

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2024.05.009.

王银龙, 高瑞忠, 房丽晶, 等. 内蒙古草原内陆河流域水文循环要素时空演变及驱动因素[J]. 水土保持研究, 2024, 31(5): 279-287.

Wang Yinlong, Gao Ruizhong, Fang Lijing, et al. Spatial-Temporal Evolution and Driving Factors of Hydrological Cycle Factors in Inland River Basin of Inner Mongolia Grassland[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2024, 31(5): 279-287.

内蒙古草原内陆河流域水文循环要素 时空演变及驱动因素

王银龙¹, 高瑞忠¹, 房丽晶¹, 张旭¹, 李宝群²

(1. 内蒙古农业大学 水利与土木建筑工程学院, 呼和浩特 010018;

2. 锡林郭勒水文水资源分中心, 内蒙古自治区 锡林浩特 026099)

摘要: [目的] 开展内蒙古草原内陆河流域水文循环要素对植被动态和气候变化的响应研究, 对于内蒙古草原内陆河流域的生态保护及区域水资源开发利用具有重要的理论意义。[方法] 以内蒙古草原内陆河流域为研究区, 基于多源遥感、气候气象、水文等数据, 采用趋势检验、显著性检验和相关性分析等方法, 对流域水文循环要素的时空演变及驱动因素进行相关分析。[结果] (1) 流域蒸散发呈显著上升趋势(0.994 mm/a), 降水量呈显著下降趋势(2.69 mm/a), 土壤水分呈增加趋势, 其中子流域锡林河径流呈下降趋势, 巴拉格尔河径流呈上升趋势; (2) 生长季植被总体呈增加趋势, 植被归一化指数(NDVI)、总初级生产力(GPP)和叶面积指数(LAI)整体呈东高西低的阶梯状空间分布格局, 气温整体呈现上升趋势; (3) 植被变化与蒸散发(ET)、土壤水分(SSM)呈正相关, 气温和蒸散发整体上呈现显著正相关($R=0.699$, $p=0.01$), 空间相关性由西向东递增; 气温和径流呈负相关, 和土壤水分在流域东、西部呈显著负相关性。[结论] 流域水文循环变量(降水、蒸散发、土壤水分、径流量)随着植被增加而增加; 降水、土壤水分和径流量随气温上升而减少, 蒸散发随气温上升而增加。

关键词: 草原内陆河流域; 气候变化; 植被动态; 水文响应; 趋势分析

中图分类号: P339

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2024)05-0279-09

Spatial-Temporal Evolution and Driving Factors of Hydrological Cycle Factors in Inland River Basin of Inner Mongolia Grassland

Wang Yinlong¹, Gao Ruizhong¹, Fang Lijing¹, Zhang Xu¹, Li Baoqun²

(1. College of water conservancy and civil engineering, Inner Mongolia agricultural university, Hohhot, Inner Mongolia 010018, China; 2. Xilin Gol hydrology and water resources branch center, Xilinhot, Inner Mongolia 026099, China)

Abstract: [Objective] The aim of this study is to examine the response of hydrological cycle factors to vegetation dynamics and climate change in the inland river basin of Inner Mongolia grassland, which is of important theoretical significance for the ecological protection and regional water resources development and utilization in the inland river basin of Inner Mongolia grassland. [Methods] The inland river basin of Inner Mongolia grassland was taken as the research area. Based on multi-source remote sensing, climate, meteorology, hydrology and other data, the temporal and spatial evolution and driving factors of hydrological cycle elements in the basin were analyzed by trend test, significance test and correlation analysis. [Results] (1) The evapotranspiration of the basin showed a significant upward trend (0.994 mm/a), the precipitation showed a significant downward trend (1.965 mm/a), and the soil moisture showed an increasing trend. (2) The

收稿日期: 2023-11-01

修回日期: 2023-11-25

资助项目: 国家自然科学基金“草原煤田开采驱动下流域水文-生态-地质演化机制及协同效应研究”(52169004); “寒旱区高原内陆河草原流域生态水文-化学协同演化过程试验与模拟研究”(51969022)

第一作者: 王银龙(1998—), 男, 内蒙古通辽人, 硕士研究生, 主要研究方向为生态水文。E-mail: 2914500061@qq.com

通信作者: 高瑞忠(1977—), 男, 内蒙古呼和浩特人, 博士, 教授, 研究方向为寒旱区生态水文过程。E-mail: ruizhonggao@qq.com

<http://stbcyj.paperonce.org>

vegetation in the growing season generally showed an increasing trend. The normalized difference vegetation index (NDVI), gross primary productivity (GPP) and leaf area index (LAI) showed a ladder-like spatial distribution pattern of high level in the east and low level in the west, and the temperature showed an overall upward trend. (3) Vegetation change was positively correlated with evapotranspiration (ET) and soil moisture (SSM). There was a significant positive correlation between temperature and evapotranspiration ($R=0.699$, $p=0.01$), and the spatial correlation increased from west to east. There was a negative correlation between temperature and runoff, and a significant negative correlation with soil moisture in the east and west of the basin. [Conclusion] The hydrological cycle variables (precipitation, evapotranspiration, soil moisture, runoff) increased with the increase of vegetation. Precipitation, soil moisture and runoff decreased with the increase of temperature, and evapotranspiration increased with the increase of temperature.

Keywords: grassland inland river basin; climate change; vegetation dynamics; hydrological response; trend analysis

水文循环是在太阳辐射及重力驱动下,存在于地球浅部层圈中以不同形态和不同方式交替转换的水体。区域尺度水文循环的强度及其时空变化特征,对于一个地区生态环境平衡或失调具有重要作用,循环强度的大小,可能会引发洪涝灾害或干旱灾害^[1]。研究表明,气温上升,使全球尺度降水、蒸散发、径流等水文循环要素的分布、强度和极值都发生了变化,对全球水文循环产生了积极作用^[2]。有学者采用观测和多套再分析数据,系统分析了中国及各大流域大气水汽含量、降水、蒸散发和地表径流等水循环要素年际变化,指出中国年平均气温上升约 $0.63\text{ }^{\circ}\text{C}$,年降水量和大气水汽含量分别增加 0.5% 和 1.2% ^[3]。21 世纪以来,中国陆地由蒸散发再凝结形成的降水量增加,大气内循环活跃程度加大^[4]。但由于区域差异较大,并且监测数据覆盖的时空范围方面的限制,水文循环各要素的趋势仍然存在较大的不确定性^[5]。因此,科学揭示区域水文循环过程,深入认识水文科学规律,对保障未来的水资源安全具有重要的科学价值和实际意义。

植被动态和气候变化在流域水文循环过程中起着至关重要的作用。现有研究表明植被变化可以改变区域水文平衡,影响不同时空尺度的水文循环^[6]。如,在全球尺度,植被恢复使得全球蒸散发呈现显著的增加趋势,使陆地水循环加快^[7];在尼洋河上游流域、黄土高原等不同区域尺度上植被的增加对蒸散发产生促进作用^[8]。毕早莹等^[9]定量分析了窟野河流域径流对植被变化的响应,研究表明植被变化对径流的贡献率达到 84.9% 。Feng 等^[10]分析了我国京津冀地区典型流域径流变化特征,并探究了径流对植被变化的响应。除此也有研究表明,气候因素导致大气含水量和水蒸气平衡发生变化,影响水文循环要素的时空分布,从而导致水文循环的改变^[11]。如,全球变

暖使水汽含量增加从而诱发降水的发生,导致小雨减少,大雨增加^[12];陈婷等在汉江上游流域,气温和径流量的响应研究表明,气温对于水文过程的影响更加明显^[13];刘昌明等、杨大文等探究了水循环要素的演变特征,并得出黄河流域的气候变化是黄河干流水量减少的主导因素^[14]。尽管已有大量相关研究成果,但气候变化对不同区域水文循环的影响仍有待阐明。近些年有大量研究开展了中国陆地水循环组成要素的时空演变特征分析,多数集中于分析气候变化或人类活动对单一水循环要素的影响。较少关注气候和植被变化对水文循环的影响以及影响的区域差异。

综上所述,多数研究集中于流域生态植被、陆地水文等方面的研究,并且忽略土壤水文的重要意义,再者对于高纬度寒旱区草原内陆河流域的水文循环研究甚少。因此,本研究选择内蒙古高原草原内陆河流域为研究区,选取水文循环的多个变量进行全面、详细的分析研究,描述草原内陆河流域多年的生态和水文循环要素状况,分析蒸散发(Evapotranspiration, ET)、降水(Precipitation, Pre)径流(runoff, R)、土壤水分(surface soil moisture, SSM)等水文循环要素对驱动因素的响应关系,旨在为理解高原内陆河草原流域生态水文演化过程及区域水资源开发利用提供理论依据。

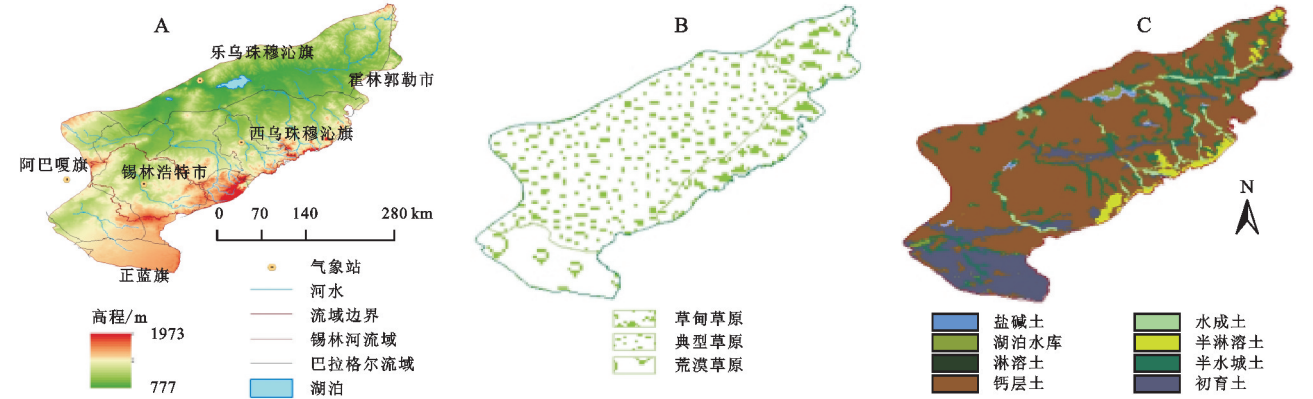
1 材料和方法

1.1 研究区概况

草原内陆河流域主要分布于内蒙古自治区锡林郭勒盟的东乌珠穆沁、西乌珠穆沁、锡林浩特市、阿巴嘎旗及赤峰市的克什克腾旗等地(114.6° — 120.1°E , 42.5° — 46.6°N),总面积约为 21.56 万 km^2 。流域属于大陆型半干旱气候,年均降水量为 264.1 mm ,多年平均蒸发量介于 $500\sim 800\text{ mm}$,多年平均气温为 $2.1\text{ }^{\circ}\text{C}$,

海拔高度为 777~1 973 m。该流域是欧亚大陆草原区亚洲东部草原亚区保存比较完整的原生草原部分,包含草甸草原、典型草原、荒漠化草原 3 种类型。土壤

类型有淋溶土、半淋溶土、钙层土、初育成土、半水土、水成土、盐碱土,其中钙层土均匀分布整个流域,所占比例为 69.17%(图 1)。



注:基于标准地图服务系统下载的标准地图制作,底图未做修改,下同。

图 1 研究区高程(A)、草原类型(B)及土壤类型分布(C)

Fig. 1 DEM of the study area (A), Grassland type distribution (B) Soil type distribution map (C)

1.2 数据来源

根据研究区的自然条件,选取了归一化植被指数(NDVI)、叶面积指数(LAI)和总初级生产力(GPP)。基于 SPOT/VEGETATION 以及 MODIS 等卫星遥感影像得到的 NDVI 时序数据来源于中国科学院资源环境科学数据中心(<http://www.resdc.cn/>)。该数据集的空间分辨率为 1 km,时间跨度为 2000—2020 年、使用最大值合成法合成影像,得到研究区各年的 NDVI 最大值栅格数据集。GPP 和 LAI 被广泛用于观测植被生长和空间分布^[15]。GPP 和 LAI 数据集来源于美国国家航空航天局 NOAA 气象卫星上的高分辨率辐射计(AVHRR)传感器获得,时间间隔为 2000—2021 年。该 GPP 和 LAI 数据集的时间分辨率为 8 d,空间分辨率为 500 m。

水文循环要素包括降水量、蒸散发、径流、土壤含水率,通过分析这些要素的变化和趋势,可以描绘出该地区的水文状况。降水数据集来源于国家科技资源共享服务平台—国家地球系统科学数据中心(<http://www.geodata.cn>),该数据时间分辨率为月,空间分辨率是 1 km。蒸散发数据是 8 d 合成 MOD16A2 科学数据,来源于美国地质调查局土地过程分布式活动档案中心(<https://lpdaac.usgs.gov/>),全球 MOD16 数据产品覆盖全球 10 903 万 km² 的植被面积,为 Aqua 和 Terra 平台上的 MODIS 传感器设计,从 2000 年开始一直持续到现在。该数据有 500 m 的空间分辨率。径流数据来源于内蒙古水文总局,为白音乌拉站(巴拉格尔河流域)和锡林浩特站(锡林河流域)的日径流序列实测数据,资料序列完整,经检验,数据可靠。土壤水分

数据集来源于国家青藏高原科学数据中心(<https://data.tpdc.ac.cn>),该数据集是以中国气象局提供的 1 648 个站点观测 10 层土壤湿度作为基准,使用 ERA5_Land 时间序列数据、叶面积指数、(LAI)土地覆盖类型(Landtypes)、地形(DEM)和土壤特性(Soil properties)作为协变量,通过机器学习方式获得,空间分辨率为 1 km。

平均气温数据集来源于国家科技资源共享服务平台—国家地球系统科学数据中心,时间分辨率为月、空间分辨率为 1 km。

1.3 研究方法

基于 Theil-Sen 趋势分析方法研究逐像元变化趋势,并通过 Mann-Kendall 检验对变化趋势进行显著性检验。Theil-Sen 的斜率估计值是一个稳健的线性回归,它将斜率计算为每次时间变化的测量值的变化^[16]。它具有较高的计算效率,对异常值不敏感^[17]。Mann-Kendall 检验法是一种无参数的时间序列趋势检验方法^[18]。与其他趋势检验方法相比,样本可能不遵循特定的分布,并且受异常值的干扰较少。最后,根据 Sen 斜率值 S 及显著性统计量 p 值对各要素变化趋势进行分级(表 1)。

表 1 趋势变化分级

Table 1 Trend change classification

sen 斜率值	显著性统计量	变化趋势分级
S>0	S>0	p<0.01
	S>0	0.01≤p<0.05
S=0	—	p>0.05
S<0	S<0	0.01≤p<0.05
	S<0	p<0.01

采用皮尔逊相关系数法,探讨研究区气温和植被

变量与水文循环要素的相关性,并对结果进行显著性检验。参照相关研究成果^[19]。根据相关系数 r 和显著性统计量 p 值将相关关系划分为显著相关 ($0.35 \leq |r| < 0.5$ 且 $p < 0.05$)、 $|r| > 0.5$ 且 $0.01 \leq p < 0.05$) 和极显著相关 ($|r| > 0.5$ 且 $p < 0.01$) 2 个级别。

2 结果与分析

2.1 水文循环要素时空演变

从时间变化上看草原内河流域水文循环要素的年际变化(图 2)。由图 2 可知,2000—2019 年子流域锡林河流域径流(XLR)呈现出下降趋势,最低径流深 0.6 mm 出现在 2009 年,最高径流深 8.1 mm 出现在 2013 年;2000—2019 年子流域巴拉格尔流域径流(BLGR)呈现出上升趋势,最高径流深 19.6 mm 也

出现在 2013 年,其中 2013 年以外,近 20 年间两个子流域年际变化波动不明显。两个子流域上的径流有不一样的趋势变化,其原因与人类活动有关。

蒸散发年际变幅较大,介于 524~801 mm,整体呈现出上升趋势(0.994 mm/a)。多年平均值为 701.24 mm,其中 2007 年和 2012 年波动较明显。降水量年际变化波动较大,介于 213.48~477.50 mm,多年平均值为 300.36 mm,最低值发生于 2017 年,受 1998 年洪水影响,降水量在 1998 年达到峰值。降水量整体呈现出下降趋势(2.69 mm/a)。土壤水分呈不明显的增加趋势,多年平均值为 0.186 m³/m³。土壤水分在 2012—2013 年、2017—2018 年波动较明显,这与蒸散发和降水的变化相对应着,波动幅度大与流域土壤质地的异常有关。

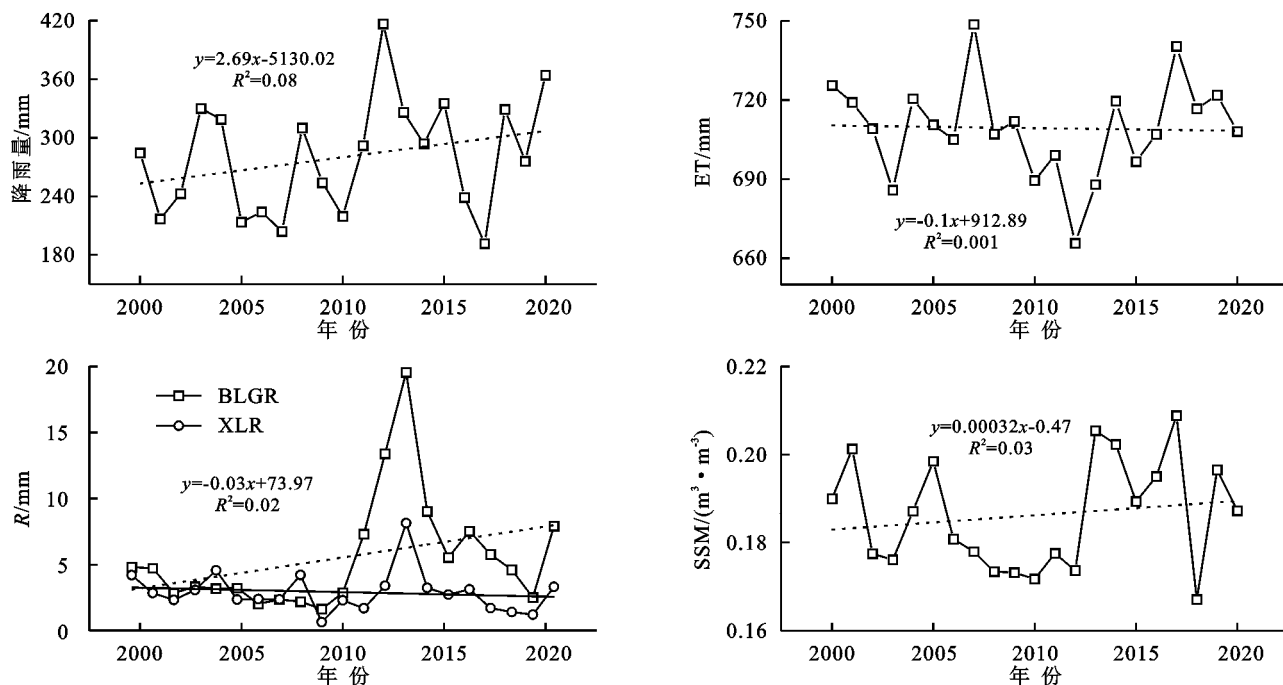


图 2 2000—2020 年水文循环变量年际变化

Fig. 2 Interannual changes of hydrological cycle variables from 2000 to 2020

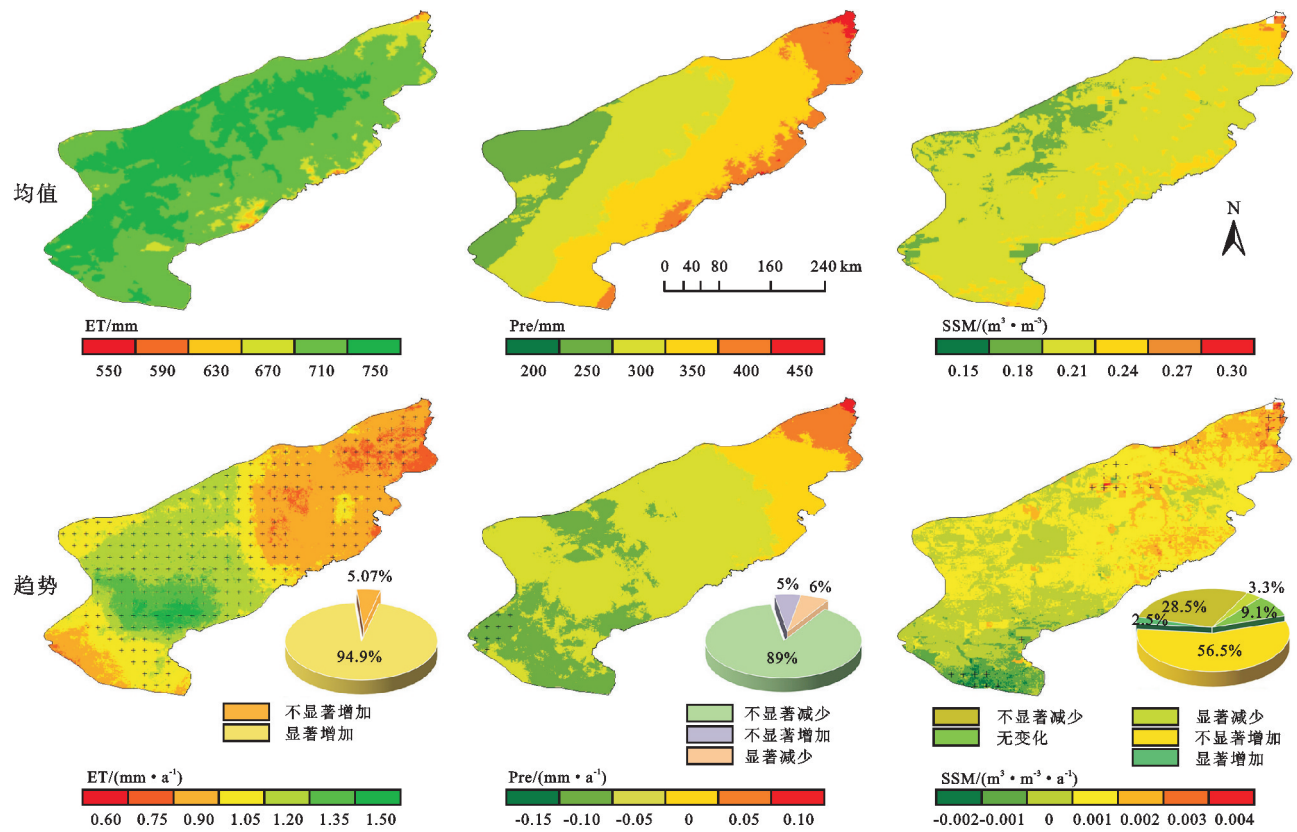
从空间变化上看草原内河流域水文循环要素的年际变化(图 3)。ET 相对呈现出西北高东南低的空间特征,Pre 和 SSM 呈现出东高西低的条带状空间分布格局,Pre 分布尤其明显。ET 和 SSM 的空间分布相反,大致上 ET 大区域的 SSM 比较低,这说明 SSM 受 ET 的影响比较大。ET 是由东向西递增,在像元尺度上整个流域的 94.93% 是显著增加的。SSM 和 Pre 的空间趋势较相似,在荒漠化草原区域都呈不显著减少趋势,在像元尺度上 Pre 呈不显著减少占整个流域的 89%,SSM 呈不显著增加占整个流域的 56.5%。

2.2 水文循环要素的驱动因素

流域水文循环过程十分复杂,在太阳辐射、重力

作用、下垫面因素及人类活动驱动下,各要素相互作用、相互影响及相互转化。随着太阳辐射增加,气温升高,从而对水文循环要素产生影响,使水文循环发生变化。植被动态对流域下垫面条件,通过影响降雨截留和入渗、蒸散发、地表径流、地下水补给等过程,直接影响水文循环过程与演变。

2.2.1 气温的时空演变 由图 4—5 可知,平均气温年际变化波动较大,介于 6.3~31.7 °C、多年平均值为 19.6 °C。平均气温呈现出上升趋势(0.3 °C/a)。平均气温最小值出现在 2012 年,该年蒸散发量也是最小的,这意味着气温和蒸散发是密切相关的。在空间上,气温呈现出由东向西递增的分布特征,在流域西部呈显著增加趋势。



注:符号“+”表示显著性水平低于 0.05。

图 3 2000—2020 年水文循环变量多年均值空间分布和趋势

Fig. 3 Spatial distribution and trend of multi-year mean values of hydrologic cycle variables from 2000 to 2020

2.2.2 植被动态 LAI(0.014/a)和 GPP(2.381/a)总体的增加趋势较为明显,NDVI 呈不明显的增加趋势(0.003/a),但都存在一定的波动。LAI, NDVI, GPP 值变化范围依次为 0.75~1.65,0.44~0.65,152.27~246.60,多年均值依次为 1.19,0.56,197.48。

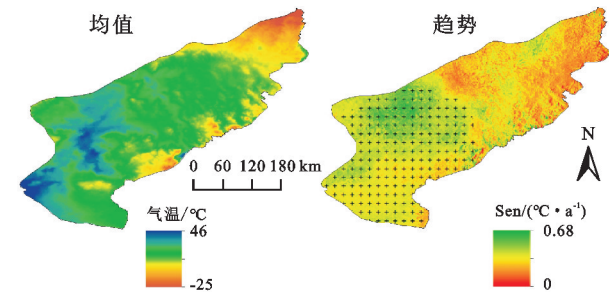
中东部的 NDVI 和 GPP 值比较高。LAI 值为 2.5 的分布于该流域中西部。流域西部 NDVI 和 GPP 值相对较低是由于分布在荒漠化草原,该区域内草地相对退化严重。整个研究区的 NDVI,LAI,GPP 都呈不显著增加。相比之下,LAI 的增加趋势更为明显和广泛,在像元尺度上占整个区域的 64.8%,NDVI 和 GPP 的增加在像元尺度上占整个区域的 47.8%和 32%。

2.3 水文循环要素对植被和气温的响应

为进一步分析草原内陆河流域 NDVI,LAI,GPP,T 与水文循环要素间的关系,绘制 NDVI,LAI,GPP,T 与水文循环要素的相关性图(图 7)。

ET 和 NDVI,LAI,GPP 呈显著正相关,主要分布在草甸草原和荒漠化草原生态保护区。ET 与植被变量在典型草原呈负相关,但不显著。实地考察发现西乌珠穆沁旗和东乌珠穆沁旗有大面积的露天煤矿,这种大面积的裸露地直接增加蒸散发,该区域呈显著正相关可能与之有关。由此可知,整体上研究区植被的良好可以促进 ET 的增加。

Pre 与 NDVI,LAI 和 GPP 呈正相关,这与赵汝冰等^[20]研究结果相一致。由图可知,Pre 与 NDVI 和 LAI 的相关性很强,与 GPP 的相关性相比较弱。Pre 与 GPP 在部分地区零星地呈负相关,实地考察



注:符号“+”表示显著性水平低于 0.05。

图 4 2000—2020 年气温多年均值空间分布和趋势

Fig. 4 Spatial distribution and trend chart of multi-annual mean temperature from 2000 to 2020

草原内陆河流域生长季植被年际空间分布(图 6)。NDVI,GPP 和 LAI 整体状况呈东高西低的阶梯状空间分布格局,GPP 尤为明显。NDVI 和 GPP 空间分布存在明显差异,经考察发现,由于草甸草原主要分布在流域中东部等地区,区域内有较高的灌木等植被类型,相对于整个流域该区域农田占地较多,因此流域

发现呈负相关的地方有草原沙化地、农田和矿区,这

说明不同区域植被所处的生态环境差异较大。

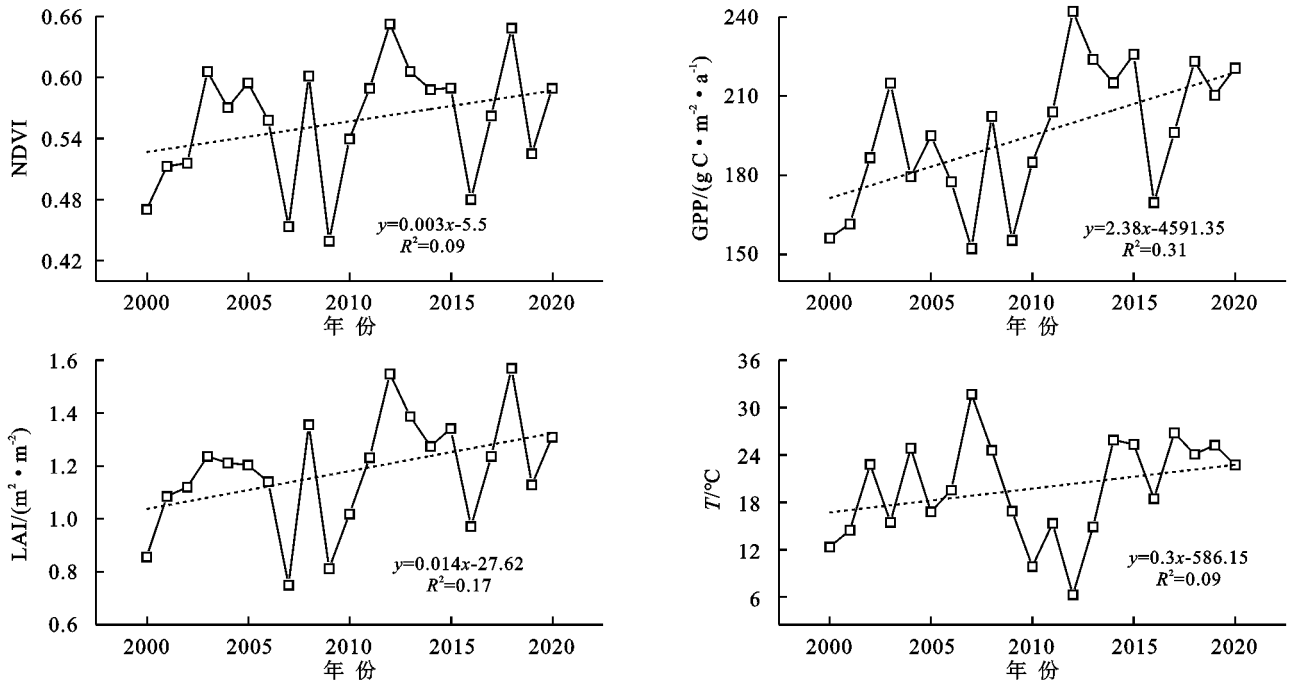
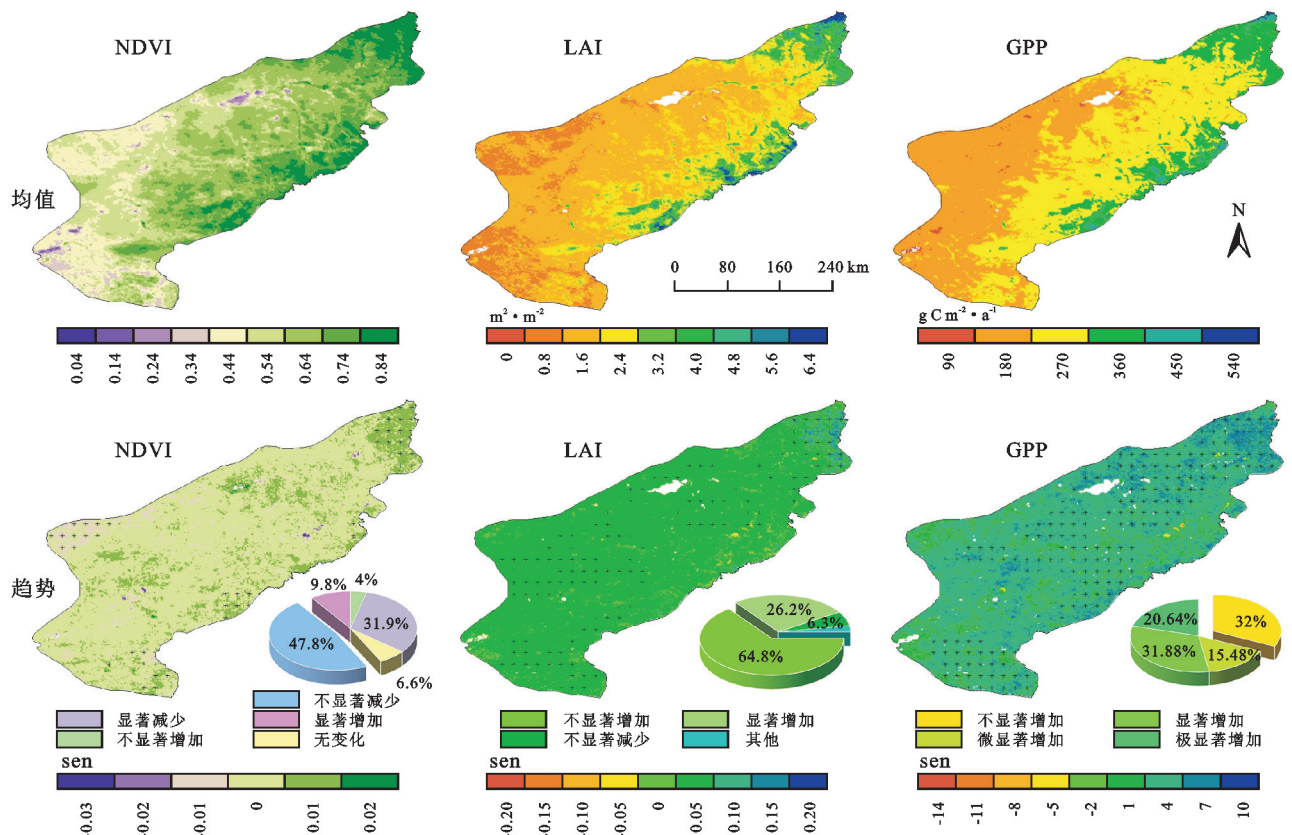


图5 2000—2020年水文循环影响因子年际变化

Fig. 5 Map of interannual variation of hydrological cycle factors during 2000—2020



注:符号“+”表示显著性水平低于0.05。

图6 2000—2020年植被变量空间分布和趋势

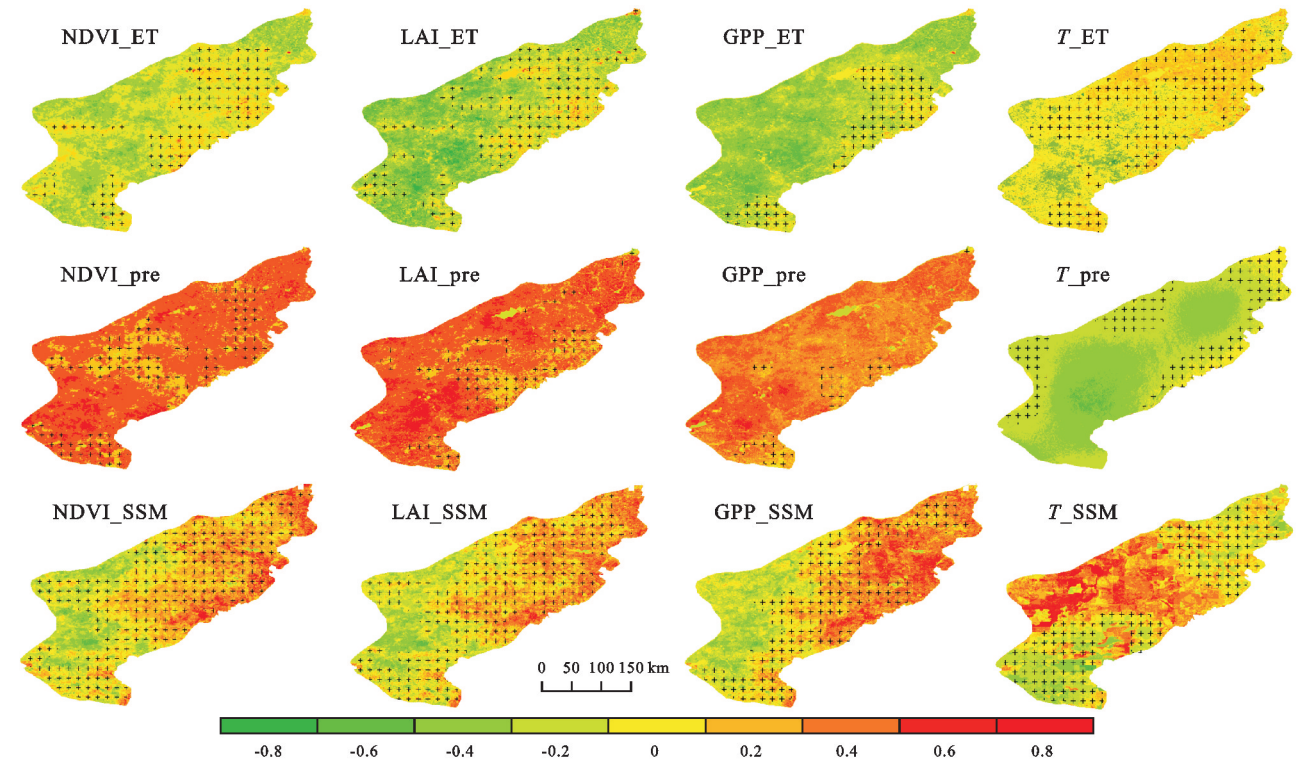
Fig. 6 Spatial distribution and trend of vegetation variables from 2000 to 2020

SSM与NDVI, LAI和GPP呈正相关的区域主要集中在典型草原和草甸草原区域,负相关区域主要分布在荒漠化草原区域。SSM与植被变量的空间相

关性相似。表明在典型草原和草甸草原随着植被的增加SSM也增加,这是由于植被的垂直结构可以拦截更多的降水,减少陆地地表水的直接蒸散^[21]。

气温和 ET 整体呈现显著正相关,由西向东相关性递增。在流域西部荒漠化区域气温和 ET 呈负相关关系,这可能是荒漠化草原植被稀,地面相对裸露多,导致土壤含水率少、蒸发量减少。气温和降水呈

负相关关系。研究区西部和东部气温与 SSM 呈显著负相关性,研究区中部地区呈正相关。相关系数在空间上明显呈现空间差异特征,这能说明 SSM 是受多方面综合影响的。



注:符号“+”表示显著性水平低于 0.05。

图 7 2000—2020 年气温和植被变量与水文循环变量相关性的空间分布
Fig. 7 Spatial distribution of correlations between air temperature and vegetation variables and hydrological cycle variables during 2000—2020

由图 8 可知,植被变量与径流深存在正相关特征,但总体相关程度不是很高。其中在巴拉格尔流域相关性最高的为 GPP($r=0.525$),说明随着植被的增加,流域径流随之增加。径流和气温呈现负相关,说明随着气温的增加,径流随之减少,相比较巴拉格尔流域的径流受气温影响更明显。假设根据径流与植被变量的相关性来推断径流的发展,在这种情况下,总径流量应该是增加的趋势,而实际研究结果显示,径流在锡林河流域减少、在巴拉格尔流域增加。这意味着尽管研究区植被变量与径流存在正相关关系,但它们的关系仍然模糊不清。

3 讨论与结论

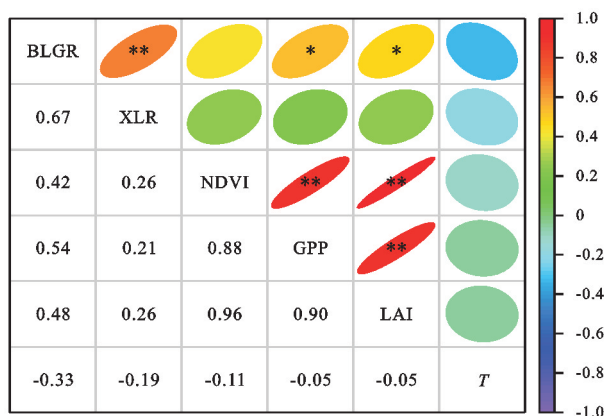
3.1 讨论

在气候与植被变化等因素的影响下,观测到的全球蒸发与径流等要素发生了显著的趋势性变化^[22]。定量识别不同驱动要素对水文循环的影响,对流域的治理策略制定非常重要。从 2000 年以来流域降水量和锡林河

径流量呈现出下降趋势,蒸散发和巴拉格尔径流量呈上升趋势,这与现有的研究结果相一致^[23]。锡林河流域与巴拉格尔河流域径流差异性主要由于地理位置、地形地貌、土地利用和人类活动强度等因素造成^[24]。整个流域大面积的 Pre 减少、ET 增加的情况下,SSM 增加是可能意味着植被在增加。2000—2020 年植被生产力增加,导致了水文通量的明显响应。气候和人类活动对植被覆盖均呈现积极作用,人类活动因素特别是生态治理保护措施对草原植被的贡献远大于气候因素变化^[25]。草原内陆河流域植被增加的原因是由于大规模的生态恢复工程。自 2000 年以来,锡林郭勒盟积极实施退耕还林还草、围封禁牧、轮牧休牧等政策,对锡林郭勒草原生态恢复产生了积极效果^[26]。

流域植被变量波动大是因为植被类型以草原植被为主,生态系统对自然环境变化和人类活动干扰特别敏感。整个流域中 LAI 值小于等于 2.5 的为草地,大于 2.5 的为耕地或林地,不同地表覆盖类型中,草原的平均年最大 LAI 值为 2.5,其次为耕地的平均年最大

LAI 值为 4.0, 森林的平均年最大 LAI 值为 4.5。随着全球逐渐变暖, 变暖的大气增加地球表面水循环各部分的流量, 加剧了降水的变异性^[27]。这意味着尽管降水与植被变量相关, 但该地区降水变化也可能受到大气循环等其他因素的影响。SSM 与 NDVI, LAI 和 GPP 呈负相关是可能在荒漠化草原植被长得稀疏, 加大地表的暴露度, 导致地表蒸发量增加, 也可能由于植被的生长对水的需求量增加, 从而导致 SSM 的减少。



注: ** 表示在 0.01 显著性水平下相关, * 表示在 0.05 显著性水平下相关。

图 8 径流与 NDVI, GPP, LAI, T 的关系

Fig. 8 The relationship between runoff and NDVI, GPP, LAI, T

此外, 人类活动对水文循环的影响同样不可忽视。本文只研究了植被动态和气候变化对水文循环的影响, 未能涉及到人类活动对水文循环的影响。经实地考察发现, 研究区人类活动(放牧、矿产开采等)对植被和水文循环均有很大的影响。在今后的研究中开展人类活动对生态水文影响相关研究, 以便更好地, 更全面地解释该流域水文循环的变化。

3.2 结论

(1) 锡林河流域 2000—2019 年径流呈现出下降趋势, 巴拉格尔流域的径流呈现出上升趋势; 蒸散发量整体呈现出上升趋势(0.994 mm/a); 降水量整体呈现出下降趋势(2.69 mm/a); 土壤水分呈不明显的增加趋势。ET 呈现出西北高东南低的空间特征, Pre 和 SSM 呈现出东高西低的条带状空间分布格局。ET 在像元尺度上占整个流域的 94.93% 是显著增加。

(2) 草原内陆河流域生长季 LAI(0.014/a)、GPP(2.381/a)、NDVI(0.003/a) 及气温呈现增加趋势。NDVI, GPP 和 LAI 整体状况呈东高西低的阶梯状空间分布格局, LAI, NDVI 和 GPP 在像元尺度上分别占整个区域的 64.8%, 47.8% 和 32%。

(3) 植被跟水文循环变量呈正相关关系, 随着植

被生产力的提高水文循环变量随之增加, 整体上植被的增加对水文循环有积极作用。气温和径流呈现负相关; 与 ET 整体上呈现显著正相关($r=0.699$), 由西向东相关性递增; 与 SSM 在研究区西部和东部呈显著负相关性。

参考文献(References):

- [1] 刘春蓁, 巢清尘, 王守荣, 等. 水文气象学领域的水文循环研究进展[J]. 气候变化研究进展, 2023, 19(1): 1-10.
Liu C Z, Chao Q C, Wang S R, et al. The research progress of hydrologic cycle in hydrometeorology[J]. Climate Change Research, 2023, 19(1): 1-10.
- [2] Kramer R, Bounoua L, Zhang P, et al. Evapotranspiration trends over the eastern United States during the 20th century[J]. Hydrology, 2015, 2(2): 93-111.
- [3] 苏布达, 孙赫敏, 李修仓, 等. 气候变化背景下中国陆地水循环时空演变[J]. 大气科学学报, 2020, 43(6): 1096-1105.
Su B D, Sun H M, Li X C, et al. Impact of climate change on terrestrial water cycle in China[J]. Transactions of Atmospheric Sciences, 2020, 43(6): 1096-1105.
- [4] 姜彤, 孙赫敏, 李修仓, 等. 气候变化对水文循环的影响[J]. 气象, 2020, 46(3): 289-300.
Jiang T, Sun H M, Li X C, et al. Impact of climate change on water cycle[J]. Meteorological Monthly, 2020, 46(3): 289-300.
- [5] Huntington T G, Weiskel P K, Wolock D M, et al. A new indicator framework for quantifying the intensity of the terrestrial water cycle[J]. Journal of Hydrology, 2018, 559: 361-372.
- [6] Bai P, Liu X M, Zhang Y Q, et al. Assessing the impacts of vegetation greenness change on evapotranspiration and water yield in China[J]. Water Resources Research, 2020, 56(10): E2019 WR027019.
- [7] 张永强, 孔冬冬, 张选泽, 等. 2003—2017 年植被变化对全球陆面蒸散发的影响[J]. 地理学报, 2021, 76(3): 584-594.
Zhang Y Q, Kong D D, Zhang X Z, et al. Impacts of vegetation changes on global evapotranspiration in the period 2003-2017[J]. Acta Geographica Sinica, 2021, 76(3): 584-594.
- [8] 王凯利, 王志慧, 肖培青, 等. 气候与下垫面变化对黄土高原蒸散发变化的影响评估[J]. 水土保持学报, 2022, 36(3): 166-172, 180.
Wang K L, Wang Z H, Xiao P Q, et al. Assessment on the impact of climate and the changes of underlying surface on the evapotranspiration in the Loess Plateau[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2022, 36(3): 166-172, 180.
- [9] Khoie M M M, Nasser M, Banihashemi M A. Determining the spatial contributions of land use changes on the streamflow and sediment transport regimes: A case

- study of the Gorganroud watershed in Iran[J]. *Environmental Science and Pollution Research International*, 2023,30(15):45029-45045.
- [10] Feng Z, Liu S, Guo Y, et al. Runoff responses of various driving factors in a typical basin in Beijing-Tianjin-Hebei Area[J]. *Remote Sensing*, 2023,15(4):1027.
- [11] Allan R P, Barlow M, Byrne M P, et al. Advances in understanding large-scale responses of the water cycle to climate change[J]. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 2020,1472(1):49-75.
- [12] 吴福婷,符淦斌.全球变暖背景下不同空间尺度降水谱的变化[J].*科学通报*,2013,58(8):664-673.
Wu F T, Fu C B. Change of precipitation intensity spectra at different spatial scales under warming conditions [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2013,58(8):664-673.
- [13] 陈婷,夏军,邹磊.汉江上游流域水文循环过程对气候变化的响应[J].*中国农村水利水电*,2019(9):1-7.
Chen T, Xia J, Zou L. The response of the upstream hydrological cycle process to climate change in the upper Hanjiang River Basin[J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2019(9):1-7.
- [14] Yang D, Li C, Hu H, et al. Analysis of water resources variability in the Yellow River of China during the last half century using historical data[J]. *Water Resources Research*, 2004,1842(40):308-322.
- [15] Sun Y L, Yang Y L, Zhang Y, et al. Assessing vegetation dynamics and their relationships with climatic variability in Northern China[J]. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*,2015,87:79-86.
- [16] 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.
- [17] Krishnaswamy J, John R, Joseph S. Consistent response of vegetation dynamics to recent climate change in tropical mountain regions [J]. *Global Change Biology*, 2014,20(1):203-215.
- [18] Mann H B. Nonparametric tests against trend [J]. *Econometrica*, 1945,13(3):245-259.
- [19] 沈贝贝,魏一博,马磊超,等.内蒙古草原植被覆盖度时空格局变化及驱动因素分析[J].*农业工程学报*,2022,38(12):118-126.
Shen B B, Wei Y B, Ma L C, et al. Spatiotemporal changes and drivers of fractional vegetation cover in Inner Mongolia grassland of China[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2022,38(12):118-126.
- [20] 赵汝冰,肖如林,万华伟,等.锡林郭勒盟草地变化监测及驱动力分析[J].*中国环境科学*,2017,37(12):4734-4743.
Zhao R B, Xiao R L, Wan H W, et al. Grassland change monitoring and driving force analysis in Xilingol League [J]. *China Environmental Science*, 2017,37(12):4734-4743.
- [21] Cano-Arboleda L V, Villegas J C, Restrepo A C, et al. Complementary effects of tree species on canopy rainfall partitioning: New insights for ecological restoration in Andean ecosystems [J]. *Forest Ecology and Management*, 2022,507:119969.
- [22] Famiglietti J S, Rodell M. Water in the balance [J]. *Science*, 2013,340(6138):1300-1301.
- [23] 张阿龙,高瑞忠,刘廷玺,等.高原内陆河流域气候水文突变与生态演变规律:以内蒙古锡林河和巴拉格河河流域为例[J].*中国环境科学*,2019,39(12):5254-5263.
Zhang A L, Gao R Z, Liu T X, et al. Identification on hydrometeorology mutation characteristics and ecological evolution pattern of the plateau inland river basin—Taken Xilin River and Balager river of Inner Mongolia for instance[J]. *China Environmental Science*, 2019,39(12):5254-5263.
- [24] 张阿龙,高瑞忠,刘廷玺,等.近50年半干旱典型草原区域不同时间尺度上的降水、径流研究[J].*水土保持研究*,2019,26(4):80-86,95.
Zhang A L, Gao R Z, Liu T X, et al. Study on precipitation and runoff at different time scales in semi-arid grassland basin over the past 50 years[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2019,26(4):80-86,95.
- [25] 焦全军,付安民,张肖,等.基于MODIS数据的锡林郭勒草原植被覆盖变化及驱动因子分析[J].*北京工业大学学报*,2017,43(5):659-664.
Jiao Q J, Fu A M, Zhang X, et al. Driving factors of vegetation changes in Xilingol Grassland based on MODIS data[J]. *Journal of Beijing University of Technology*, 2017,43(5):659-664.
- [26] 刘佳佳,黄甘霖.锡林郭勒盟和锡林浩特市草原生态系统服务与人类福祉的关系研究综述[J].*草业科学*, 2019,36(2):573-593.
Liu J J, Huang G L. A review of grassland ecosystem service and human well-being in Xilingol League and Xilinhot City[J]. *Pratacultural Science*, 2019,36(2):573-593.
- [27] Magan B, Kim S, Wasko C, et al. Impact of atmospheric circulation on the rainfall-temperature relationship in Australia [J]. *Environmental Research Letters*, 2020,15(9):094098.