

# 近 20 年内蒙古干旱时空动态及其对气候、蒸散发变化的响应

汪士为

(湖北汽车工业学院, 湖北 十堰 442002)

**摘要:**为实现对内蒙古旱情的动态连续监测,基于温度植被干旱指数(Temperature Vegetation Dryness Index, TVDI),采用趋势分析、R/S分析方法,探究了内蒙古 2001—2020 年 TVDI 时空变化特征及降水、气温、蒸散发对 TVDI 的影响。结果表明:(1) 20 a 间内蒙古 TVDI 以每年 0.000 9 速率减小,且在 2007 年、2010 年和 2013 年大范围出现重旱。春、夏、秋、冬季 TVDI 分别以每年 0.000 5, 0.001 8, 0.001 3, 0.000 07 速率减小。(2) 春、夏、冬季未来一段时间大部分区域 TVDI 将呈增加趋势,秋季大部分区域将呈减小趋势。(3) 春、夏、秋季 TVDI 与降水和气温均以负相关为主;冬季 TVDI 与气温、降水均以正相关为主。春、冬季 ET 与 TVDI 为正相关性;夏季 TVDI 与 ET 从西南向东北相关性从正逐渐过渡为负;秋季 TVDI 与 ET 以负相关为主。研究表明近 20 a 内蒙古干旱程度有所缓解,但未来干旱程度减缓趋势变小或增加。因此,后期研究应进一步分析月尺度干旱、蒸散发的时空动态,对进一步测量和预测季节性蒸散发和干旱如何联合影响内蒙古生态环境和经济发展具有重要意义。

**关键词:** TVDI; 气温; 降水; 蒸散发; 内蒙古

**中图分类号:** S342.1

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1005-3409(2022)04-0231-09

## Spatial and Temporal Dynamics of Drought in Inner Mongolia in Recent 20 Years and Its Response to Seasonal Climate and Evapotranspiration

WANG Shiwei

(Hubei University of Automotive Technology, Shiyan, Hubei 442002, China)

**Abstract:** In order to realize the dynamic and continuous monitoring of drought in Inner Mongolia, based on the temperature vegetation drought index (TVDI), trend analysis and R/S analysis methods were used to explore the spatiotemporal distribution characteristics of TVDI in Inner Mongolia from 2001 to 2020, and the influence of precipitation, temperature and evapotranspiration on the change of TVDI. The results show that: (1) TVDI decreased at a rate of 0.000 9 per year, and severe drought occurred on a large scale in 2007, 2010 and 2013; TVDI decreased at the rate of 0.000 5, 0.001 8, 0.001 3 and 0.000 07 per year in spring, summer, autumn and winter, respectively; (2) in spring and summer, TVDI will increase in most areas of Inner Mongolia in the future; in autumn, TVDI will decrease in most pixels in a period of time; in winter, TVDI will increase in the future; (3) in spring, summer and autumn, TVDI was negatively correlated with precipitation and temperature, while in winter, TVDI was positively correlated with precipitation and precipitation; in spring and winter, the correlation between ET and TVDI was significantly positive; in summer, the correlation between ET and TVDI gradually transited from positive correlation to negative correlation from southwest to northeast; in autumn, the correlation between ET and TVDI was consistent in spatial distribution, with negative correlation as the main correlation. These research results indicate that the drought degree in Inner Mongolia has eased in recent 20 years, but the trend of drought degree slowing down will become smaller or increase in the future. Therefore, the upcoming research should further analyze the temporal and spatial

收稿日期: 2021-05-11

修回日期: 2021-06-15

资助项目: 国家自然科学基金重点项目“花岗岩风化岩土体特性的地带性分异及崩岗形成机理研究”(41630858)

第一作者: 汪士为(1987—), 男(满族), 吉林长春人, 博士, 讲师, 主要从事旅游景区开发与管理研究。E-mail: wangshiwei2021@126.com

dynamics of monthly drought and evapotranspiration, which is of great significance for further measuring and predicting how seasonal evapotranspiration and drought jointly affect the ecological environment and economic development of Inner Mongolia.

**Keywords:** TVDI; temperature; precipitation; evapotranspiration; Inner Mongolia

地处干旱半干旱区内蒙古地区作为我国重要的以畜牧业和旱作农业为主的农业区,因其独特的自然和资源条件,东部、中部和西部干旱分布特征存在较大差异<sup>[1]</sup>。近年来,因气候变暖导致极端低温事件减少,极端高温事件与降水事件的逐渐增加,使土地退化、干旱事件的频繁发生成为 21 世纪严重影响内蒙古地区草原和农业生态系统环境、草原畜牧业和旱作农业经济的健康持续发展的最复杂挑战之一<sup>[2,3]</sup>。因此,如何及时、准确、大范围监测和预测内蒙古旱情的发生和发展规律对内蒙古农业生产和生态环境治理具有重要指导意义。

传统的旱情监测主要通过地面观测站网获取,虽可得到较为精确的干旱数据,但数据代表性差、获取过程劳民伤财,获得的基于站点的数据已不能准确刻画大尺度范围内干旱的时空变化<sup>[4]</sup>。随着遥感技术的发展,不同时空分辨率的卫星数据成为大面积、动态监测的理想选择,目前已有诸多学者对基于遥感技术对内蒙古干旱进行了研究<sup>[5-8]</sup>。在内蒙古的干旱空间分布规律的研究中,有学者指出空间分布上整体表现为轻旱和中旱等级,但内蒙古干旱空间分异明显,西南部以轻旱为主,中部地区以中旱为主,大兴安岭以西的呼伦贝尔草原等地区旱情严重<sup>[6-9]</sup>。但其空间分布上存在明显的季节差异性,内蒙古全区春、冬季节主要以中、重和特旱为主,整体表现为西部和西南部地区干旱发生频率较低,但东部、北部和中部地区干旱发生频率相对较高;秋季中旱、中旱发生频率在空间分布上较为一致<sup>[7-11]</sup>;夏季各级别干旱发生频率在空间上无规律,主要受到气温和降水的影响<sup>[12]</sup>。在干旱的变化趋势研究中,有学者发现 1960—2015 年内蒙古地区的干旱发现内蒙古地区整体为干旱逐渐减轻趋势,四季均呈现为变湿趋势,春季表现最为显著,但 1976 年干旱趋势发生突变<sup>[8]</sup>。其中,20 世纪 70—80 年代的春旱年份发生概率远高于其他年份,表现为连年干旱,但近 10 a 的干旱频率明显减少<sup>[13]</sup>。但也有很多学者研究发现近 50 a 内蒙古东部和中部为干旱强度增强趋势,但增加不显著,西部总体表现为干旱呈不显著减弱趋势,尤其在阿鲁科尔沁旗东北部—霍林河一带旱情增加趋势最为严重,而阿荣旗和扎兰屯等农业生产地区旱情增加趋势不明显<sup>[12,14-15]</sup>。有学者对影响干旱的影响因子中发现在

21 世纪以来,随温度跃升,蒸发需求加剧,而降水量增加趋势减缓甚至微弱减少,这些因素可能导致了内蒙古地区的干旱程度呈持续增加趋势<sup>[16]</sup>。也有学者研究发现温度升高仅对温性荒漠草原类及温性草原化荒漠类的干旱程度具有显著影响,降水稀少对非荒漠型草地的干旱程度具有显著的影响<sup>[17]</sup>。贾元童等<sup>[16]</sup>选取地形、人文、经济等 19 个指标对内蒙古干旱脆弱性进行评价,发现第一产业 GDP 比例、人均可支配收入和第一产业从业人员的比例是使内蒙古地区的干旱脆弱性增加的主要因素。以上研究多以气象站点资料,“以点带面”分析新疆区域的干旱时空特征,很难精确描述大区域尺度或气象站点很少的区域的干旱情况。而遥感技术凭借具有客观、及时、覆盖面广、数据连续性强、能够将传统的测点方法扩展到整个区域的信息等优点,已被应用于干旱的研究中。温度植被干旱指数(TVDI)因考虑温度与植被指数双重特征,被证明可以有效地反映干旱特征<sup>[17-20]</sup>。但目前基于 TVDI 的干旱监测和评估研究中<sup>[11-15]</sup>,很少探讨未来干旱可能的持续状态的研究;关于气候变化对干旱影响的研究大部分是以年尺度的气候来分析,忽略了干旱对季节性气候的响应,而各个季节的温度和降水变化也对干旱产生重要的影响。

因此,研究基于 NASA 提供的 2001—2020 年的 MODIS 产品(包括 NDVI, LST, ET 数据),利用 Sen 趋势分析法、R/S 法、偏相关分析等方法对 2001—2020 年内蒙古地区干旱时空分布特征、变化趋势、未来变化趋势及蒸散发、季节性气候变化对干旱的影响进行分析,并分析不同土地利用类型下内蒙古地区的干旱变化特征。以期为深刻认识在气候暖干化的背景下,内蒙古地区干旱的时空动态,从而为合理利用水资源、农业产业结构调整及生态环境防治提供一定的理论依据。

## 1 研究区概况与研究方法

### 1.1 研究区概况

内蒙古地处中国北部边疆(33°24′—53°23′N, 97°12′—126°4′E),总面积达 118 万 km<sup>2</sup>,地形由东北向西南斜伸,呈狭长状。境内多数地区为高原型地貌区,海拔在 1 000 m 以上。区域所处纬度较高,高原面积大,距离海洋较远,边沿有山脉阻隔,大部分区域属于典型的温带大陆性干旱气候,是非季风气候影响的主要地

区,少部分属于温带季风气候,光热资源充足,年日照时数达 2 600 h 以上,降水量少而不匀,一般在 400 mm 以下,总的特点是春季气温骤升,多大风天气,夏季短促而炎热,降水集中,秋季气温剧降,霜冻往往早来,冬季漫长严寒,多寒潮天气<sup>[1,16]</sup>。境内既有典型的草原和农耕

区,又有相当比例的农牧交错带,也是我国重要的农畜产品生产基地<sup>[16]</sup>。因其特殊的地理位置、地形条件和干旱气候的影响,加之不合理的人为开垦利用,区域内生态环境极为脆弱,水土流失十分严重,是该区域主要的生态环境问题之一<sup>[14-15]</sup>(图 1)。

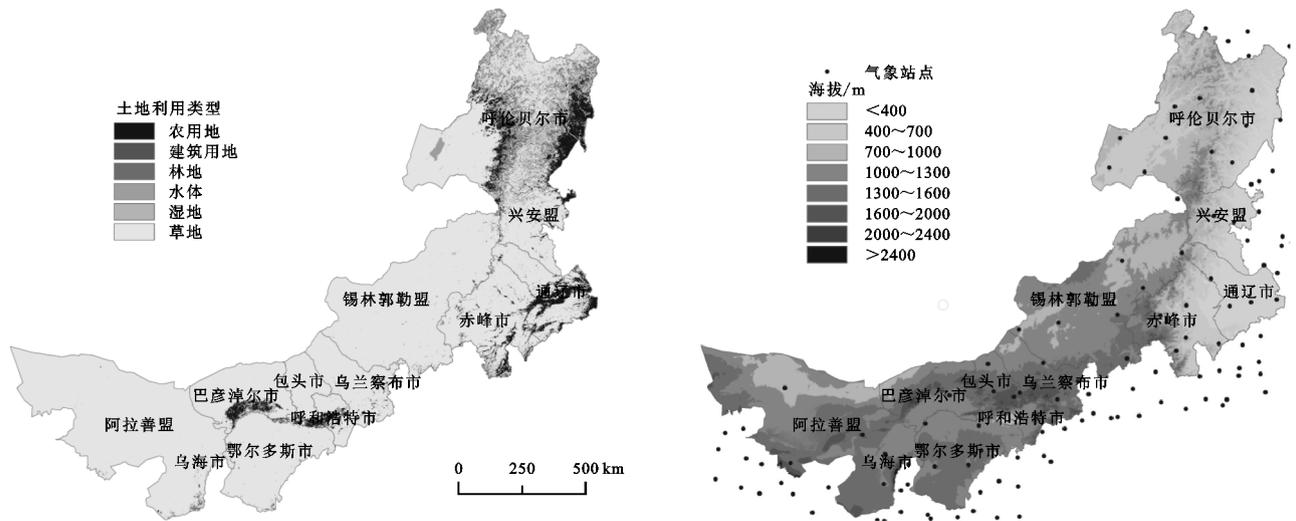


图 1 内蒙古土地利用类型、海拔及气象站点空间分布

## 1.2 数据来源与处理

NDVI 数据由 NASA(<https://ladsweb.modaps.eos-dis.nasa.gov/>) 网站所提供,采用 MODIS Reprojection Tools (MRT) 软件对下载的原始数据进行格式转换、投影转换、数据拼接、裁切等预处理,转换为 TIF 格式且坐标系为 WGS-84 坐标系。空间分辨率为 1 000 m,时间分辨率为 16 d,经过几何校正和大气校正的标准 3 级产品数据,数据经过 MVC 合成为月值。

地表温度数据(LST)源于 NASA 网站提供的 2001—2020 年的 MOD11A2 产品提供的空间分辨率为 1 km、时间分辨率为 8 d 的 LST 数据,该数据经过地形校正。

蒸散发数据(ET)源于 NASA 网站提供的 2001—2020 年的 MOD16A2 产品,空间分辨率为 500 m、时间分辨率为 8 d。

土地利用数据源于 NASA 网站提供的 MCD12Q1 产品,该产品是根据 IPGP 进行分类的全球产品,包括 17 种土地利用类型,土地覆盖数据重分类为林地、草地、湿地、农用地、建筑用地和水体。

DEM 数据由资源环境数据与平台网站(<http://www.resdc.cn/User>)提供,分辨率为 1 km。

温度和降水数据采用中国气象数据网(<http://data.cma.cn/data/cdcindex>)提供的月值数据,时间跨度为 2001—2020 年,得到研究区及周围的 130 个站点气象数据(图 1),最后利用专业气象插值软件 ANUSPLINE 将季节性气象数据插值为空间分辨率为 1 km 的栅格数据集。

## 1.3 研究方法

1.3.1 地表温度的地形订正 在不同的海拔高度下,地表温度会因气温和大气湍流的影响而又较大变化。当研究区内地形有明显起伏时在海拔高的地区,气温较低,地温也会较低,若不经高程订正,高程高区地表温度低,会造成对该区域土壤湿度的高估。在纬度跨度较大的情况下,气温随纬度的增加而降低,因此高维地区地表温度偏低,也会造成对研究区内土壤湿度的高估<sup>[21]</sup>。因此,地表温度数据(LST)需要使用 DEM 数据和纬度对其进行订正,订正公式如下。

$$T = T_s + aH + bL + c \quad (1)$$

式中: $T$  为经 DEM 订正后的地表温度值; $T_s$  为原始的地表温度值; $H$  为数字高程(DEM)值; $L$  为纬度; $a, b, c$  为订正系数,结合相关参考文献<sup>[21]</sup>,本文的  $a$  取值为  $-0.6/100^\circ\text{C}$ ,  $b$  取 0.941 1,  $c$  取 35.77。

1.3.2 温度植被干旱指数(TVDI) Price<sup>[22]</sup>、Sandholt 等<sup>[23]</sup> 研究发现植被覆盖度与土壤含水量之间的变化范围较大时,NDVI 与 LST 间构成的散点图是一个三角形。并在大量研究下提出了温度植被干旱指数(TVDI)的概念,指出 TVDI 是利用  $T_s$ -NDVI 特征空间提取的水分胁迫指标来估算陆面表层土壤水分的一种方法。TVDI 的计算公式为(2):

$$\text{TVDI} = \frac{T_s - T_{s_{\min}}}{T_{s_{\max}} - T_{s_{\min}}} \quad (2)$$

式中: $T_s$  为地表温度; $T_{s_{\max}}$  为最高地表温度; $T_{s_{\min}}$  为最低地表温度。干湿边方程可表示为(3)~(4):

$$T_{s_{\max}} = a_1 + b_1 \cdot \text{NDVI} \quad (3)$$

$$T_{s_{\min}} = a_2 + b_2 \cdot \text{NDVI} \quad (4)$$

式中:  $a_1, b_1, a_2, b_2$  分别为干湿边拟合方程的系数; NDVI 为归一化植被指数。

TVDI 的干旱等级参考吴黎<sup>[18]</sup>对 TVDI 干旱指标的划分标准和本研究区 TVDI 的分布特征,对研究区干旱等级分级,等级阈值见表 1。

表 1 土壤湿度干旱等级划分

| TVDI                        | 土壤水分状况          | 干旱等级 |
|-----------------------------|-----------------|------|
| $\text{TVDI} \leq 0.46$     | 地表湿润            | 无旱   |
| $0.46 < \text{TVDI} < 0.57$ | 土壤水分正常或近地表空气偏干  | 轻旱   |
| $0.57 < \text{TVDI} < 0.76$ | 土壤表面干燥,植被叶片缺水干黄 | 中旱   |
| $0.76 < \text{TVDI} < 0.86$ | 土壤出现干土层,叶片干黄    | 重旱   |
| $0.86 \leq \text{TVDI} < 1$ | 地表植物出现干枯死亡现象    | 特旱   |

1.3.3 干旱变化趋势分析 采用 Sen 斜率估计法分析 2001—2020 年内蒙古 TVDI 变化趋势和变化速率。Sen 斜率的计算公式为<sup>[24]</sup>:

$$\beta = \text{Median}\left(\frac{x_j - x_i}{j - i}\right), \forall j > i \quad (5)$$

式中:  $\beta$  为 TVDI 变化趋势; Median 为取中值函数; 当  $\beta > 0$  时, TVDI 呈增加趋势;  $\beta < 0$  时, TVDI 呈减小趋势。

1.3.4 气候变化持续性分析 Hurst 指数是根据长时间序列数据预测未来持续状态的一种指数,是一种定量表述时间序列信息长期依赖性的有效方法。因此,研究基于 Hurst 中的重标极差(R/S)分析法可以反映其变化趋势的持续性<sup>[25]</sup>。Hurst 值域介于[0,1],可以根据 Hurst 的大小判断 TVDI 时间序列是完全随机还是存在持续性。当  $\text{Hurst} > 0.5$ , 表示 TVDI 时间序列是一个持续性序列,即未来物候变化趋势与过去一致。如果  $\text{Hurst} = 0.5$ , 则说明 TVDI 序列为随机序列,与过去没有关系。当  $\text{Hurst} < 0.5$  则表明 TVDI 时间序列数据具有反持续性,即 TVDI 过去变化趋势与未来的变化趋势相反。TVDI 时间序列为  $A_i, i = 1, 2, 3, \dots, n$ , 对于任意正整数  $m$ , 定义该时间序列,具体公式见参考文献<sup>[25]</sup>。

1.3.5 TVDI 与气温、降水相关分析法 本研究采用相关分析法研究 TVDI 与 ET 和气候的关系,相关系数见计算公式(6)<sup>[14]</sup>:

$$r_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (6)$$

式中:  $r_{xy}$  为相关系数;  $n$  为年份数量;  $\bar{x}, \bar{y}$  分别为 TVDI 和气候 20 a 的平均值;  $(x - \bar{x})$  为 TVDI 的离差值;  $(y - \bar{y})$  为变量 ET/气候的离差值。

## 2 结果与分析

### 2.1 干旱时空分布特征

从内蒙古不同季节、全年近 20 a 的 TVDI 时间变化曲线可以发现:内蒙古 TVDI 整体表现为微弱的下降趋势,以 0.000 9 的速率下降( $p < 0.01$ )。其中在 2007 年、2010 年、2013 年 TVDI 的值明显高于其他年份,TVDI 值分别为 0.774 2, 0.779 3, 0.762 2, 根据干旱等级划分其属于重旱年份。在 2004 年、2015 年 TVDI 低于周围其他年份,总体波动程度较小, TVDI 基本在 0.75 附近上下波动。不同季节 TVDI 的变化特征各不相同:冬季干旱程度最大,均值基本集中在 0.9~0.95,属特旱等级,即地表植物出现干枯死亡现象,其波动性较小;夏季为干旱程度最小的季节, TVDI 值介于 0.5~0.6,属中旱等级,其在 2003 年、2010 年出现突变点,从中旱等级变为重旱等级;秋季和春季的 TVDI 趋势曲线与全年 TVDI 趋势曲线较为相近。冬季 TVDI 的增加速率为四季最小(减少速率为每年 0.000 07,  $R^2 = 0.002$ ),呈不显著的减小趋势,其在 2003 年、2010 年并未出现突变点;春季 TVDI 呈不显著的减小趋势,减小速率为每年 0.000 5,  $R^2 = 0.008 8$ ;秋季 TVDI 的减小速率为每年 0.001 3,  $R^2$  为 0.037 2,在 2010 年的 TVDI 异常增大,大于常年;夏季 TVDI 的减小速率最大(增长速率为每年 0.001 8,  $R^2 = 0.101 5$ ),变化较为明显。总体而言,内蒙古地区的 TVDI 均呈现出并不显著的减小趋势(图 2)。

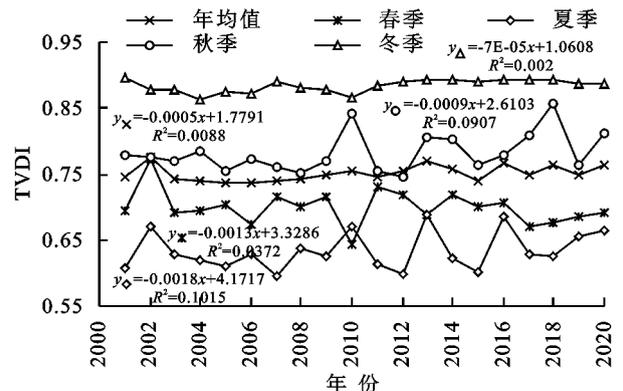


图 2 内蒙古 TVDI 的年度际变化趋势

20 a 间内蒙古 TVDI 的空间分布情况(图 3)发现 TVDI 呈现出从西南向东北逐渐减小的空间分布规律,即干旱程度在逐渐降低。TVDI 最大值区域主要为阿拉善盟,基本在 0.86 以上,属于特旱等级。TVDI 最小值集中在呼伦贝尔市, TVDI 基本集中在 0.57 以下,属于轻旱等级。结合图 1 的草地类型图和 DEM 可以发现在 TVDI 值较低的地区海拔较低,土地利用类型主要为林地覆盖区域,而在海拔较高的西北部地区,土地利用类型主要为草地, TVDI 值较高。从年际变化上来

看,2007年、2010年的TVDI属于特旱的面积明显大于其他年份,整个地区的TVDI较其他年份基本呈现明显增大趋势,尤其在兴安盟和锡林郭勒盟地区,

TVDI增加最为明显。干旱程度较小的主要为2012年、2013年、2018—2020年,TVDI除在阿拉善盟地区表现为特旱,其他地区均为轻旱或中旱。

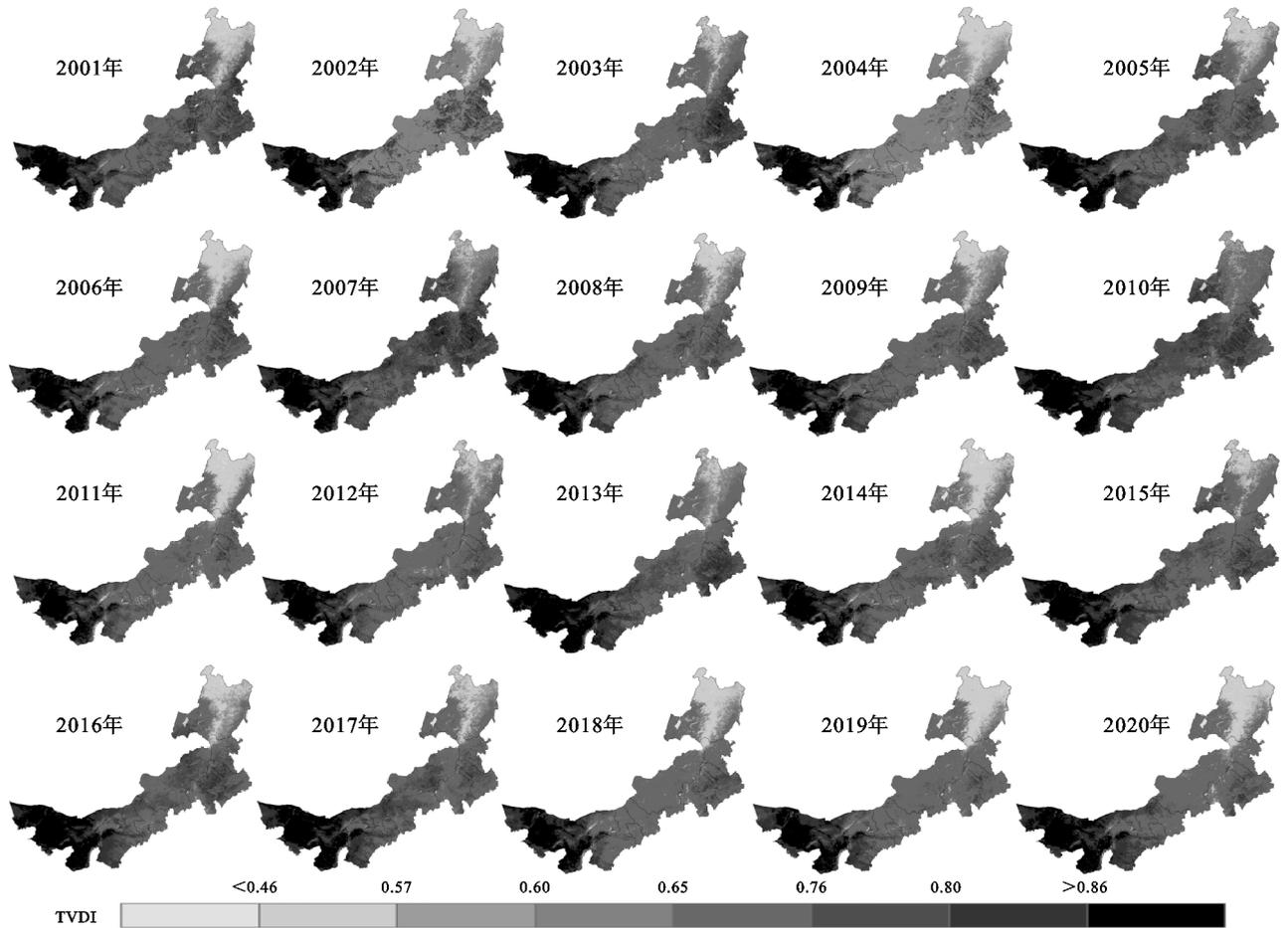


图3 2001—2020年内蒙古TVDI空间分布

## 2.2 干旱的空间变化趋势

从全年来看变化趋势空间分布来看(图4),内蒙古20a间整体以减小趋势为主( $p < 0.01$ ),减小速率集中在 $-2.5 \sim 0.0$ ,空间分布上呈现出从西南向东北差异,西南部主要以增加趋势(主要分布在阿拉善盟中部),从中部地区向西部地区TVDI的减小速率在逐渐增大。从不同季节变化趋势空间分布来看,内蒙古20a间春季TVDI以减小趋势为主( $p < 0.05$ ),每年减小速率集中在 $-2.5 \sim -0.5$ ,占内蒙古总面积的81.76%。TVDI呈显著增加趋势的区域集中在阿拉善盟、巴彦淖尔市、乌海市和鄂尔多斯市的部分地区,年增加速率集中在 $0 \sim 1.5$ ,占内蒙古总面积的13.89%,TVDI呈显著减小的区域集中在兴安盟和呼伦贝尔市。夏季TVDI变化速率以显著的减小趋势为主,呈显著增加的区域主要集中在阿拉善盟、巴彦淖尔市、乌海市、鄂尔多斯市和通辽市。秋季58.99%的像元表现为增加趋势,尤其在锡林郭勒盟以西地区,呈显著增加趋势;在锡林郭勒盟以东地区,

TVDI以显著减小趋势为主,减小速率集中在 $-0.5$ 以下。20a间内蒙古冬季TVDI大部分像元上表现为减小趋势,但在干旱程度较低的呼伦贝尔市的TVDI呈显著的增加趋势,增加速率高达1.5以上,而在其他地区以减小趋势为主。

为进一步探讨不同土地利用下内蒙古地区的TVDI变化趋势特征,统计土地利用下各个季节在不同变化速率等级下的像元百分比,发现不同土地利用下的TVDI的变化趋势差异性较大(图4)。从全年来看,5种土地利用类型的TVDI均以年变化速率为 $-2.5 \sim 0.0$ 为主,但草地覆盖区域的TVDI呈增加趋势的面积明显大于其他土地利用类型。林地的覆盖区域的TVDI呈增加趋势的像元占比为5.63%。从不同季节来看,春季、夏季的像元统计数除湿地外,与全年的较为相近,夏季在湿地区域主要以增加趋势为主;秋季的草地覆盖区域的TVDI以增加趋势为主的像元数明显多于全年的和其他三季的,但不同土地利用覆盖区域的差异较大;冬季整个内蒙古区域均以增

加趋势为主,即土壤水分明显在减少,但不同土地利用类型的像元数的差异较大。冬季 TVDI 在草地、农

用地、建设用和湿地覆盖区域以减小为主,但在林地地区以显著增加趋势为主。

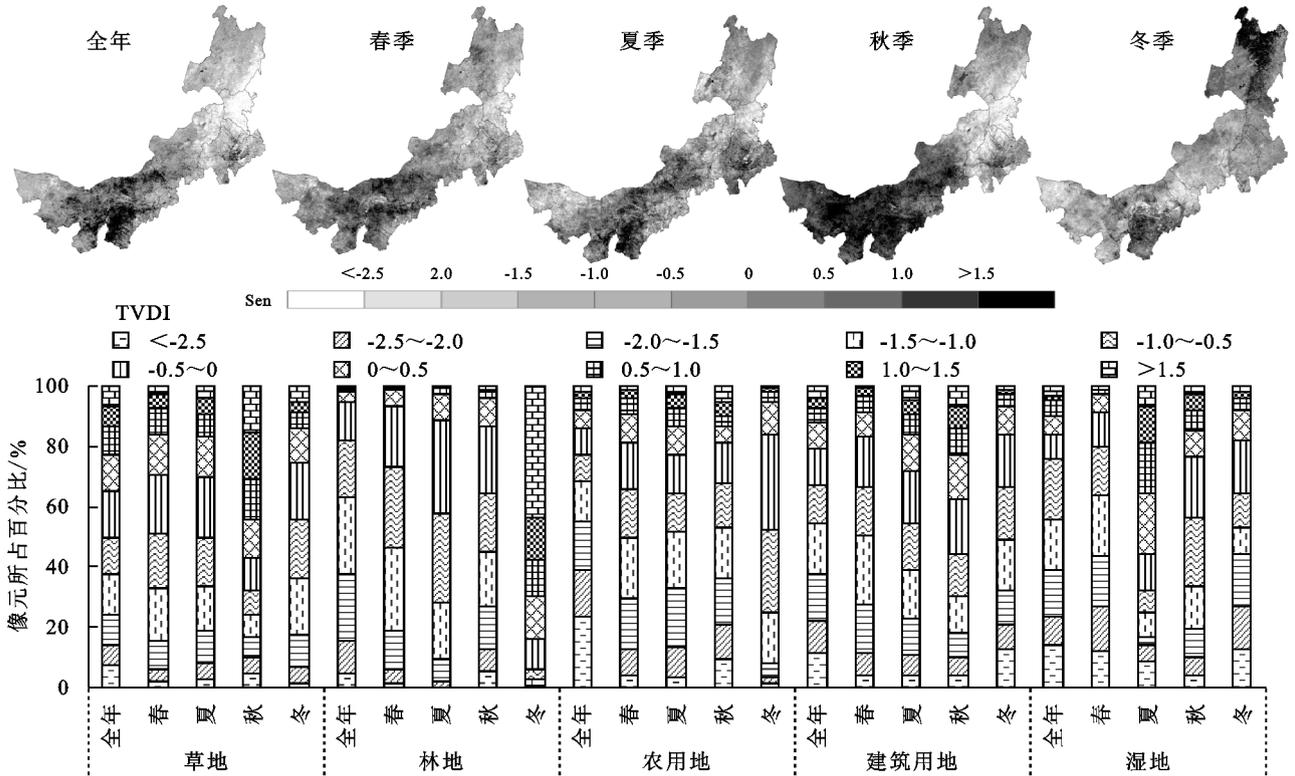


图 4 2001—2020 年内蒙古 TVDI 季节变化趋势及不同土地利用类型 TVDI 变化趋势

### 2.3 干旱变化的持续性分析

利用内蒙古 20 a 的 TVDI 计算 Hurst 指数,获得内蒙古年际、各个季节变化持续性空间分布(图 5),发现内蒙古 TVDI 未来变化趋势具有 Hurst 现象。从全年来看, Hurst 指数空间分布来看, Hurst 均值为 0.394 2,即未来一段时间内内蒙古 TVDI 变化趋势与 2001—2020 年的变化趋势表现为相反趋势,结合前面趋势分析结果表明未来一段时间内内蒙古大部分区域的 TVDI 将呈增大趋势。从不同季节来看,春季 Hurst 集中在 0.5 以下的像元占比为 93.12%,结合趋势分析发现内蒙古地区的 TVDI 在未来一段时间内可能会持续增大,且这种增加趋势较为明显;夏季 TVDI 的 Hurst 均值为 0.421 2,结合趋势分析表明未来夏季 TVDI 在一段时间内大部分像元数将呈增大趋势,但增大趋势不明显,呈较小区域的零星分布在阿拉善盟地区;秋季的 Hurst 均值为 0.455 2,大部分像元数的变化趋势与过去 20 a 的变化趋势相反,即未来一段时间秋季 TVDI 将呈减小趋势,尤其在锡林郭勒盟以西的地区,表现为减小趋势较为明显;冬季的 Hurst 为 0.487 9,未来一段时间的持续状态与过去 20 a 在大面积上呈现出相反趋势,即大面积表现为变旱趋势。总体而言,不同季节之间未来的变化趋势均与过去的趋势存在一定的关系。

统计不同季节、不同土地利用覆盖区域的 Hurst 指数均值发现(图 5):全年、春季草地覆盖区域的 Hurst 集中在 0.3~0.4 的区域占比较大,其次为夏季 >秋季 >冬季,即未来一段时间全年和春季的变旱程度较其他 3 个季节明显。林地覆盖区域 Hurst < 0.3 的占比明显高于草地,即未来一段时间的持续状态与过去相反的趋势较大,但秋季、冬季的与过去呈相反趋势的强度明显较春、夏、全年小很多。农用地、建设用地和湿地的 Hurst 指数在不同等级中的占比接近,秋冬两季与过去呈相反状态明显小于春、夏和全年。

### 2.4 干旱对气温、降水、蒸散发变化的响应格局

采用偏相关分析法对 TVDI 和不同季节降水、温度和蒸散发量分析发现(图 6):在控制气温的条件下 TVDI 与降水之间的关系为正负相关并存。就全年尺度来看,主要以负相关为主,即降水量增多, TVDI 增加,仅在乌海市的最南部零星分布正相关关心的像元。春季 TVDI 与降水之间的关系以负相关为主(即降水量增加, TVDI 降低),占总面积的 86.23%,相关系数主要集中在 -0.6~0.0。 TVDI 与降水呈正相关关系的集中在乌海市、包头市、乌兰察布市和赤峰市,相关系数在 0.1 以上;夏季 TVDI 与降水的偏相关关系以负相关为主,即 TVDI 随降水的增多而减小,尤

其在内蒙古高原地带,相关性较高。在乌海市和通辽市零星分布有呈正相关的像元。秋季 TVDI 与降水主要以负相关关系为主,尤其在兴安盟和呼伦贝尔市,相关系数达到 $-0.4$ 以下,相关性极高,而在锡林郭勒盟以西的内蒙古区其他市,降水与 TVDI 主要以

正相关关系为主。冬季 TVDI 与降水呈正相关、负相关的占比分别为 49.72%,50.28%,在内蒙古高原和呼伦贝尔市林地覆盖区域以极显著正相关关系为主,但在阿拉善盟以西的地区,TVDI 与降水主要以负相关关系为主。

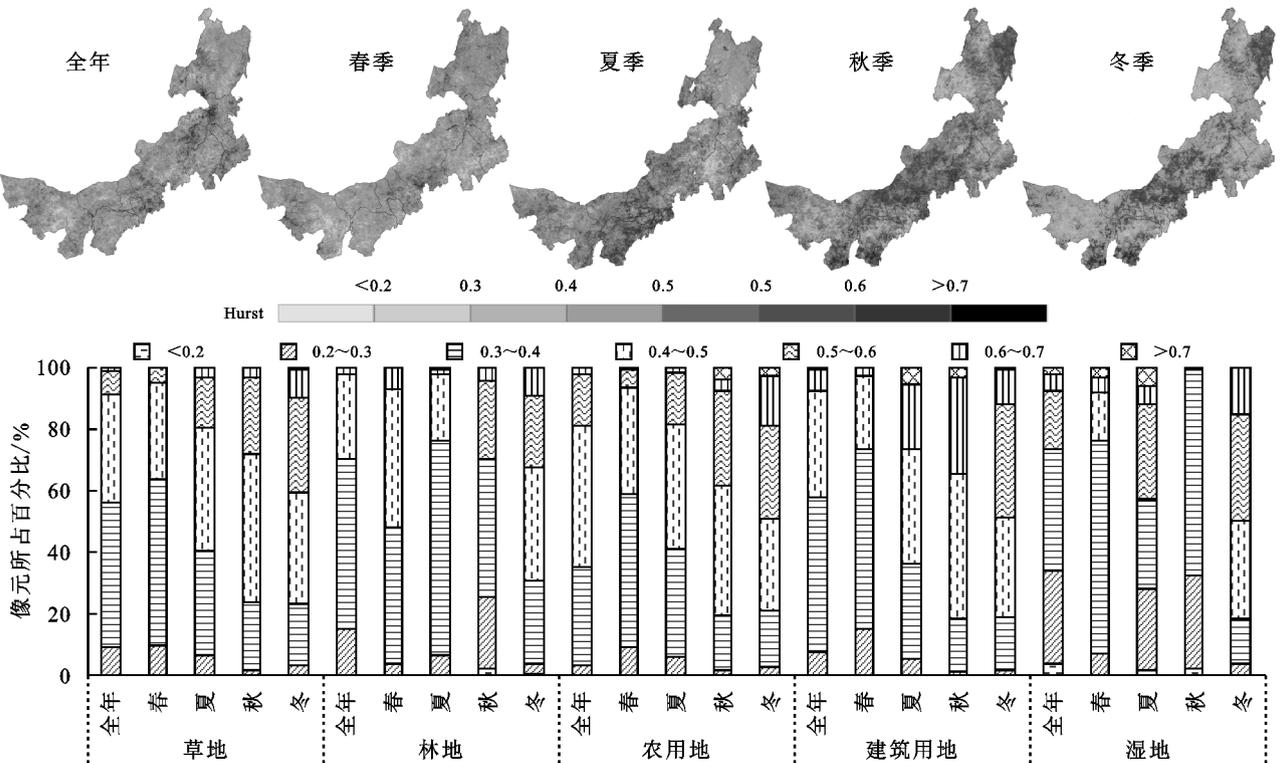


图 5 2001—2020 年内蒙古不同季节 Hurst 指数空间分布及不同土地利用类型 TVDI 变化趋势

在控制降水的条件下 TVDI 与气温之间的相关关系也为正负相关并存。全年气温与 TVDI 以负相关为主,即温度升高,TVDI 降低,空间差异较大。春季 TVDI 与气温以负相关关系为主,即温度升高会导致 TVDI 减小,但在阿拉善盟最西地区,以极显著正相关关系为主;夏、秋季两季 TVDI 与气温的相关性在空间分布上较为一致,主要以正相关关系为主,但在兴安盟地区 TVDI 与气温表现为负相关关系。冬季 TVDI 与气温表现为显著的正相关关系,正相关系数在 0.2 以上,相关性极高。

通过相关分析计算得到 TVDI 与蒸散发(ET)的空间分布,发现 ET 与 TVDI 在全年尺度主要以负相关关系为主。春季 ET 与 TVDI 表现为显著的正相关关系,且相关性极高;夏季 TVDI 与 ET 的相关性存在明显的地带性,从西南向东北相关性从正相关逐渐过渡为负相关,尤其在水资源较为丰富的兴安盟地区的负相关关系较为显著;秋季 TVDI 与 ET 的相关性在空间分布上表现较为一致;冬季 TVDI 与 ET 在大面积上表现为显著的正相关关系,及 ET 的增加会导致内蒙古地区的干旱程度加大。

## 3 讨论与结论

### 3.1 讨论

随着全球气候变暖、蒸散发增强的内蒙古的干旱化问题引起来广泛关注。为了遏制生态环境恶化,自 1998 年起,目前我国已经开展了一系列生态工程(如 2000 年的天然林保护工程、草原生态建设与保护工程、退耕还林还草、防风固沙等多项工程改善内蒙古生态环境建设。在这一系列的工程实施下,内蒙古的生态环境得到很好地改善,尤其是夏季的干旱程度明显得到防治,明显比未实施这一系列工程之前的干旱防治能力强很多<sup>[6]</sup>。但在实施水利工程、退耕还草政策实行之初,没有考虑到地区的气候、水文等自然因素,土地利用面积的大幅度变化使内蒙古部分地区土壤蒸发量加大,从而造成土地干旱程度增加,土壤干燥化现象受到普遍关注。本文通过研究 2001—2020 年内蒙古干旱,发现近 20 a 整体表现为干旱减轻趋,呈现出西部主要以增加趋势(主要分布在阿拉善盟中部),东部地区 TVDI 以减少速率为主,这一结论与程伟等<sup>[17]</sup>研究结果一致,但与那音太<sup>[7]</sup>基于 SPI 指数研究发现内蒙古东部和中部干旱程度增加,西部干旱程度减小的结论存在矛盾。究其

原因一方面可能是因为使用的不同干旱评价指标、同一指标的干旱等级划分依据和研究的时间段不同导致结论相反,如那音太<sup>[7]</sup>选择的是以气象站点资料的 SPEI 指数分析内蒙古的干旱时空特征,可能存在难以精确描述大区域尺度或气象站点很少的区域的干旱情况,而本研究使用的 TVDI 指数评估干旱程度是基于植被覆盖度和地表温度建立的指标,因此使结果存在差异。因此,不同评价指标对内蒙古干旱的监测结果存在差异,如本文的 TVDI 指数只考虑到了植被

覆盖度和地表温度两个因素,其他如局部地形因子、土壤条件和不同土地利用覆盖(如城镇用地存在不能保持水分,NDVI 指数偏低,进而导致 TVDI 值偏高的问题)等影响干旱状况发生的因子没有考虑。而 SPEI 指数是基于气象站点的降水数据建立,没有考虑到地表温度和植被覆盖情况。因此,在后期的研究中,因综合分析水文干旱指标、农业干旱指标和土壤干旱指标与 TVDI 的关系,并针对不同的土地利用类型选择合适的指标监测干旱程度。

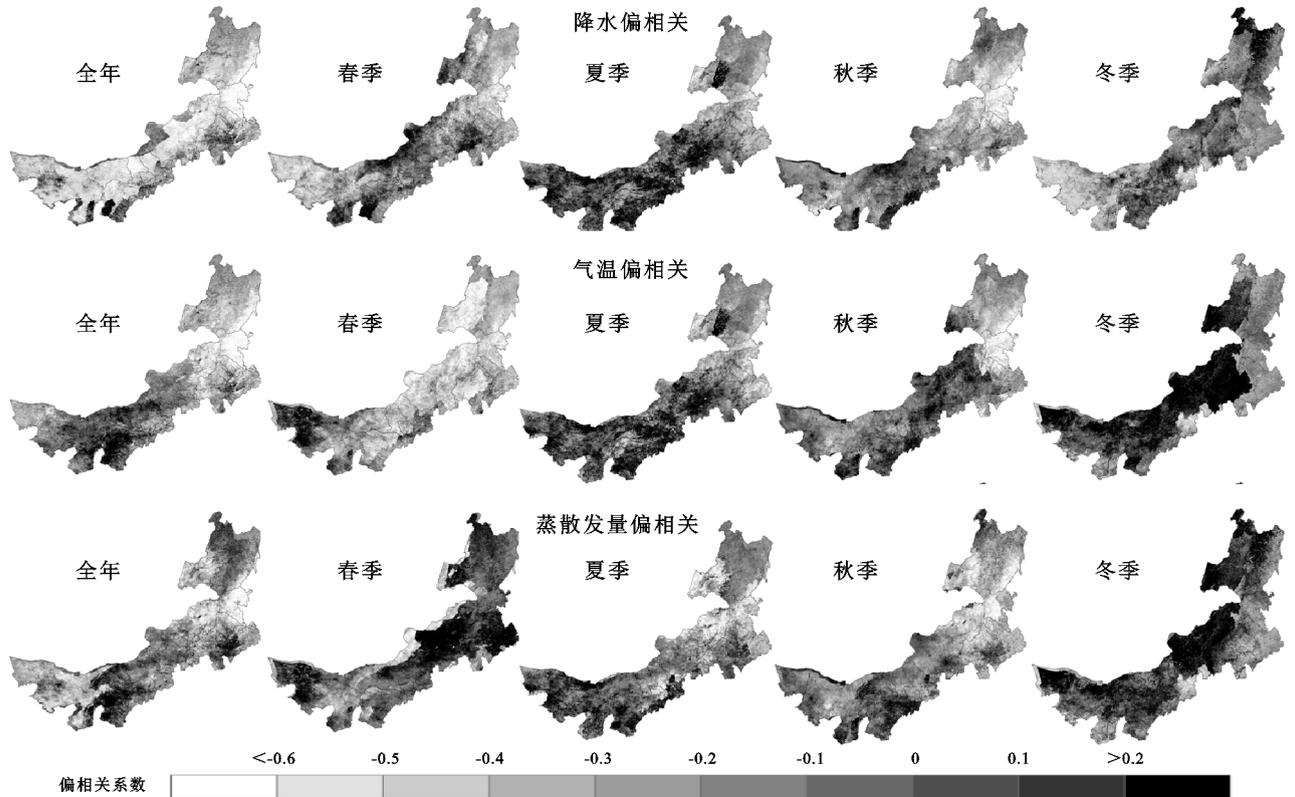


图 6 2001—2020 年内蒙古 TVDI 与气温、降水、ET 偏相关系数空间分布

本研究发现 2003 年、2010 年内蒙古出现大面积的干旱加重,据报道 2010 年夏季内蒙古降水量为 1961 年以来最少、气温为 1961 年以来最高,异常的高温少雨使内蒙古出现大面积的干旱,这一报道为本文研究提供了支持<sup>[26]</sup>。

但在未来一段时间内内蒙古干旱将以增加趋势变化,未来一段时间内阿拉善盟部分区域的干旱程度有所缓解。蒸散发与 TVDI 从年尺度看,以负相关关系为主,但不同季节差异性较大。春季和冬季 ET 与 TVDI 表现为显著的正相关关系;夏季 TVDI 与 ET 从西南向东北相关性从正相关逐渐过渡为负相关,尤其在水资源较为丰富的兴安盟地区的负相关关系较为显著;秋季 TVDI 与 ET 的相关性在空间分布上表现较为一致,以负相关为主。春冬季节 ET 与 TVDI 呈显著正相关关系,究其原因可能一方面是因为在春冬季节内蒙古地区降水较少,地表水源涵养量较少,

较大的蒸发会使地表干旱程度进一步加大。另一方面可能是因为内蒙古位于东亚夏季风影响区域边缘,其东南部降水量严重受到夏季风的制约,有研究<sup>[27]</sup>表明自 20 世纪 70 年代以来,东亚夏季风强度总体表现为显著减弱趋势,导致内蒙古、南部干旱呈不显著增加趋势;也可能是因为全球气候变暖,导致植被蒸腾作用加快,蒸散发增加,使土壤水分减少,抑制了植被(尤其是草地)的生长,使草地退化现象出现导致干旱程度加深。

### 3.2 结论

(1) TVDI 整体呈现出以呼伦贝尔市的 TVDI 值较小,基本集中在 0.57 以下,属轻旱等级,阿拉善盟和乌海市的 TVDI 基本在 0.86 以上,属特旱等级。

(2) TVDI 以每年 0.000 9 的速率不显著变小。春季 81.76% 的面积上 TVDI 呈现出减少趋势,减小速率为每年 0.5~2.5,夏季 TVDI 变化趋势以显著减

小趋势为主;秋季 58.99% 的像元上表现为增加趋势;冬季 TVDI 大部分像元上表现为减小趋势。

(3) 内蒙古未来一段时间内 TVDI 可能呈现出增加趋势。春、夏两季未来一段时间内内蒙古大部分区域的 TVDI 将呈增加趋势,秋季未来一段时间内 TVDI 将呈减小趋势,未来一段时间冬季 TVDI 将呈增加趋势。

(4) TVDI 与降水和气温以负相关为主,即降水量增多、气温上升,TVDI 减小。春、夏、秋季 TVDI 与降水以负相关为主,冬季 TVDI 与降水、气温以正相关为主。ET 与 TVDI 的相关性存在显著的季节差异,春、冬季 ET 与 TVDI 表现为显著的正相关关系,夏季 TVDI 与 ET 从西南向东北相关性从正相关逐渐过渡为负相关,尤其在水资源较为丰富的兴安盟地区的负相关关系较为显著;秋季 TVDI 与 ET 的相关性在空间分布上表现较为一致,以负相关为主。

#### 参考文献:

- [1] 戴尔阜,黄宇,吴卓,等.内蒙古草地生态系统碳源/汇时空格局及其与气候因子的关系[J].地理学报,2016,71(1):21-34.
- [2] 杨涛,陆桂华,李会会,等.气候变化下水文极端事件变化预测研究进展[J].水科学进展,2011,22(2):279-286.
- [3] 秦大河,丁一汇,王绍武,等.中国西部生态环境变化与对策建议[J].地球科学进展,2002,17(3):314-319.
- [4] 姚玉璧,张强,李耀辉,等.干旱灾害风险评估技术及其科学问题与展望[J].资源科学,2013,35(9):1884-1897.
- [5] 覃艺,张廷斌,易桂花,等.2000 年以来内蒙古生长季旱情变化遥感监测及其影响因素分析[J].自然资源学报,2021,36(2):459-475.
- [6] 周扬,李宁,吉中会,等.基于 SPI 指数的 1981—2010 年内蒙古地区干旱时空分布特征[J].自然资源学报,2013,28(10):1694-1706.
- [7] 那音太.基于 SPI 指数的近 50 a 内蒙古地区干旱特征分析[J].干旱区资源与环境,2015,29(5):161-166.
- [8] 张煦庭,潘学标,徐琳,等.基于降水蒸发指数的 1960—2015 年内蒙古干旱时空特征[J].农业工程学报,2017,33(15):190-199.
- [9] 韩志慧,刘小刚,郝琨,等.基于 SPI 指数的内蒙古地区干旱演变特征及趋势预测[J].排灌机械工程学报,2017,35(5):430-439.
- [10] 吴英杰,李玮,王文君,等.基于降水量距平百分率的内蒙古地区干旱特征[J].干旱区研究,2019,36(4):943-952.
- [11] 张宇瑾,于瑞宏,张笑欣,等.近 30 年内蒙古入湖流域干旱特征时空变化分析[J].水资源与水工程学报,2016,27(6):232-238.
- [12] 薛海丽,张钦,唐海萍.近 60 a 内蒙古不同草原类型区极端气温和干旱事件特征分析[J].干旱区地理,2018,41(4):701-711.
- [13] 白美兰,李金田,李喜仓,等.近 50 年内蒙古中东部地区春夏季干旱特征分析[J].干旱区资源与环境,2013,27(5):131-136.
- [14] 薛海丽,张钦,唐海萍.近 60 a 内蒙古不同草原类型区极端气温和干旱事件特征分析[J].干旱区地理,2018,41(4):701-711.
- [15] 韩志慧,小刚,郝琨,等.基于 SPI 指数的内蒙古地区干旱演变特征及趋势预测[J].排灌机械工程学报,2017,35(5):430-439.
- [16] 贾元童,崔骁勇,刘月仙,等.内蒙古自治区干旱脆弱性评价[J].生态学报,2020,40(24):9070-9082.
- [17] 程伟,幸晓平.基于 TVDI 的内蒙古草地干旱变化特征分析[J].中国农业科学,2020,53(13):2728-2742.
- [18] 吴黎.基于 MODIS 数据温度植被干旱指数干旱监测指标的等级划分[J].水土保持研究,2017,24(3):130-135.
- [19] 陈丙寅,杨辽,陈曦,等.基于改进型 TVDI 在干旱区旱情监测中的应用研究[J].干旱区地理,2019,42(4):902-913.
- [20] 黄静,张运,汪明秀,等.近 17 年新疆干旱时空分布特征及影响因素[J].生态学报,2020,40(3):1077-1088.
- [21] 沙莎,郭妮,李耀辉,等.我国温度植被旱情指数 TVDI 的应用现状及问题简述[J].干旱气象,2014,32(1):128-134.
- [22] Price J C. On the analysis of thermal infrared imagery: the limited utility of apparent inertia [J]. Remote Sensing of Environment, 1985,18(1):59-73.
- [23] Sandholt I, Rasmussen K, Andersen J. A simple interpretation of the surface temperature/vegetation index space for assessment of surface moisture status [J]. Remote Sensing of Environment, 2002,79(2/3):213-224.
- [24] 汪攀,刘毅敏.Sen's 斜率估计与 Mann-Kendall 法在设备运行趋势分析中的应用[J].武汉科技大学学报,2014,37(6):454-457,472.
- [25] 姜丽霞,王晾晾,吕佳佳,等.基于 Hurst 指数的黑龙江省作物生长季降水趋势研究[J].气象与环境学报,2020,36(2):70-77.
- [26] 陈廷芝,尤莉,古月,等.2010 年夏季内蒙古干旱高温成因分析[J].干旱区资源与环境,2012,26(1):88-92.
- [27] 丁一汇,司东,柳艳菊,等.论东亚夏季风的特征、驱动力与年代际变化[J].大气科学,2018,42(3):533-558.