

1982—2009 年内蒙古地区植被覆盖变化对气象干旱的响应

布 和¹, 乌兰图雅^{1,2,3*}, 斯琴朝克图^{1,2,3}, 韩淑敏⁴, 高苏日固嘎¹, 吴秀泉¹

(1. 内蒙古师范大学 地理科学学院, 内蒙古 呼和浩特 010022; 2. 内蒙古自治区蒙古高原灾害与生态安全重点实验室, 内蒙古 呼和浩特 010022; 3. 蒙古高原气候变化与区域响应自治区高等学校重点实验室, 内蒙古 呼和浩特 010022; 4. 内蒙古农业大学 林学院, 内蒙古 呼和浩特 010018)

摘 要:基于气象站的降水量和 AVHRR NDVI 数据, 评估 MPI-ESM 全球气候模式在内蒙古适用性的基础上开展了历史时期和未来时期的植被覆盖度(FVC)对气象干旱的响应特征研究。结果表明: 1) 在研究区内, MPI-ESM 模式的降水量、FVC 和 SPI03 与历史数据通过显著性检验的地区分别为 100%、96.92% 和 85.67%, 该模式能够代表内蒙古地区的观测结果。2) 历史时期内蒙古地区年 FVC 呈增加趋势, 植被改善最明显的区域主要在内蒙古的东北部。就未来时期而言, SSP585 比 SSP245 情景下 FVC 增加更为明显, 表明高脆弱性和高排放路径下 FVC 改善显著。3) 历史时期, 年均 SPI03 呈波动增加趋势, SPI03 的增加速率自东北向西南呈现“增-减-增”的空间格局; 未来时期内蒙古地区干旱将进一步减弱。4) 植被生长状况在大部分区域均与 SPI03 呈现不同程度的正相关, 其中东北部植被对气象干旱的响应程度最高, 中部次之, 西部最低; 对于不同情景而言, SSP585 情景下的植被对气象干旱的响应程度最高, SSP245 次之, 历史时期最弱; 在不同土地利用类型中, 未利用土地对气象干旱的响应最强, 林地和耕地的响应最弱。研究结果为内蒙古地区未来时期植物群落的生态预警和生态修复提供理论参考。

关键词:气象干旱; 植被覆盖度; 响应特征; 内蒙古地区

中图分类号: S127

文献标志码: A

文章编号: 1001-7461(2023)05-0001-09

Response of Vegetation Fraction Cover Change to Meteorological Drought in Inner Mongolia From 1982 to 2009

BUHE¹, ULANTUYA^{1,2,3*}, SIQINCHAOKETU^{1,2,3}, HAN Shu-min⁴, GAOSURIGUGA¹, WU Xiu-quan¹

(1. School of Geographical Sciences, Inner Mongolia Normal University, Hohhot 010022, Inner Mongolia, China; 2. Key Laboratory of Disasters and Ecological Security on the Mongolian Plateau of Inner Mongolia Autonomous Region, Hohhot 010022, Inner Mongolia, China; 3. Key Laboratory of Climate Change and Regional Response on the Mongolian Plateau of Autonomous Region, Hohhot 010022, Inner Mongolia, China; 4. College of Forestry, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018, Inner Mongolia, China)

Abstract: Based on precipitation data collected from different meteorological stations within Inner Mongolia Autonomous Region and AVHRR NDVI data, a study was carried out on the response characteristics of fraction vegetation cover (FVC) to meteorological drought in historical and future periods after assessing the applicability of the MPI-ESM global climate model in the region. The results showed that 1) the precipitation, FVC, and SPI03 of the MPI-ESM model passed the significance test 100%, 96.92%, and 85.67% of the areas with historical data in the study area, respectively, indicating that the model could be used in the region. 2) The annual FVC displayed an increasing trend in the historical period, and the most significant

收稿日期: 2022-10-08 修回日期: 2023-03-13

基金项目: 国家自然科学基金项目(41861024); 内蒙古自治区自然科学基金(2021BS04001); 内蒙古自治区高等学校科学技术研究项目(NJZZ21006)。

第一作者: 布 和。研究方向: 干旱区地理。E-mail: buhe15540767179@163.com

* 通信作者: 乌兰图雅, 教授。研究方向: 土地利用/土地覆盖变化与生态安全。E-mail: mtuya1967@163.com

areas of FVC improvement were mainly distributed in the northeastern part of the region. The increase of FVC under SSP585 was more evident than that under the SSP245 scenario in the future stage, indicating a significant improvement of FVC under high vulnerability and high emission path. 3) In the historical period, the annual average SPI03 exhibited a fluctuating increasing trend, and the increasing rate of SPI03 showed a spatial pattern of "increasing-decreasing-increasing" from northeast to southwest. The drought in the region would be further weakened in the future period. 4) The vegetation growth condition displayed different degrees of positive correlation with SPI03 in most areas, among which the response of vegetation to meteorological drought was the highest in the northeast, followed by central area and lowest in the west. For different scenarios, the response of FVC to meteorological drought was the highest in SSP585, followed by SSP245 and weakest in historical period. The response of unused land to meteorological drought was the strongest, and the response of unused land to meteorological drought was the weakest. Among the different land use types, the response of unused land to meteorological drought was the strongest, and the responses of forest land and cropland were the weakest. The study results provide theoretical references for ecological warning and ecological restoration of plant communities in Inner Mongolia in the future.

Key words: meteorological drought; fractional vegetation cover; response characteristics; Inner Mongolia

植被是地球表面生态系统的重要组成部分,区域的植被覆盖度(FVC)直接影响区域的水文循环和气候变化,FVC的高低也直接反映区域生态的脆弱性^[1]。近年来,全球气候变化加剧,除气温升高外,气象干旱也受到广泛的关注^[2-4]。气象干旱是指持续的极端干燥天气导致缺水,引起严重水文不平衡^[5]。气象干旱持续时间较长,会导致土壤水分锐减导致农作物生长缓慢进而减产^[6-7],也会影响自然植被的覆盖度。研究表明,全球气候变化引起干旱频率和强度的增加对草地生态系统和荒漠植被的变化同样产生较大影响^[8]。植被在气象干旱时期无法得到充足的水分进而影响长势,导致覆盖度下降,而根据研究,这种响应也具有滞后性^[9]。当前气象干旱对于植被的研究主要集中在响应机理探究^[10]、指数的建立和改进^[11]、历史不同时间尺度^[12]等。然而未来时期植被覆盖对于气象干旱响应的研究相对较少。如何利用未来情景数据分析植被覆盖对于干旱的响应对于应对气候变化具有重要的意义。

新一代CMIP数据的发布使未来气候研究精度进一步提高。与早期版本(CMIP5)相比,CMIP6使用共享社会经济途径(SSP)和典型浓度路径(RCP)的耦合框架。新的版本包括未来人口、社会经济发展、生态系统、资源、社会制度等,还包括未来减缓、适应和应对气候变化的努力措施,具有更强的适用性^[13-15]。由于CMIP6模式受机理、初始条件设置、分辨率等因素的影响,导致不同地区的模拟性能差异较大^[16]。因此模型的区域应用评估也是必不可少的一步。

内蒙古位于我国北部,具有降水分布不均、植被生态环境脆弱、生态系统不稳定的特点^[17]。内蒙古

的东部与西部干湿度、光热资源差异较大,水资源匮乏且供需矛盾突出,降水和气温等气象因素随季节变化明显,其中植被对气候变化和人类活动较为敏感^[7]。近年来,内蒙古统筹山水林田湖草沙的系统治理,全方位、全地域、全过程开展生态文明建设,草地恢复、植被生产力上升、防沙治沙均位于全国首位。由于受温带季风、复杂地势和人类活动众多等因素,内蒙古地区尤其容易受到全球变暖的影响^[18],因此准确地预测FVC对气象干旱的响应特征,为政策制定者抵御和适应灾害提供可靠的信息是至关重要的。基于CMIP6最新发布的MPI-ESM气候模式的降水和FVC,开展内蒙古地区MPI-ESM气候模式的降水量和FVC与气象站的降水量和AVHRR NDVI一致程度评估,进而预估内蒙古地区未来FVC对气象干旱的响应特征。研究结果有助于了解内蒙古地区气候变化对生态系统的影响,对于农业生产布局和种植制度制定、生态资源保护、水旱灾害管理等具有重要参考意义。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

内蒙古位于中国北部,横跨东北、华北和西北地区,相邻8个省区,外与蒙古国和俄罗斯接壤,总面积118.3万km²,是中国面积第3大的省级行政区。研究区以温带大陆性季风气候为主,从东至西由湿润、半湿润区逐渐过渡到半干旱、干旱区,全区的气温和降水时空分布不均匀。地貌类型复杂多样,以高原为主,全区平均海拔>1 000 m,因为气温和降水存在明显的空间差异,所以自东向西植被类型依次为森林、草原和荒漠(图1)。此外,由于特殊的地

理位置、地形和气候条件的影响,该区生态环境极其脆弱、草地退化和水土流失严重、水资源分布不平衡等^[19-23],使干旱成为研究区最严重的自然灾害。

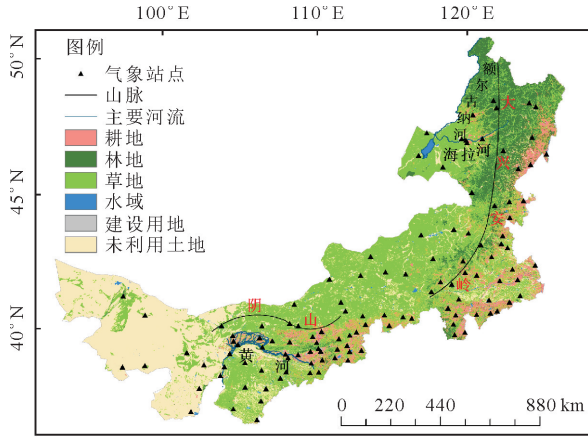


图1 内蒙古地区植被类型及气象站点分布

Fig. 1 Vegetation types and distribution of meteorological stations in Inner Mongolia

1.2 数据来源及处理

本研究使用的历史时期观测数据为1982—2014年内蒙古地区120个气象站点实测的降水逐月数据集(图2),该数据下载于中国气象数据网(<http://data.cma.cn/data/>)。以研究区气象站点的经纬度数据为基础,在ArcGIS环境下,通过反距离权重法将气象要素实现空间化,进而获取气象要素的栅格数据,将其插值到 $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ 。

内蒙古地区5 km逐月NDVI数据集(1982—2020)根据NASA AVHRR CDR NDVI V5版逐日数据进行月度合成、镶嵌和裁剪后制作而成,包含1个TIF文件,内含396个波段,即1982年1月至2014年12月的月最大值NDVI数据,数据来源于国家地球系统科学数据中心(<http://www.geodata.cn>)。

此外,为了数据模式统一,均选择CMIP6全球气候模式下的MPI-ESM历史时期(1982—2014年)和未来时期(2015—2099年)的月度网格化降水、日度网格化的FVC,来源于地球系统网格协会(<https://esgf-node.llnl.gov/search/cmip6/>)。其中,选择常用的中等社会脆弱性和中等排放路径(SSP245)、高脆弱性和高排放路径(SSP585)来开展本研究^[24],并使用双线性插值将MPI-ESM下的逐月降水和气温栅格数据集转换为 0.1° 分辨率^[25-26]。

2000年中国1 km分辨率的土地覆盖数据下载于中国科学院资源环境科学与数据中心(<http://www.resdc.cn>)。利用ENVI与ArcGIS,将中国土地覆盖数据进行裁剪和重分类,归并为耕地、林地、草地、水体、建设用地和未利用土地6个一级地类

(图1),并将其空间分辨率重采样至 0.1° 。

1.3 研究方法

1.3.1 标准化降水指数(SPI) 已有研究证明,SPI及其分级标准在内蒙古地区具有较好的适用性^[27-29]。此外,1个月的SPI通常用于反映气象干旱;3个月的SPI更好地反映了土壤水分的变化,6~24个月的SPI反映了径流、地下水和淡水储存的长期变化^[30]。在本研究中,应用3个月时间尺度的SPI来描述地表土壤水分含量的相对短期变化对FVC的影响,这与内蒙古地区的农业生产相匹配。

1.3.2 趋势分析和显著性检验 Sen的趋势分析是一种用于检测趋势的稳健非参数统计方法,广泛用于气象、水文和植被数据,这种斜率方法的主要优点是不需要遵循特定的分布^[31]。具体公式如下。

$$\beta = M_{ED} \left(\frac{S_j - S_i}{j - i} \right) \quad (1)$$

式中: $1 < j < i < n$, i, j 均代表 $1 \sim n$ 的常数; M_{ED} 表示中位数; β 表示SEN趋势,为分析的要素增强或衰减程度, $\beta > 0$ 显示要素有增加趋势,反之亦然。本研究中的Sen趋势分析用于了解NDVI和SPI变化;然而,无法确定SPI变化是否显著。因此,通过Mann-Kendall显著性检验确定了SPI发生显著变化的区域。根据研究,Mann-Kendall显著性检验已被发现能够对水文气象系列的趋势进行稳健量化^[32-33]。统计数据用 Z 表示,当 $|Z| > 1.96$ 时,SPI变化趋势通过显著性检验。

1.3.3 相关性分析 Pearson相关分析能够较好地反映两者之间的关系^[10],本研究CMIP6的模式评估以及植被变化对气象干旱的响应均使用了该方法。CMIP6模式评估主要分析观测和模拟数据之间空间相关性,而用植被覆盖度和气象干旱的相关性来反映植被对于气象干旱的响应。2个分析均为空间像元尺度的相关系数。具体公式如下^[34]。

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

式中: R_{xy} 为气象干旱指数(SPI)和植被覆盖度的相关系数; x 和 y 分别代表气象干旱指数(SPI)和植被覆盖度。结合回归系数和相关系数的显著性水平($P=0.01$ 和 $P=0.05$),来判断是否通过显著性检验。

2 结果与分析

2.1 MPI-ESM气候模式评估

计算1982—2014年月度观测和模拟之间的空间相关性,来判断CMIP6全球气候模式模拟的降水

量(图 2a)、FVC(图 2b)和 SPI03(图 2c)在研究区的适用性。由图 2 可知,MPI-ESM 模拟的降水量与实测值一致程度较高;逐月降水量的模拟值和观测值一致性最高,相关系数 0.52~0.86,相关系数自东北向西南逐渐增加,并且逐月降水量在整个内蒙古地区均通过显著性检验($P<0.01$);此外,SPI03 和 FVC 在内蒙古地区也具有较高的一致性,SPI03 相关系数 0.03~0.69,FVC 相关系数 -0.20~0.91,研究区的 SPI03 96.92%的地区通过了显著性检验,未通过显著性检验的地区主要分布在内蒙古中部以南地区;而 FVC 有 14.33%的面积未通过显著性检验,主要分布在内蒙古地区的阿拉善盟。总的来说,MPI-ESM 模拟的降水、FVC 和 SPI03 在内蒙古地区与实测值的一致程度较高,可用于评估历史时期和未来时期三者的变化特征。

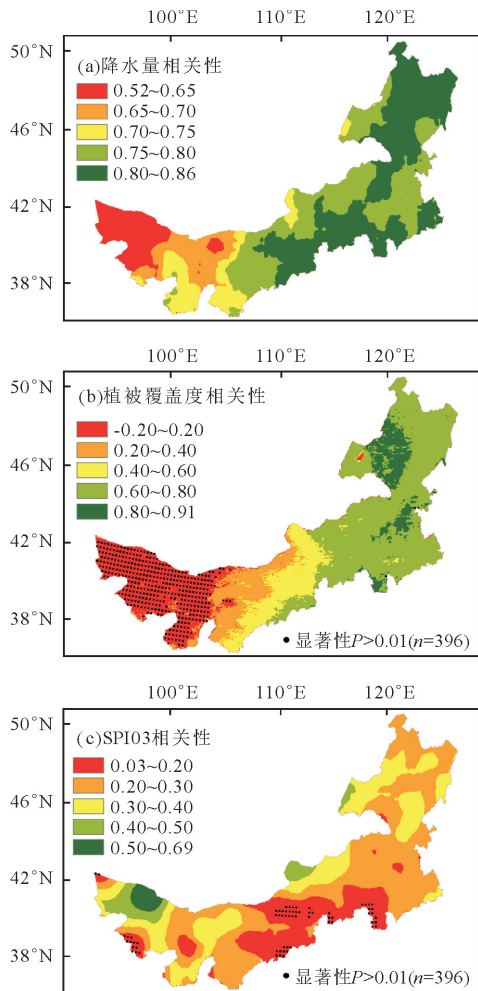


图 2 内蒙古地区 CMIP6 全球气候模式的适用性评价

Fig. 2 Applicability evaluation of cmip6 global climate model in Inner Mongolia

2.2 内蒙古地区植被变化特征

2.2.1 FVC 时空格局特征 从内蒙古地区 FVC 的年际变化时间序列看(图 3),历史时期(1982—

2014 年)年 FVC 最大值出现在 2013 年,为 49.18%;最小值出现在 1990 年,为 44.61%,多年平均 47.03%,且呈显著的增加趋势($P<0.01$),总体增速 $1.13\% \cdot 10 a^{-1}$,说明内蒙古地区的植被生长状况改善;在 SSP245 情景下,未来时期(2015—2099 年)年 FVC 最大值出现在 2097 年,为 55.967%;最小值出现在 2022 年,为 46.43%,多年平均值为 52.06%,且呈显著的增加趋势($P<0.01$),总体增速 $0.76\% \cdot 10 a^{-1}$;相比较而言,在 SSP585 情景下,未来时期 FVC 增速要高于历史时期和 SSP245 情景,总体增速为 1.33% ,这表明高排放路径下 FVC 增加更为明显。

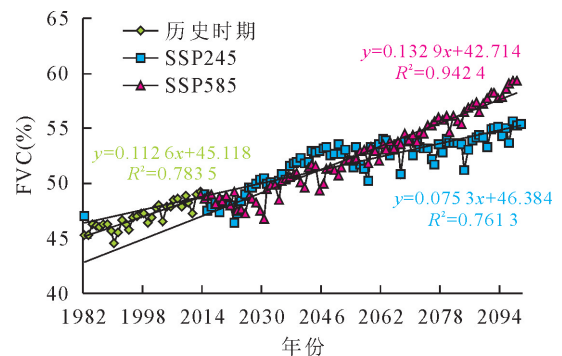


图 3 1982—2099 年内蒙古地区 FVC 年际变化

Fig. 3 Interannual variation of FVC in Inner Mongolia from 1982 to 2099

基于历史时期、SSP245 和 SSP585 情景下的年 FVC,计算多年平均 FVC 空间分布(图 4)。根据以前的研究^[35-37],将内蒙古地区的 FVC 划分为 5 类:低覆盖度($0 \leq FVC < 20\%$)、中低覆盖度($20\% \leq FVC < 40\%$)、中覆盖度($40\% \leq FVC < 60\%$)、中高覆盖度($60\% \leq FVC < 80\%$)、高覆盖度($80\% \leq FVC \leq 100\%$)。由图 4 可知,在历史时期、SSP245 和 SSP585 情景下的内蒙古地区年 FVC 空间分布基本一致,均呈现出自东北向西南递减的变化趋势,中高覆盖度和高覆盖度主要分布在内蒙古中部以北地区,分别占研究区总面积的 47.36%、54.19%和 54.23%,可见 SSP245 和 SSP585 均表明未来时期内蒙古地区中高覆盖度以上的面积在扩大;值得注意的是,SSP245 和 SSP585 相较于历史时期,内蒙古的大兴安岭地区出现罕见的高覆盖度区域,这主要是因为 1998 年实施了天然林保护工程,国家一直致力于对这片森林生态系统保护;内蒙古地区的中低覆盖度和中覆盖度主要分布在内蒙古的中部地区,分别占整个研究区的 27.46%、23.15%和 24.41%;而内蒙古地区西部均表现为低覆盖度,分别占研究区总面积的 25.18%、22.66%和 21.36%,表明在 SSP585 情景下的低 FVC 区域在不断缩减。

此外,基于历史时期(1982—2014年)作为参考期,探讨2种情景下的未来变化。由图5可见,未来空间格局表明自西北向东南地区FVC的增长率在逐

渐递减,从西北部的90%下降到10%以下,结合图4可知,未来时期低FVC的增长率要大于较高FVC的增长率。

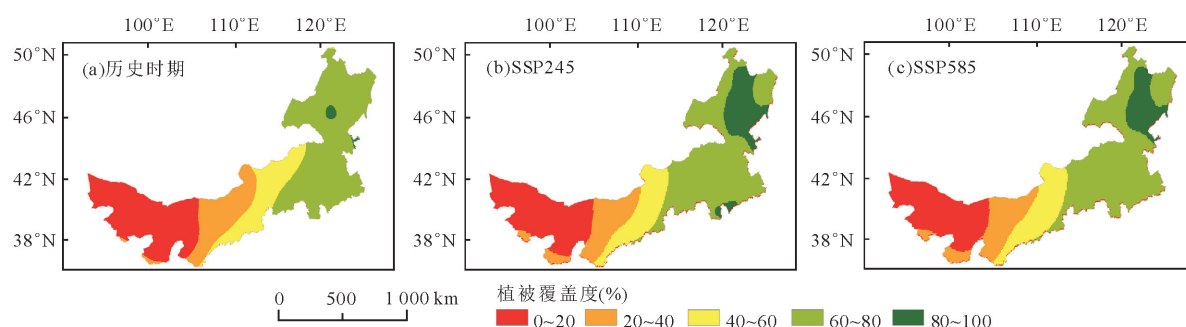


图4 1982—2009年内蒙古地区FVC空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of FVC in Inner Mongolia from 1982 to 2009

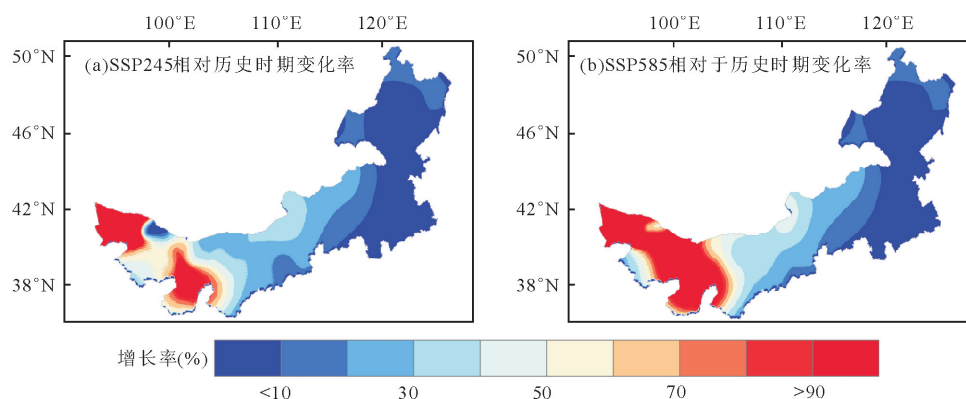


图5 与历史时期(1982—2014年)相比,内蒙古地区未来时期(2015—2009年)FVC增长率

Fig. 5 Growth rate of FVC in the future period (2015—2009) in Inner Mongolia compared with the historical period (1982—2014)

2.2.2 FVC的趋势分析 由图6可以看出,历史时期内蒙古地区地表植被覆盖总体表现为增加趋势,即Sen趋势值 >0 的区域占整个研究区的88.39%,其中极显著增加的区域占整个研究区的31.99%,主要分布在内蒙古地区的东北部;显著增加的区域占整个研究区的30.67%;退化区的面积远小于得到改善的区域,在整个研究区中FVC呈降低的区域所占面积为10.22%,主要分布在阿拉善盟的部分地区,该区主要为荒漠区域,受人类干扰的影响较小,主要受气候变化的影响。与历史时期相比,SSP245和SSP585情景下的未来时期FVC增加趋势的面积扩大,即Sen趋势值 >0 的区域分别增加到89.95%和95.61%,其中极显著增加的区域扩张最为明显,分别增加了39.42%和50.29%,这表明未来时期内蒙古地区的FVC会进一步改善;值得注意的是,在SSP245情景下内蒙古地区的阿拉善盟北部出现明显的显著退化区。

2.3 内蒙古地区气象干旱变化特征

2.2.1 气象干旱时空格局特征 从图7可以看出,历史时期和未来时期的SPI值的波动幅度存在明显

差异,但均表示出内蒙古地区的气象干旱程度呈减轻的变化趋势。1982—2009年研究区的SPI03值均呈上升趋势,其中SSP585情景下的SPI03值变化趋势最为明显,为 $0.29 \cdot 10 a^{-1}$ ($P < 0.01$),其次为SSP245情景下的SPI03变化趋势为 $0.15 \cdot 10 a^{-1}$ ($P < 0.01$),而历史时期的SPI03变化趋势相对较弱。总体上表明,内蒙古地区气象干旱程度降低。

2.2.2 气象干旱的趋势分析 通过Sen趋势分析和MK显著性检验计算历史时期和未来时期的SPI03的变化趋势和显著性的空间分布格局(图8)。历史时期、SSP245和SSP585情景下的SPI03的Sen趋势分析表明, SPI03的增加速率自东北向西南呈现出“增-减-增”的变化趋势,但在SSP585情景下的Sen趋势值更大,表明在SSP585情景下干旱减缓程度最大;历史时期、SSP245和SSP585情景下的SPI03在整个研究区内达到极显著增加的区域分别有48.14%、52.66%和74.11%,说明这些区域的干旱有极显著减缓趋势,并且未来时期的整个研究区旱情均呈显著减缓趋势,表明降水量增加,区域呈现湿润化,进一步增加了研究区的FVC。

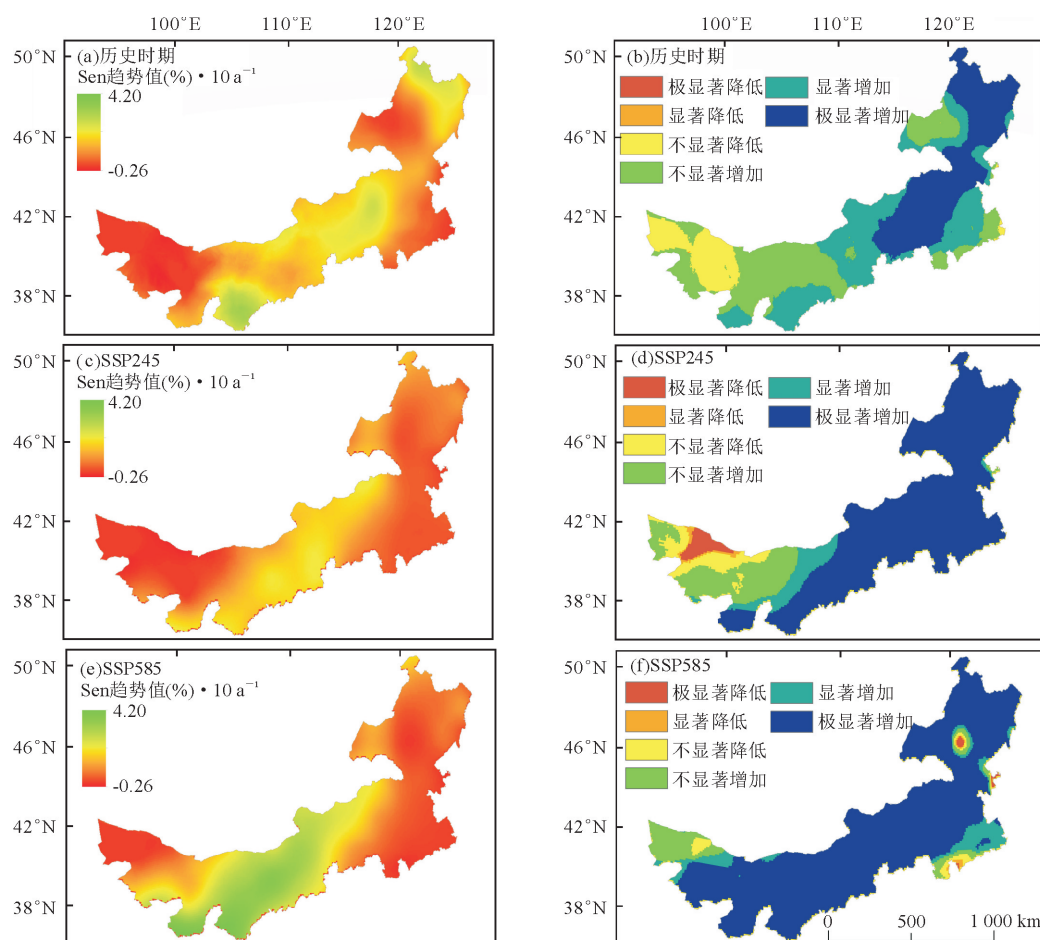


图 6 历史时期和未来时期内蒙古地区的 FVC 年际变化趋势(左)及显著性检验空间分布(右)

Fig. 6 Interannual change trend of FVC in Inner Mongolia in historical and future periods (left) and the spatial distribution of significance test (right)

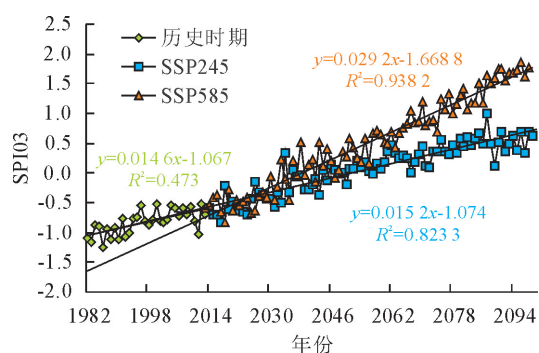


图 7 1982—2099 年内蒙古地区 SPI03 年均值的年际变化

Fig. 7 Interannual variation of annual mean value of SPI03 in Inner Mongolia from 1982 to 2099

2.4 内蒙古地区植被对气象干旱的响应

选取历史时期和未来时期每年的 FVC 和表征气象干旱状况的 SPI03 数据,进行基于空间像元的相关分析(图 9),内蒙古地区年植被状况对 SPI03 的响应程度较高,在历史时期、SSP245 和 SSP585 情景下分别有 89.87%、86.06%和 92.08%的区域相关系数为正,呈现正相关区域的均值分别为 0.35、0.64 和 0.77,其中分别有 10.41%、73.87%

和 87.99% 呈现强相关性。历史时期、SSP245 和 SSP585 情景下的负相关区域明显小于正相关区域,分别占整个研究区的 10.13%、13.94%和 7.92%,其中仅有在 SSP585 情景下的 0.03%呈现强负相关,绝大部分区域呈不显著负相关。不同区域,植被状况与气象干旱的响应程度存在较大差异,两者相关系数较高的区域主要分布在内蒙古地区的东北部,而阿拉善盟的 FVC 对气象干旱的响应程度较低。此外,对于不同时期而言,SSP585 情景下的植被状况对气象干旱的响应程度较高。

考虑到不同植被类型的影响,统计得出 6 类土地利用类型中年 FVC 与 SPI03 的相关系数均值,并计算不同场景下各土地利用类型 FVC 对 SPI03 的响应强度增加率(图 10)。相对于历史时期,6 种不同土地利用类型的植被状况对气象干旱的响应强度均呈增加趋势,其中 SSP585 情景下的未利用土地最高,为 218.45%,其次为草地和水域,分别为 134.11%和 130.35%。此外,高脆弱性和高排放路径(SSP585)比中等社会脆弱性和中等排放路径(SSP245)的 FVC 对干旱的响应要强,尤其是未利

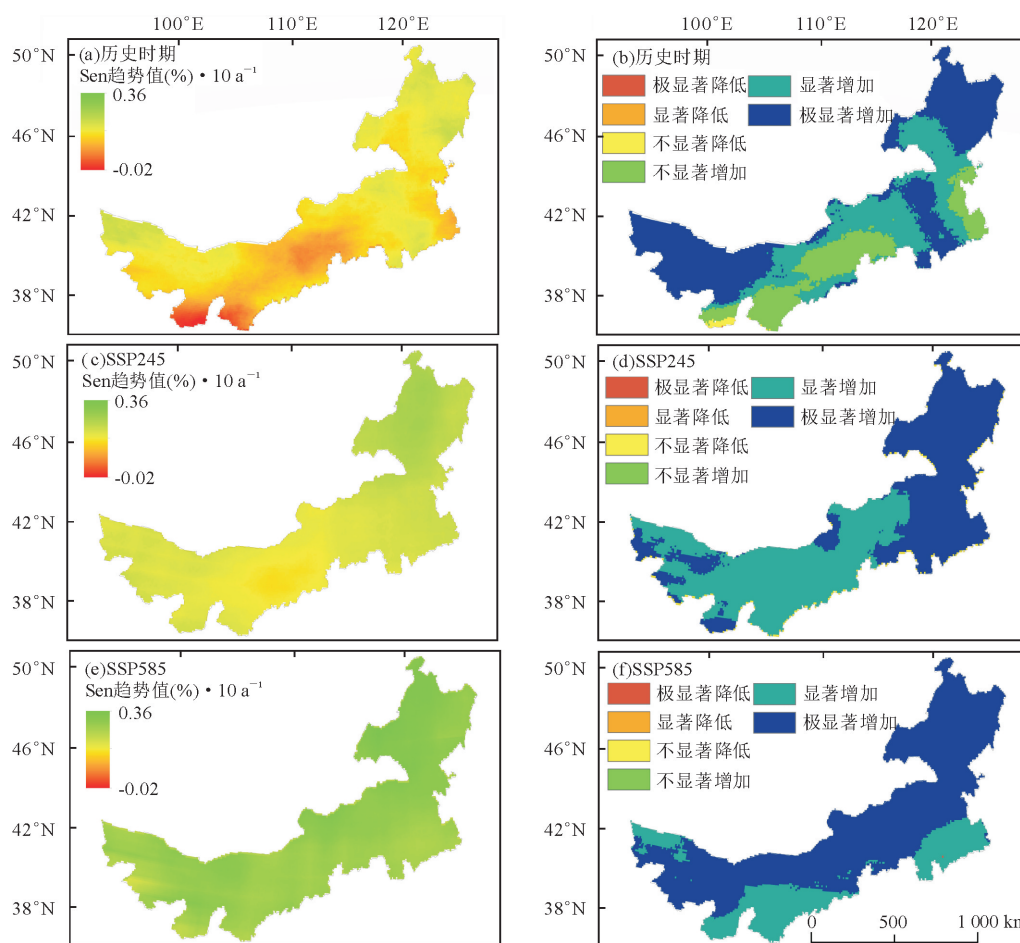


图 8 历史时期和未来时期内蒙古地区的 SPI03 年际变化趋势(左侧)及显著性检验空间分布(右侧)

Fig. 8 Interannual change trend of SPI03 in Inner Mongolia in historical and future periods (left) and the spatial distribution of significance test (right)

用土地,为 68.58%,而 2 种情景下的耕地和林地变化很小,仅为 6.75%和 2.47%。因此,在内蒙古地区的未来干旱预警中,应着重关注未利用土地和草地的生长状况。

3 结论与讨论

3.1 结论

在研究区内,MPI-ESM 模式的降水量、FVC 和 SPI03 与历史数据通过显著性检验的地区分别为 100%、96.92%和 85.67%,这表明 MPI-ESM 全球气候模式能够代表内蒙古地区的观测结果。

历史时期(1982—2014 年)内蒙古地区年 FVC 呈增加趋势,其中改善最明显的区域主要分布在内蒙古的东北部。未来时期(2015—2099 年)SSP585 比 SSP245 情景下 FVC 增加更为明显,并且整个内蒙古地区有 50.29%的区域呈现极显著增加。

历史时期年均 SPI03 呈波动增加趋势,SPI03 的增加速率自东北向西南呈现“增-减-增”的空间格局;未来时期内蒙古地区干旱将进一步减弱,逐渐开始由干旱转为湿润,并且在 SSP585 情景下干旱减

缓程度最大。

SPI03 与 FVC 在大部分区域均呈不同程度的正相关,总体表现为,内蒙古地区东北部植被对气象干旱的响应程度最高,中部次之,西部最弱;对于不同情景而言,SSP585 情景下的植被对气象干旱的响应程度最高,SSP245 次之,历史时期最弱;在不同土地利用类型中,未利用土地对气象干旱的响应最强,林地和耕地的响应最弱。

3.2 讨论

基于未来气候情景数据分析内蒙古地区历史时期和未来时期的植被覆盖度(FVC)对气象干旱的响应特征,有助于更好地理解干旱半干旱地区植被对于全球气候变化的响应,有助于我们更好地应对气候变化。总体来看,研究区气象干旱程度降低,这与未来时期内蒙古地区降水量明显增加相一致,且在高排放路径下的降水量增加高于低排放路径^[38]。此外,在高排放情景下,植被覆盖度对于气象干旱的响应更大,这主要是因为研究区为干旱半干旱地区,对气候变化和外界干扰的响应非常敏感,该地区水分的变化是影响植被生长发育的主要因素^[39]。高

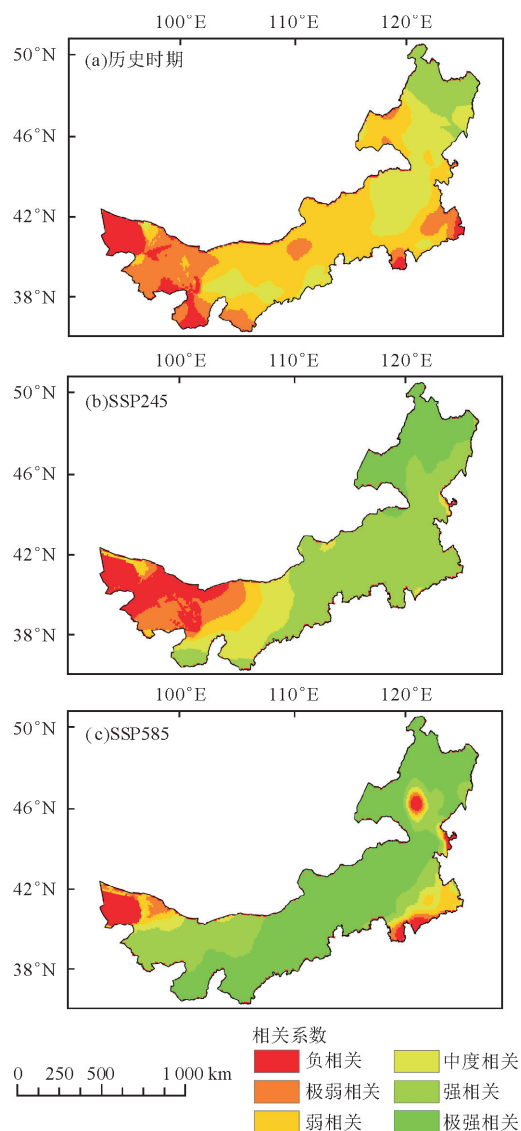


图 9 1982—2099 年内蒙古地区 FVC 与 SPI03 的相关系数

Fig. 9 Annual FVC and SPI03 correlation coefficient in Inner Mongolia from 1982 to 2099

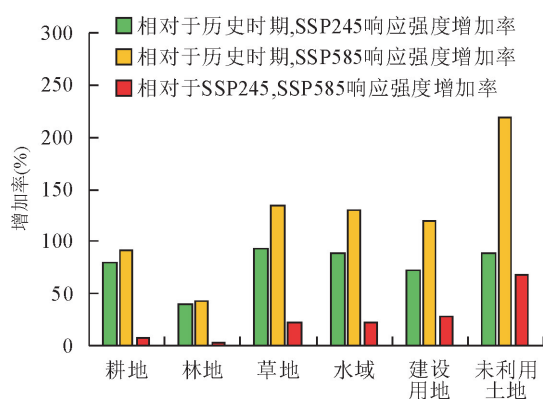


图 10 不同场景下各土地利用类型 FVC 对 SPI03 的响应强度增加率

Fig. 10 Response intensity increase rate of FVC to SPI03 under different scenarios

强度的人类活动和气候变化无疑会增加植被覆盖与气象干旱的响应强度。另外,人类活动对于植被的影响也同样不可忽视,下一步需要探究土壤类型、地形地貌、人类活动等要素对于植被的机理研究。

参考文献:

- [1] 张华,徐存刚,王浩. 2001—2018 年西北地区植被变化对气象干旱的响应[J]. 地理科学, 2020, 40(6): 1029-1038.
- [2] 高放,刘冀,陈威,等. 淮河流域上游分区气象-水文干旱传播特征及响应概率研究[J]. 水土保持研究, 2023, 30(5): 257-265. GAO F, LIU J, CHEN W, *et al.* Study on propagation characteristics and response probabilities of meteorological and hydrological drought zones in the upper reaches of Huai River [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023, 30(5): 257-265. (in Chinese)
- [3] 卢冬燕,朱秀芳,刘婷婷,等. 2 °C 升温情景下中国气象干旱特征变化[J/OL]. 干旱区地理: 1-14[2023-03-07]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/65.1103.X.20230103.1624.002.html>
- [4] 薛华柱,李阳阳,董国涛. 基于 SPEI 指数分析河西走廊气象干旱时空变化特征[J]. 中国农业气象, 2022, 43(11): 923-934. XUE H Z, LI Y Y, DONG G T. Analysis of spatial-temporal variation characteristics of meteorological drought in the Hexi Corridor based on SPEI index[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2022, 43(11): 923-934. (in Chinese)
- [5] 杨思遥,孟丹,李小娟,等. 华北地区 2001—2014 年植被变化对 SPEI 气象干旱指数多尺度的响应[J]. 生态学报, 2018, 38(3): 1028-1039. YANG S Y, MENG D, LI X J, *et al.* Multi-scale responses of vegetation changes relative to the SPEI meteorological drought index in north China in 2001—2014[J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(3): 1028-1039. (in Chinese)
- [6] HUANG S, WANG L, WANG H, *et al.* Spatio-temporal characteristics of drought structure across China using an integrated drought index[J]. Water Resources Management, 2019, 218: 182-192.
- [7] XU H, WANG X, ZHAO C, *et al.* Diverse responses of vegetation growth to meteorological drought across climate zones and land biomes in northern China from 1981 to 2014[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2018, 262: 1-13.
- [8] PENA-GAKKARDO M, VICENTE-SERRANO S M, QUIR-ING S, *et al.* Response of crop yield to different time-scales of drought in the United States: spatio-temporal patterns and climatic and environmental drivers[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2019, 264: 40-55.
- [9] 焦月正. 子牙河流域植被干旱时空分布及其对气象因子的滞后性研究[D]. 邯郸: 河北工程大学, 2021.
- [10] 邢愿. 基于不同时间尺度的贵州省农业干旱对气象干旱的响应机制[D]. 贵阳: 贵州师范大学, 2021.
- [11] 张昊延. 温度-植被-降水干旱指数 (TVPDI) 的改进及应用[D]. 兰州: 西北师范大学, 2022.
- [12] 皮贵宁, 贺中华, 张浪, 等. 区域植被对不同时间尺度气象干旱的响应——以贵州省为例[J]. 水土保持研究, 2022, 29(4): 277-284, 291.

- PI G N, HE Z H, ZHANG L, *et al.* Response of vegetation to meteorological drought in watershed at different time scale [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2022, 29(4): 277-284, 291. (in Chinese)
- [13] O'NEILL B C, TEBALD C, VAN VUUREN D P, *et al.* The scenario model intercomparison project (Scenario MIP) for CMIP6 [J]. *Geoscientific Model Development*, 2016, 9(9): 3461-3482.
- [14] UKKOLA A M, DE KAUWE M G, RODERICK M L, *et al.* Robust future changes in meteorological drought in CMIP6 projections despite uncertainty in precipitation [J]. *Geophysical Research Letters*, 2020, 47(11): 087820.
- [15] FENG M, XING Y, YANG J, *et al.* Unprecedented europe heat in June-July 2019: risk in the historical and future context [J]. *Geophysical Research Letters*, 2020, 47(11): 087809.
- [16] 周天军, 陈梓明, 邹立维, 等. 中国地球气候系统模式的发展及其模拟和预估 [J]. *气象学报*, 2020, 78(3): 332-350.
- ZHOU T J, CHEN Z M, ZOU L W, *et al.* Development of climate and earth system models in China: past achievements and new CMIP6 results [J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2020, 78(3): 332-350. (in Chinese)
- [17] 罗琳玲, 易桂花, 张廷斌, 等. 内蒙古植被长势变化及其对气候变化的响应 [J]. *测绘科学*, 2021, 46(5): 126-134.
- LUO L L, YI G H, ZHANG T B, *et al.* Changes of vegetation growth and its response to climate change in Inner Mongolia [J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2021, 46(5): 126-134. (in Chinese)
- [18] 尹燕亭, 侯向阳, 运向军. 气候变化对内蒙古草原生态系统影响的研究进展 [J]. *草业科学*, 2011, 28(6): 1132-1139.
- [19] 张超, 高晶, 赵艳丽. 基于 GIS 内蒙古荒漠草原气候变化分析 [J]. *草业科学*, 2014, 31(12): 2212-2220.
- [20] 陈宝瑞, 辛晓平, 朱玉霞, 等. 内蒙古荒漠化年际动态变化及与气候因子分析 [J]. *遥感信息*, 2007(6): 39-45.
- [21] 郑颖, 刘华民, 刘东伟, 等. 内蒙古湿地空间分布格局及动态变化研究 [J]. *环境科学与技术*, 2016, 39(12): 1-16.
- [22] 苗百岭, 梁存柱, 韩芳, 等. 内蒙古主要草原类型植物物候对气候波动的响应 [J]. *生态学报*, 2016, 36(23): 7689-7701.
- MIAO B L, LIANG C Z, HAN F, *et al.* Responses of phenology to climate change over the major grassland types [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36(23): 7689-7701. (in Chinese)
- [23] 顾润源, 周伟灿, 白美兰, 等. 气候变化对黄河内蒙古段凌汛期的影响 [J]. *中国沙漠*, 2012, 32(6): 1751-1756.
- [24] ZHU Y, YANG S. Interdecadal and interannual evolution characteristics of the global surface precipitation anomaly shown by CMIP5 and CMIP6 models [J]. *International Journal of Climatology*, 2020, 41(Supp. 1): 1-19.
- [25] MONDAL S K, HUANG J, WANG Y, *et al.* Doubling of the population exposed to drought over south Asia: CMIP6 multi-model-based analysis [J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 771(1): 145186.
- [26] ZARGAR A, SADIQ R, NASER B, *et al.* A review of Drought Indices [J]. *Environmental Reviews*, 2011, 19: 333-349.
- [27] 赵水霞, 周泉成, 王文君, 等. 基于 SPI 指数的内蒙古地区干湿气候特征 [J]. *中国水利水电科学研究院学报: 中英文*, 2022, 20(1): 10-19.
- [28] 王江涛. 基于华北地区气象指数 SPI 干旱时空分析 [J]. *水土保持研究*, 2019, 26(4): 203-207, 379.
- WANG J T. Analysis on spatiotemporal pattern of SPI drought based on meteorological index in north China [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2019, 26(4): 203-207, 379. (in Chinese)
- [29] 武新英, 郝增超, 张璇, 等. 中国夏季复合高温干旱分布及变异趋势 [J]. *水利水电技术 (中英文)*, 2021, 52(12): 90-98.
- WU X Y, HAO Z Q, ZHANG X, *et al.* Distribution and trends of compound hot and dry events during summer in China [J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2021, 52(12): 90-98. (in Chinese)
- [30] MA Z C, SUN P, ZHANG Q, *et al.* The characteristics and evaluation of future droughts across China through the CMIP6 multi-model ensemble [J]. *Remote Sensing*, 2022, 14(5): 1097.
- [31] THEIL H. A rank-invariant method of linear and polynomial regression analysis [J]. *Nederl. Akad. Wetensch. Proc.*, 1992, 12, 345-381.
- [32] HAMED K H, RAO A R. A modified mann-kendall trend test for autocorrelated data [J]. *Journal of Hydrology*, 1998(204): 182-196.
- [33] ZHANG Q, SINGH V P, PENG J, *et al.* Spatial-temporal changes of precipitation structure across the Pearl River basin, China [J]. *Journal of Hydrology*, 2012(440/441): 113-122.
- [34] BAI X H, PENG C, JIANG T, *et al.* Distribution of geographical scale, data aggregation unit and period in the correlation analysis between temperature and incidence of HFRS in mainland China: a systematic review of 27 ecological studies [J]. *PLoS Negl. Trop. Dis.*, 2019, 13(8): 0007688.
- [35] 何宝忠, 丁建丽, 张喆, 等. 新疆植被覆盖度趋势演变实验性分析 [J]. *地理学报*, 2016, 71(11): 1948-1966.
- [36] 盛任, 万鲁河. 乌伊岭国家级自然保护区植被覆盖演变及其对气候突变的响应研究 [J]. *生态学报*, 2019, 39(9): 1-14.
- SHENG R, WAN L H. Evolution of vegetation coverage and its response to abrupt climate change in the Wuyi mountains national nature reserve [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(9): 1-14. (in Chinese)
- [37] 熊俊楠, 彭超, 程维明, 等. 基于 MODIS-NDVI 的云南省植被覆盖度变化分析 [J]. *地球信息科学学报*, 2018, 20(12): 1830-1840.
- XIONG J N, PENG C, CHENG W M, *et al.* Analysis of vegetation coverage change in Yunnan Province based on MODIS-NDVI [J]. *Journal of Geo-information Science*, 2018, 20(12): 1830-1840. (in Chinese)
- [38] 孟玉婧. 基于 CMIP5 和 RegCM4 模式的内蒙古气候变化模拟评估及未来 RCPs 情景预估 [J]. *内蒙古气象*, 2021(2): 3-8.
- [39] 张煦庭. 中国温带地区草地植被动态时空特征及其对气候变化的响应 [D]. 北京: 中国农业大学, 2018.