

黑龙江流域生长季温度植被干旱指数 1-km 栅格数据集 (2007–2018) 的研发

周业智^{1,2}, 王卷乐^{1,3*}, 李 凯^{1,2}

1. 中国科学院地理科学与资源研究所资源与环境信息系统国家重点实验室, 北京 100101;
2. 中国矿业大学(北京)地球科学与测绘工程学院, 北京 100083;
3. 江苏省地理信息资源开发与利用协同创新中心, 南京 210023

摘 要: 温度植被干旱指数 (Temperature Vegetation Dryness Index, TVDI) 是指基于植被指数和地表温度相关关系估测土壤表层水分状况进而反映其所在地区的干旱程度的度量参数。本数据集覆盖的地区为黑龙江流域, 时间序列为 2007–2018 年的 4–10 月 (植被生长季)。该数据集是在 MOD13A3 植被指数 (NDVI) (月度)、MOD11A2 地表温度 (LST) (8 天合成) 以及 ASTER-DEM 数据基础上融合温度植被干旱指数计算模型得到。数据集存储为.tif 格式, 空间分辨率为 1 km, 由 84 个文件组成, 数据量为 362 MB (压缩为 1 个文件, 319 MB), 通过数据集与同期气象站降水和全球表层土壤水数据相关性分析表明, 本产品与两者均呈负相关关系并均通过显著性检验。

关键词: 黑龙江流域; 生长季; 温度植被干旱指数; 通用 NDVI-LST 特征空间

DOI: <https://doi.org/10.3974/geodp.2021.03.11>

CSTR: <https://cstr.science.org.cn/CSTR:20146.14.2021.03.11>

数据可用性声明:

本文关联实体数据集已在《全球变化数据仓储电子杂志 (中英文)》出版, 可获取:

<https://doi.org/10.3974/geodb.2021.05.02.V1> 或 <https://cstr.science.org.cn/CSTR:20146.11.2021.05.02.V1>。

1 前言

黑龙江流域位于亚洲东北部 (图 1)。其南源额尔古纳河及北源石勒喀河在中国黑龙江省漠河以西的洛古河附近汇合, 流域容纳俄罗斯阿穆尔州的结雅、布列亚河、阿姆贡河以及黑龙江省的松花江、乌苏里江等支流, 在俄罗斯尼古拉耶夫斯克 (庙街) 汇入鞑靼海峡。流域面积为 2,083,345.35 km²^[1,2], 在世界河流流域面积排名第十^[1]。作为国际上最重要的界江之一, 流域跨境段长度近 4,000 km, 连接中蒙俄朝四国 15 个一级行政区, 故此其内部资源环境的变化对所属的中蒙俄经济走廊沿线地区绿色发展影响重大^[3–5]。近年来流域内各地

收稿日期: 2021-04-24; 修订日期: 2021-06-23; 出版日期: 2021-09-30

基金项目: 中国科学院 (Y9X90050Y2); 中国工程院 (CKCEST-2020-2-4)

*通讯作者: 王卷乐 R-8881-2016, 中国科学院地理科学与资源研究所, wangjl@igsnr.ac.cn

数据引用方式: [1] 周业智, 王卷乐, 李凯. 黑龙江流域生长季温度植被干旱指数 1-km 栅格数据集 (2007–2018) 的研发[J]. 全球变化数据学报, 2021, 5(3): 333–345. <https://doi.org/10.3974/geodp.2021.03.11>
<https://cstr.science.org.cn/CSTR:20146.14.2021.03.11>

[2] 周业智, 王卷乐. 黑龙江流域生长季温度植被干旱指数 1-km 栅格数据集 (2007–2018) [J/DB/OL]. 全球变化数据仓储电子杂志, 2021. <https://doi.org/10.3974/geodb.2021.05.02.V1>.
<https://cstr.science.org.cn/CSTR:20146.11.2021.05.02.V1>.

区干旱事件频发，对沿线地区各领域尤其是粮食安全问题风险增大。通过多源数据及采用科学研究手段对黑龙江流域沿线旱情开展长期监测，将有助于为本流域防旱减灾对策实施及未来风险评价预测等研究工作提供科学参考及基础支持，有助于强化流域覆盖国针对该流域内各地区干旱化灾害事件的协同防治和国际合作。

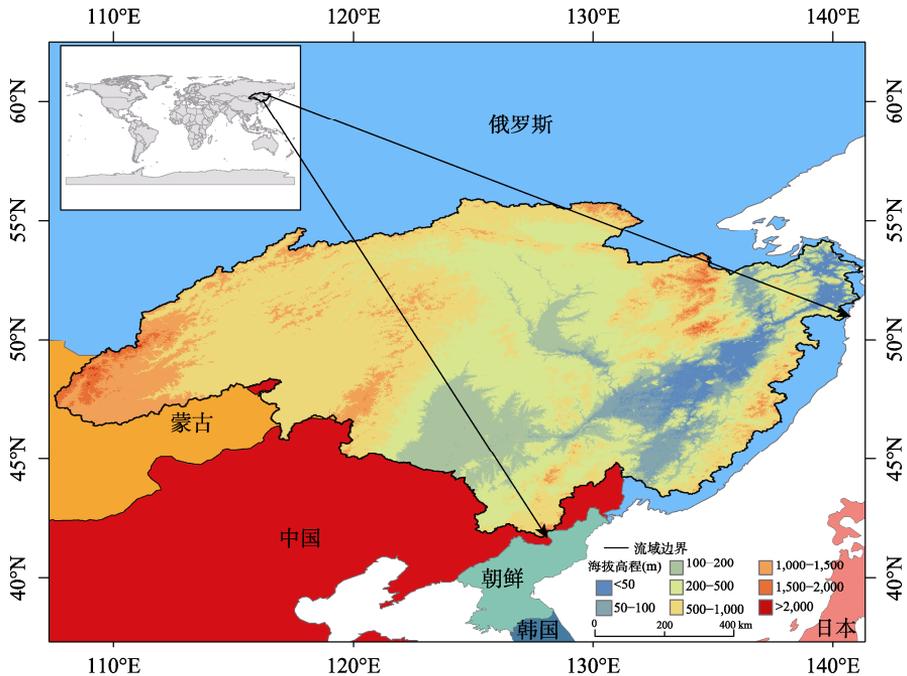


图 1 黑龙江流域地理位置与海拔高度分类图

干旱监测与预警近年来已逐渐成为学术界所关注和研究的热点议题。该领域的早期研究方法是采集站点监测的降水、气温、蒸散量、浅层土壤湿度等气象水文及土壤墒情数据并基于各类旱情评价指标进行统计分析进而量化研究区域的干旱程度^[6]。由于站点受自然环境和经济成本等因素影响呈现监测数据体量有限且空间分布不均的特点，所以站点数据在监测旱情过程中所获得的结果质量无论从时间、空间、效率等层面上均受到影响。而现今遥感领域相关技术的成熟发展使得其与传统方法融合研究的设想成为可能，新方法可以高效、客观、经济地完成多尺度范围内的干旱化信息提取^[7]。在基于遥感技术的旱情监测评价中，以植被指数和地表温度作为评价因子的相关指数较为常见^[8]。其中温度植被干旱指数 (Temperature Vegetation Dryness Index, TVDI) 最初为 Sandholt 等^[9]所提出，其指数模型原理为基于植被指数和地表温度两者的相关关系估测土壤表层水分状况进而反映其所在地区的干旱程度^[10]。相关学者利用该指数进行了地理单元级、国家级、区域级、省市级等不同空间尺度的大量旱情监测应用研究。如曹晓明等应用 TVDI 指数方法对蒙古高原进行了近 40 年的长时序干旱监测，研究结果显示运用该指数可有效反映大尺度区域的旱情及其演变特征^[11]。Cong 等^[12]基于 TVDI 指数计算结果与站点监测的 10 cm 土壤湿度数据进行组合分析验证表明利用该指标在中国东北地区进行全年度干旱动态监测是可行的。

覃艺等^[13]依据 TVDI 对 2000 年以来内蒙古地区生长季旱情特征变化进行监测与评估,并结合对应时期内的气温、降水等要素探讨时段内气候条件变化对其影响的趋势与幅度大小。然而当采用 TVDI 指数对大尺度范围地区进行干旱监测时,由于受到地表高程波动、经纬跨幅过大等影响,导致地表温度数据与实际存在较大偏差,进而影响对应特征空间的评价效果,降低 TVDI 指数反演表层土壤水分的数据精度^[14]。针对这一问题,刘立文等^[15]在构建多种常见植被指数-地表温度特征空间的过程中,采用研究区数字高程数据并对地表温度进行地形校正,减少了地形因素对地表能量平衡的影响,明显提升了基于 TVDI 指数反演大尺度区域土壤表层水分的效果。

2 数据集元数据简介

《黑龙江流域生长季温度植被干旱指数 1-km 栅格数据集(2007-2018)》^[16]的名称、作者、地理区域、数据年代、时间分辨率、空间分辨率、数据集组成、数据出版与共享服务平台、数据共享政策等信息见表 1。

3 数据研发方法

制作本数据集的遥感数据采用空间分辨率为 1 km 的 MODIS 月度植被指数产品 MOD13A3^[18]和 8 天地表温度产品 MOD11A2^[19],时间范围为 2007-2018 年的 4-10 月(其中植被指数产品包括每年第 91 天至第 274 天的数据,地表温度产品包括每年第 89 天至第 305 天的数据),空间区域行列编号为 h24v03、h25v03-04、h26v03-04 以及 h27v04。高程数据采用黑龙江流域海拔高度分类数据集^[20];气象数据采用空间分辨率为 0.1°的全球逐旬表层土壤水栅格数据产品^[21]以及按站点统计的逐月平均降水数据以及旬值土壤湿度数据^[22,23]。

3.1 算法原理

温度植被干旱指数(Temperature Vegetation Dryness Index, TVDI)是一种基于植被指数-地表温度特征空间的土壤水分监测方法^[9],其计算公式如下:

$$TVDI = \frac{T - T_{\min}}{T_{\max} - T_{\min}} \quad (1)$$

$$T_{\min} = a \times NDVI + b \quad (2)$$

$$T_{\max} = c \times NDVI + d \quad (3)$$

式中, T 为地表温度产品的像元值, T_{\min} 和 T_{\max} 分别为通用特征空间中 NDVI 所对应的最低和最高地表温度, a 、 c 和 b 、 d 分别为 NDVI-LST 特征空间中干湿边的斜率与截距系数,指数取值范围为从 0 至 1。

在 NDVI-LST 理论特征空间中,当研究区地表覆盖条件满足从裸地到植被全部覆盖状态、同时土壤含水量状况满足从完全干旱到全蓄水的条件时,指标散点图近似呈三角形或梯形^[24]。而在实际情况下,因为受监测区域土地覆被类型及其所占面积等各方面因素的约束,常常不能完全满足理论特征空间中的所需条件,故此在基于单时期遥感影像构建特征空间的过程中,其干、湿边中的散点数据无法完全覆盖至理论特征空间边界。针对这一问

题, 由于监测区域的土地覆被以及土壤含水量情况在较长时间序列内会发生较大变化。故此基于长时序同期数据进行最值合成方法构建通用特征空间, 该构建方案能够囊括地区内部不同时段内土地覆被和土壤湿度变化情况, 能够近似得到理论特征空间地表覆盖及含水量的设定条件从而有效改善单一时段特征空间对于旱情况的反馈不足。

表 1 《黑龙江流域生长季温度植被干旱指数 1-km 栅格数据集 (2007–2018)》元数据简表

条 目	描 述
数据集名称	黑龙江流域生长季温度植被干旱指数 1-km 栅格数据集 (2007–2018)
数据集短名	TVDI_AmurRiverBasin_2007-2018
作者信息	周业智, 中国科学院地理科学与资源研究所, zhouyz@lreis.ac.cn 王卷乐 R-8881-2016, 中国科学院地理科学与资源研究所, wangjl@igsrr.ac.cn
地理区域	地理范围为 41°42'N–55°56'N, 107°31'E–141°14'E, 包括中国、俄罗斯、蒙古和朝鲜四国的 15 个一级行政区
数据年代	2007–2018
时间分辨率	月
空间分辨率	1 km
数据格式	.tif
数据量	319 MB (压缩后)
数据集组成	数据集共包括 84 个逐月温度植被干旱指数数据文件, 文件名称为 TVDI.YYYYMM.1_km_monthly.tif
基金项目	中国科学院特别交流计划项目 (Y9X90050Y2); 中国工程科技知识中心防灾减灾知识服务系统 (CKCEST-2021-2-18)
数据计算环境	ENVI、ArcGIS
出版与共享服务平台	全球变化科学研究数据出版系统 http://www.geodoi.ac.cn
地址	北京市朝阳区大屯路甲 11 号 100101, 中国科学院地理科学与资源研究所
数据共享政策	全球变化科学研究数据出版系统的“数据”包括元数据 (中英文)、通过《全球变化数据仓储电子杂志 (中英文)》发表的实体数据集和通过《全球变化数据学报 (中英文)》发表的数据论文。其共享政策如下: (1) “数据”以最便利的方式通过互联网系统免费向全社会开放, 用户免费浏览、免费下载; (2) 最终用户使用“数据”需要按照引用格式在参考文献或适当的位置标注数据来源; (3) 增值服务用户或以任何形式散发和传播 (包括通过计算机服务器) “数据”的用户需要与《全球变化数据学报 (中英文)》编辑部签署书面协议, 获得许可; (4) 摘取“数据”中的部分记录创作新数据的作者需要遵循 10% 引用原则, 即从本数据集中摘取的数据记录少于新数据集总记录量的 10%, 同时需要对摘取的数据记录标注数据来源 ^[17]
数据和论文检索系统	DOI, CSTR, Crossref, DCI, CSCD, CNKI, SciEngine, WDS/ISC, GEOSS

依据上述理论, 相关学者已在不同区域的干旱监测研究中对其方案可行性及优越性予以了印证^[24,25], 本研究选取 2007–2012 年黑龙江流域内部国内省份 (黑龙江、吉林、内蒙古) 生长季代表月份 (4、7、10 月) 的同期 10 cm 土壤湿度均值与基于单一和通用特征空间计算的指数结果进行相关性分析 (图 2), 结果表明: 单一时段特征空间的相关系数最小为 0.352,5, 最大为 0.399,4。与之相比, 同期通用特征空间的相关系数均有所提高, 最小为 0.397,1, 最大为 0.414,3, TVDI 指数结果与实测值相关性更强。

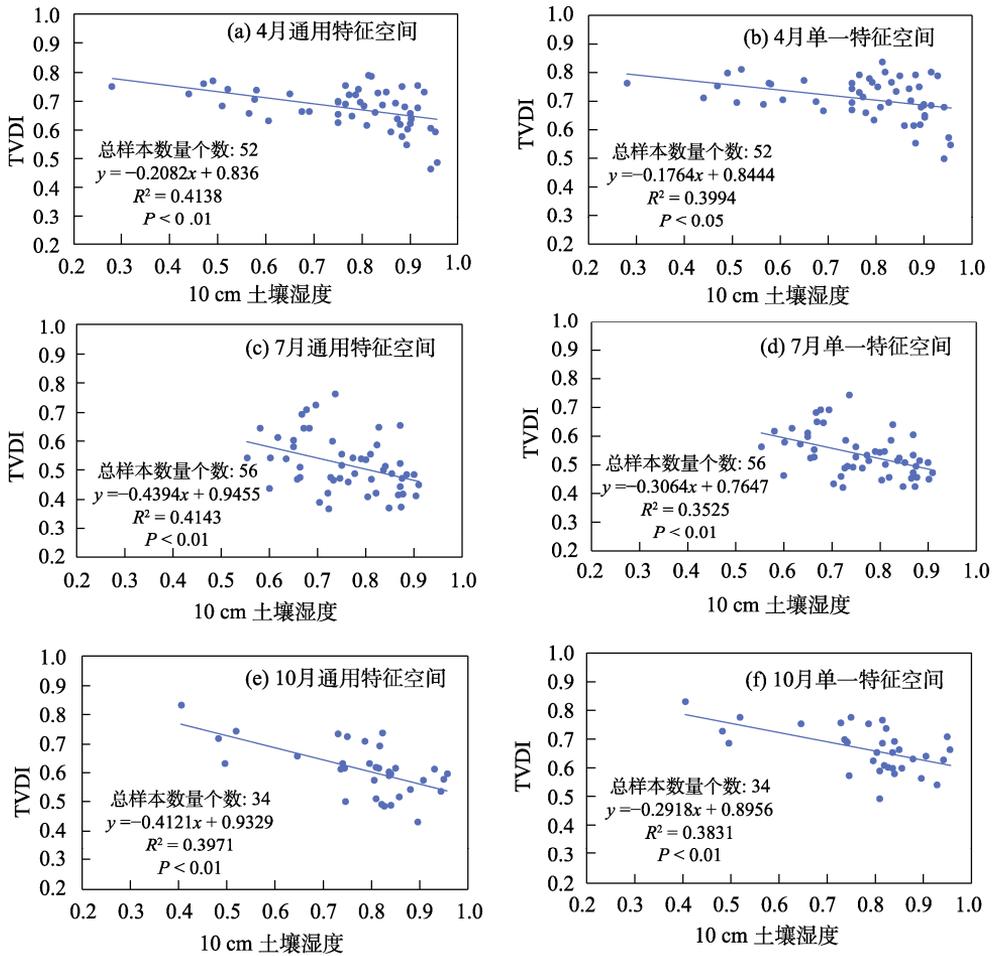


图 2 基于通用特征空间与单一特征空间的相关性结果对比图

本研究基于通用特征空间方法获得的 LST 最大值变化情况以及拟合后的干湿边方程如表 2 和图 3 所示。

表 2 黑龙江流域逐月干湿边拟合方程

月份	干边方程	湿边方程
4 月	$y = -20.234x + 52.094$	$y = 12.216x - 6.9245$
5 月	$y = 11.838x - 6.7406$	$y = 11.441x - 2.8382$
6 月	$y = -6.7647x + 54.671$	$y = 0.7518x + 12.232$
7 月	$y = -11.188x + 62.355$	$y = -3.6056x + 21.516$
8 月	$y = -20.381x + 68.587$	$y = -3.8234x + 22.905$
9 月	$y = -6.9896x + 40.358$	$y = 8.3332x - 8.3254$
10 月	$y = -12.249x + 26.295$	$y = 4.1039x - 18.233$

3.2 技术路线

本数据的生产处理流程包括原始 NDVI 和 LST 数据预处理及时空序列重建, NDVI-LST

通用特征空间构建及 TVDI 指数计算与评估等工作（图 4）。数据预处理主要由分幅数据拼接与投影转换、波段提取及像元重采样等步骤组成；数据时空序列重建包括空间插补、地形校正、时间序列补齐与统一；通用特征空间构建部分主要包含单一空间干湿点提取与最值合成通用干湿边等工作；指数计算与评估的内容为将计算的研究区 TVDI 指数结果与降水和表层土壤水数据进行相关性分析来验证其监测适用性。

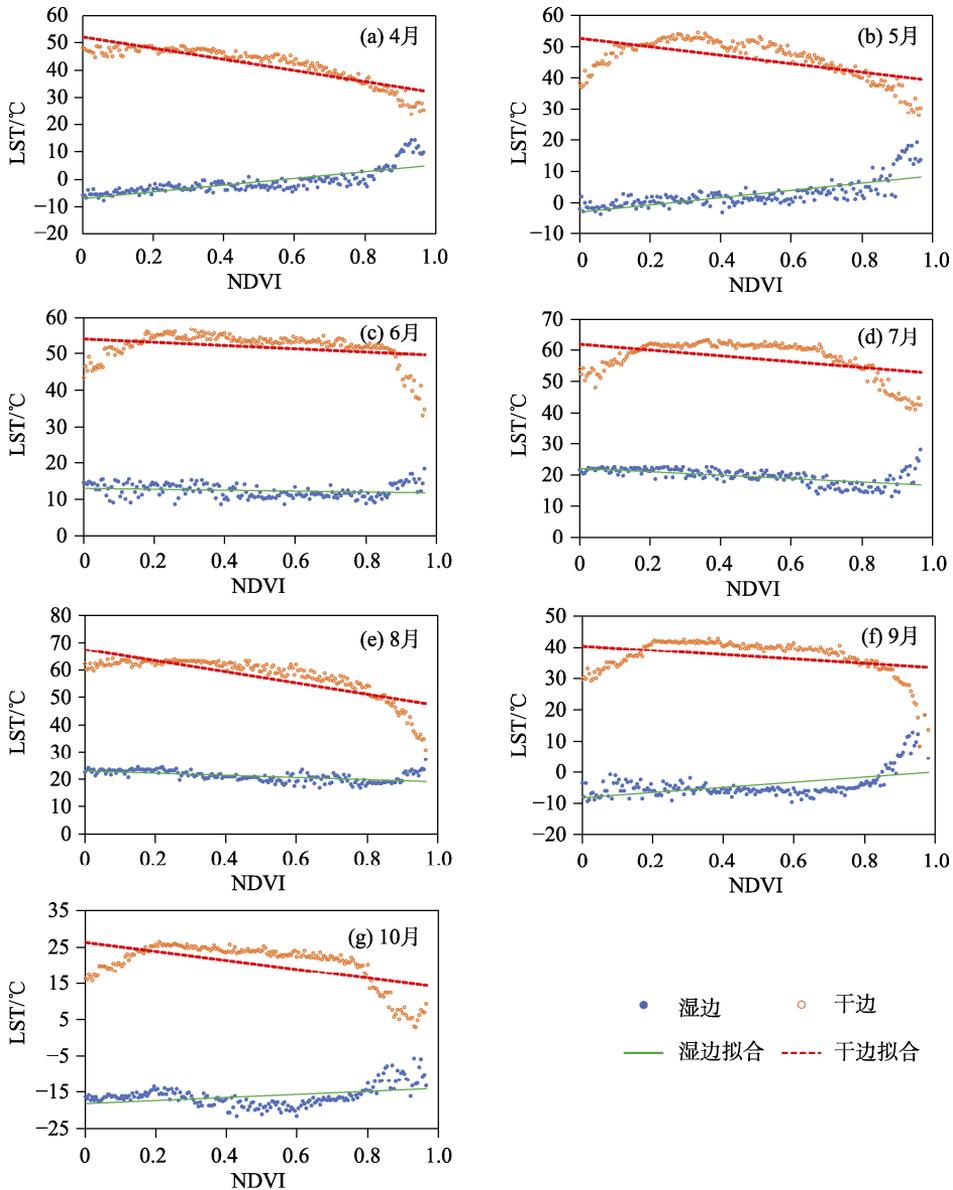


图 3 黑龙江流域生长季各月通用特征空间变化图

(1) 数据预处理

在本数据集获取的原始遥感数据产品中，植被指数及地表温度产品的数据格式为.hdf，

投影方式为正弦曲线投影。为直观反映两类数据所包含的信息，首先在 MODIS 再投影工具（MODIS Rejection Tool, MRT）内设置相关参数，将投影方式转换为以 WGS84 为基准的地理投影，选取适用于连续数据重采样的最近邻采样法将像元大小设置为 0.008,333,333,3 度（单位转换后空间分辨率为 1 km）并选择归一化植被指数 NDVI、地表温度 LST 及其质量控制数据波段 QC，最后将上述波段设定为 Geotiff 格式输出。

基于 ArcGIS 软件中的 arcpy 功能，结合黑龙江流域矢量边界与 MODIS 产品质量控制文件中的 QA 值及波段数据 QC，进行上述遥感数据的批量裁剪与掩膜，同时剔除质量不可靠像元，生成研究区质量可靠的 NDVI 与 LST 数据集。

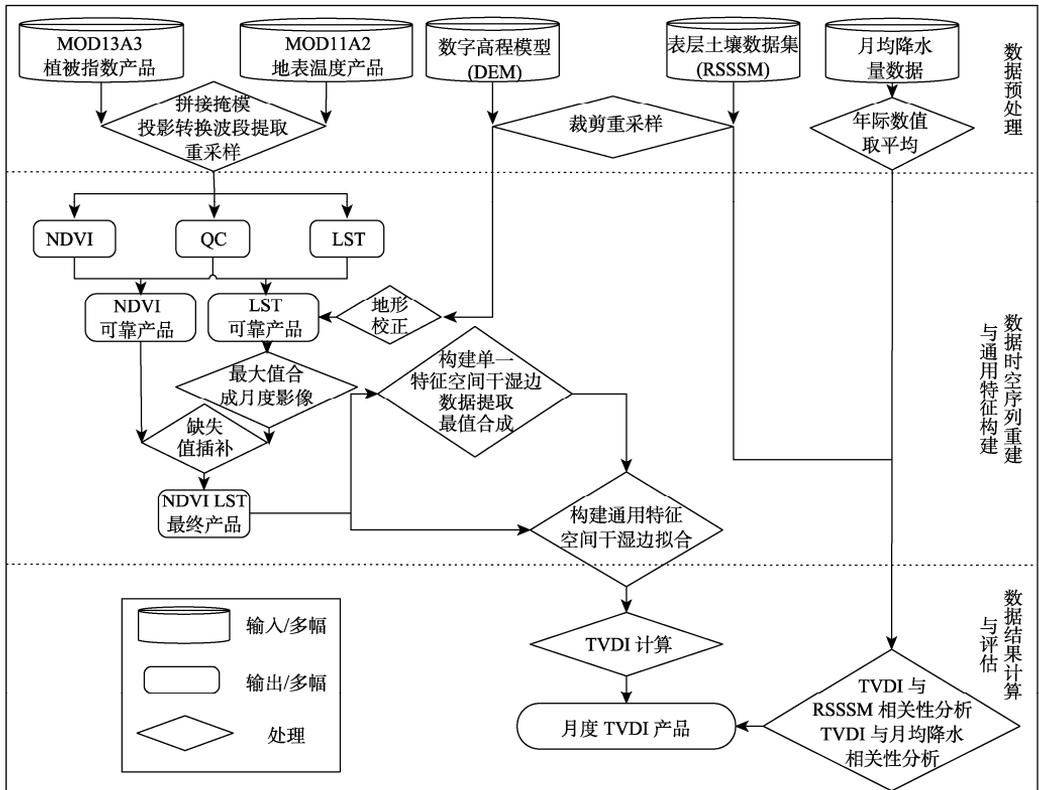


图 4 黑龙江流域温度植被干旱指数数据集研发流程图

(2) 数据时空序列重建

数据序列重建工作主要体现在时间和空间两方面，在时间部分通过最大值合成方法统一不同数据的时间尺度并弥补因云雾等天气条件影响下的观测值缺失，在空间部分通过插补缺失和质量不可靠像元以及结合数字高程模型对地形进行修正，减弱地形因素对观测数值造成偏差的影响。

1) 数据时间序列统一

由于最终生成的数据产品时间分辨率为月并考虑到地表温度数据的可用性受云雾遮盖的影响较大，因此将 MOD11A2 数据产品由原来的 8 天转换为月尺度，处理方法为 4 幅数

据影像通过最大值合成方法将转换后影像的像元值赋为原来每幅影像对应像元的最大值。

2) 可靠像元值提取及缺失与不可靠像元值插补处理

依据 MODIS NDVI 数据质量说明中的 QA 值和 LST 质量控制波段数据 (QC) 说明中的位标志信息,运用 Python 语言基于上述数据中所规定的可信像元类型批量提取目标像元。

对于缺失像元和已剔除的质量不可靠像元,采用 ArcGIS 软件栅格计算器中的条件函数 con、判断函数 isNull 以及焦点统计函数 Focal Statistics 对其进行填充。具体语句为 Con(IsNull("raster"), FocalStatistics("raster", NbrRectangle(5, 5, "CELL"), "MEAN"), "raster"), 其核心意思是对待处理栅格的空值区域赋予其周围指定邻域值内插的数据。其中 NbrRectangle(5, 5, "CELL")中的数值为以目标像元为中心的正方形长度,依据实际情况而设定。

3) 地形数据修正处理

本部分基于经典 C 校正模型对研究区地形进行校正^[15],首先利用 DEM 数据在 ENVI 软件中提取坡度与坡向数据,然后基于软件中波段运算 (Bandmath) 功能结合 IDL 语言基于二阶校正模型对各类坡向地区进行两次坡度匹配及校正来消除由大气散射和地表反射光折射造成的地表温度数据 DN 值和太阳入射角间的关系偏差,提高其数据精度并输出最终结果。

(3) NDVI-LST 通用特征空间构建

本部分具体处理方法为利用研究时段内每年同一月份 NDVI 和 LST 影像构建逐月单一特征空间并沿横坐标轴 (NDVI 值) 按步长为 0.005 提取干湿边上各点的 LST 最值;最终将这些数值作为极值统计出各年份对应时间段内的 LST 最值来构建通用特征空间并通过线性拟合方法生成干、湿边方程。

(4) TVDI 指数计算与评估

根据干湿边方程的斜率与截距系数以及式(1)至(3)计算黑龙江流域 2007–2018 年生长季逐月温度植被干旱指数,然后将结果与和表层土壤含水量相关的实测数据与估测产品进行相关性分析,评估本数据产品的干旱监测质量和效果。

表 3 温度植被干旱指数产品属性信息

编号	属性	数值
1	数据类型	unsigned int16
2	行数	4,045
3	列数	1,708
4	像素值	0–10,000
5	像素大小	0.008,333,333,3、0.008,333,333,3
6	缺省值	65,535
7	应用比例系数	0.000,1
8	坐标系统	WGS84

4 数据结果与验证

4.1 数据集组成

黑龙江流域 2007–2018 年生长季逐月温度植被干旱指数产品为单波段数据文件,数据

名称格式为 TVDI.YYYYMM.1_km_monthly.tif，其中 TVDI 表示数据内容为温度植被干旱指数结果；YYYYMM 表示数据文件所处时间为 YYYY 年第 MM 月份；1_km 表示数据集空间分辨率为 1 km；monthly 表示数据集时间尺度为月。数据结果在存储时放大 10,000 倍，即像元数值大小范围为 0–10,000，使用本数据集时需乘以比例系数 0.000,1。

4.2 数据结果

根据 TVDI 指数计算的数据结果将 2007–2018 年黑龙江流域逐月干旱情况划分为 5 级^[21]：湿润（ $TVDI \in [0, 0.2]$ ）、正常（ $TVDI \in (0.2, 0.4]$ ）、轻旱（ $TVDI \in (0.4, 0.6]$ ）、中旱（ $TVDI \in (0.6, 0.8]$ ）和重旱（ $TVDI \in (0.8, 1.0]$ ）。以此分级方案确定的黑龙江流域干旱等级分布结果如图 5 所示。

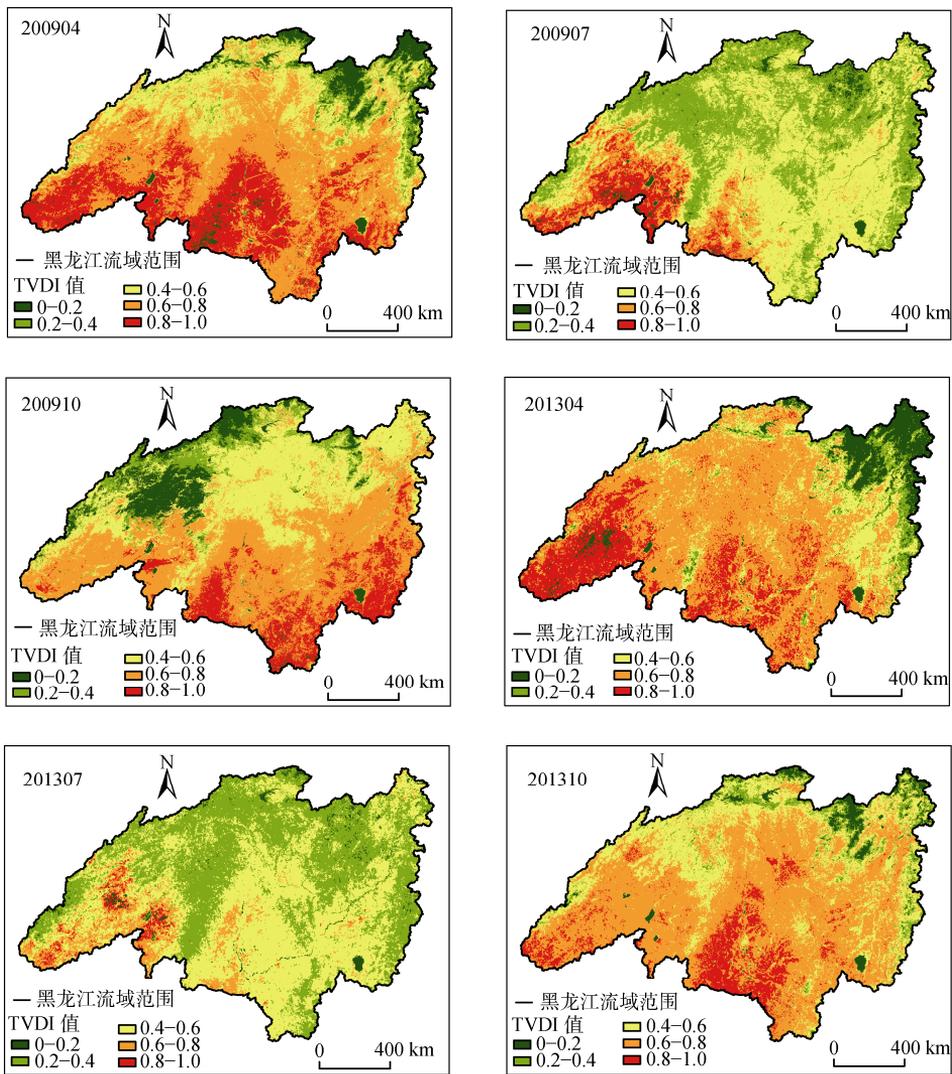


图 5 基于 TVDI 指数的黑龙江流域 2009、2013 年生长季代表月干旱等级分布图

为反映黑龙江流域整体干旱年际变化，本文选定流域生长季的三个时期（初期 4–5 月，

中期 6–8 月, 末期 9–10 月), 对各时期的 TVDI 指数均值进行趋势分析, 分析结果如图 6 所示。

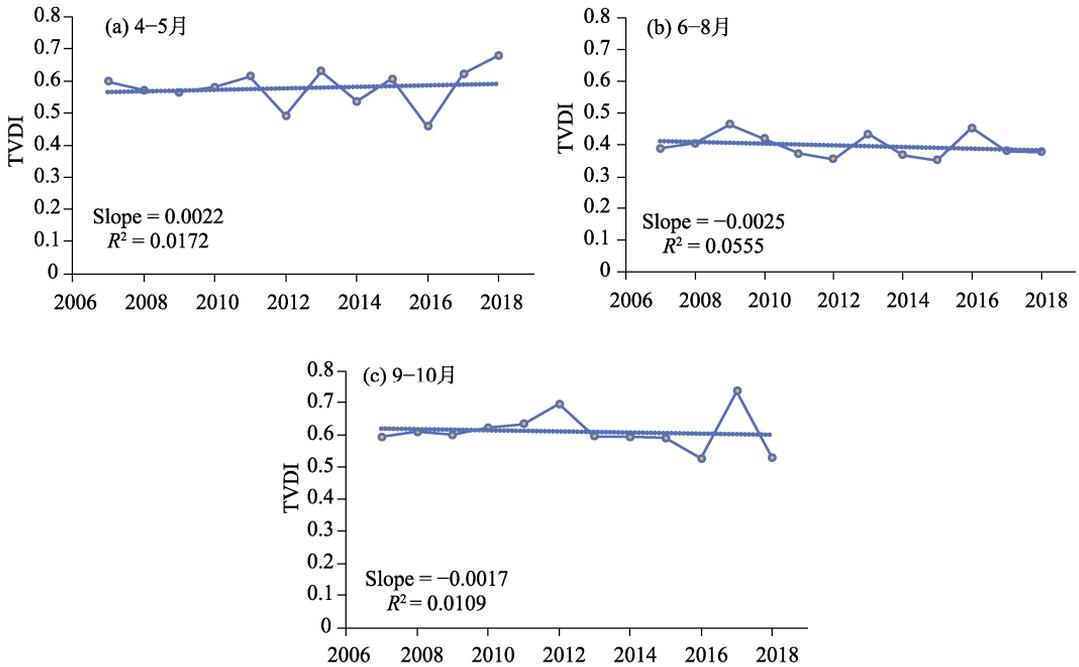


图 6 黑龙江流域生长季各时期 TVDI 均值结果年际变化趋势

4.3 数据结果验证

全球表层土壤水旬度数据集 (Remote-sensing-based Surface Soil Moisture, RSSSM) 是融合多种主、被动微波遥感数据反演出的结果, 其数据精度与现今最优遥感土壤水数据产品 Soil Moisture Active Passive (SMAP) 为同一水平^[26]。故此在本数据集的质量评估部分选用该数据集以及在研究区均匀分布的 50 座气象站点监测的降水量数据与本指数结果进行相关性分析 (图 7、图 8)。在指数结果同前者逐像元级的相关性分析中, 分析结果表明两者内部所有像元数据均呈现负相关关系, 其中相关系数的绝对值均大于 0.45, 并且所有像点间的相关性全部通过了 $P < 0.05$ 的显著性检验。而在与降水量数据的相关性分析中, 结果显示站点所在位置的 TVDI 指数与该数据均呈现负相关关系, 相关系数绝对值的最大和最小值分别为 0.558,1 和 0.129,1, 所有数据的相关性分析结果均通过了 $P < 0.01$ 的显著性检验。

5 讨论和总结

针对黑龙江流域这一气候变化敏感地区进行干旱监测对中蒙俄经济走廊绿色安全发展具有重要的现实意义, 为此本文结合多源数据构建通用特征空间计算该地区 2007–2018 年生长季 TVDI 结果, 获取本时段内逐月旱情特征。由各月份通用特征空间中的干边结果可以看出, 在 NDVI 介于 0–0.2 范围内多数月份的地表温度存在“爬升”现象, 其原因可能是由于这些地区植被过于稀疏, 近地表被风力等自然因素带走更多的热量从而导致温度

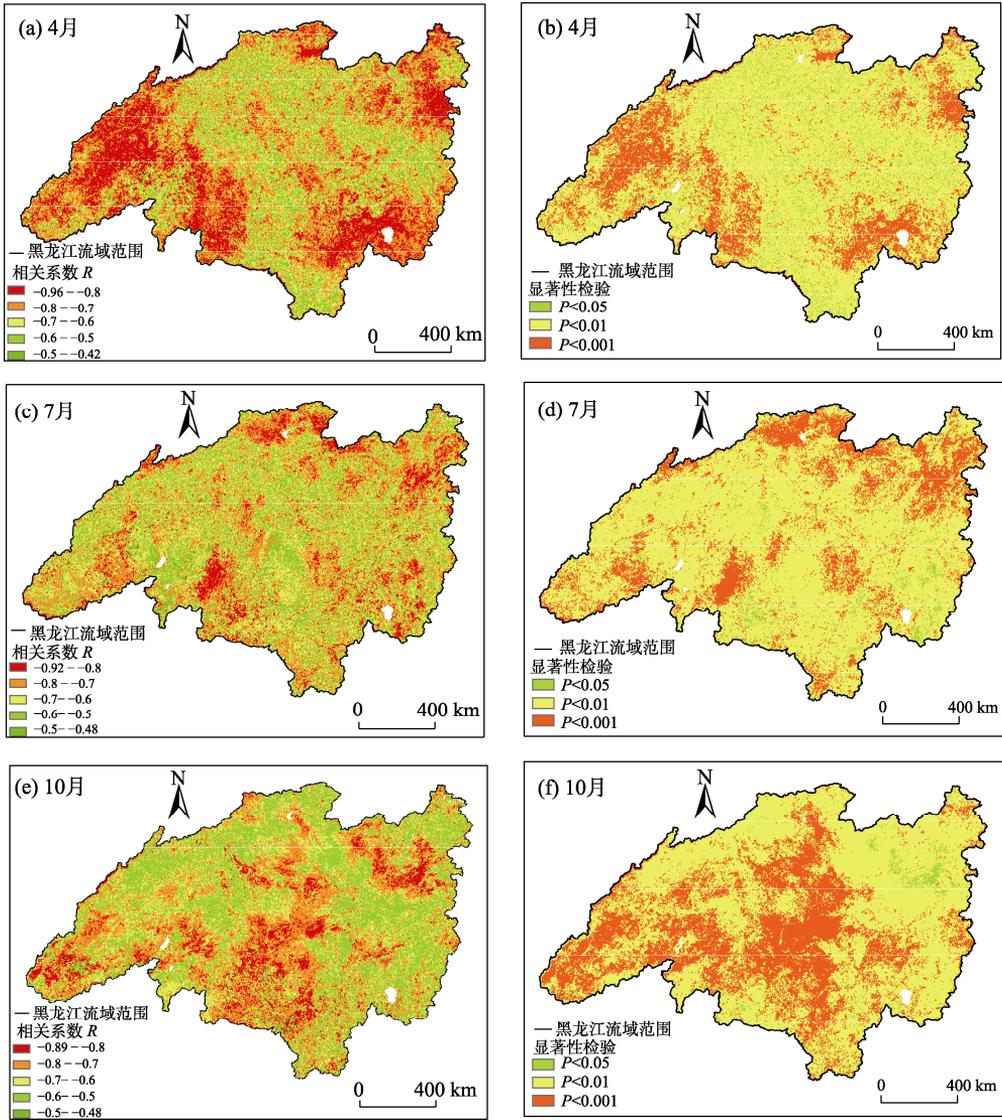


图 7 研究区生长季代表月 TVDI 与 RSSM 的相关系数与显著性检验结果图

较存在植被覆盖地区略低；在 NDVI 值大于 0.8 的范围内，6–10 月特征空间内的干边 LST 值均出现明显下降的趋势，表明该时段内高植被覆盖度区域的蒸腾作用可有效削减地表附近的能量。反观湿边方程，4–5 月和 9–10 月的地表温度的总体趋势随植被指数的增大而上升，而在生长季中期（6–8 月）两者关系总体呈现负相关。两者存在差异的原因与植被的季节性蒸腾能力以及当季气温条件存在一定联系。而由黑龙江流域生长季各时期 TVDI 均值年际变化趋势可以看出，流域内各时期土壤含水量情况总体保持稳定，其中初期和末期的指数值均在 0.6 左右上下波动，而中期的指数统计值则趋近于 0.4。该结果结合流域干旱等级分布图表明干旱情况相对严重区域主要集中在黑龙江流域中部及南部，其中，蒙古及中蒙交界部分在各月份内干旱等级均为最高。综合以上发现，本研究为探究黑龙江流

域生长季干旱特征,为中蒙俄朝四国在对应跨境地区的干旱灾害联合防控机制提供了基础参考资料。

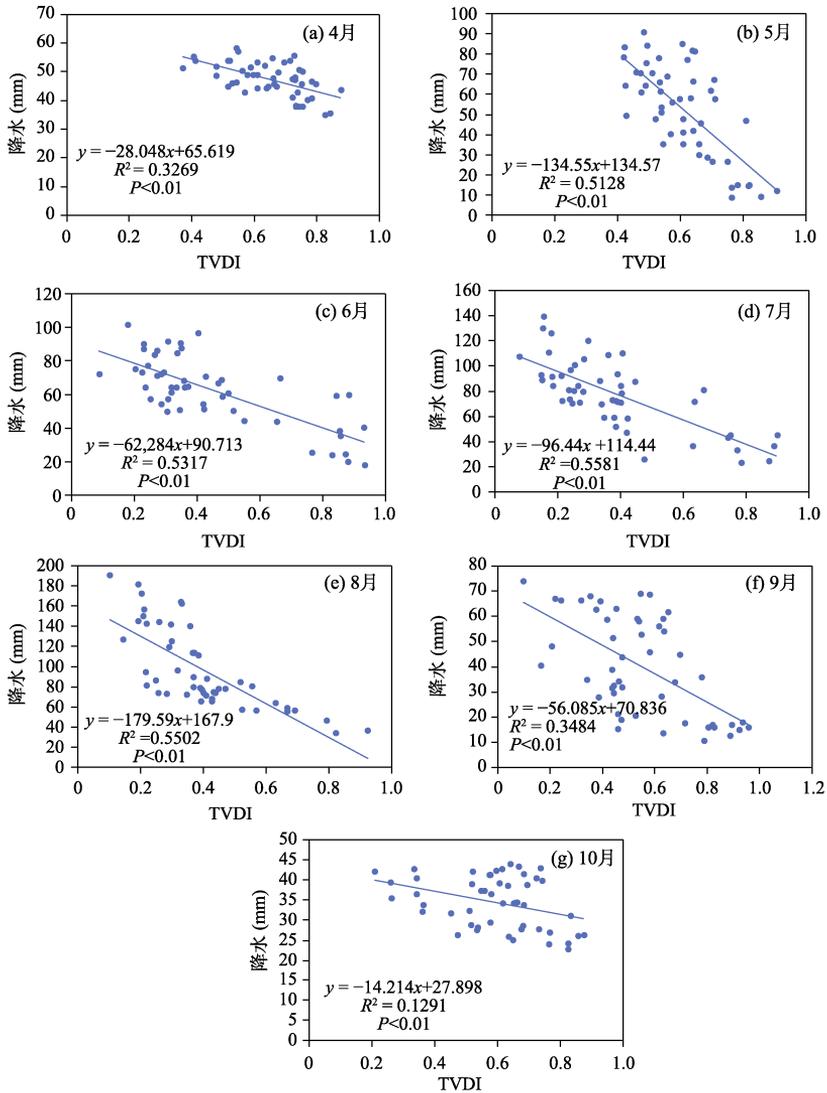


图8 研究区生长季各月份 TVDI 与降水的相关系数与显著性检验结果图

作者分工:王卷乐负责数据集开发总体设计工作;周业智、李凯负责数据采集处理及验证工作;王卷乐、周业智、李凯共同完成数据论文撰写。

利益冲突声明:本研究不存在研究者以及与公开研究成果有关的利益冲突。

参考文献

- [1] 黄跃飞,李铁键,吕恩泽等.黑龙江流域界线数据——世界地理数据大百科辞条[DB/OL].全球变化数据仓储,2016. <https://doi.org/10.3974/geodb.2016.03.11.V1>.
- [2] 黄跃飞,李铁键,吕恩泽等.黑龙江流域——世界地理数据大百科辞条[J].全球变化数据学报,2017,1(1):114. <https://doi.org/10.3974/geodp.2017.01.18>.

- [3] 戴长雷, 王思聪, 李治军等. 黑龙江流域水文地理研究综述[J]. 地理学报, 2015, 70(11): 1823–1834.
- [4] Haruyama, S., Takayuki, S. Environmental Change and the Social Response in the Amur River Basin [M]. Japan: Springer Press, 2015: 37–38.
- [5] Yang, R., Li, X. Y., Mao, D. H., *et al.* Examining fractional vegetation cover dynamics in response to climate from 1982 to 2015 in the Amur River Basin for SDG 13 [J]. *Sustainability*, 2020, 12(14): 5866.
- [6] 刘宪锋, 朱秀芳, 潘耀忠等. 农业干旱监测研究进展与展望[J]. 地理学报, 2015, 70(11): 1835–1848.
- [7] 柳钦火, 辛景峰, 辛晓洲等. 基于地表温度和植被指数的农业干旱遥感监测方法[J]. 科技导报, 2007 (6): 12–18.
- [8] 张顺谦, 卿清涛, 侯美亭等. 基于温度植被干旱指数的四川伏旱遥感监测与影响评估[J]. 农业工程学报, 2007(9): 141–146, 294.
- [9] 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): 213–224.
- [10] 沙莎, 郭铤, 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.
- [11] Cao, X. M., Feng, Y. M., Shi, Z. J. Spatio-temporal variations in drought with remote sensing from the Mongolian Plateau during 1982–2018 [J]. *Chinese Geographical Science*, 30(6): 1081–1094.
- [12] Cong, D. M., Zhao, S. H., Xian, L., *et al.* Temporal and spatial distribution of drought in Northeast China based on temperature vegetation drought index (TVDI) from 2001–2013 [C]. IGARSS 2016—2016 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, IEEE, 2016.
- [13] 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.
- [14] 赵杰鹏, 张显峰, 廖春华等. 基于 TVDI 的大范围干旱区土壤水分遥感反演模型研究[J]. 遥感技术与应用, 2011, 26(6): 742–750.
- [15] 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.
- [16] 周业智, 王卷乐, 李凯. 黑龙江流域生长季温度植被干旱指数 1-km 栅格数据集(2007–2018) [J/DB/OL]. 全球变化数据仓储电子杂志, 2021. <https://doi.org/10.3974/geodb.2021.05.02.V1>. <https://cstr.escience.org.cn/CSTR:20146.11.2021.05.02.V1>.
- [17] 全球变化科学研究数据出版系统. 全球变化科学研究数据共享政策 [OL]. <https://doi.org/10.3974/dp.policy.2014.05> (2017 年更新).
- [18] MODIS13A3 data [DB/OL]. <https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/>.
- [19] MODIS11A2 data [DB/OL]. <https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/>.
- [20] 查逢丽, 刘闯, 石瑞香. 黑龙江流域海拔高度分类数据集 [DB/OL]. 全球变化数据仓储, 2016. <https://doi.org/10.3974/geodb.2016.04.17.V1>.
- [21] 陈永喆, 冯晓明, 傅伯杰. 全球表层土壤水旬度数据集 (RSSSM, 2003–2018) [J/DB/OL]. 全球变化数据仓储电子杂志, 2021. <https://doi.org/10.3974/geodb.2021.02.01.V1>. <https://cstr.escience.org.cn/CSTR:20146.11.2021.02.01.V1>.
- [22] 中国农作物生长发育和农田土壤湿度旬值数据集 [DB/OL]. http://data.cma.cn/data/cdcdetail/dataCode/AGME_AB2_CHN_TEN.html.
- [23] 全球月均降水统计数据地图 [DB/OL]. <https://gis.ncdc.noaa.gov/maps/ncei/summaries/monthly>.
- [24] 于敏, 程明虎, 刘辉. 地表温度–归一化植被指数特征空间干旱监测方法的改进及应用研究[J]. 气象学报, 2011, 69(5): 922–931.
- [25] Cao, X. M., Feng, Y. M., Wang, J. L. An improvement of the Ts-NDVI space drought monitoring method and its applications in the Mongolian plateau with MODIS, 2000–2012 [J]. *Arabian Journal of Geosciences*, 2016, 9(6): 433.
- [26] Chen, Y. Z., Feng, X. M., Fu, B. J. An improved global remote-sensing-based surface soil moisture (RSSSM) dataset covering 2003–2018 [J]. *Earth System Scientific Data*, 2021, 13: 1–31.