

# 基于温度植被干旱指数的黑龙江省 20 年 干旱时空特征研究

吴 黎, 解文欢, 张有智, 宋丽娟, 李 岩, 吕志群

(黑龙江省农业科学院 农业遥感与信息研究所, 哈尔滨 150086)

**摘 要:**为了探讨 2000—2019 年黑龙江省的干旱时空变化特征,通过利用 MODIS 的归一化植被指数和地表温度产品计算温度植被干旱指数(TVDI),对 20 a 的 5—9 月农业干旱进行了监测。结果表明:(1)从时间上来看,2000—2006 年干旱较严重、2007—2013 年干旱减弱、2014—2019 年干旱震荡减弱,其中 2006 年、2009 年和 2015 年极端干旱情况最重,年平均干旱有显著减弱趋势而极端干旱未通过显著性检验分析。年内 5 月是全省干旱最严重时期,6 月和 9 月干旱次之,7 月和 8 月干旱较弱。(2)从空间上来看,根据干旱频率高低强度大小将全省划分为重风险区、中风险区和低风险区,年干旱特征为讷河市、甘南县、齐齐哈尔市、龙江县、林甸县、泰来县、大庆市、肇源县和杜尔伯特县属重风险区,西部地区 and 宝清县、富锦市、友谊县、集贤县、勃利县和宁安市属中风险区,北部、中部和东北部地区属低风险区。(3)逐月干旱空间特征表现为西部地区、宁安市、勃利县、鸡东县、友谊县、宝清县和集贤县等地区 5 月干旱发生频率高、强度大,西部部分地区 6 月持续高频率高强度干旱,大庆市周边及泰来县、龙江县、甘南县、齐齐哈尔市、讷河市等地区 9 月干旱发生频率高、强度大。研究结果可为黑龙江省抗旱减灾部门提供数据参考,指导高标准农田的有效灌溉。

**关键词:**降雨量;平均气温;温度植被干旱指数;黑龙江省

**中图分类号:**TP79; S423

**文献标识码:**A

**文章编号:**1005-3409(2022)05-0358-06

## Research of Drought Characteristics in Heilongjiang Province Nearly 20 years Based on Temperature Vegetation Dryness Index by Remote Sensing

WU Li, XIE Wenhuan, ZHANG Youzhi, SONG Lijuan, LI Yan, LYU Zhiqun

(Institute of Agricultural Remote Sensing and Information, Heilongjiang  
Academy of Agricultural Sciences, Harbin 150086, China)

**Abstract:** In order to monitor drought time series and regional characteristics in Heilongjiang, based on the temperature of the moderate resolution imaging spectroradiometer (MODIS) and normalized differential vegetation index (NDVI) data, the monthly temperature vegetation dryness index (TVDI) in Heilongjiang from 2000 to 2019 was produced. The time series TVDI data were used to monitor the drought characteristics in Heilongjiang during the past 20 years from May to September. The results showed that: the time series TVDI indicated that the drought intensity was severe from 2000 to 2006, weakening from 2007 to 2013 and shock weakening from 2014 to 2019; from the perspective of whole Heilongjiang, the monthly extreme drought was the highest in 2006, 2005 and 2009, respectively, the annual mean drought intensity and the monthly extreme drought event of each year were weakening from 2000 to 2019; the mostest severe drought period in the monthly mean drought intensity from 2000 to 2019 was May, drought periods in June and September were weakening, droughts in July and August were the lightest; according to the drought of intensity and frequency, the whole province could be divided into three regions: regional severe drought with the most frequency and high intensity named severe drought risk region, regional moderate drought with lower frequency and intensity named moderate drought risk region, regional light drought with slightly frequency and intensity named slight drought risk region: the severe drought risk region occurred in Nehe, Gannan, Qiqihar, Longjiang, Lindian, Tailai, Daqing, Zhaoyuan and Du'erbote, moderate drought risk region occurred in

收稿日期:2021-08-08

修回日期:2021-08-18

资助项目:黑龙江省农科院院级项目(2021YYF028, HNK2019CX12-16, 2019YYF022);黑龙江省农业科学院 2021 年度科技攻关项目(CZKYF2021-2-B010);黑龙江省农业科学院“农业科技创新跨越工程”专项(HNK2019CX20-02)

第一作者:吴黎(1983—),女,黑龙江巴彦县人,硕士,助理研究员,主要从事农业灾害研究。E-mail:aromawu@163.com

通信作者:张有智(1979—),男,山东郓城人,硕士,研究员,主要从事农业遥感方向。E-mail:107744588@qq.com

western area, Baoqing, Fujin, Youyi, Jixian, Boli and Ning'an, slight drought risk region occurred in northern, central and northeastern regions. The regional drought by the month was that: droughts in May were severe in the western regions, Ning'an, Boli, Jidong, Youyi County, Baoqing County and Jixian etc, droughts in June were continuous in the western regions, droughts in September were severe in Tailai County, other areas around Daqing and Longjiang, Gannan, Qiqihar, Nehe, etc. This study can provide certain reference for local governments to formulate drought relief and agricultural production policies. In summary, the above research results can provide data reference for drought resistance and disaster reduction departments in Heilongjiang Province, and guide the effective irrigation of high-standard farmland.

**Keywords:** precipitation; average temperature; temperature vegetation dryness index; Heilongjiang Province

农业干旱是作物生长过程中因供水不足,阻碍作物正常生长而发生的水量供应不平衡的现象<sup>[1]</sup>。黑龙江省是典型的旱作农业区,近 20 a 来黑龙江省旱灾占总农业气象灾害总面积的 63%,占据省内三大气象灾害首位。遥感监测技术以其宏观、快速、动态、经济的优势,成为旱灾监测研究的有效重要手段。众多学者研究表明利用地面温度和植被指数特征空间耦合而成的温度植被干旱指数(TVDI)监测旱情方法优越、可行性高<sup>[2]</sup>。利用 TVDI 模型监测地表旱情时,其受传感器类型和数据空间分辨率的影响较小,因此被广泛应用到干旱监测中<sup>[3-8]</sup>。

众多学者对黑龙江省的干旱研究主要归纳为两类:一是基于长时间的气象站点数据采用不同干旱方法进行时空特征、演变规律、变化趋势、灾害评价等研究,二是基于遥感数据进行干旱监测及预测模型分析。分析干旱时空特征研究基本都是以气象数据为基础的,其原因是气象数据历史时间更久,从 1951 年开始我国便已有气象站观测数据,时间越长对规律和趋势分析就越有利,这是气象数据的优点。但气象站属于点数据,不能代表面上干旱情况,学者需采用一系列方法进行面数据的转化,这样在监测精度上有所损失。遥感数据属于面数据,以像元为单元,可监测每一个像元的干旱程度弥补气象数据的不足,且 MODIS 数据具有时效性好、幅宽大、波段范围广,数据开放的优势,可快速实现全省范围内土壤干旱监测,在防治干旱,指导精准灌溉,节约水资源,降低农民损失方面均具有重要意义。目前对黑龙江省利用遥感数据进行 20 a 的时空变化特征研究特别缺少,学者主要集中在对单一时刻或某一时段的干旱监测上。针对如上问题本文基于 MODIS 时序数据计算逐月 TVDI,累计 20 a 间黑龙江省干旱发生频率及干旱强度,分析黑龙江省干旱时间特征,找到规律并同时开展空间变化特征研究,为后续作者进行黑龙江省干旱预警研究奠定基础,为政府抗旱救灾、制定农业政策和管控农业项目提供科学数据支撑。

## 1 研究区概况

黑龙江省地理位置介于  $121^{\circ}11'—135^{\circ}05'E$  和  $43^{\circ}25'—53^{\circ}33'N$ 。年平均气温在  $-6\sim 4^{\circ}C$ ,无霜期多在 100~140 d,年降雨量介于 400~650 mm,中部最多,东部次之,北部和西部最少,黑龙江省地势西北高东南低,农业地域特征是东西两大平原、南北两大山地。

## 2 数据来源与研究方法

### 2.1 数据来源

中国科学院计算机网络信息中心(<http://www.ns-data.cn/>)获取 MODIS 标准产品中 16 d 合成的植被指数 MOD13A2,8 d 合成的地表温度 MOD11A2 数据。构建温度植被干旱指数(TVDI)需将植被指数(MOD13A2)及地表温度(MOD11A2)数据统一到相同的时间分辨率和相同的空间分辨率上,将临近的两个 8 d 的 MOD11A2 以最大值法(同一点两景影像中取最大值作为新影像的相元值·)合成 16 d 的数据。两种数据的空间分辨率均为 1 km。数据时间从 2000—2019 年,每年的 5 月初至 9 月末,涵盖农作物的整个生育期。从(<https://ladsweb.nascom.nasa.gov/data/search.html>)网站获取土地覆盖类型产品数据(MCD12Q1),获取黑龙江省耕地区域界限范围。根据国际地圈生物圈计划(IGBP)的全球植被分类方案,选取 DN 值为 12 的像元为耕地。统一全部图幅投影,后进行图幅拼接,再利用黑龙江省行政区划图进行黑龙江省遥感影像的裁剪,得到黑龙江省归一化植被指数和地表温度数据;最后利用 MCD12Q1 数据提取黑龙江省耕地,对 MODIS 所有时序数据进行掩膜处理,获得最终的农作物研究区的归一化植被指数和地表温度时序数据集。

从中国气象数据共享网(<http://cdc.nmic.cn/>)获取黑龙江省 40 个气象站 2000—2019 年气象观测降雨量数据用于计算标准化降水指数(SPI)<sup>[9]</sup>。

### 2.2 研究方法

(1) TVDI 模型法。国内外众多学者研究不同时间分辨率和空间尺度的植被指数(NDVI)和地表

温度( $T_s$ )的关系表明,二者存在明显的负相关关系。Sandholt 等<sup>[10]</sup>在研究 NDVI— $T_s$  特征空间时发现了很多条直线,据此提出了温度植被干旱指数(TVDI)监测地表相对含水量状况,计算公式为:

$$TVDI = \frac{T_s - T_{s_{min}}}{T_{s_{max}} - T_{s_{min}}} \tag{1}$$

$$T_{s_{max}} = a_1 + b_1 \times NDVI \tag{2}$$

$$T_{s_{min}} = a_2 + b_2 \times NDVI \tag{3}$$

将公式(2—3)代入公式(1)

$$TVDI = \frac{T_s - (a_2 + b_2 \times NDVI)}{(a_1 + b_1 \times NDVI) - (a_2 + b_2 \times NDVI)} \tag{4}$$

式中: $T_s$  为地表温度; $T_{s_{min}}$  为相同 NDVI 条件下的最小地表温度; $T_{s_{max}}$  为相同 NDVI 条件下的最大地表温度; $a_1, a_2, b_1, b_2$  为拟合方程系数。

TVDI 值为 0~1,引用作者较前 TVDI 等级划分结果<sup>[11]</sup>,共分 5 个强度其中无旱对应的强度等级 I(Intensity)为 1,轻旱为 2,中旱为 3,重旱为 4,特旱为 5,相对应的 TVDI 值范围见表 1;20 a 总干旱强度为  $I_{20}$ ,定义  $I_{20} < 60$  为干旱频率低强度弱,  $60 \leq I_{20} < 80$  为干旱发生频率中强度中,  $80 \leq I_{20}$  为干旱频率高强度大。

表 1 温度植被干旱指数干旱强度

强度等级	干旱类型	TVDI 值范围
1	无旱	$0 < TVDI < 0.46$
2	轻旱	$0.46 \leq TVDI < 0.57$
3	中旱	$0.57 \leq TVDI < 0.76$
4	重旱	$0.76 \leq TVDI < 0.86$
5	特旱	$0.86 \leq TVDI < 1$

为了研究黑龙江省干旱特征,分析年平均干旱强度和年内极端干旱(年内月平均 TVDI 最大值)情况,本文将 2000—2019 年每年 5—9 月月温度植被干旱指数数据求平均获得年平均温度植被干旱指数( $TVDI_{mean}$ ),其代表的是作物生育期内平均受旱程度;一年中 5—9 月的每月 TVDI 值中最大温度植被干旱指数为  $TVDI_{max}$ ,其代表的是作物生育期内极端受旱情况。采用一元线性回归分析方法研究时序 TVDI 数据的趋势特征。

(2) 标准化降水指数。降雨分布是一种偏态分布,因此直接用降雨量很难在不同时间、不同地区上进行相互比较,标准化降水指数(SPI)是表示某时段降水量出现概率的指标之一,因其具有概率属性,其能很好的比较不同区域的干旱状况<sup>[12]</sup>。通过计数出累积降水的概率密度函数  $\Gamma$ ,进行正态标准化处理,其计算方法是在特定时间段内产生的降水量与平均值之差除以标准差,其中降水量平均值和标准差是根据过去的历年气象观测记录来确定的<sup>[13]</sup>。公式如下:

$$SPI = \begin{cases} -\left(t - \frac{c_0 + c_1 t + c_2 t^2}{1 + d_1 t + d_2 t^2 + d_3 t^3}\right), t = \sqrt{\ln\left(\frac{1}{(H(x))^2}\right)}, 0 < H(x) < 0.5 \\ t - \frac{c_0 + c_1 t + c_2 t^2}{1 + d_1 t + d_2 t^2 + d_3 t^3}, t = \sqrt{\ln\left(\frac{1}{(1.0 - H(x))^2}\right)}, 0.5 < H(x) < 1.0 \end{cases}$$

式中: $x$  为降水样本值; $H(x)$  为与  $\Gamma$  函数相关的降水分布累积概率; $c_0 = 2.515\ 517$ ;  $c_1 = 0.802\ 853$ ;  $c_2 = 0.010\ 328$ ;  $d_1 = 1.432\ 788$ ;  $d_2 = 0.189\ 269$ ;  $d_3 = 0.001\ 308$ 。

本文计算的是 1 个月时间尺度 SPI 下黑龙江各站点的 SPI 指数值。

### 3 结果与分析

#### 3.1 精度验证

标准化降水指数(SPI)是气象干旱监测中被广泛应用的指标,本研究利用 SPI 与 TVDI 进行相互精度验证,可明确遥感 TVDI 干旱指标的指导意义<sup>[14-16]</sup>。SPI 选取 2000—2019 年黑龙江省 40 个气象站的 5—9 月的月降水量数据,计算 1 个月尺度 SPI 值,求 40 个站点平均值代表全省 1 个月尺度 SPI 情况,最后将 1 个月 SPI 值累积求平均获得年 SPI 值。同时获取与 SPI 时间相匹配的月 TVDI 值,将月 TVDI 值累积求平均获得年平均 TVDI( $TVDI_{mean}$ )。对年 SPI 与  $TVDI_{mean}$  进行关系分析,可见年平均 SPI 与  $TVDI_{mean}$  有负相关关系,相关系数为  $-0.67$ ,公式为:  $SPI = -3.2737 TVDI + 1.9136$ ,  $p$  值为  $0.002$ ,表明年平均 SPI 与  $TVDI_{mean}$  存在极显著负相关性。说明  $TVDI_{mean}$  可以很好的体现年干旱情况,即  $TVDI_{mean}$  越高,年平均标准化降水指数越小,越干旱,且气象干旱也是造成农业干旱的主要原因。

#### 3.2 黑龙江省干旱时间特征分析

研究全省 20 a 来干旱时间特征变化, $TVDI_{mean}$  时序数据(图 1)显示,黑龙江省 2006 年是省内干旱趋势变化转折年,干旱发生较重的在 2000—2006 年,此时间段内  $TVDI_{mean}$  均值为  $0.63$ ;到 2013 年干旱水平降到最低,2007—2013 年此时间段内  $TVDI_{mean}$  均值为  $0.57$ ;2015 年  $TVDI_{mean}$  值虽有所升高,但 2014—2019 年时间段内  $TVDI_{mean}$  均值依然有所降低,为  $0.56$ 。3 个时段内  $TVDI_{mean}$  均值呈下降趋势。对 2000—2019 年  $TVDI_{mean}$  值与时间进行回归分析,表明  $TVDI_{mean}$  值 20 a 间总体呈减弱的趋势,经过显著性分析得出  $p < 0.05$ ,表明黑龙江省年平均干旱有显著减弱趋势。

$TVDI_{max}$  监测(图 1)出黑龙江省 2006 年、2009 年和 2015 年极端干旱情况最重( $TVDI_{max}$  最大),且分布在 3 个不同干旱时间内, $TVDI_{mean}$  与  $TVDI_{max}$  关系不大,从变化趋势来看黑龙江省近 20 a 的  $TVDI_{max}$  有减弱的趋势,但未通过显著性分析。



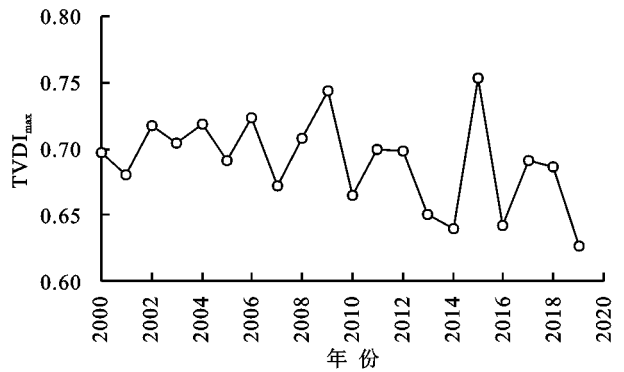


图1 2000—2019年TVDI变化特征

分析2000—2019年 $TVDI_{mean}$ 中干旱面积占比情况,由图2可以看出,黑龙江省年干旱类型中,无旱与特旱面积占比较少,主要集中在轻旱、中旱和重旱,其中中旱面积占比最大,表明黑龙江省年干旱主要以中旱为主。轻旱和无旱面积占比呈增加趋势,其他干旱等级面积占比呈减少趋势,该趋势与 $TVDI_{mean}$ 呈减弱趋势相一致。

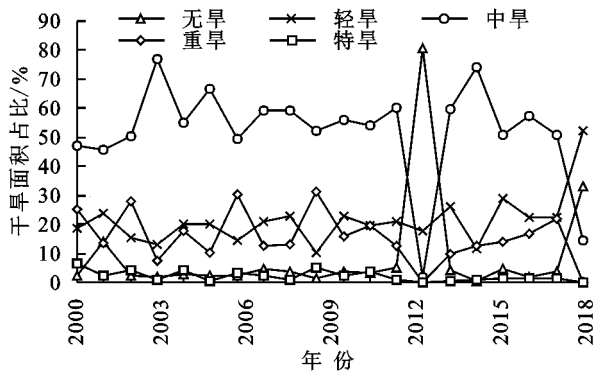


图2 2000—2019年黑龙江省不同等级干旱面积占比

分析5—9月20 a平均干旱面积占比的月动态情况,由图3可知,黑龙江省无旱面积占比呈先增加后降低现象,在7月无旱面积占比达到峰值,8月无旱面积占比剧降其比例小于5月和6月,9月无旱面积占比降到最低;轻旱面积占比也呈先增加后降低现象,7月轻旱面积占比达到峰值,8月轻旱面积占比比较7月减少但高于6月,9月轻旱面积占比降到最低;中旱面积占比呈先降低后升高现象,7月中旱面积占比降到最低,8月中旱面积占比逆转升高比例高于5月和6月,9月中旱面积占比达到峰值;重旱面积占比6月份最高,5月重旱面积占比仅次于6月居第二,9月重旱面积占比小于6月和5月,7月和8月重旱面积占比特小;特旱面积占比呈降低现象5月最大,7月和8月特旱面积占比最小,几乎接近0值,9月特旱面积占比有所增加但仍小于6月。中旱、重旱、特旱3个等级干旱面积占比总和由大到小:9月>5月>6月>8月>7月,其中虽然9月3个等级干旱面积占比总量最大,但以中旱为主,特旱特少,重旱占比也比5月和6月少,中旱本身级别不高,9月又属秋收季节,因此对作物影响不是很大;5月虽不是3个等级干旱面积占比总量最大,但其重旱、特旱面积占比均

较大。因此分析表明5月是黑龙江省干旱最严重期,6月是干旱期,7月是黑龙江省干旱最弱时期,8月是干旱较弱时期,9月是干旱期以中旱为主。

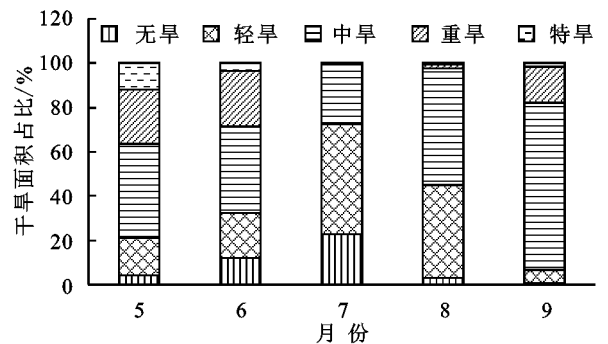


图3 2000—2019年黑龙江省5—9月干旱面积占比

### 3.3 黑龙江省干旱空间特征分析

根据定义 $TVDI_{mean}$ 值中各种干旱类型的干旱强度:无旱干旱强度为1,轻旱干旱强度为2,中旱干旱强度为3,重旱干旱强度为4,特旱干旱强度为5,利用公式(5)计算 $I_{20}$ ,本文假设20 a同一像元干旱强度都为4,那80就是重旱和中旱的临界值,因此认为 $80 \leq I_{20}$ 的像元点为干旱频率高且干旱强度大的区域称为重风险区,主要分布在讷河、甘南县、市齐齐哈尔市、龙江县、林甸县、泰来县、大庆市、肇源县和杜尔伯特县。假设20 a同一点干旱强度都为3,那60就是中旱和轻旱的临界值,因此认为 $60 \leq I_{20} < 80$ 的像元点为干旱频率中干旱强度中区域称为中风险区,主要分布在西部地区、宝清县、富锦市、友谊县、集贤县、勃利县和宁安市干旱频率中强度中。 $I_{20} < 60$ 的像元点为干旱频率轻干旱强度轻区域称为低风险区,主要分布在北部、中部和东北部地区(图4)。

分析5—9月逐月干旱空间特征情况,5月重风险区内含县市较多,主要分布在西部地区、宁安市、勃利县、鸡东县、友谊县、宝清县和集贤县,表明该地区每年5月份发生重旱、特旱的概率大;中风险区主要分布在北部、中部;干旱频率轻干旱强度轻区域主要分布在东部地区。6月重风险区明显减少,主要分布在西部部分地区;中风险区域增加,增加主要为5月份的重风险区,也说明6月份较5月份干旱有明显减弱;低风险区分布在北

部和东部地区。7 月、8 月份重风险区几乎没有,此结果与上文时间特征结果相吻合;中风险区零星分布在西部地区,该区面积 8 月份大于 7 月份;低风险区 7 月份几乎覆盖全省(除齐齐哈尔市和大庆市附近外),8 月份除西南

部外的全部区域,表明 7 月、8 月较少发生干旱。9 月重风险区主要分布在大庆市周边及泰来县、龙江县、甘南县、齐齐哈尔市、讷河市等地;中风险区分布在西部地区 and 东南部地区;低风险区主要分布在北部和东北部(图 4)。

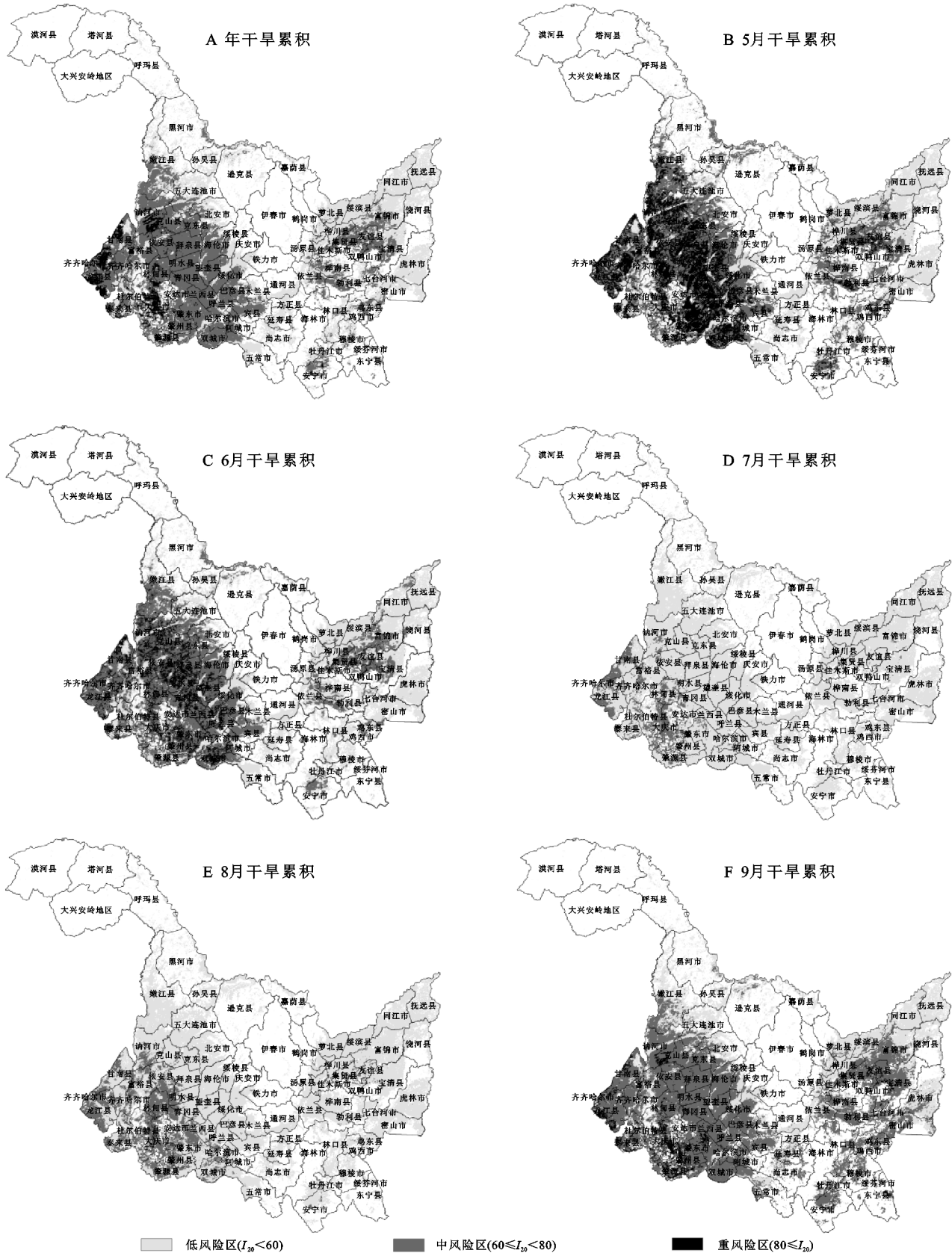


图 4 黑龙江省 20 a 及逐月干旱空间特征分布

## 4 讨论

作者较前研究<sup>[11]</sup>已对温度植被干旱指数干旱监测指标的干旱强度进行了划分,且该划分结果也在黑龙江省进行应用与验证<sup>[2,17]</sup>证明了划分的 TVDI 干旱强度对黑龙江省土壤干旱情况的反演具有较好的适用性。本文就是基于此对黑龙江省开展 2000—2019 年的干旱时空变化特征研究,张剑侠等<sup>[18]</sup>以气象数据和统计数据计算月干旱指数,统计 30 a(1975—2005)内月干旱发生的次数,区域划分干旱多发区、干旱次发区和较少发生干旱区,区域划分结果与本研究结果具有一致性。基于 TVDI 的干旱空间特征分析是以像元为基础单元,属于面状数据,对于全省研究更具有代表性,而传统的气象数据和统计数据均是以气象监测站和县为基础单元,属于点状数据,对全省研究属以点概面,因此 TVDI 监测更具优势。

TVDI 的构建是基于温度—植被的理想假设,即在相同植被覆盖度的前提下,地表温度越高,土壤水分越低,这一区域就越干旱,反之就越湿润。本文研究的黑龙江省耕地范围生长季内的干旱情况,仅从区域角度和时间跨度上进行分析,并未考虑到地面附着植被类型,由于植被类型的不同,植株高矮存在一定的差异,对 TVDI 的计算会有一定的影响,因此后续作者会从植被覆盖类型出发,研究不同植被类型、不同时期、不同区域对干旱的响应程度的研究将更有意义。

## 5 结论

(1) 从时间尺度上来分析,2000—2019 年黑龙江省 20 a 间 2000—2006 年干旱严重、2007—2013 年干旱减弱、2014—2019 年干旱震荡减弱;TVDI<sub>max</sub> 监测出黑龙江省 2006 年、2009 年、2015 年三年中极端干旱情况最重;20 a 间 TVDI<sub>mean</sub> 有显著减弱趋势而 TVDI<sub>max</sub> 未通过显著性检验。分析 20 a 间 TVDI<sub>mean</sub> 中干旱面积占比可知,全省中旱现象较为普遍。分析月内干旱情况可知,5 月是黑龙江省干旱发生的最严重时期,6 月是干旱早期,7 月是黑龙江省干旱最弱时期,8 月是干旱较弱时期,9 月也是干旱期以中旱为主。

(2) 从空间尺度上来分析,20 a 重风险区主要分布在讷河市、甘南县、齐齐哈尔市、龙江县、林甸县、泰来县、大庆市、肇源县和杜尔伯特县。中风险区主要分布在西部地区、宝清县、富锦市、友谊县、集贤县、勃利县和宁安市。低风险区主要分布在北部、中部和东北部地区。分析逐月干旱空间特征:西部地区、宁安市、勃利县、鸡东县、友谊县、宝清县和集贤县等地区 5 月干旱发生频率高强度大,西部部分地区 6 月持续高频率高强度干旱,大庆市周边及泰来县、龙江县、甘南县、齐齐哈尔市、讷河市等地区 9 月干旱发生频率高强度大。

## 参考文献:

- [1] 杨鹤松,王鹏新,孙威.条件植被温度指数在华北平原干旱监测中的应用[J].北京师范大学学报:自然科学版,2007,43(3):314-318.
- [2] 吴黎.基于温度植被干旱指数的黑龙江省旱情动态研究[J].干旱地区农业研究,2017,35(4):276-282.
- [3] 鲍艳松,严婧,闵锦忠,等.基于温度植被干旱指数的江苏淮北地区农业旱情监测[J].农业工程学报,2014,30(7):163-172.
- [4] 陈斌,张学霞,华开,等.温度植被干旱指数(TVDI)在草原干旱监测中的应用研究[J].干旱区地理,2013,36(5):930-937.
- [5] 刘立文,张吴平,段永红,等. TVDI 模型的农业旱情时空变化遥感应用[J].生态学报,2014,34(13):3704-3711.
- [6] 闫娜,李登科,杜继稳,等.基于 MODIS 产品 LST/NDVI/EVI 的陕西旱情监测[J].自然灾害学报,2010,19(4):178-182.
- [7] 孙丽,王飞,吴全.干旱遥感监测模型在中国冬小麦区的应用[J].农业工程学报,2010,26(1):243-249.
- [8] 杜灵通,候静,胡悦,等.基于遥感温度植被干旱指数的宁夏 2000—2010 年旱情变化特征[J].农业工程学报,2015,31(14):209-216.
- [9] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. GB/T20481-2006 中华人民共和国国家标准:气象干旱,等级[S].北京:中国标准出版社,2006.
- [10] 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.
- [11] 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):130-135,3.
- [12] 杨舒畅.基于标准化降水指数的内蒙古地区干旱特征分析[D].南京:南京信息工程大学,2017.
- [13] 赵静,严登华,杨志勇,等.标准化降水蒸发指数的改进与适用性评价[J].物理学报,2015,64(4):382-390.
- [14] Li Z, Wang Y, Zhou Q, et al. Spatiotemporal variability of land surface moisture based on vegetation and temperature characteristics in Northern Shaanxi Loess Plateau, China [J]. Journal of Arid Environments, 2008,72(6):974-985.
- [15] Son N T, Chen C F, Chen C R, et al. Monitoring agricultural drought in the Lower Mekong Basin using MODIS NDVI and land surface temperature data[J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2012,18:417-427.
- [16] Liang L, Zhao S, Qin Z, et al. Drought change trend using MODIS TVDI and its relationship with climate factors in China from 2001 to 2010[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2014,13(7):1501-1508.
- [17] 吴黎. MODIS 数据在黑龙江省农业上的应用[J].黑龙江农业科学,2014(1):129-134.
- [18] 张剑侠,孙彦坤,王晨轶,等.黑龙江省近 30 a 干旱发生规律及趋势分析[J].黑龙江气象,2010,27(1):20-22.