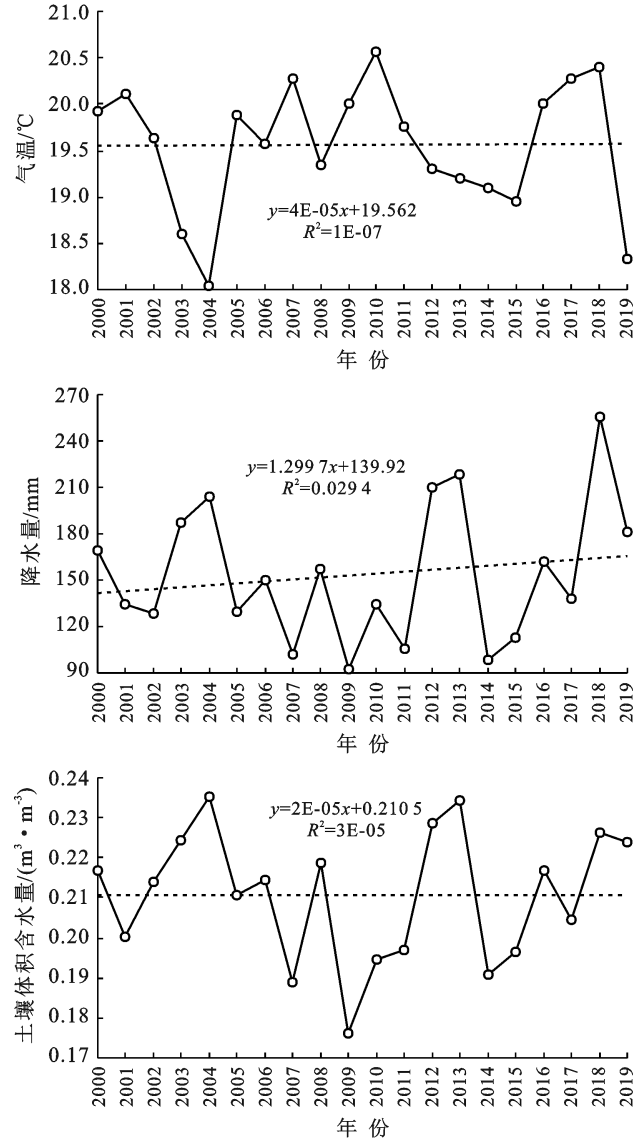


图 7 乌兰察布市 2000—2019 年 7—8 月不同气候因子变化

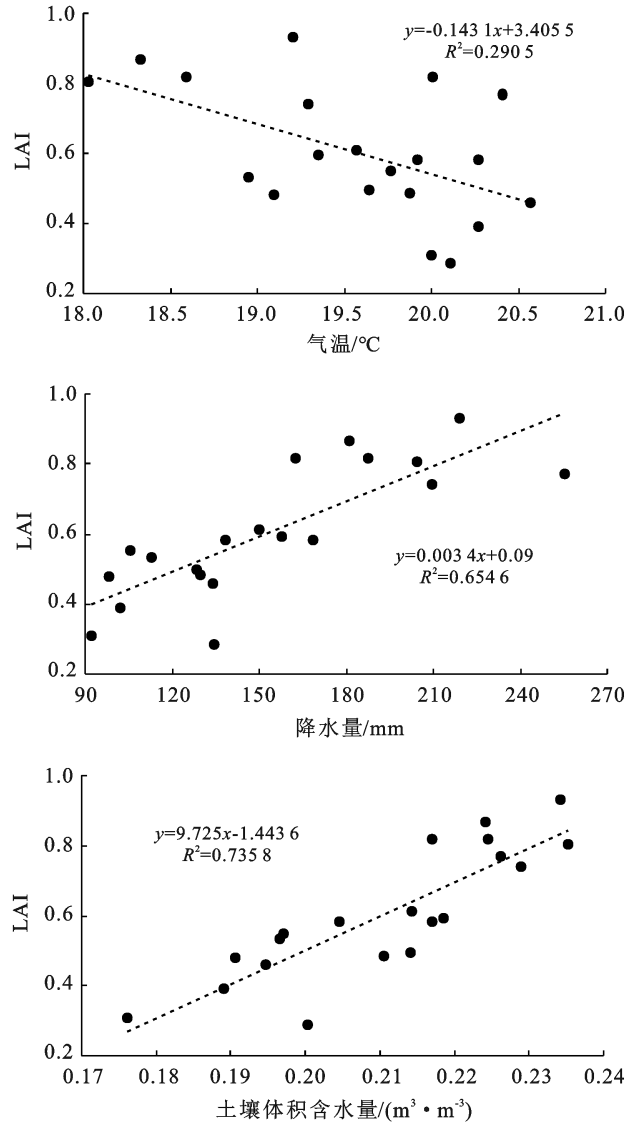


图 8 乌兰察布市 2000—2019 年 7—8 月 LAI 与各气候因子的相关性

3 讨论

(1) 2000—2019 年 7—8 月乌兰察布市 LAI 呈波动上升趋势,空间分布差异明显,东南高西北低,与李建飞等^[1]对乌兰察布市 NDVI 变化的研究结论基

本一致。阴山以北的后山大部分地区 LAI 上升速度较缓慢或出现下降,变异系数较大,未来需重点关注,应加大生态保护力度。将研究期分为 4 个阶段进一步分析,发现 2000—2019 年乌兰察布市叶面积变化趋势表现为:增加→减少→增加→增加,且增加的速度

度小于减少的速度。LAI的增减反映了植被生态的改善及退化状况^[9-10],因此上述可表明研究期内该地区植被生态改善的速度小于退化的速度。究其原因,一方面,生态退化区多分布于后山风蚀沙化和草原地带,土地蓄水能力差,对降水的依赖性强,生态敏感脆弱,植被在遭受干旱灾害高度退化后难以恢复^[1];另一方面,近年来乌兰察布市城镇化步伐持续加快,工业、制造业、建筑业等规模逐步扩大^[24],影响了区域生态的恢复和改善。

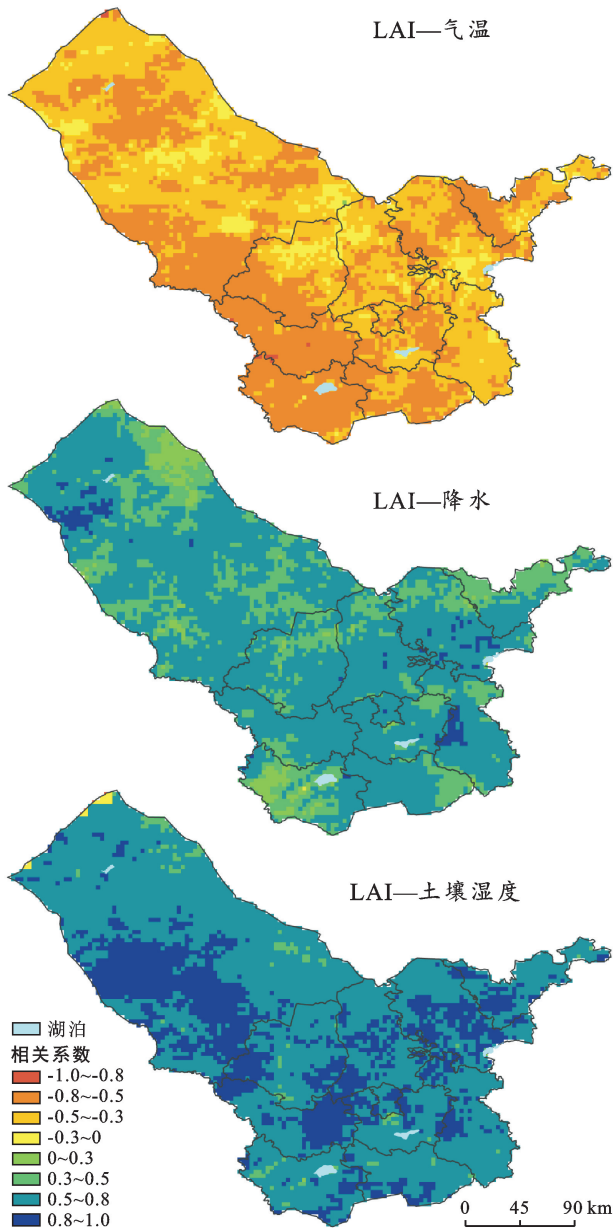


图9 乌兰察布市2000—2019年7—8月LAI与各气候因子的相关系数空间分布

(2) 以往研究^[1,22]大多认为降水是影响乌兰察布市植被生长的主要气候因子。本研究还分析了土壤湿度对LAI变化的影响,结果显示土壤湿度对LAI

的影响强于降水。这可能是因为土壤水分是植被生长所需水分的主要来源^[26-27],而降水需转化为土壤水分才能被植物根系直接吸收利用^[27]。此外,土壤水分是养分循环和能量流动的重要载体,在土壤—植被—大气系统物质循环和能量转化起着纽带作用^[28]。

(3) 不同地区不同植被类型其LAI对气候因子的反映存在差异^[4,10]。本研究中LAI与气温、降水、土壤湿度的相关系数空间分布差异不显著,结合土地利用类型和相关系数空间分布来看,也没有发现不同植被类型的LAI与气候因子的相关性存在明显差异。这是因为植被变化对气候因子的响应是一个复杂的过程,研究结果因研究区域、时空尺度、数据来源、分析方法等因素的不同而呈现一定的差异性^[29-31]。本研究选取简单相关系数来分析LAI与气候因子的相关性,简单相关分析方法得到的结果并没有忽略其他干扰因素的影响^[30],未来可采用偏相关分析等方法在不包含其他因素影响的前提下做进一步研究。另外,植被对气候因子的响应具有滞后性,不同植被类型的滞后期也有所差别,这些都将对二者之间相关性的空间分布规律造成一定影响^[31]。本研究未将植被对气候因子响应的时滞性考虑在内,这也是今后需要进一步深入探讨的内容。

4 结论

(1) 2000—2019年7—8月乌兰察布市的平均LAI为0.61,整体呈波动上升趋势,速度为0.01/a。具体来看,2000—2004年、2005—2009年、2010—2014年、2015—2019年乌兰察布市LAI变化趋势为:增加→减少→增加→增加,增加的速度比减少的速度缓慢。

(2) 乌兰察布市LAI空间分布差异明显,呈东南高西北低的特征。LAI增加的区域占研究区面积的88.3%,兴和县大部、丰镇市东部、凉城县西部、四子王旗西南部及察哈尔右翼中旗中北部等地显著增加,而阴山以北的后山大部分地区LAI上升速度较缓慢或出现下降。

(3) 研究期内乌兰察布市的LAI平均变异系数为0.38,植被变化处于相对不稳定的状态。LAI变异系数空间分布差异显著,具有东南低西北高的特征,其中后山大部分地区的LAI变异系数普遍较大,生态相对更为脆弱。

(4) 2000—2019年7—8月乌兰察布市气温和土壤湿度在波动中基本维持稳定,降水呈波动上升趋势。LAI与气温呈显著的负相关,与降水和土壤湿度呈极显著的正相关,且与土壤湿度的相关性高于降水

和气温,这表明土壤湿度是影响该地区植被生长的决定性因素。LAI 与气温、降水、土壤湿度的相关系数空间分布差异不显著,大部分区域植被 LAI 与气温呈负相关,45.4%的区域相关性显著;与降水和土壤湿度呈显著正相关,呈极显著正相关的区域土壤湿度大于降水。

[参 考 文 献]

- [1] 李建飞,李小兵,周义.2000—2015年乌兰察布市生长季 NDVI 时空变化及其影响因素[J].干旱区研究,2019,36(5):1238-1249.
- [2] 孙康慧,曾晓东,李芳.中国生态脆弱区叶面积指数变化的主导气象因子研究[J].自然资源学报,2021,36(7):1873-1892.
- [3] 石晓丽,史文娇.北方农牧交错带界线的变迁及其驱动力研究进展[J].农业工程学报,2018,34(20):1-11.
- [4] 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.
- [5] 张佳华,符淙斌.利用遥感反演的叶面积指数研究中国东部生态系统对东亚季风的响应[J].自然科学进展,2002,12(10):92-94,116-117.
- [6] 邵全琴,赵志平,刘纪远,等.近30年来三江源地区土地覆被与宏观生态变化特征[J].地理研究,2010,29(8):1439-1451.
- [7] Xiao Zhiqiang, Liang Shunlin, Wang Jindi, et al. Long-time-series global land surface satellite leaf area index product derived from MODIS and AVHRR surface reflectance [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2016,54(9):1-18.
- [8] Fang H, Baret F, Plummer S, et al. An overview of global leaf area index (LAI): Methods, products, validation, and applications [J]. Reviews of Geophysics, 2019,57(3):739-799.
- [9] 王雅鑫,巴雅尔,孙亚丽,等.基于叶面积指数的荒漠草原动态监测[J].内蒙古师范大学学报(自然科学汉文版),2019,48(4):314-322.
- [10] 韩思淇,麻泽龙,庄文化,等.2000—2018年黄河源植被叶面积指数时空变化特征[J].灌溉排水学报,2019,38(12):57-62.
- [11] 靳华安,刘殿伟,王宗明,等.三江平原湿地植被叶面积指数遥感估算模型[J].生态学杂志,2008,27(5):803-808.
- [12] Dusseux P, Gong X, Hubert M L, et al. Identification of grassland management practices from leaf area index time series [J]. Journal of Applied Remote Sensing, 2014,8(1):083559.
- [13] 董金芳,袁媛,何慧娟,等.基于 MODIS 的陕西省叶面积指数时空变化特征分析[J].西北林学院学报,2016,31(3):79-85.
- [14] 王利,徐翠玲,蒋镒竹.黑河流域植被叶面积指数时空变化特征[J].水力发电,2021,47(10):6-11,36.
- [15] 张宇佳,袁金国,张莎.2002—2011年河北省植被 LAI 时空变化特征[J].南京林业大学学报(自然科学版),2015,39(1):86-92.
- [16] He Jie, Yang Kun, Tang Wenjun, et al. The first high-resolution meteorological forcing dataset for land process studies over China [J]. Science Data, 2020,7(25):1-11.
- [17] 宋海清,李云鹏,师春香,等.内蒙古地区下垫面变化对土壤湿度数值模拟的影响[J].大气科学,2016,40(6):1165-1181.
- [18] 徐浩杰,杨太保,柴达木盆地植被生长时空变化特征及其对气候要素的响应[J].自然资源学报,2014,29(3):398-409.
- [19] Running S W, Hunt Jr E R. Generalization of a forest ecosystem process model for other biomes, BIOME-BCG, and an application for global-scale models [J]. Scaling Physiological Processes, 1993,37(12):141-158.
- [20] 刘晓婉,彭定志,徐宗学.雅鲁藏布江流域 NDVI 对高程与降水的相依性研究[J].高原气象,2018,37(2):349-357.
- [21] 董静.乌兰察布市主要气象灾害及防御[M].北京:气象出版社,2018.
- [22] 郭晓丽.乌兰察布市近十年植被指数时空特征分析[J].北方农业学报,2017,45(3):86-89.
- [23] 曹二佳,薛羽,李红瑛,等.基于相对湿润指数的蒙中农牧交错带作物生长季干旱时空分析:以乌兰察布市为例[J].中国农村水利水电,2019(11):165-171.
- [24] 乌兰察布市统计局.乌兰察布市统计年鉴 2012—2020年[M].(2020-02-03)[2021-03-12]. <http://tjj.wu-lanchabu.gov.cn>.
- [25] 王锡稳,王毅荣,张存杰.黄土高原典型半干旱区水热变化及其土壤水分响应[J].中国沙漠,2007,27(1):123-129.
- [26] 宁和平,刘丽,栾振斌,等.甘南合作地区牧草生长季土壤水分气候变化特征[J].中国农学通报,2021,37(14):116-122.
- [27] 张翀,雷田旺,宋佃星.黄土高原植被覆盖与土壤湿度的时滞关联及时空特征分析[J].生态学报,2018,38(6):2128-2138.
- [28] 邹慧,高光耀,傅伯杰.干旱半干旱草地生态系统与土壤水分关系研究进展[J].生态学报,2016,36(11):3127-3136.
- [29] 张景华,封志明,姜鲁光,等.澜沧江流域植被 NDVI 与气候因子的相关性分析[J].自然资源学报,2015,30(9):1425-1435.
- [30] 王茜,陈莹,阮玺睿,等.1982—2012年中国 NDVI 变化及其与气候因子的关系[J].草地学报,2017,25(4):691-700.
- [31] 卢乔倩,江涛,柳丹丽,等.中国不同植被覆盖类型 NDVI 对气温和降水的响应特征[J].生态环境学报,2020,29(1):23-34.