

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

覃 艺¹, 张廷斌^{1,2}, 易桂花³, 魏澎湃¹, 杨 达¹

(1. 成都理工大学地球科学学院, 成都 610059; 2. 成都理工大学工程技术学院, 乐山 614000;

3. 成都理工大学管理科学学院, 成都 610059)

摘要: 为探讨内蒙古旱情状况及其影响因素, 利用MODIS 16 d合成的植被指数产品数据MOD13A2和8 d合成的地表温度产品数据MOD11A2构建Ts-NDVI特征空间, 计算温度植被干旱指数(TVDI), 基于内蒙古2000—2017年生长季每16 d的TVDI分析了近18年来内蒙古生长季旱情时空分布特征, 结合气温和降水资料初步探讨了旱情变化的影响因素。结果表明: (1)2000—2017年内蒙古生长季TVDI平均值为0.6, 重旱和中旱所占面积最大, 其中2007年、2010年为旱情最为严重的年份。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旱情严重。(2)近18年内蒙古生长季干旱程度呈现轻微加重趋势, 年际变化值 θ_{slope} 介于-0.07~0.7之间, 阿鲁科尔沁旗东北部至霍林河一带旱情加重趋势最为严重, 阿荣旗和扎兰屯等农业生产地区旱情有轻微加重趋势。(3)2017年内蒙古生长季以区域性和局域性干旱为主, 6月和9月干旱最为严重, 呼伦贝尔草原和鄂尔多斯高原西部干旱发生频率高且程度重。(4)内蒙古干旱影响因子分析结果表明, TVDI值与气温呈正相关、与降水和坡度呈负相关、与小于1300 m的高程呈正相关、与大于1300 m的高程呈负相关关系。内蒙古生长季TVDI与气温和降水偏相关分析结果表明, 锡林郭勒盟苏尼特左旗北部、呼伦贝尔鄂伦春自治旗和呼伦贝尔草原等地旱情与气温正相关关系较为显著($P<0.01$), 锡林郭勒盟东北部干旱情况与降水负相关关系较为显著($P<0.01$), 其中, 气温对旱情的影响强于降水。

关键词: 温度植被干旱指数(TVDI); 旱情; 气候因子; 遥感; 内蒙古

干旱是植物蒸腾作用和光合作用的限制因子, 干旱程度决定了植被的类型和结构, 是植被生长、植被恢复、土壤荒漠化的重要影响因素^[1,2], 同时也是陆地生态系统重要的输入因子, 干旱的时空分布对地—气热量和水文交换的影响十分重要^[3]。因此, 准确、快速地把握旱情时空变化格局对农业生产有着重要的指导意义^[4]。

传统的旱情监测主要通过地面观测站网获取, 受限于人力物力^[5]。相对于传统干旱监测方法, 遥感监测具有时效性强、监测范围广等优势, 已成为大面积、动态监测的主要途径^[6,7]。目前遥感干旱监测的方法主要分为土壤水分监测模型、植被指数干旱监测模型和植被指数—表面温度干旱监测模型。基于土壤水分的监测模型中常用热惯量法估算土壤水分^[8-10], 但此方法在植被覆盖情况下进行土壤水分评价存在很大限制。结合植被指数的干旱监测模型以冠层或叶片辐射温度信息作为旱情评价指标^[11,12], 根据植被指数评估相

收稿日期: 2019-05-30; 修订日期: 2019-09-27

基金项目: 国家自然科学基金项目(41801099, 41501060); 四川省教育厅自然科学重点项目(18ZA0042)

作者简介: 覃艺(1995-), 女, 重庆人, 硕士, 研究方向为生态环境遥感。E-mail: yiqin0110@163.com

通讯作者: 张廷斌(1978-), 男, 山东沂水人, 博士, 教授, 研究方向为资源与环境遥感。

E-mail: zhangtb@cdut.edu.cn

应区域的干旱程度,在几种常用的植被指数中应用较多的是归一化植被指数(Normalized Difference Vegetation Index, NDVI)。然而利用NDVI作为水分胁迫指标时,因植被自身的生长过程,干旱监测表现出一定的滞后性^[13,14]。植被指数—表面温度的干旱监测模型相较植被指数干旱监测模型而言,加入地表温度作为水分胁迫指标会表现出更高的时效性^[15],也能在一定程度上消除土壤背景的影响^[16]。Sandholt等^[17]基于NDVI和地表温度(Land Surface Temperature, LST)建立了Ts-NDVI特征空间,计算得到温度植被旱情指数(Temperature Vegetation Dryness Index, TVDI),可有效模拟土壤水分,在国内外已被广泛应用并得到了很好地验证。Patel等^[18]利用TVDI评估了印度亚湿润地区土壤水分状况,验证了TVDI与土壤水分之间存在显著负相关关系;Zormand等^[19]评价了垂直干旱指数、修正垂直干旱指数和温度植被干旱指数等遥感指标在伊朗东北部干旱监测中的应用,认为不同干旱指数在不同时间尺度上具有不同准确性。以草原畜牧业和旱作农业为主的内蒙古自治区(简称“内蒙古”)极易受到干旱的影响。高涛等^[20]研究发现自21世纪以来,内蒙古东部及东北部地区降水严重偏少;周扬等^[21]认为内蒙古近30年中以区域性干旱和局域性干旱为主,呼伦贝尔盟是年度干旱发生频率最高的地区;胡琦等^[22]基于气温和降水量数据发现近50年内蒙古降水有减少趋势,西部地区旱情比东部地区严重;张煦庭等^[23]基于降水蒸发指数分析了内蒙古55年干旱时空特征,认为内蒙古地区整体上呈西部干旱缓解、东部干旱加剧的趋势;薛海丽等^[24]认为自2000年后,多伦、锡林浩特、海拉尔和四子王旗4个内蒙古典型草原类型区域干旱事件发生频率显著增加。

前人对内蒙古长时间序列的年际干旱变化监测中,较多基于降水量数据,未考虑连续无降水日等诸多因素对干旱的影响。另外,在探讨内蒙古干旱及影响因素时,主要从气温、降水等气象因子方面考虑,少有涉及高程、坡度等地貌因子对干旱分布影响的研究。本文拟基于MODIS(Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer)产品数据MOD11A2 LST和MOD13A2 NDVI开展内蒙古2000—2017年植被生长季旱情监测,总结内蒙古TVDI时空分布变化特征,并从气象和地貌两个方面综合分析内蒙古干旱的影响因素,以期为当地旱灾防控提供参考。

1 研究方法与数据来源

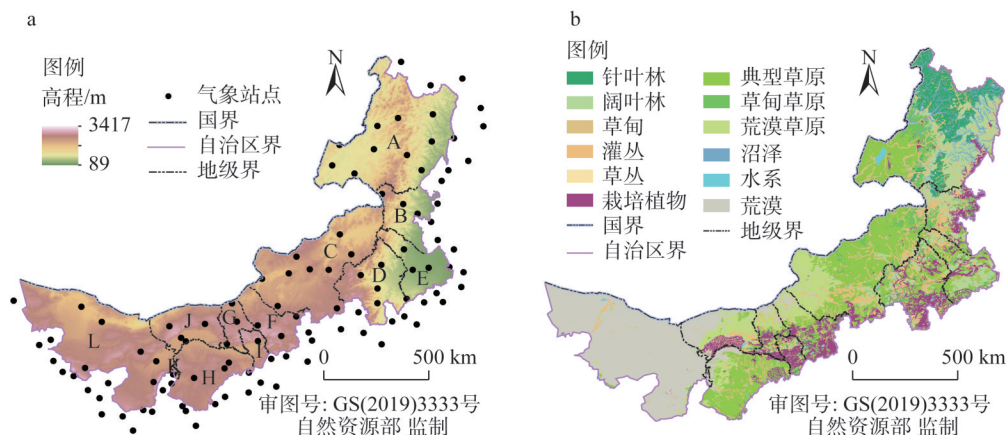
1.1 研究区概况

内蒙古位于我国华北地区(37°24′~53°23′N, 97°12′~126°04′E),总面积为118.3万km²,占全国总面积的12.3%^[25],其中海拔大多在800~1400 m之间(图1a),全区涵盖高原、平原、沙漠、山地、丘陵、河流、湖泊等地貌。内蒙古东西向经差29°,南北向纬差达16°,有“东林西矿、南农北牧”之称。从东向西,气候由半湿润逐步向半干旱、干旱气候类型过渡,其中分布着森林、草原、沙漠和荒漠(不作为本文研究区域)等多种自然生态景观(图1b),以及林牧交错带、农牧交错带和旱作等特色农牧业生态系统,是我国最大的草原牧区^[26,27]。

1.2 数据来源与数据预处理

1.2.1 NDVI和LST数据

研究数据来源于美国国家航空航天局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)发射的地球观测系统(Earth Observing System, EOS)系列卫星上搭载的



注：A-呼伦贝尔，B-兴安盟，C-锡林郭勒盟，D-赤峰，E-通辽，F-乌兰察布，G-包头，H-鄂尔多斯，I-呼和浩特，J-巴彦淖尔，K-乌海，L-阿拉善盟；本图基于自然资源部标准地图服务系统下载的标准地图制作，底图无修改，下同。

图1 研究区DEM、气象站点分布和植被类型划分

Fig. 1 DEM, distribution of meteorological stations and vegetation types in the study area

MODIS 1 km空间分辨率数据，包括地表温度数据MOD11A2 LST（时间分辨率为8 d）和归一化植被指数数据MOD13A2 NDVI（时间分辨率为16 d），数据时相覆盖2000—2017年5-9月，研究区涉及h25v03、h26v03、h25v04、h26v04、h27v04、h25v05和h26v05七个影像分带。两种数据产品均包含数据质量控制文件（QC），表示了不同地区不同时期LST产品和NDVI产品质量的可靠性。2000—2017年LST_QC、NDVI_QC数据统计结果表明，2000—2017年内蒙古区域LST和NDVI数据质量中、高等级年均可信度均在98%以上，研究区数据整体质量较好。本文剔除了反演失败和可信度较低的像元，然后借助MRT（MODIS Reprojection Tools）工具对MOD11A2和MOD13A2数据进行拼接、裁剪、重投影等预处理，然后对MOD11A2数据采用平均值合成方法^[28]，得到研究区空间分辨率为1 km、时间分辨率为16 d的LST和NDVI数据集。

内蒙古海拔较高，大多数地区海拔在1000 m以上，由东自西，地表起伏明显，气温差异大，地表温度受高程影响显著，需对LST数据采用DEM（Digital Elevation Model）进行高程订正^[29]，订正方法为：

$$T_{S1} = T_{S2} + a \times \text{DEM} \quad (1)$$

式中： $a=0.6\%$ ； T_{S1} 为订正后地表温度（℃）； T_{S2} 为订正前地表温度（℃）；DEM为高程（m）。

由于确定干边和湿边是以NDVI固定步长区间查询的最大最小LST拟合而得，而LST数据未能完全消除云和噪声等因素的影响，可能会导致获取的最大最小LST不能得出正确的干湿边方程，因此通过对LST进行频率统计界定合适的阈值，舍弃频率过低的离散点，以提高后期TVDI拟合精度。

1.2.2 DEM数据

DEM来源于地理空间数据云（<http://www.gscloud.cn>）的ASTER GDEM V2数据，空间分辨率为30 m，经过坏值处理、拼接、裁剪等预处理工作后，将DEM空间分辨率重采样为1 km，以用于空间插值等后续数据处理工作。综合考虑像元空间分辨率和地表温度垂向特征的影响，以200 m为间隔，将内蒙古地区分为<300 m、300~500 m、500~

700 m、700~900 m、900~1100 m、1100~1300 m、1300~1500 m、1500~1700 m、1700~1900 m、1900~2100 m和>2100 m等11个高程区间。基于DEM数据在ArcGIS软件平台提取研究区坡度数据,并以1°为间隔共分为<1°、1~2°、2~3°、3~4°、4~5°、5~6°、6~7°、7~8°、8~9°、9~10°、10~11°和>11°等11个坡度区间,用于后续研究。

1.2.3 气象数据

采用的气象数据包括内蒙古及其周边共110个气象站点的月平均气温(°C)和降水量(mm)数据,数据来源于中国气象局气象数据中心(<http://data.cma.cn>)。由于气温具有海拔敏感性,为提高气温数据空间插值的准确性,选用ANUSPLIN气象插值软件对年平均气温进行插值处理^[30]。累积降水量采用克里金插值方法处理^[31]。平均气温和累积降水量插值空间分辨率与LST和NDVI数据空间分辨率及空间参考保持一致。

1.3 研究方法

1.3.1 TVDI计算方法

对于地貌情况复杂的内蒙古,干旱的反演因同时受到了土壤水分和植被覆盖率的影响而变得困难。就辐射率固定的裸土而言,地表温度的高低决定了其水分蒸发速率;就植被覆盖区而言,土壤水分含量与地表温度之间不存在直接关系,但当土壤水分含量不能满足潜在蒸散时,植被冠层为抑制进一步蒸散而温度升高,从这个角度看,冠层温度能间接反映土壤水分含量^[32]。地表温度和植被指数散点图中,散点基本呈三角形^[33]或梯形^[34]分布,Sandholt等^[17]利用简化的Ts-NDVI特征空间提出了TVDI,图2a中A点表示为干燥裸土,B点表示为湿润裸土,C点表示为湿润密闭冠层。

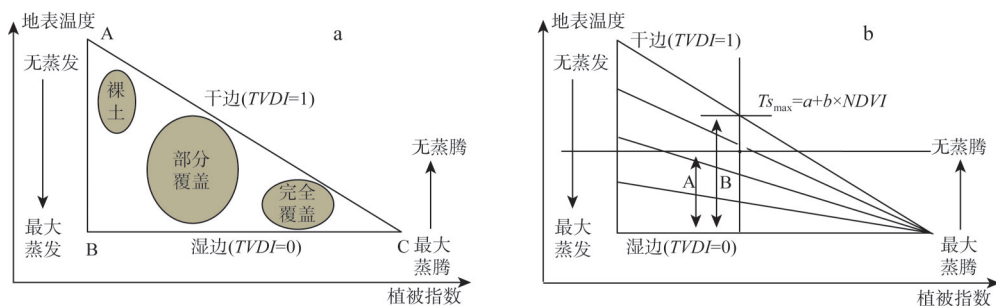


图2 植被指数与地表温度特征空间和TVDI原理示意^[17]

Fig. 2 Vegetation index and surface temperature space and definition of the TVDI

图2b中的A表示式(2)中的分子($T_s - T_{s_{\min}}$),代表某一像元与相同植被覆盖情况下最湿像元的温度差;B表示式(2)中的分母($T_{s_{\max}} - T_{s_{\min}}$),代表在一定植被覆盖条件下最大温度差。特征空间内的斜线可看作TVDI相同的等值线,TVDI自下而上升高,斜率绝对值大的相对于斜率绝对值小的较为干旱,因此,在一定面积区域拟合出其特征空间的干、湿边,即可得到每个像元的干旱指数。

据此,Sandholt等^[17]定义的TVDI表示为:

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

式中: T_s 为地表温度(°C); $T_{s_{\max}}$ 为给定NDVI值下的最大地表温度(°C); $T_{s_{\min}}$ 为相对应地表温度的最小值(°C);TVDI值为温度植被干旱指数,TVDI值越大,则土壤含水量

越低,旱情越严重。干、湿边的拟合方程为:

$$\begin{aligned} Ts_{\max} &= a + b \times NDVI \quad (\text{干边方程}) \\ Ts_{\min} &= c + d \times NDVI \quad (\text{湿边方程}) \end{aligned} \quad (3)$$

式中: a 、 b 、 c 、 d 分别为干、湿边的线性拟合方程系数。

拟合干、湿边时首先将 $NDVI$ 值域划分为间隔为 0.01 的区间,以每个节点为缓冲中心,分别向前、向后取 0.005 作为一个区间,并在该区间查询 LST 的最大值和最小值。然后,将 $NDVI$ 的节点值序列作为自变量, LST 在节点区间的最大值和最小值序列为因变量进行一元线性回归拟合,得到干边和湿边方程,最后根据式 (2) 计算出每个像元的 $TVDI$ 值。本文 $TVDI$ 分级采用适用于干旱半干旱区的干旱等级划分标准^[35-37] (表1)。

表1 $TVDI$ 干旱等级划分标准

Table 1 Standard for classification of drought grades

| $TVDI$ 范围 | 干旱等级 | 干旱影响程度 |
|------------|------|---------------------|
| [0, 0.4] | 正常 | 地表湿润或正常, 无旱象 |
| (0.4, 0.6] | 轻旱 | 地表蒸发量较小, 近地表空气干燥 |
| (0.6, 0.8] | 中旱 | 土壤表面干燥, 地表植物叶片有萎蔫现象 |
| (0.8, 1] | 重旱 | 土壤出现较厚的干土层, 植物干枯、死亡 |

1.3.2 趋势分析法

对 $TVDI$ 数据逐像元计算其平均值, 得到研究区 18 年平均 $TVDI$ 的空间分布图。

采用趋势分析法分析 2000—2017 年的 $TVDI$ 年均值的变化趋势^[38], 计算公式为:

$$\theta_{\text{slope}} = \frac{n \times \sum_{i=1}^n (i \times TVDI_i) - \sum_{i=1}^n i \sum_{i=1}^n TVDI_i}{n \times \sum_{i=1}^n i^2 - (\sum_{i=1}^n i)^2} \quad (4)$$

式中: n 为研究时序的年数 ($n=18$); $TVDI_i$ 为某像元第 i 年的 $TVDI$ 均值; θ_{slope} 为该像元 $TVDI$ 年际变化斜率, θ_{slope} 大于零时 $TVDI$ 为增大趋势, 则旱情加重, 反之表示旱情减轻。

1.3.3 相关分析法

本文采用相关分析法研究 2000—2017 年生长季内蒙古 $TVDI$ 与气候因子 (平均气温和累积降水量) 的关系, 通过相关系数判断二者关系的密切程度, 计算偏相关系数^[39]得到不同气候因子对 $TVDI$ 的影响程度, 并采用 t 双侧检验法对偏相关系数的显著性进行检验, 具体相关公式见张景华等^[40]文献。

2 结果分析

2.1 内蒙古植被生长季 $TVDI$ 计算

2.1.1 Ts - $NDVI$ 特征空间的构建

通过提取不同 $NDVI$ 节点下像元对应的最大地表温度和最小地表温度, 得到内蒙古地区 2000—2017 年生长季每 16 d 的 Ts - $NDVI$ 特征空间分布。以 2017 年生长季 (5 月 9 日至 9 月 13 日) 的 Ts - $NDVI$ 特征空间为例 (图 3), 可以看出, 在 Ts - $NDVI$ 特征空间的干边上, Ts_{\max} 的散点大致分为 $0.2 < NDVI < 0.8$ 和 $0.8 < NDVI < 1$ 两部分。当 $0.2 < NDVI < 0.8$ 时, Ts_{\max} 随 $NDVI$ 增大而减小, 且 $NDVI$ 和 Ts_{\max} 之间的线性关系显著 ($0.876 < |r| < 0.971$); 当 $0.8 < NDVI$

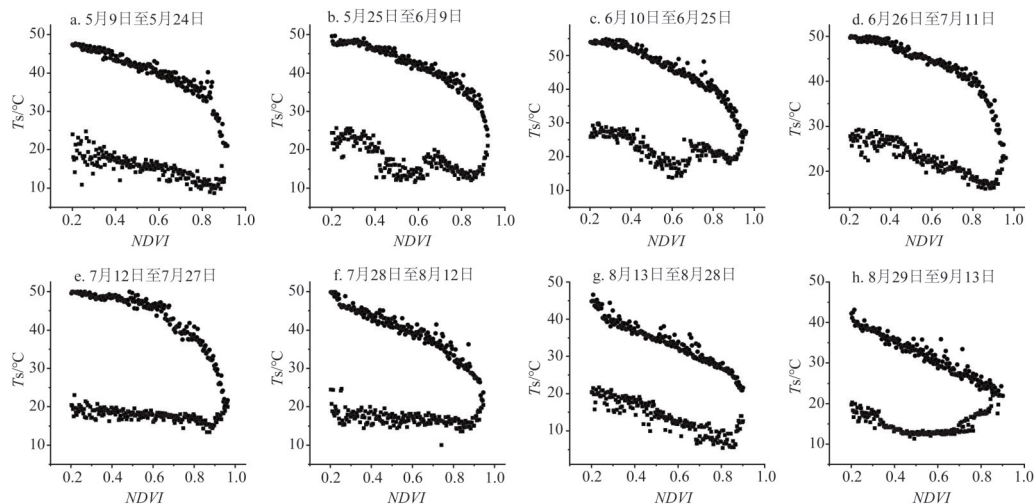


图3 2017年内蒙古植被生长季(5月9日至9月13日)每16 d的 T_s - $NDVI$ 特征空间

Fig. 3 The T_s - $NDVI$ space of Inner Mongolia growing season (9 May-13 September) every 16 days in 2017

$VI < 1$ 时, $T_{s_{max}}$ 散点明显偏离干边的主轴, 降幅较前段明显增大。

2.1.2 T_s - $NDVI$ 特征空间干湿边的确定

利用 T_s - $NDVI$ 特征空间中地表温度的最大值和最小值, 通过回归分析计算干边和湿边方程。干边和湿边方程分段特征明显 (图3), 需选择合适的像元以提高干、湿边回归方程拟合精度。由于 $NDVI < 0$ 的地表主要为水系、冰川、云或雪, 可认为其土壤水分含量为 100%; 当 $0 < NDVI < 0.2$ 时, 地表基本为裸土, 因植被覆盖度很低, $NDVI$ 值很难指示该区植被长势状况; 当 $NDVI > 0.8$ 时, $NDVI$ 呈饱和状态, 对植被覆盖变化的敏感性下降^[41,42]。有研究表明, 植被生长初期 $NDVI$ 对植被覆盖度的估计过高, 而在植被生长后期 $NDVI$ 会过低估计植被覆盖度^[43]。因此, 在拟合干、湿边方程时, 不考虑 $NDVI$ 值小于 0.2 和 $NDVI$ 值大于 0.8 的像元。

以 2017 年内蒙古生长季为例, 从 T_s - $NDVI$ 特征空间线性拟合的效果来看 (表 2), 干边方程线性拟合效果较好。式 (3) 中 a 和 c 分别为干、湿边线性回归方程的常数项, 在 T_s - $NDVI$ 特征空间中的几何意义分别为干、湿边在 Y 轴的截距, 其生态学意义是裸土像元在土壤含水量过饱和时和土壤含水量不足时的地表温度值^[44]。可明显看出干、湿边截距随季节变化发生相应改变, 5 月温度相对较低, 截距较小, 干边截距小于 55, 湿边截距小于 23; 在 6 月、7 月温度较高时, 干边截距大于 55, 湿边截距大于 23; 8 月下旬后干边截距小于 50, 湿边截距小于 25。在干、湿边斜率的时间变化趋势上, 由于受到风速、日照、人工灌溉等多种因素的影响, 斜率随时间变化无明显规律。

得到干、湿边方程后, 将各个像元的 $NDVI$ 值带入干、湿边方程计算出最大地表温度 ($T_{s_{max}}$) 和最小地表温度 ($T_{s_{min}}$), 即可根据式 (2) 计算对应像元 $TVDI$ 值。

2.2 内蒙古植被生长季 $TVDI$ 时空格局

2.2.1 植被生长季 $TVDI$ 年际变化特征

从内蒙古 $TVDI$ 年际变化值可知 (图 4a), 近 18 年内蒙古发生不同程度干旱, 各年 $TVDI$ 均值为 0.6, 说明内蒙古整体处于中旱或轻旱状态; $TVDI$ 值呈不规则波动变化, 峰值出现在 2007 年和 2010 年, 谷值出现在 2000 年、2003 年、2013 年和 2014 年。 $TVDI$ 值偏

表2 2017年内蒙古植被生长季每16 d *Ts-NDVI*特征空间的干、湿边方程

Table 2 The dry and wet edges in *Ts-NDVI* space estimated by linear regression in Inner Mongolia growing season in every 16 days in 2017

| 月份 | 时间 | 干边 | 湿边 |
|----|-------------|-------------------------|-------------------------|
| 5月 | 5月9日至5月24日 | $y = -26.465x + 54.683$ | $y = -12.199x + 22.049$ |
| | | $r = -0.900$ | $r = -0.779$ |
| 6月 | 5月25日至6月9日 | $y = -25.639x + 56.258$ | $y = -13.013x + 24.552$ |
| | | $r = -0.945$ | $r = -0.693$ |
| | 6月10日至6月25日 | $y = -32.321x + 64.381$ | $y = -9.692x + 27.831$ |
| | | $r = -0.945$ | $r = -0.562$ |
| 7月 | 6月26日至7月11日 | $y = -24.714x + 57.813$ | $y = -14.899x + 31.255$ |
| | | $r = -0.905$ | $r = -0.899$ |
| | 7月12日至7月27日 | $y = -29.536x + 60.236$ | $y = -3.873x + 20.038$ |
| | | $r = -0.884$ | $r = -0.574$ |
| 8月 | 7月28日至8月12日 | $y = -27.986x + 55.309$ | $y = -3.183x + 18.816$ |
| | | $r = -0.957$ | $r = -0.373$ |
| | 8月13日至8月25日 | $y = -27.573x + 48.844$ | $y = -19.422x + 24.205$ |
| | | $r = -0.971$ | $r = -0.881$ |
| 9月 | 8月26日至9月13日 | $y = -25.834x + 45.925$ | $y = 2.1045x + 14.033$ |
| | | $r = -0.977$ | $r = 0.152$ |

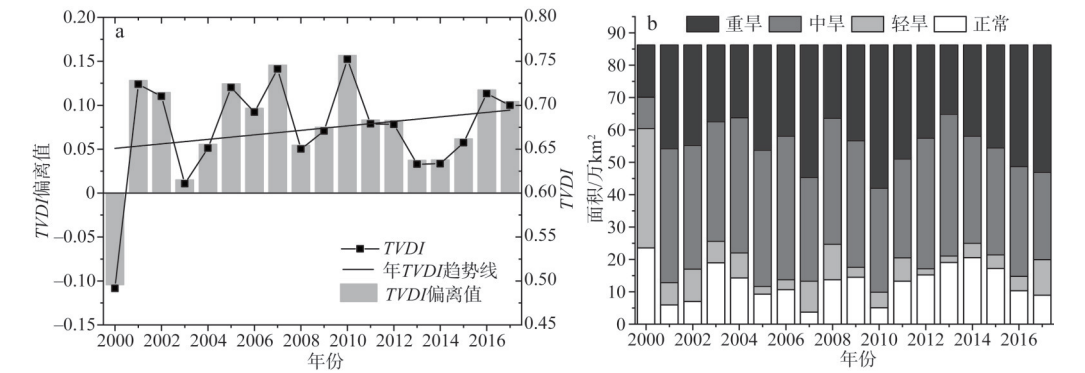


图4 2000—2017年内蒙古植被生长季 *TVDI* 年际变化和干旱程度分级面积变化
Fig. 4 Annual variations of *TVDI* and area change of drought degree during growing season in Inner Mongolia from 2000 to 2017

离均值 (0.6) 较大的年份为2001年、2005年、2007年和2010年 (比 *TVDI* 均值高0.12以上), 其中2010年 *TVDI* 值比 *TVDI* 均值高0.15。内蒙古干旱程度分级的面积变化 (图4b) 结果表明, 中旱所占面积比例最大, 其次为重旱。2000年内蒙古主要以正常区和轻旱区为主, 自2000年以后主要以重旱区和中旱区为主, 在2010年中旱和重旱面积达到最大, 2010年后中旱和重旱总面积略有减少。

2.2.2 植被生长季 *TVDI* 空间分布及变化情况

根据内蒙古2000—2017年 *TVDI* 的多年平均空间分布格局 (图5a), 内蒙古整体以干旱为主, 且干旱程度差异较为明显, 东北部地区旱情最为复杂, 各等级旱情均有体现; 西南部地区以轻旱为主, 中部以中旱为主。*TVDI* 高值区主要集中分布在呼伦贝尔草原、

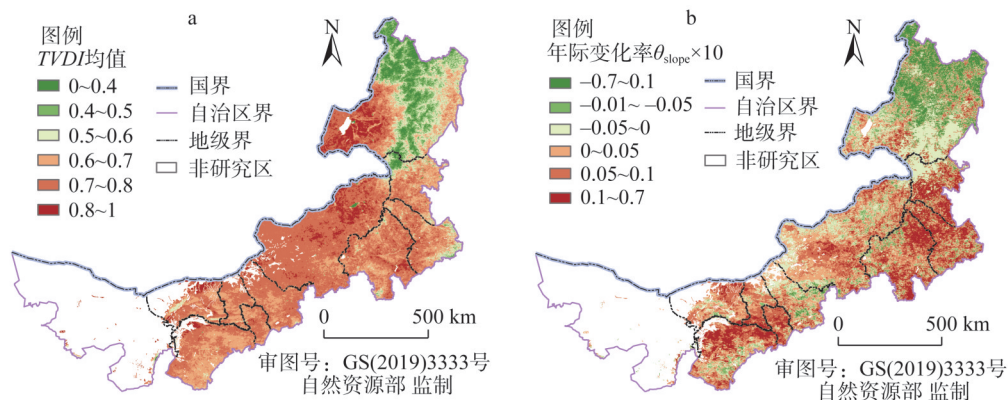


图5 2000—2017年内蒙古植被生长季年均TVDI、TVDI变化趋势

Fig. 5 The spatial distribution of mean TVDI and TVDI annual variability during growing season in Inner Mongolia from 2000 to 2017

锡林郭勒盟的乌兰盖高壁以及赤峰市的奈曼旗,其中大兴安岭以西的呼伦贝尔草原干旱尤为突出;低值区(0~0.4)主要集中分布在牙克石、根河等林地和山地;在内蒙古中部和西部区域的河套平原和鄂尔多斯高原旱情相对其他区域较轻。

内蒙古2000—2017年植被生长季TVDI平均值年际变化 θ_{slope} 介于-0.07~0.7之间(图5b),研究区旱情主要呈增加趋势(即 $\theta_{\text{slope}} > 0$)。旱情增加趋势明显的区域主要分布在兴安盟南部、通辽市、赤峰市和鄂尔多斯的库布齐沙漠,其中,鄂尔多斯高原北部旱情增加趋势最为严重,通辽市和赤峰市接壤处次之,阿荣旗和扎兰屯等农业生产地区旱情也有轻微加重趋势;内蒙古旱情呈减小趋势(即 $\theta_{\text{slope}} < 0$)的区域中呼伦贝尔北部、乌兰察布和兴安盟北部等地旱情有明显缓解,尤其以呼伦贝尔北部区域为典型代表,镶黄旗一带旱情亦有轻微减小趋势。

2.2.3 内蒙古2017年旱情监测结果分析

从历年监测结果来看,内蒙古自治区干旱分布差异大,以区域性和局域性干旱为主。2017年内蒙古自治区东部降水量偏少、气温偏高且持续时间较长^[45],本文以2017年为例,基于16 d时间尺度分析内蒙古旱情的空间变化特征(图6)。自2017年4月下旬,内蒙古东部出现中度干旱,后逐渐发展,到6月中旬至6月下旬内蒙古东部持续发展为重旱,7月干旱有所缓解,8月上旬内蒙古西南部旱情严重,8月下旬至9月下旬研究区的干旱程度有加重趋势,且面积不断扩大,基本覆盖除呼伦贝尔针叶林区外的全部研究区。空间上,2017年全区干旱频发的区域主要分布在呼伦贝尔草原、兴安盟、锡林郭勒盟以及鄂尔多斯等地,干旱程度较重的区域主要集中分布在锡林郭勒盟的道特淖尔周围和呼伦贝尔西部的呼伦贝尔草原,鄂尔多斯高原西部旱情亦较为严重,而鄂尔多斯高原东部至大青山南麓较同区干旱程度较弱。16 d时间序列干旱监测结果很好地呈现了内蒙古干旱的空间分异性,呼伦贝尔草原、兴安盟和鄂尔多斯高原等地干旱问题严重,应作为旱情监测重点区域,提前做好政策制定。

2.3 内蒙古植被生长季TVDI影响因子分析

2.3.1 TVDI影响因子的分段统计特征

选取高程和坡度作为TVDI的地貌影响因子,统计高程、坡度各个分段区间内TVDI

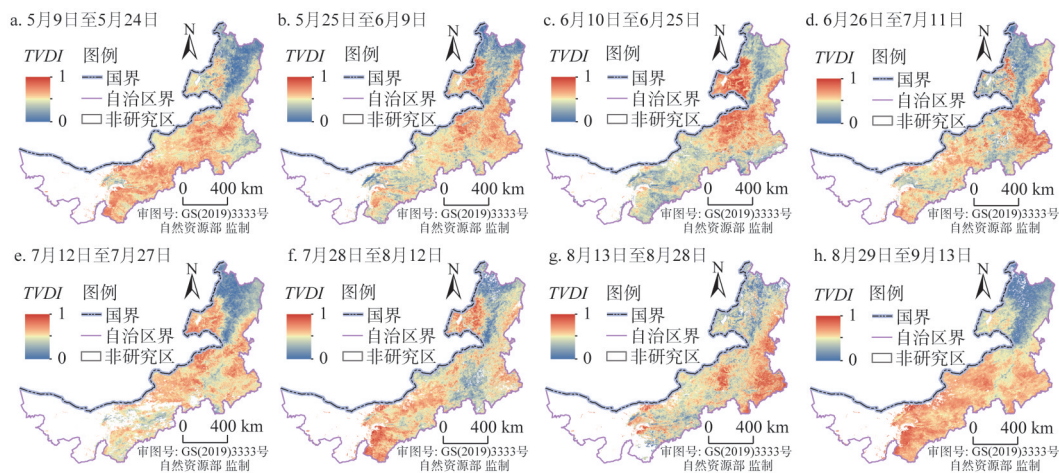


图6 内蒙古2017年植被生长季TVDI反演结果

Fig. 6 TVDI inversion results in Inner Mongolia growing season in 2017

均值, 分析TVDI值与高程和坡度间的统计特征。从统计结果来看(图7a), 内蒙古大部分区域高程在1500 m以下, 900~1100 m区间内面积占比最大, 其中, 高程介于900~1300 m之间的区域干旱较为严重。以1300 m高程为分界线, 小于1300 m高程区域的干旱程度随高程升高呈波动上升趋势, 高程大于1300 m区域的干旱程度随高程升高呈显著下降趋势。TVDI与坡度整体呈负相关关系(图7b), 坡度小于1°的区域旱情最为严重, 坡度介于1~5°之间时, 随坡度增加干旱程度明显下降; 拐点出现在坡度为4°处, 坡度在4~7°范围时, 旱情趋势变缓。

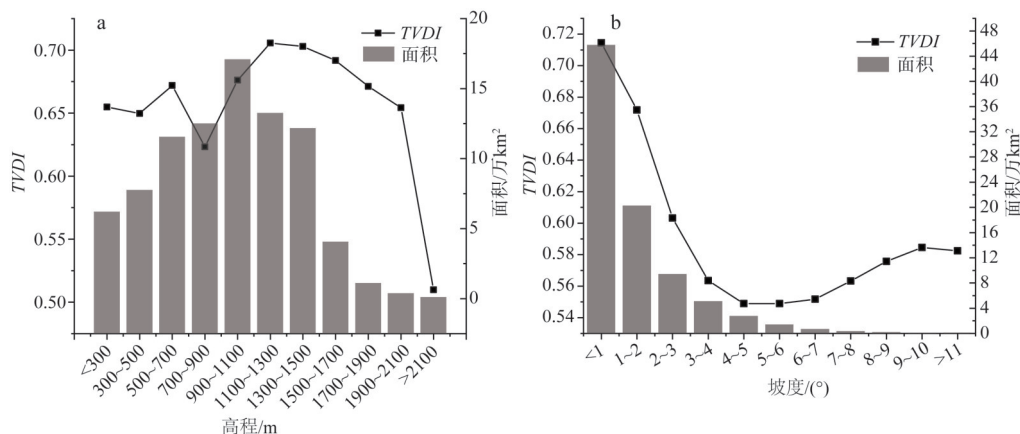


图7 TVDI与高程的关系、TVDI与坡度的关系

Fig. 7 The relationship between TVDI and elevation and slope

气温与降水量是影响植被生长、土壤含水量的重要气象因素^[46,47], 本文将内蒙古地区以1℃为间隔划分11个气温区间, 以30 mm为间隔划分11个降水区间, 逐一分析TVDI与气温和降水量的关系。

内蒙古多数地区平均气温以15~20℃为主(图8a), 其中16~17℃所占区域面积最大。TVDI与气温总体呈正相关, 线性拟合趋势线可分为两段, 其拐点出现在16℃。气

温小于 16 ℃ 时,随着气温的升高 *TVDI* 值增加较快,正相关性显著 ($r=0.999$, $P<0.01$); 气温大于 16 ℃ 时,随着气温的升高 *TVDI* 值基本呈稳定趋势, $r=-0.757$ 。*TVDI* 高值区 ($TVDI>0.60$) 主要分布在平均气温 16 ℃ 以上地区,说明内蒙古多年平均气温在 16 ℃ 以上的地区受干旱影响较大。且 *TVDI* 高值区面积占比大,内蒙古大部分区域干旱程度较严重。

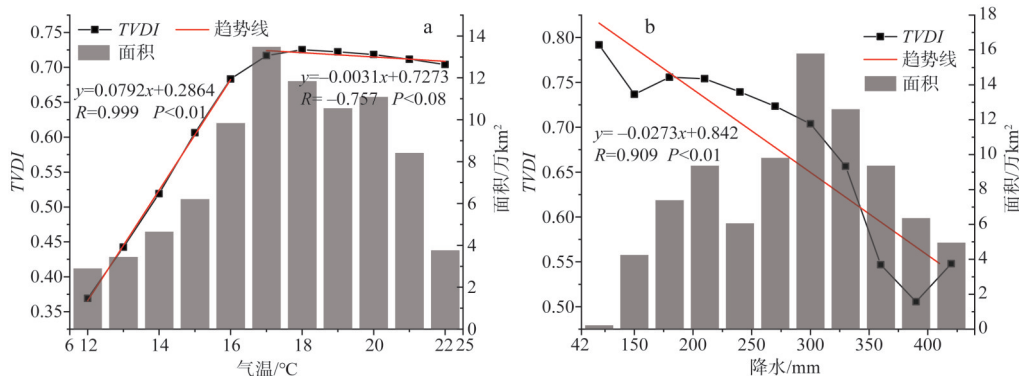


图8 *TVDI*与气温的关系、*TVDI*与降水的关系

Fig. 8 The relationship between *TVDI* and temperature and precipitation

内蒙古年累积降水量以 270~330 mm 为主 (图 8b), 其中 300 mm 左右累积降水量的区域面积占比最大。*TVDI* 与累积降水量呈负相关, $r=-0.909$ 且通过 $P<0.01$ 的显著性检验, 整体而言, 干旱程度随累积降水量增加明显减弱。

2.3.2 *TVDI*与气候因子的偏相关分析

干旱是由于降水和水分蒸散的收支不平衡造成的土壤含水量异常短缺现象^[48], 干旱程度与平均气温、降水量等影响因子以及它们之间复杂的相互作用有关。从上文分析来看, 气温和降水是内蒙古干旱更为直接的影响因子。

2000—2017 年内蒙古植被生长季平均气温的年际变化表明 (图 9a), 近年来内蒙古气温呈不显著波动下降趋势, 2000—2017 年平均最高气温为 19.8 ℃, 最低气温为 18.5 ℃。2000—2017 年内蒙古植被生长季累计降水量年际波动较大 (图 9b), 累积降水量最小值 (215 mm) 出现在 2000 年、2008 年和 2013 年, 在 2003 年、2012 年分别达到较大累积降水量 309 mm、342 mm, 多年平均累计降水量为 259 mm, 平均增速为 27.2 mm/10 a, 整体表现为不明显增加趋势。

内蒙古植被生长季 *TVDI* 与平均气温的偏相关性分析结果显示 (图 10a), 内蒙古地区多年平均 *TVDI* 与平均气温的偏相关系数介于 -0.82~0.95 之间, 平均值为 0.05; 呈正相关的区域主要分布在呼伦贝尔北部鄂伦春自治旗、呼伦贝尔草原、锡林郭勒盟西部和呼和浩特西北部等地, 约占内蒙古地区 *TVDI* 总面积的 53%; 负相关的区域大致分布于锡林郭勒盟南部、呼和浩特南部和鄂尔多斯市西南部, 约占内蒙古地区 *TVDI* 总面积的 47%。 t 双侧检验表明 (图 11), 内蒙古通过 0.05 显著性水平检验的区域主要在锡林郭勒盟的苏尼特左旗北部、阿尔善宝拉格—东乌珠穆沁旗一带、锡林郭勒盟南部、乌兰察布市和河套平原后套、呼伦贝尔的鄂伦春自治旗、呼伦贝尔草原和鄂尔多斯的都思兔河一带, 总面积 93643 km², 约为研究区面积的 11.8%; 通过 0.01 显著性水平检验的区域主要为锡林郭勒盟的苏尼特左旗北部、阿尔善宝拉格—东乌珠穆沁旗一带、呼伦贝尔的鄂伦春自治旗和呼伦贝尔草原, 总面积 32819 km², 约占 4.1%。

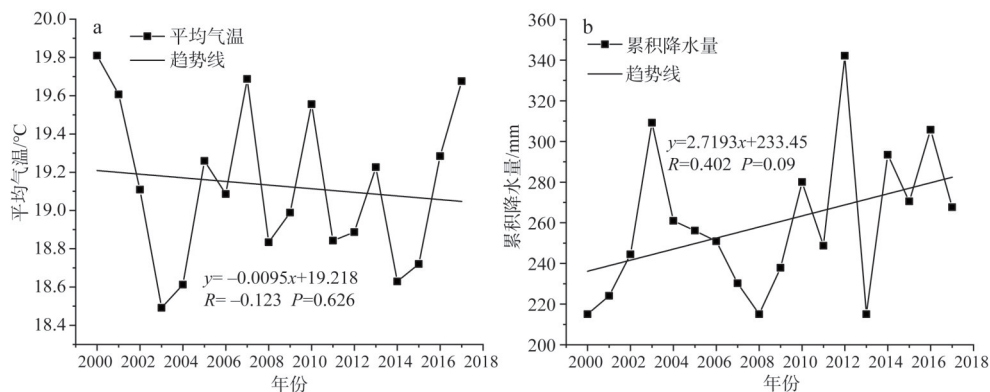


图9 2000—2017年内蒙古植被生长季平均气温和累积降水量

Fig. 9 The monthly mean air temperature and cumulative precipitation in Inner Mongolia growing season from 2000 to 2017

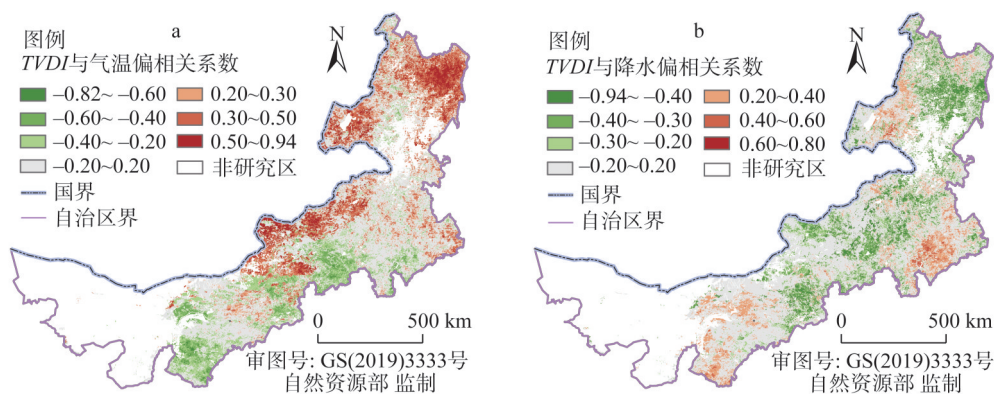


图10 2000—2017年内蒙古植被生长季TVDI与气温、降水量的偏相关系数

Fig. 10 The partial correlation coefficient between TVDI and air temperature and precipitation in Inner Mongolia growing season from 2000 to 2017

内蒙古植被生长季TVDI与累积降水量的相关性分析结果显示(图10b),内蒙古TVDI与累积降水量的偏相关系数介于-0.94~0.80之间,平均值为-0.06。呈负相关的区域主要分布于呼伦贝尔中部、鄂尔多斯市西南部以及锡林郭勒盟东南部与赤峰市接壤处等地,约占内蒙古地区TVDI总面积的59%,该区域中植被类型以草原和疏林灌木草原为主,海拔介于500~1500 m之间。呈正相关区域集中于通辽市和赤峰市东南部接壤处,其余区域相关性不明显。 t 双侧检验表明(图11),内蒙古通过0.05显著性水平检验的区域主要在呼伦贝尔古利牙山一带、锡林郭勒盟东北部和乌兰察布市中部等地,总面积44060 km²,约为5.5%;通过0.01显著性水平检验的区域主要为锡林郭勒盟东北部,总面积11627 km²,约占1.5%。内蒙古植被生长季TVDI与气温的相关性显著强于降水,表明气温对内蒙古干旱的影响大于降水。

3 结论与讨论

3.1 结论

本文利用MODIS MOD11A2 LST、MOD13A2 NDVI数据集,计算TVDI干旱监测指

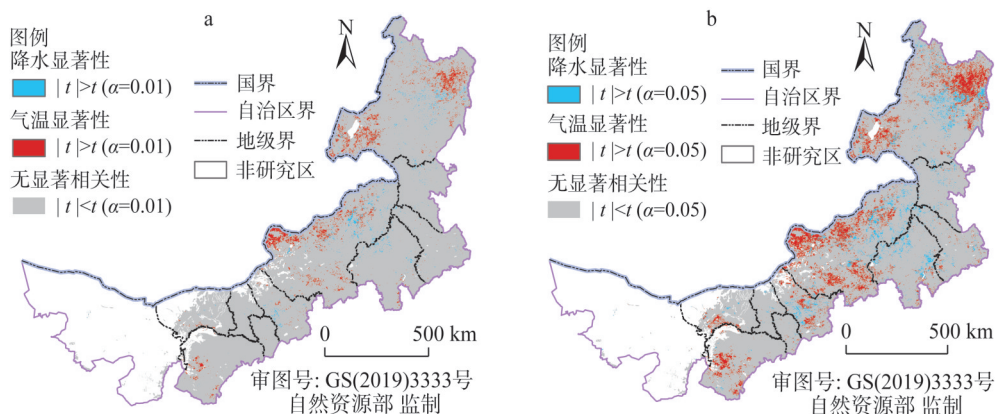


图 11 2000—2017 年内蒙古 $TVDI$ 与气候因子偏相关系数的 0.01、0.05 显著性检验

Fig. 11 The 0.01 and 0.05 significance tests of partial correlation coefficient between $TVDI$ and climatic factors in Inner Mongolia from 2000 to 2017

数,分析了内蒙古 $TVDI$ 时空格局,探讨自 21 世纪实施“退耕还林还草、退牧还草、围封转移”等一系列生态恢复政策以来内蒙古干旱变化情况;统计分析高程、坡度、平均气温和累积降水量不同分段下内蒙古干旱程度变化特征;采用趋势分析和相关性法分析探索内蒙古地区 $TVDI$ 与平均气温和累积降水量等气候因子的响应关系。主要结论如下:

(1) 2000—2017 年内蒙古植被生长季 $TVDI$ 平均值为 0.6,不同干旱等级中重旱和中旱所占面积最大,其中 2007 年和 2010 年为旱情最为严重的年份,2010 年后,中旱和重旱总面积略有减少。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旱情严重。

(2) 近 18 年来,研究区内干旱程度呈现轻微加重趋势,年际变化值 θ_{slope} 介于 $-0.07 \sim 0.7$ 之间,阿鲁科尔沁旗东北部至霍林河旱情加重趋势最为严重。阿荣旗和扎兰屯等农业生产地区虽 $TVDI$ 均值并不突出,但该区旱情有轻微加重趋势。

(3) 2017 年每 16 d 旱情监测结果表明,2017 年内蒙古干旱分布差异大,以区域性和局域性干旱为主。6 月和 9 月是 2017 年生长季干旱最为严重的月份,呼伦贝尔草原和鄂尔多斯高原西部干旱发生频率高且程度重,而鄂尔多斯高原东部至大青山南麓较同区干旱程度较弱。此外,以阴山为典型代表,由于山脉对水汽的阻隔和抬升作用,阴山北麓干旱程度整体低于南麓干旱程度^[49]。

(4) 近 18 年来内蒙古生长季气候因子相对于地貌因子对区内干旱影响更为直接。 $TVDI$ 与平均气温呈正相关、与累积降水量和坡度呈负相关、与小于 1300 m 的高程呈正相关、与大于 1300 m 的高程呈负相关关系。对内蒙古植被生长季 $TVDI$ 与气温降水偏相关分析结果表明,与气温呈正相关区域面积占 53%,锡林郭勒盟的苏尼特左旗北部、呼伦贝尔的鄂伦春自治旗和呼伦贝尔草原等地干旱情况与气温相关性较为显著;与降水呈负相关的区域面积占 59%,锡林郭勒盟东北部干旱情况与降水相关性较为显著。整体而言,气温对旱情的影响强于降水。

3.2 讨论

本文采用 LST 和 $NDVI$ 计算得到的 $TVDI$ 来表示旱情程度,通过对两种数据各自质量控制文件分析表明,2000—2017 年内蒙古区域 LST 和 $NDVI$ 数据质量中、高等级平均可信

度达 98% 以上, 整体可信度较高。*LST* 高质量数据占内蒙古总面积的 88.80%; 质量中等的区域主要集中在呼伦贝尔针叶林和阔叶林覆盖的区域, 约占总面积的 11.14%; 反演失败的区域仅占 0.06%。通过 *NDVI* 质量控制文件统计分析可得, 高可信度数据占比为 78.46%; 可信度中等的的数据主要集中在呼伦贝尔北部等高植被覆盖区域, 以及毛乌素沙地等低植被覆盖度区域, 占比约 21.32%; 不可用数据占 0.21%, 主要分布在内蒙古的乌兰盖高壁和嘎顺淖尔等湖泊地区。在原始数据质量不高的地区开展 *TVDI* 反演时, 可采用 Savitzky-Golay (S-G) 滤波方法^[50-52]对 *NDVI* 和 *LST* 数据进行重构。

本文内蒙古干旱状况年际变化与张煦庭等^[23]基于降水蒸发指数的内蒙古干旱年际变化分析结果较吻合, 差异点主要表现在干旱风险高值区不同。对内蒙古旱情变化进行趋势分析发现, 阿鲁科尔沁旗东北部至霍林河旱情加重趋势最为严重, 阿荣旗和扎兰屯等农业生产地区虽 *TVDI* 均值并不突出, 但该区旱情有轻微加重趋势, 与曲学斌等^[53]、迟道才等^[54]得到的结论一致。产生差异的主要原因可能为数据空间分辨率不同, 本文采用的数据为 1 km 空间分辨率数据, 而张煦庭等^[23]采用的是站点数据。此外, 研究发现 2000—2017 年间内蒙古呼伦贝尔北部针叶林、针阔混交林覆盖区域的干旱程度较低, 生态恢复措施的广泛实施可能发挥了重要作用^[25,56]。从研究时段开始, 内蒙古已经开始实施国有造林、鼓励人工造林、退耕退牧还林还草、封山育林以及无林地和疏林地新封等措施^[55], 林地和草地的干旱情况得到了缓解, 其中林地的改善尤为明显。

研究结果表明, 气温变化对内蒙古旱情变化影响较大。在内蒙古气候由暖干化向暖湿化发展的背景下^[57-59], 土壤水分对降水的依赖性降低。相对于降水而言, 气温对湿润区土壤状况更为重要^[60,61], 气温的高低直接决定了土壤中水分的蒸发量和植物的蒸腾量。另外, 内蒙古干旱程度与极端天气也存在密切关系, 薛海丽等^[24]研究发现, 2000 年后, 内蒙古在极端高温事件频率显著增加的情况下, 多伦、锡林浩特、海拉尔和四子王旗四个区域干旱事件发生频率均明显增加。

参考文献(References):

- [1] 段春青, 刘昌明, 陈晓楠, 等. 区域水资源承载力概念及研究方法的探讨. 地理学报, 2010, 65(1): 82-90. [DUAN C Q, LIU C M, CHEN X N, et al. Preliminary research on regional water resources carrying capacity conception and method. Acta Geographica Sinica, 2010, 65(1): 82-90.]
- [2] 李新荣, 何明珠, 贾荣亮. 黑河中下游荒漠区植物多样性分布对土壤水分变化的响应. 地球科学进展, 2008, 23(7): 685-691. [LI X R, HE M Z, JIA R L. The response of desert plant species diversity to the changes in soil water content in the middle-lower reaches of the Heihe River. Advances in Earth Science, 2008, 23(7): 685-691.]
- [3] JACKSON T, MANSFIELD K, SAAFI M, et al. Measuring soil temperature and moisture using wireless MEMS sensors. Measurement, 2008, 41(4): 381-390.
- [4] CHAUHAN N S, MILLER S, ARDANUY P. Spaceborne soil moisture estimation at high resolution: A microwave-optical/IR synergistic approach. International Journal of Remote Sensing, 2003, 24(22): 4599-4622.
- [5] ESZTER I, BAUER N, ZOLTAN B. Classification of semi-dry grassland vegetation in Hungary. Preslia, 2009, 81(3): 239-260.
- [6] 吴黎, 张有智, 解文欢, 等. 土壤水分的遥感监测方法概述. 国土资源遥感, 2014, 26(2): 19-26. [WU L, ZHANG Y Z, XIE W H, et al. Summary of remote sensing methods for monitoring soil moisture. Remote Sensing for Land & Resources, 2014, 26(2): 19-26.]
- [7] 周磊, 武建军, 张洁. 以遥感为基础的干旱监测方法研究进展. 地理科学, 2015, 35(5): 630-636. [ZHOU L, WU J J, ZHANG J. Remote sensing-based drought monitoring approach and research progress. Scientia Geographica Sinica, 2015, 35(5): 630-636.]

- [8] 刘兴文, 冯勇进. 应用热惯量编制土壤水分图及土壤水分探测效果. 土壤学报, 1987, 24(3): 272-280. [LIU X W, FENG Y J. Compilation of soil moisture map by means of soil thermal inertia image. Acta Pedologica Sinica, 1987, 24(3): 272-280.]
- [9] 田国良. 土壤水分的遥感监测方法. 环境遥感, 1991, 6(2): 89-98. [TIAN G L. Methods for monitoring soil moisture using remote sensing technique. Environment Remote Sensing, 1991, 6(2): 89-98.]
- [10] 余涛, 田国良. 热惯量法在监测土壤表层水分变化中的研究. 遥感学报, 1997, 1(1): 24-31. [YU T, TIAN G L. The application of thermal inertia method the monitoring of soil moisture of North China plain based on NOAA-AVHRR data. Journal of Remote Sensing, 1997, 1(1): 24-31.]
- [11] IDSO S B, JACKSON R D, PINTER P J, et al. Normalizing the stress-degree-day parameter for environmental variability. Agricultural Meteorology, 1981, 24(1): 45-55.
- [12] JACKSON R D, IDSO S B, REGINATO R J, et al. Canopy temperature as a crop water stress indicator. Water Resources Research, 1981, 17(4): 1133-1138.
- [13] 沙莎, 郭锐, 李耀辉, 等. 植被状态指数 VCI 与几种气象干旱指数的对比: 以河南省为例. 冰川冻土, 2013, 35(4): 990-998. [SHA S, GUO N, LI Y H, et al. Comparison of the vegetation condition index with meteorological drought indices: A case study in Henan province. Journal of Glaciology and Geocryology, 2013, 35(4): 990-998.]
- [14] 刘成林, 樊任华, 武建军, 等. 锡林郭勒草原植被生长对降水响应的滞后性研究. 干旱区地理, 2009, 32(4): 512-518. [LIU C L, FEN R H, WU J J, et al. Temporal lag of grassland vegetation growth response to precipitation in Xilinguole-meng. Arid Land Geography, 2009, 32(4): 512-518.]
- [15] PHILLIPS C G. An evaluation of ecosystem management and its application to the national environmental policy act: The case of the United States forest service. Agricultural Systems, 1997, 108(4): 84-93.
- [16] MORAN M S, CLARKE T R, INOUE Y. Estimating crop water deficit using the relation between surface-air temperature and spectral vegetation index. Remote Sensing of Environment, 1994, 49(3): 246-263.
- [17] SANDHOLT I, ANDERSEN J, RASMUESEN K. A simple interpretation of the surface temperature/vegetation index space for assessment of soil moisture status. Remote Sensing of Environment, 2002, 79(2): 213-224.
- [18] PATEL N R, ANUPASHSHA R, KUMAR S, et al. Assessing potential of MODIS derived temperature/vegetation condition index (TVDI) to infer soil moisture status. International Journal of Remote Sensing, 2009, 30(1): 23-39.
- [19] ZORMAND S, JAFARI R, KOUPEI S S. Assessment of PDI, MPDI and TVDI drought indices derived from MODIS Aqua/Terra Level 1B data in natural lands. Natural Hazards, 2017, 86(2): 757-777.
- [20] 高涛, 肖苏君, 乌兰. 近 47 年(1961—2007 年)内蒙古地区降水和气温的时空变化特征. 内蒙古气象, 2009, (1): 3-7. [GAO T, XIAO S J, WU L. Temporal-spatial characteristics of precipitation and temperature in Inner Mongolia for the last 47 years (1961-2007). Inner Mongolia Meteorological, 2009, (1): 3-7.]
- [21] 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. 自然资源学报, 2013, 28(10): 1694-1706. [ZHOU Y, LI N, JI Z H, et al. Temporal and spatial patterns of droughts based on standard precipitation index (SPI) in Inner Mongolia during 1981-2010. Journal of Natural Resources, 2013, 28(10): 1694-1706.]
- [22] 胡琦, 潘学标, 邵长秀. 内蒙古作物生长季降水资源空间分布及月尺度旱情特征分析. 干旱区资源与环境, 2014, 28(10): 61-67. [HU Q, PAN X B, SHAO C X. The distribution of precipitation during crop growth season and the monthly drought characteristics in Inner Mongolia. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2014, 28(10): 61-67.]
- [23] 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. 农业工程学报, 2017, 33(15): 190-199. [ZHANG X T, PAN X B, XU L, et al. Analysis of spatio-temporal distribution of drought characteristics based on SPEI in Inner Mongolia during 1960-2015. Transactions of the CSAE, 2017, 33(15): 190-199.]
- [24] 薛海丽, 张钦, 唐海萍. 近 60 年内蒙古不同草原类型区极端气温和干旱事件特征分析. 干旱区地理, 2018, 41(4): 701-711. [XUE H L, ZHANG Q, TANG H P. Extreme temperature and drought events in four different grassland areas of Inner Mongolia in recent 60 years. Arid Land Geography, 2018, 41(4): 701-711.]
- [25] 董昱, 闫慧敏, 杜文鹏, 等. 基于供给—消耗关系的蒙古高原草地承载力时空变化分析. 自然资源学报, 2019, 34(5): 1093-1107. [DONG Y, YAN H M, DU W P, et al. Spatio-temporal analysis of grassland carrying capacity in Mongolian Plateau based on supply-consumption relationship. Journal of Natural Resources, 2019, 34(5): 1093-1107.]
- [26] 彭海英, 童绍玉, 李小雁. 内蒙古典型草原土壤及其水文过程对灌丛化的响应. 自然资源学报, 2017, 32(4): 642-653. [PENG H Y, TONG S Y, LI X Y. Effects of thickening of rangeland on soil and soil hydrological processes in Inner Mongolia. Journal of Natural Resources, 2017, 32(4): 642-653.]
- [27] 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. 地理学报, 2016, 71(1): 21-34. [DAI E F, HUANG Y, WU Z, et al. Spatial-temporal features of carbon source-sink and its relationship with climate

- factors in Inner Mongolia grassland ecosystem. *Acta Geographica Sinica*, 2016, 71(1): 21-34.]
- [28] 卢晓宁, 曾德裕, 黄玥, 等. 四川省伏旱及驱动因子多尺度分析. *农业工程学报*, 2019, 35(9): 138-146. [LU X N, ZENG D Y, HUANG Y, et al. Multi-scale analysis of drought and its driving factors in Sichuan. *Transactions of the CSAE*, 2019, 35(9): 138-146.]
- [29] 郑发美, 白建军. 基于地形因子的TVDI修正: 以陕西省为例. *干旱区研究*, 2018, 35(5): 1223-1233. [ZHENG F M, BAI J J. TVDI modification based on topographic factors: A case study in Shaanxi province. *Arid Zone Research*, 2018, 35(5): 1223-1233.]
- [30] 谭剑波, 李爱农, 雷光斌. 青藏高原东南缘气象要素Anusplin和Cokriging空间插值对比分析. *高原气象*, 2016, 35(4): 875-886. [TAN J B, LI A N, LEI G B. Contrast on Anusplin and Cokriging meteorological spatial interpolation in southeastern margin of Qinghai-Xizang Plateau. *Plateau Meteorology*, 2016, 35(4): 875-886.]
- [31] LAWRENCE D S, SEELY-REYNOLDS D M, REYNOLDS R C. Application of Kriging to estimating mean annual precipitation in a region of orographic influence. *Jawra Journal of the American Water Resources Association*, 1988, 24(2): 329-339.
- [32] 刘思雨. 基于风云气象卫星数据的内蒙古草地干旱监测. 成都: 电子科技大学, 2017. [LIU S Y. Drought detection of grassland in Inner Mongolia based on Fengyun meteorological satellite data. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2017.]
- [33] PRICE J C. Using spatial context in satellite data to infer regional scale evapotranspiration. *IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing*, 1990, 28(5): 940-948.
- [34] MORAN M S, CLARKE T R, KUSTAS W P, et al. Evaluation of hydrologic parameters in a semiarid rangeland using remotely sensed spectral data. *Water Resources Research*, 1994, 30(5): 1287-1297.
- [35] 吴孟泉, 崔伟宏, 李景刚. 温度植被干旱指数(TVDI)在复杂山区干旱监测的应用研究. *干旱区地理*, 2007, 30(1): 30-35. [WU M Q, CUI W H, LI J G. Monitoring drought in mountainous area based on temperature/vegetation dryness index(TVDI). *Arid Land Geography*, 2007, 30(1): 30-35.]
- [36] 李正国, 王仰麟, 吴健生, 等. 基于TVDI的黄土高原地表干燥度与土地利用的关系研究. *地理研究*, 2006, 25(5): 913-920. [LI Z G, WANG Y L, WU J S, et al. Relationship between surface dryness degree and landuse types based on TVDI on Loess Plateau. *Geographical Research*, 2006, 25(5): 913-920.]
- [37] 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. *水土保持研究*, 2017, 24(3): 130-135. [WU L. Classification of drought grades based on temperature vegetation drought index using the MODIS data. *Research of Soil and Water Conservation*, 2017, 24(3): 130-135.]
- [38] 何奕萱, 易桂花, 张廷斌, 等. 红河流域“通道—阻隔”作用下2000—2014年植被EVI变化趋势与驱动力分析. *生态学报*, 2018, 38(6): 2056-2064. [HE Y X, YI G H, ZHANG T B, et al. The EVI trends and driving factors in Red River Basin affected by the "corridor-barrier" function during 2000-2014. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(6): 2056-2064.]
- [39] 王强, 张廷斌, 易桂花, 等. 横断山区2004—2014年植被NPP时空变化及其驱动因子. *生态学报*, 2017, 37(9): 3084-3095. [WANG Q, ZHANG T B, YI G H, Tempo-spatial variations and driving factors analysis of net primary productivity in the Hengduan Mountain Area from 2004 to 2014. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37(9): 3084-3095.]
- [40] 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. *自然资源学报*, 2015, 30(9): 1425-1435. [ZHANG J H, FENG Z M, JIANG L G, et al. Analysis of the correlation between NDVI and climate factors in the Lancang River Basin. *Journal of Natural Resources*, 2015, 30(9): 1425-1435.]
- [41] 王正兴, 刘闯, HUETE A. 植被指数研究进展: 从AVHRR-NDVI到MODIS-EVI. *生态学报*, 2003, 23(5): 979-987. [WANG Z X, LIU C, HUETE A. From AVHRR-NDVI to MODIS-EVI: Advances in vegetation index research. *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 23(5): 979-987.]
- [42] EVRENDILEK F, GULBEYAZ O. Deriving vegetation dynamics of natural terrestrial ecosystems from MODIS NDVI/EVI data over Turkey. *Sensors*, 2008, 8(9): 5270-5302.
- [43] 姚春生, 张增祥, 汪潇. 使用温度植被干旱指数法(TVDI)反演新疆土壤湿度. *遥感技术与应用*, 2004, 19(6): 473-479. [YAO C S, ZHANG Z X, WANG X. Evaluating soil moisture status in Xinjiang using the temperature vegetation dryness index (TVDI). *Remote Sensing Technology and Application*, 2004, 19(6): 473-479.]
- [44] 杨曦, 武建军, 闫峰, 等. 基于地表温度—植被指数特征空间的区域土壤干湿状况. *生态学报*, 2008, 29(3): 1205-1216. [YANG X, WU J J, YAN F, et al. Assessment of regional soil moisture status based on characteristics of surface temperature/vegetation index Space. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 29(3): 1205-1216.]
- [45] 尤莉, 丁晓华, 高志国, 等. 2017年5-7月内蒙古中东部地区气象干旱及环流特征分析. *内蒙古气象*, 2017, (6): 3-6. [YOU L, DING X H, GAO Z G, et al. Analysis of the meteorological-drought in Mid-eastern Inner Mongolia from May

- to July in 2017 and the characteristic of atmosphere circulation. *Meteorology Journal of Inner Mongolia*, 2017, (6): 3-6.]
- [46] 叶红, 张廷斌, 易桂花, 等. 2000—2014年黄河源区ET时空特征及其与气候因子关系. *地理学报*, 2018, 73(11): 69-86. [YE H, ZHANG T B, YI G H, et al. Spatio-temporal characteristics of evapotranspiration and its relationship with climate factors in the source region of the Yellow River from 2000 to 2014. *Acta Geographica Sinica*, 2018, 73(11): 69-86.]
- [47] LIANG L, ZHAO S H, QIN Z H, et al. Drought change trend using MODIS TVDI and its relationship with climate factors in China from 2001 to 2010. *Journal of Integrative Agriculture*, 2014, 13(7): 1501-1508.
- [48] 刘文莉, 张明军, 王圣杰, 等. 近50年来华北平原极端干旱事件的时空变化特征. *水土保持通报*, 2013, 33(4): 90-95. [LIU W L, ZHANG M J, WANG S J, et al. Temporal-spatial variation characteristics of extreme drought events in North China Plain during recent 50 years. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2013, 33(4): 90-95.]
- [49] 潘韬, 吴绍洪, 何大明, 等. 纵向岭谷区地表格局的生态效应及其区域分异. *地理学报*, 2012, 67(1): 13-26. [PAN T, WU S H, HE D M, et al. Ecological effects of longitudinal range-gorge land surface pattern and its regional differentiation. *Acta Geographica Sinica*, 2012, 67(1): 13-26.]
- [50] 边金虎, 李爱农, 宋孟强, 等. MODIS植被指数时间序列 Savitzky-Golay 滤波算法重构. *遥感学报*, 2010, 14(4): 725-741. [BIAN J H, LI A N, SONG M Q, et al. Reconstruction of NDVI time-series datasets of MODIS based on Savitzky-Golay filter. *Journal of Remote Sensing*, 2010, 14(4): 725-741.]
- [51] 周旻悦, 沈润平, 陈俊, 等. 基于像元质量分析和异常值检测的LAI时序数据S-G滤波重建研究. *遥感技术与应用*, 2019, 34(2): 323-330. [ZHOU M Y, SHEN R P, CHEN J, et al. Filtering and reconstruction of LAI time series data by S-G filter based on pixel quality analysis and outlier detection. *Remote Sensing Technology and Application*, 2019, 34(2): 323-330.]
- [52] 李天祺, 朱秀芳, 潘耀忠, 等. MODIS陆地表面温度数据重构方法研究. *北京师范大学学报: 自然科学版*, 2015, 51(s1): 70-76. [LI T Q, ZHU X F, PAN Y Z, et al. Study on reconstruction methods of MODIS LST products. *Journal of Beijing Normal University: Natural Science*, 2015, 51(s1): 70-76.]
- [53] 曲学斌. 基于MCI指数的呼伦贝尔市干旱灾害风险区划. *北方农业学报*, 2019, 47(1): 120-125. [QU X B. Risk zoning of drought disasters in HulunBuir city based on MCI index. *Journal of Northern Agriculture*, 2019, 47(1): 120-125.]
- [54] 迟道才, 沙炎, 陈涛涛, 等. 基于标准化降水蒸散指数的干旱敏感性分析: 以呼伦贝尔市为例. *沈阳农业大学学报*, 2018, 49(4): 433-439. [CHI D C, SHA Y, CHEN T T, et al. Analysis of drought sensitivity based on standardized precipitation evapotranspiration index: Taking Hulunbeier as an example. *Journal of Shenyang Agricultural University*, 2018, 49(4): 433-439.]
- [55] 穆少杰, 李建龙, 陈奕兆, 等. 2001—2010年内蒙古植被覆盖度时空变化特征. *地理学报*, 2012, 67(9): 1255-1268. [MU S J, LI J L, CHEN Y Z, et al. Spatial differences of variations of vegetation coverage in Inner Mongolia during 2001-2010. *Acta Geographica Sinica*, 2012, 67(9): 1255-1268.]
- [56] HE Y, PFLUGMACHER D, LI A, et al. Land use and land cover change in Inner Mongolia-Understanding the effects of China's re-vegetation programs. *Remote Sensing of Environment*, 2018, 204: 918-930.
- [57] 姚俊强, 杨青, 陈亚宁, 等. 西北干旱区气候变化及其对生态环境影响. *生态学杂志*, 2013, 32(5): 1283-1291. [YAO J Q, YANG Q, CHEN Y N, et al. Climate change in arid areas of Northwest China in past 50 years and its effects on the local ecological environment. *Chinese Journal of Ecology*, 2013, 32(5): 1283-1291.]
- [58] 张东, 钞然, 万志强, 等. 模拟增温增雨对典型草原优势种羊草功能性状的影响. *草业科学*, 2018, 35(8): 1919-1928. [ZHANG D, CHAO R, WAN Z Q, et al. Effect of simulated warming and precipitation enhancement on plant functional traits of *Leymus chinensis*. *Pratacultural Science*, 2018, 35(8): 1919-1928.]
- [59] 马梓策, 于红博, 张巧凤, 等. 内蒙古地区1960—2016年气温和降水特征及突变. *水土保持研究*, 2019, 26(3): 114-121. [MA Z C, YU H B, ZHANG Q F, et al. Characteristics and abrupt change of temperature and precipitation in Inner Mongolia area over the period 1960-2016. *Research of Soil and Water Conservation*, 2019, 26(3): 114-121.]
- [60] 冯妍, 何彬方, 唐怀珏, 等. 安徽省2000—2009年不同类型植被的变化及其与气温、降水的关系. *生态学杂志*, 2012, 31(11): 2926-2934. [FENG Y, HE B F, TANG H O, et al. Variation patterns of different types of vegetation in Anhui province of East China in 2000-2009 in relation to air temperature and precipitation. *Chinese Journal of Ecology*, 2012, 31(11): 2926-2934.]
- [61] 郑有飞, 牛鲁燕, 吴荣军, 等. 1982—2003年贵州省植被覆盖变化及其对气候变化的响应. *生态学杂志*, 2009, 28(9): 1773-1778. [ZHENG Y F, NIU L Y, WU R J, et al. Vegetation cover change in Guizhou of Southwest China in 1982-2003 in response to climate change. *Chinese Journal of Ecology*, 2009, 28(9): 1773-1778.]

Remote sensing monitoring and analysis of influencing factors of drought in Inner Mongolia growing season since 2000

QIN Yi¹, ZHANG Ting-bin^{1,2}, YI Gui-hua³, WEI Peng-tao¹, YANG Da¹

(1. College of Earth Science, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China; 2. The Engineering & Technical College of Chengdu University of Technology, Leshan 614000, Sichuan, China; 3. College of Management Science, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China)

Abstract: This article takes Inner Mongolia Autonomous Region as the research area. The $T3-NDVI$ space is created by using MODIS 16d synthetic vegetation index product data MOD13A2 and 8d synthetic surface temperature product data MOD11A2. Additionally, based on the temperature vegetation dryness index ($TVDI$) in Inner Mongolia during 2000-2017 growing season, the spatiotemporal characteristics of drought in the study area are analyzed, and the influencing factors of drought are discussed by using air temperature and precipitation data. The results show that: (1) The average $TVDI$ of Inner Mongolia was 0.6 in the growing season from 2000 to 2017, and the area of heavy and moderate drought was the largest, during which 2007 and 2010 are the years with the most severe drought. The spatial differentiation of drought was obvious. The moderate and slight drought mainly occurred in the central and southwest parts, respectively, and severe drought was observed in the Hulun Buir grassland to the west of Da Higgan Mountains. (2) In the past 18 years, the drought degree in Inner Mongolia showed a slight increase trend, and the interannual variation θ_{slope} ranged from -0.07 to 0.7 . (3) In the growing season of 2017, drought was most serious in June and September, and drought occurred frequently and severely in the Hulun Buir grassland and western Ordos Plateau. (4) $TVDI$ is positively correlated with the average temperature, negatively correlated with the cumulative precipitation and slightly negatively correlated with the slope, positively correlated with the elevation of less than 1300 m, and negatively correlated with the elevation of greater than 1300 m. The analysis of partial correlation between $TVDI$ and climatic factors in Inner Mongolia growing season shows that the drought in northern Sonid Left Banner of Xilin Gol League, Oroqen Autonomous Banner and Hulun Buir grassland has a significant positive correlation with temperature ($P<0.01$), and that in northeastern Xilin Gol League has a significant negative correlation with precipitation ($P<0.01$); among the climatic factors, the average temperature has a stronger impact on drought than cumulative precipitation does.

Keywords: temperature vegetation dryness index ($TVDI$); drought; climatic factor; remote sensing; Inner Mongolia