

DOI: 10.5846/stxb201802260389

吴欣睿,那晓东,臧淑英.温度植被干旱指数在 2000—2015 年松嫩平原土壤湿度中的应用研究.生态学报,2019,39(12): - .
Wu X R, Na X D, Zang S Y. Application of temperature vegetation dryness index in the estimation of soil moisture of the Songnen Plain. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(12): - .

温度植被干旱指数在 2000—2015 年松嫩平原土壤湿度中的应用研究

吴欣睿,那晓东*,臧淑英

哈尔滨师范大学,寒区地理环境监测与空间信息服务黑龙江省重点实验室,哈尔滨 150025

摘要:选取了时间序列良好的 MODIS 影像,对松嫩平原 2000—2015 年逐月的温度植被干旱指数(TVDI)进行计算,并结合农业气象站点的相对土壤湿度数据进行对比验证,发现 TVDI 和相对土壤湿度数据具有良好的相关关系,表明 TVDI 可以作为表示土壤含水量的指标。文章重建 1 km 分辨率的松嫩平原作物生长季(4—10 月)表层土壤湿度空间信息数据集,引入集合经验模态分解分析方法探究了松嫩平原土壤湿度的时空变化特征及变化趋势,并探讨了松嫩平原土壤湿度变化对农作物产量的影响。结果表明,近 16 年来松嫩平原土壤湿度的时间变化趋势是逐渐变湿,土壤湿度的空间变化趋势是由西南向东北逐渐变湿,极端土壤缺水事件频率呈现出增高的趋势。松嫩平原粮食产量和年均土壤湿度水平显著相关说明粮食产量受到年平均土壤湿度的影响显著,不同季相的土壤湿度对粮食产量的影响程度差异较大,夏季土壤湿度对粮食产量的影响尤为明显。

关键词:松嫩平原;土壤湿度;温度植被干旱指数;粮食产量

Application of temperature vegetation dryness index in the estimation of soil moisture of the Songnen Plain

WU Xinrui, NA Xiaodong*, ZANG Shuying

Harbin Normal University, Heilongjiang Province Key Laboratory of Geographical Environment Monitoring and Spatial Information Service in Cold Regions, Harbin 150025, China

Abstract: In the current study, time-series MODIS images were selected to calculate the monthly temperature vegetation dryness index (TVDI) from 2000 to 2015 of the Songnen Plain. There was a strong correlation between the TVDI value and soil relative moisture, which signified that TVDI could be used as a substitute indicator for soil relative moisture. The spatial dataset for the surface soil moisture during the crop growing season (from April to October) was rebuilt with a 1 km cell size. The temporal and spatial variation characteristics and dynamic trends of soil moisture were analyzed by means of ensemble empirical mode decomposition (EEMD) and the impact of soil moisture on crop yield was discussed. The results showed that soil moisture was gradually increasing from the southwest to northeast in the Songnen Plain in terms of spatial distribution. Regarding temporal changes, soil moisture had increased over the past 16 years, although the frequency of extreme water shortage events had increased. There was a significant correlation between yearly average soil moisture and crop yield, which showed that crop yield was primarily affected by the yearly average soil moisture. Crop yield was affected by soil moisture of different seasons, especially that of summer.

基金项目:国家自然科学基金项目(41001243,41571199);黑龙江省普通本科高等学校青年创新人才培养计划项目(UNPYSCT-2016073);哈尔滨师范大学优青项目(XRQG15)

收稿日期:2018-02-26; 网络出版日期:2018-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: naxiaodong_8341@163.com

Key Words: Songnen Plain; soil moisture; temperature vegetation dryness index; crop yield

土壤湿度是监测土地生产力的重要指标之一,它不仅在水文循环过程中充当了大气和陆地之间能量交换的纽带^[1-2],而且土壤湿度同农作物及植被的生长发育状况密切相关,对生态景观结构和空间格局分布也具有决定性作用^[3]。松嫩平原地形平坦、面积广阔,土壤肥沃,是中国主要的商品粮生产基地之一。然而随着全球气候的变化和人为干扰的加剧,松嫩平原河湖面积缩减、极端水文事件频发、土壤盐碱化程度日益加剧、农业干旱综合态势较为严峻,严重威胁国家粮食安全^[4-7]。亟需对松嫩平原的土壤湿度及其变化趋势开展长期连续的监测和评估,分析大尺度土壤湿度的变化对区域粮食产量的影响。不同于前人研究中常采用的线性趋势分析方法、相关分析、M_K 突变检验法等趋势分析方法,本文引入适用于非线性波动数据特征分析的集合经验模态分解方法对土壤湿度变化趋势进行探索。该方法在信号分析领域被广泛发展和使用,近年来已有学者将其引入到对气象和生态因子的趋势分析中:罗那那^[8]和吴燕峰^[9]基于集合经验模态分解分析了降水多尺度变化特征;刘可^[10]利用该方法研究了不同陆地生态系统的 NDVI 波动特征;胡悦^[11]通过此方法得出了宁夏中部干旱带的变化趋势。以上研究均表明集合经验模态分解具有良好非线性分析能力。

本文在前期研究学者的基础上,以松嫩平原为研究区,做了以下 3 个方面工作:(1)利用温度植被干旱指数模型获取 2000—2015 年时空连续的土壤湿度数据,以补充松嫩平原土壤湿度等数据资料,为以后的科研工作提供数据参考;(2)引入集合经验模态分解对时间序列连续的土壤湿度数据进行分析,更加精准的探索土壤湿度变化趋势,以期对松嫩平原的合理灌溉、农作物种植工作做出有效的指导;(3)结合土壤湿度指标和农作物产量,进一步分析土壤湿度状况对农作物产量的影响,旨在为政府及农业部门防灾减灾、确保生态农业安全提供有力的理论支持。

1 原理与方法

1.1 温度植被干旱指数模型

TVDI 能够表征土壤湿度的原理,是由于植被蒸腾和土壤水分蒸发能够使地表温度降低。很多学者以此为切入点三者空间关系进行了研究。Price, Calson 等研究发现,在植被覆盖由疏到密和土壤湿度由干旱到湿润连续变化的区域,将从遥感影像中获得的归一化植被指数(Normalized difference vegetation index, NDVI)和地表温度(T_s)数据分别作为横坐标和纵坐标建立坐标散点图,得到二者空间上呈三角形关系^[12-13](图 1)。

Sandholt 等人在观察 T_s -NDVI 空间特征中发现该空间特征中含有较多等直线,于是将其简化并提出了温度植被干旱指数(Temperature Vegetation Dryness Index, TVDI)用以监测旱情及监测土壤湿度^[14]。表达式如下:

$$TVDI = (T_s - T_{s_{\min}}) / (T_{s_{\max}} - T_{s_{\min}}) \quad (1)$$

式中, T_s 为任意像元地表温度; $T_{s_{\min}}$ 为最小地面温度,对应的是湿边; $T_{s_{\max}}$ 为最大地面温度,对应的是干边。Nemani、Moran 等在计算 T_s -NDVI 的空间特征关系中表明: $T_{s_{\min}}$ 和 $T_{s_{\max}}$ 随着不同植被覆盖条件而变化^[15-16], Sandholt 将 $T_{s_{\min}}$ 和 $T_{s_{\max}}$ 进行线性拟合得到方程^[15]:

$$T_{s_{\max}} = a_1 + b_1 \times NDVI \quad (2)$$

$$T_{s_{\min}} = a_2 + b_2 \times NDVI \quad (3)$$

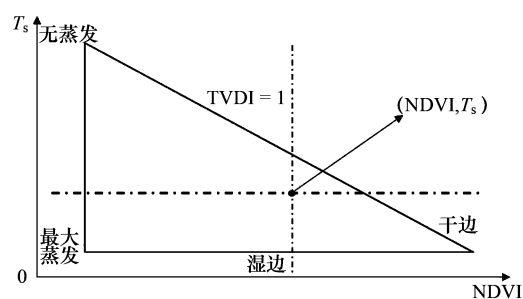


图 1 温度植被干旱指数原理示意图

Fig. 1 Schematic diagram of temperature vegetation dryness index

T_s : 地表温度, Surface temperature; NDVI: 归一化植被指数, Normalized difference vegetation index; TVDI: 温度植被干旱指数, Temperature vegetation dryness index

式中, a_1 、 b_1 是干边的拟合系数, a_2 、 b_2 是湿边的拟合系数, 并将 TDVI 方程进行整合最终可得到 TVDI 计算方程。

1.2 集合经验模态分解

集合经验模态分解^[17-18] (Ensemble Empirical Mode Decomposition, EEMD) 是一种在经验模态分解的基础上发展而来的数据减噪分析方法, 此方法能够剔除数据中不稳定噪声信息并保留数据原本所具有的内在变化特征, 因此在信号特征分析领域中被广泛应用。集合经验模态分解作为经验模态分解方法的优化算法, 具有自适性, 其关键在于白噪声的添加解决了尺度混合问题。白噪声的添加同原始信号之间的关系如下^[19]:

$$\ln \sigma + \frac{k}{2} \ln N = 0 \quad (4)$$

式中, σ 为标准偏差, k 为添加白噪声值, N 为样本数。

2 研究区与数据处理

2.1 研究区概况

松嫩平原位于黑龙江省西南部和吉林省西北部 ($42^{\circ}50' - 49^{\circ}18'N$, $119^{\circ}45' - 129^{\circ}36'E$), 平原以大兴安岭东麓丘陵和台地为界, 北部和东部以小兴安岭及长白山地外缘山麓台地为邻, 南抵达松辽分水岭 (图 2)。研究区地处半干旱半湿润交界地带, 属于典型的温带大陆性气候, 自东向西大陆性逐渐增强。年平均降水量为 400—500 mm, 集中在夏季, 并且由东南向西北递减, 年平均蒸发量为 1250—1650 mm, 蒸发量大而降水少使得气候干旱。平原面积广阔, 约 $23.75 \times 104 \text{ km}^2$, 其中耕地面积占 $5.59 \times 104 \text{ km}^2$ 。

松花江、嫩江及其支流常年冲积是该平原形成的主要原因, 加之平原地貌主要由平原周围漫岗低丘和岗丘间洼地组成, 为多种土壤的形成提供了良好条件, 不同土壤类型的理化性质及其生态环境状况详见表 1。该区域主要盛产大豆、小麦、玉米、甜菜、亚麻、马铃薯等, 是黑龙江省和国家重要的商品粮基地, 其粮食商品率所占比例高达 30% 以上, 因此, 对松嫩平原进行土壤湿度变化趋势的监测对于推动农业发展显得极为重要。

2.2 数据源及数据处理

研究所使用遥感数据来源于美国国家宇航局 (NASA) 数据中心, 由于逐日晴空资料难以获取, 本次工作选用 2000—2015 年 MODIS 的 3 级陆地标准产品: 8 天合成的 1 km 空间分辨率的包含 LST 波段的 MODIS11A2 和 16 天合成的 1 km 分辨率包含 NDVI 波段的 MODIS13A2, 其行列号为可以覆盖松嫩平原的 h26v04、h27v04。并利用 MRT、ENVI 对原始数据进行拼接、转换格式、投影、掩膜裁剪等预处理操作。由于 LST 数据为 8 天合成, 为了使 LST 数据和 NDVI 数据有一致的时间分辨率, 对 LST 数据相邻的两个时相利用最大取值法进行合并得到时相为 16 天的 LST 数据。然后通过式 (5) 对 16 天的 LST 地表温度进行校正:

$$H_a = Ts + H \times a \quad (5)$$

式中, H_a 为校正后地表温度, Ts 为校正前地表温度, H 为对应像元高程值, a 为地表温度随高程增加而改变的变化幅度, 取常数 $0.6^{\circ}\text{C}/100 \text{ m}$ 。

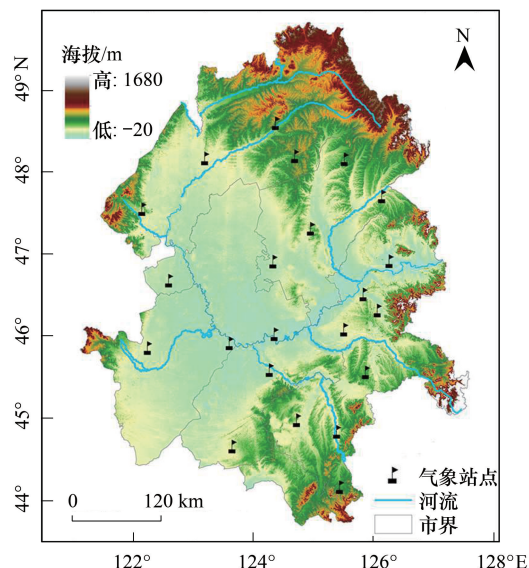


图 2 研究区及气象站点分布

Fig.2 Study area and meteorological stations

表 1 松嫩平原土壤类型的生态环境及理化性质简表

Table 1 The ecosystem and physical chemical properties of different soil types in Songnen Plain

土壤类型 Soil type	生态环境特点 Characteristics of ecological environment	理化性质 Physicochemical property
黑土 Black soil	温带半湿润草原草甸, 深厚腐殖质质量	中性土壤, 壤质, 团粒状结构, 有机质含量较高, 孔隙大, 持水量大, 通气性差
黑钙土 Chernozem	分布在半干旱地区, 草原植被为主, 低山、台地地形, 通过腐殖质积累作用和碳酸钙沉积作用形成	质地多为沙壤土到粘壤土, 具有较好的通气性、保肥性, 持水能力弱
草甸土 Meadow soil	地形低洼, 通过潜育过程和腐殖质积累过程形成	团粒结构较好, 水分充足
暗棕壤 Dark brown soil	湿润气候, 针阔叶混交林植被条件, 山区地形	有机质含量高, 壤质, 结构疏松, 保水保肥能力强
沼泽土 Marsh soil	气候湿润, 地形低洼, 具有季节性或常年性滞水, 苔藓、喜湿性植被为主	母质粘重, 持水性强, 透水性弱, 透气性良好
盐碱土 Saline-alkaline soil	分布在地势低平, 地下水位较高, 半湿润、半干旱和干旱的内陆地区	易板结, 孔隙度小, 透水透气性差, 保水保肥能力弱
风沙土 Aeolian sandy soil	干旱半干旱地区, 形成于沙性母质上	易受风力侵蚀, 持水能力弱
白浆土 Lessive	温带半湿润及湿润区, 森林、草甸植被条件	质地粘重, 土壤结构差, 保水保肥能力弱
泥炭土 Peat soil	河湖沉积低平原及山间谷地地形, 水生植被茂密	保水保肥能力良好, 松软透气
火山灰土 Volcanic ash soil	分布于火山、熔岩台地, 干旱半干旱地区	土壤质地粗, 孔隙度高, 易受侵蚀, 持水能力强

将相同时期对应的 NDVI 数据和 LST 数据相对应,并提取某一 NDVI 值所对应的 LST 的最大值、最小值(图 3),将 NDVI 和 LST 最大最小值进行线性拟合,得到干边和湿边对应的线性拟合方程。进而利用方程(1)计算每个像元所对应的 TVDI 值(图 3)。因为已有研究表明^[20],在植被覆盖度较低时,NDVI 不能够很好的反映出植被生长状况,故本研究只取 NDVI>0.2 的区域拟合 TVDI 特征方程。

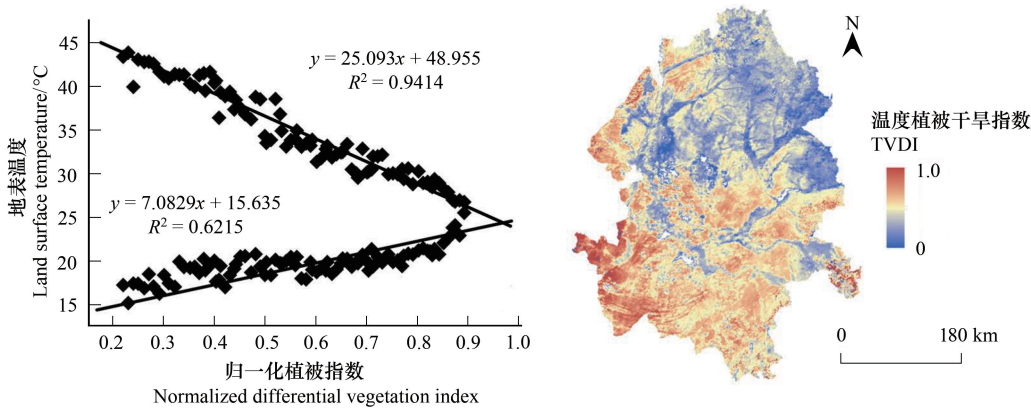


图 3 2015 年第 113 天 NDVI-LST 线性拟合及 TVDI 反演结果

Fig.3 NDVI-LST linear fitting and TVDI inversion results in the 113th day of 2015

TVDI: 温度植被干旱指数, Temperature vegetation dryness index

根据历年的 NDVI 与 LST 构成的特征空间来看,NDVI 与 LST 最大值构成的干边呈现出显著的负相关关系($P<0.05$),能非常好的拟合出干边方程,而 LST 的最小值随 NDVI 的变化较小,相关关系相对较弱,但依然能够较好的拟合线性方程。

除此以外,本研究从中国气象数据共享网上获取了 2000—2015 年松嫩平原 23 个气象站点观测的 0—10 cm 土壤相对湿度数据(中国农作物生长发育和农田土壤湿度旬值数据集,中国气象局陆面数据通化系统

CLDAS-V2.0 产品数据集),由于观测数据集未经质量控制,经过剔除筛选,最终保留 20 个站点的数据,并采用 SPSS 22.0 的最大期望算法进行数据补全。

2.3 土壤相对湿度与干旱指数的关系

以 16 年中受干旱影响较为严重的 2000 年为例,利用 2000 年 4 月上旬至 10 月下旬的 0—10 cm 土壤相对湿度数据与相应位置的 TVDI 值进行相关性分析,选取的观测站点数据时间尽量与基于遥感数据提取的土壤干湿状况的时相吻合。从图 4 可以看出,TVDI 值与土壤相对湿度之间表现出显著的相关性,TVDI 值随着土壤相对湿度的增大显示出减小的趋势。并对 TVDI 与土壤湿度二者的拟合结果进行 F 检验,通过了置信度 95% 的检验,这表明将 TVDI 作为反映土壤湿润程度的指标具有一定的合理性。

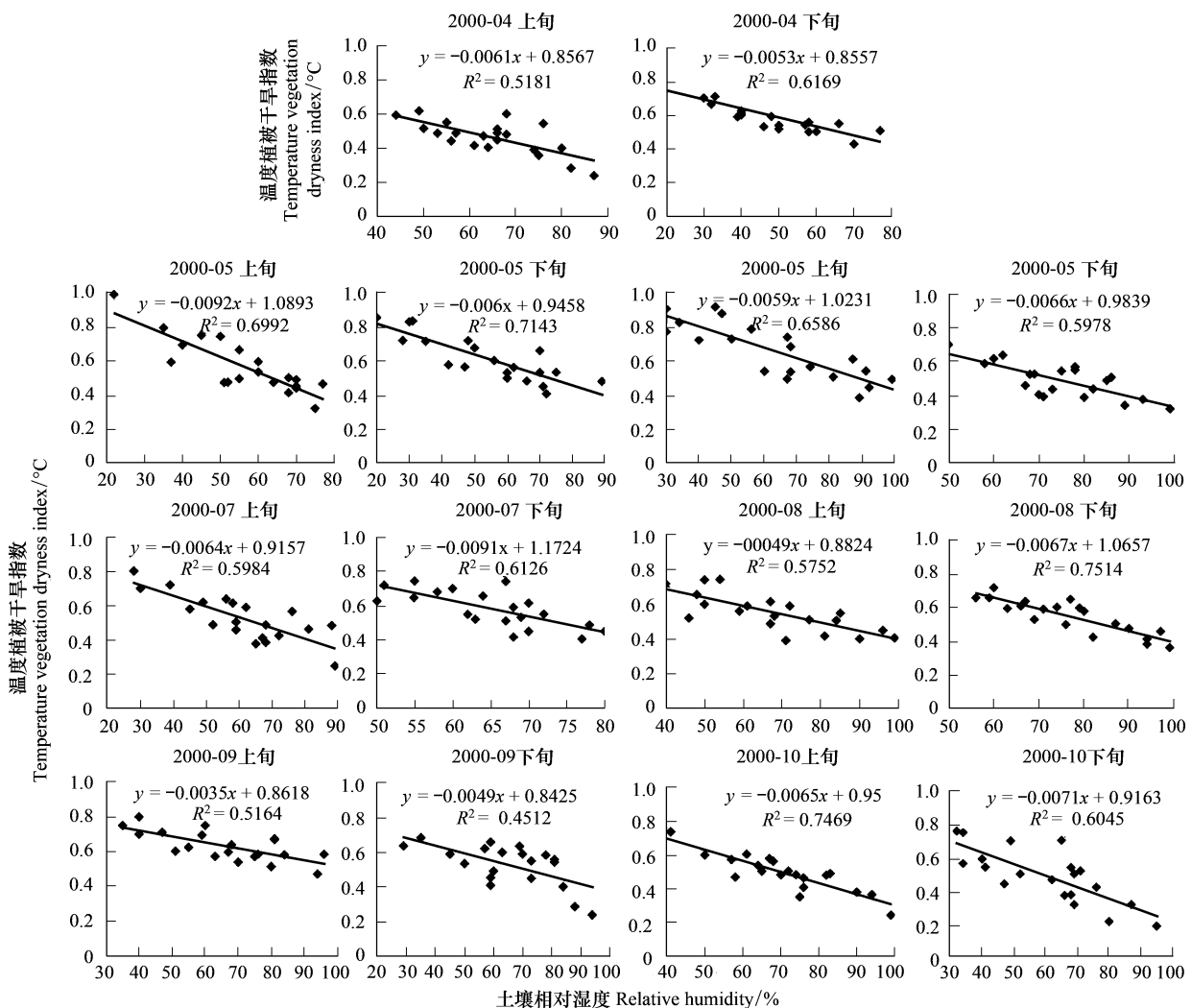


图 4 相对土壤湿度和温度植被干旱指数线性拟合

Fig.4 Linear fit to relative humidity and temperature vegetation dryness index

从上图显示可看出个别数据点较为离散,这是因为即便在选取相对土壤湿度数据和建立 TVDI 模型所使用的 T_s 和 NDVI 数据在时间上是尽可能吻合的,但是由于遥感数据是合成数据,其与地表观测数据还是会存在一定的偏差,且由于各种不可抗因素,地表观测数据和遥感影像数据不能保证空间位置的绝对匹配,其可能存在的实际空间位置的偏差对遥感反演结果也有一定的影响。尽管如此,TVDI 的分布仍然能够很好的反映土壤水分在空间上的分布状况。遂用温度植被干旱指数模型逐一计算 2000—2015 年的 TVDI 值,建立时间序列上的平均干旱指数 $TVDI_{mean}$,即每年各个时相的平均 TVDI 值来表示该年份中土壤水分的总体情况,及时间

序列上的最大干旱指数 $TVDI_{max}$, 即每年中各个时相的最大 TVDI 值来表示该年份中的极端土壤缺水干旱情况。

本研究引入集合经验模态分解方法, 对 2000—2015 年松嫩平原土壤湿度数据进行处理。利用该方法分解原始数据所得到的残余分量能够反映土壤湿度数据时间序列上的内在变化趋势。通过 Matlab 执行集合经验模态分解算法分析松嫩平原 2000—2015 年的土壤湿度数据时, 输入辅助白噪声同原始信号的标准差比率为 0.02, 执行样本算法的总次数为 100。并采用一元线性回归及皮尔森相关系数研究分析土壤水分的总体情况及土壤水分极端缺失情况两种状态对粮食产量的影响。

3 结果与分析

3.1 土壤水分监测结果分析

从历年监测结果来看, 松嫩平原的土壤湿度情况存在明显的空间分异规律: 总体上自西南向东北土壤湿度水平逐渐升高。为了更方便的描述松嫩平原土壤湿度的变化情况, 根据研究区的干旱分布规律, 将研究区按平行于右对角线方向划分为 3 个区域, 分别命名为西南区、中部地区、东北区。在 3 个子研究区中, 干旱发生频率和强度相对最高的是西南区, 东北区虽然有过短时期的干旱情况, 总体而言相较于其他两区较为湿润。以 2004 年为例, 全年土壤旱情较为严重且干旱频率较高的地区为西南部地区, 松嫩平原的东北部地区土壤长时期处于湿润状态, 且松花江流域沿岸也未受到土壤干旱化的影响(图 5)。由监测结果来看, 自 4 月份起始, 土壤干旱由中部研究区的哈尔滨一带向西南部地区、西部地区东北部地区扩展, 由于研究区受到冬夏季风交替控制, 春天土壤干旱, 需灌溉出苗, 5 月份的人工补水对土壤干旱起到了缓解作用, 但是旱情依然较为严峻。6 月迎来了该地区的雨季, 直至 9 月, 降水频繁, 土壤湿润程度明显增高, 土壤缺水情况得到了很大改善, 且夏季植被生长旺盛也对土壤水分的散失起到了阻碍作用。该地区 2000 年至 2015 年作物生长季的 TVDI 多年均值为 0.499, 最大为 0.5491, 表明生长季期间松嫩平原土壤水分含量一般保持在正常状态, 由于松嫩平原主要为农业区, 面积广阔地势平坦, 其土壤水分的变化主要受降水量变化的影响。

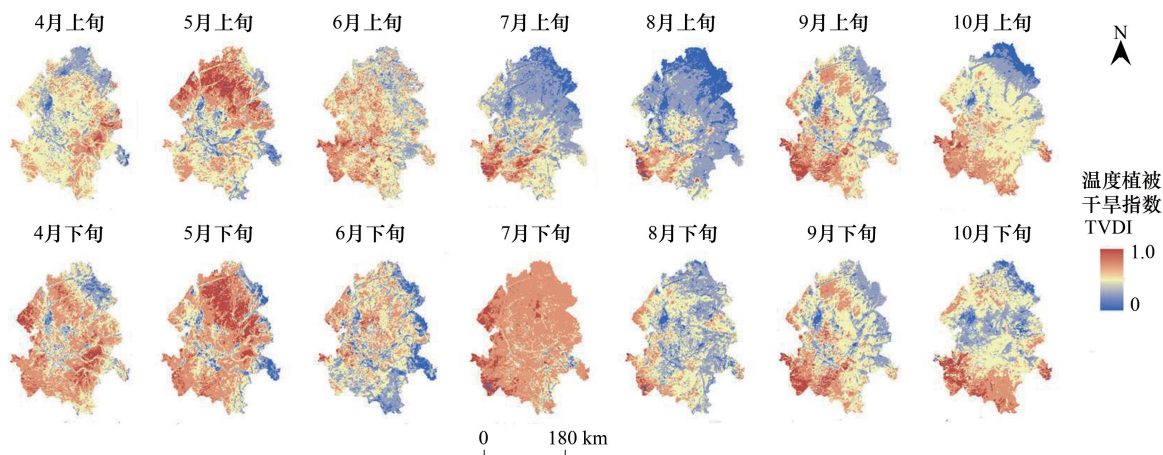


图 5 松嫩平原 2004 年 TVDI 反演结果

Fig.5 TVDI inversion results in Songnen Plain in 2004

进一步根据吴黎^[21]对 TVDI 干旱指标的划分标准, 对研究区进行土壤湿度分级(表 2), 并制作不同等级土壤缺水频率空间分布图(图 6), 分析松嫩平原全局土壤湿度水平。

总体来看, 土壤缺水的时间频率在 0—32.6% 之间, 其中, 中度缺水、重度缺水和特别重度缺水 16 年间发生的时间频率区间分别为 0—30.8%, 0—29.9%, 0—22.3%, 且土壤缺水程度越高, 发生的时间频率越低。不同等级的土壤缺水状况在空间上分异格局明显, 呈现出由西南向东北递减的趋势, 松嫩平原西南部和中部地区常出现土壤中度缺水, 重度缺水和特别重度缺水发生频繁的地区则多集中在平原西南部的白城、松原地区。

松嫩平原的风沙土主要分布于其西南的白城、松原、四平^[22],由于风沙土发育微弱、且持水能力很差,极易造成土壤缺水现象,且白城、松原地处内陆,具有很强的大陆性气候,其年均降水量低于平原其他地区,而蒸散量较大^[23],加剧了该区域的土壤缺水程度;另外,此处主要以莫莫格、向海为代表的湿地生态系统为主,近年来,湿地面积锐减^[24]使得湿地周围土壤盐碱化现象严重,土壤保水保肥能力大大降低,也是致使松嫩平原西南部土壤缺水时间频率较高的主要原因。

表 2 土壤湿度干旱等级划分
Table 2 The drought levels of soil moisture

TVDI	土壤水分状况 The condition of soil moisture	干旱等级 The drought level
$TVDI \leq 0.46$	地表湿润	无旱
$0.46 < TVDI < 0.57$	土壤水分正常或近地表空气偏干	轻旱
$0.57 < TVDI < 0.76$	土壤表面干燥,植被叶片有缺水干黄现象	中旱
$0.76 \leq TVDI < 0.86$	土壤出现干土层,叶片干黄	重旱
$0.86 \leq TVDI < 1$	地表植物出现干枯死亡现象	特旱

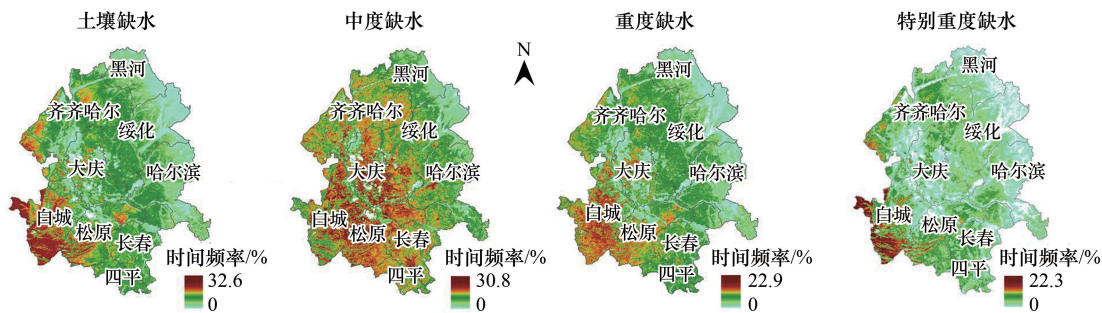


图 6 土壤缺水等级发生时间频率分布图
Fig.6 Time frequency distribution of soil water shortage different levels

3.2 松嫩平原土壤湿度变化趋势分析

2000—2015 年 $TVDI_{mean}$ 和 $TVDI_{max}$ 的折线图呈波动起伏变化(图 7),研究时间范围内出现 3 次土壤水分缺失严重的年份,分别是 2000 年、2004 年和 2007 年,这与纪仰慧等人的研究结果具有很好的一致性^[25]。对时间序列上的 $TVDI_{mean}$ 和 $TVDI_{max}$ 进行集合经验模态分解,最终得到土壤湿度的残余分量(图 7),残余分量反映了土壤湿度时间序列的内在发展趋势。2000—2015 年期间, $TVDI_{mean}$ 呈现出下降趋势,且下降速率由慢转快,表明松嫩平原整体土壤湿度呈现出变湿趋势,且变湿的速率近年来呈增加趋势;但是 $TVDI_{max}$ 变化趋势呈现逐年增高,表明土壤极端缺水导致的干旱事件呈现出逐渐升高的趋势。由于松嫩平原长期受到人为活动的影响^[26],平原的原生植被多被次生植被和单一的农田代替,生态环境具有一定的脆弱性,如过度放牧使得湿地草被退化,湿地面积锐减,导致土壤盐渍化加重,土壤持水能力减弱。人类垦荒、大量的工程建设等行为对松嫩平原生态景观结构的改变,干扰了水文循环过程,破坏了土壤结构,造成了植被的退化和单一化,弱化了土壤水分的拦截能力,从而导致极端干旱事件近年来呈现不断增加趋势。

3.3 土壤湿度的变化对农业产量影响分析

该土壤湿度的表征指标是基于植被和地表温度建立的,其与植被的长势情况密切相关,为此,本研究对历年来松嫩平原粮食产量和春夏秋冬 TVDI 值、 $TVDI_{mean}$ 和 $TVDI_{max}$ 的关系进行研究分析。松嫩平原的历年粮食产量通过查阅中国统计年鉴网发布的区域国民经济和社会发展统计公报获取,为了保证数据的准确性,研究保留了 2002—2015 年的粮食产量数据,中间个别缺失数据采用前两年和后两年取平均算法补全获取。研究表明,粮食产量和 $TVDI_{mean}$ 呈现显著相关关系($P < 0.05$),即年均土壤湿度水平对粮食产量的影响显著(图 8),

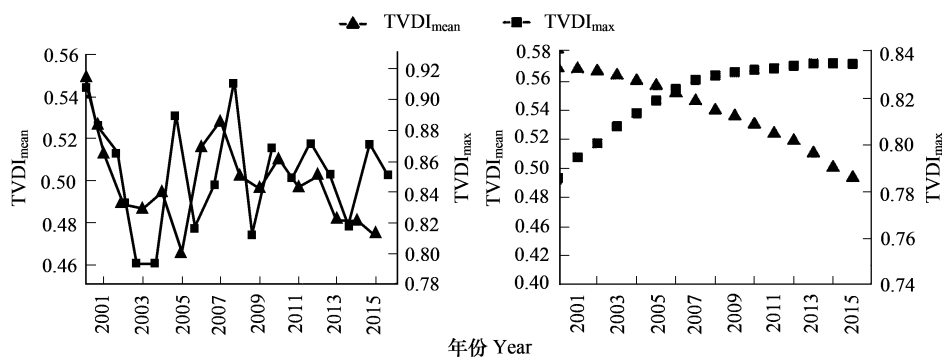


图7 2000—2015年松嫩平原年际TVDI及其残余分量变化特征

Fig.7 Variability of $TVDI_{mean}$ and $TVDI_{max}$ and residual components in the Songnen Plain, 2000—2015

$TVDI_{mean}$: 平均温度植被干旱指数, Mean temperature vegetation dryness index; $TVDI_{max}$: 最大温度植被干旱指数, Maximum temperature vegetation dryness index

而粮食产量和 $TVDI_{max}$ 的线性拟合未通过 $P < 0.05$ 显著性检验, 表明粮食产量受到极端土壤缺水事件的影响较小, 即只有在作物受到长期缺水的威胁, 才会导致农作物减产, 该结果的得出与各界的农业干旱研究结论是一致的^[27] (图8); 就粮食产量与春夏秋季的TVDI关系分析, 其与夏季土壤湿度相关关系显著, 表明夏季干旱极易导致松嫩平原粮食减产 (图8), 而春季、秋季土壤缺水也会在一定程度上致使粮食减产, 且不同时期土壤缺水对粮食产量的影响程度由深及浅依次为夏季 > 春季 > 秋季 (图8)。其原因和不同物候期作物的需水量密不可分, 松嫩平原作物的关键物候期分别为5月出苗期、7月抽穗期、9月成熟期^[28-29]。抽穗期间, 作物植株开始分化, 其茎、叶等开始迅速发育, 随着叶面积的增大, 作物植株代谢旺盛, 消耗水量较多。若该时期缺水, 则易导致作物植株分化受阻, 植株矮小, 粮食产量低, 因此夏季土壤水分对粮食产量影响最为显著; 而在出苗期和成熟期, 作物对土壤水分的需求量明显减小。虽然我们的研究发现不同季相的土壤湿度对粮食产量有不同程度影响, 同时也应注意到光照、温度、土壤肥力对粮食产量的重要影响, 要想对作物长势和产量进行科学合理的预测还需要对其他影响因素进一步深入研究。

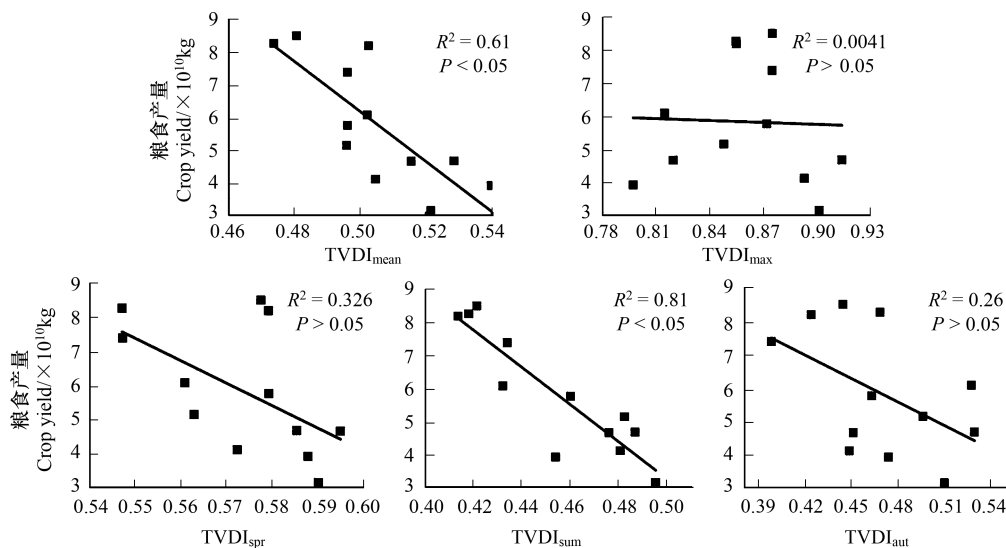


图8 TVDI与粮食产量的关系

Fig.8 Relationships between TVDI and crop production

$TVDI_{spr}$: 春季温度植被干旱指数, Spring temperature vegetation dryness index; $TVDI_{sum}$: 夏季温度植被干旱指数, Summer temperature vegetation dryness index; $TVDI_{aut}$: 秋季温度植被干旱指数, Autumn temperature vegetation dryness index

4 结论

本文基于 MODIS 影像,利用松嫩平原区域可适用的温度植被干旱指数模型对土壤湿度进行反演,引入集合经验模态分解方法,分析了松嫩平原 2000—2015 年土壤湿度分布特征和变化趋势,并探讨了不同土壤湿度指标对农业粮食产量的影响。研究得到以下几点结论:

(1) 松嫩平原土壤湿度在空间上呈现出自西南向东北逐渐变湿润的趋势,且 16 年来发生土壤缺水较为严重且时间频率较高的区域出现在平原西南部,达到重度缺水和特别重度缺水的时间比例分别高达 22.9%、22.3%,中度缺水的发生频率较高的区域集中在平原中部,达到 30.8%。

(2) 近年来松嫩平原在 2000、2004 和 2007 年土壤缺水较为严重。从年尺度来看,近 16 年来,该平原平均土壤湿度有逐年变湿润的趋势,但是极端土壤干旱事件发生的频率却有升高趋势。

(3) 短暂的土壤极端缺水现象对农作物产量并不明显,长期的土壤湿度水平对农作物的产量影响较为显著;季节性土壤湿度变化也会影响粮食产量,其中夏季土壤缺水极易致使粮食减产,次之是春季和秋季。

本研究仅从植被指数和地温指数计算温度植被干旱指数用以代替表示土壤含水量情况,来揭示松嫩平原 2000—2015 年土壤湿度的时空分布情况及变化趋势,存在要素单一的问题,在日后研究工作中,应进一步综合气象要素、农业活动干预要素等多种因素进行土壤湿度的时空变化以及其对粮食产量的影响研究。本研究虽然存在不足之处,但仍然能够反映松嫩平原长时期土壤湿度的时空变化特征及趋势,以及粮食产量对不同季相土壤湿度的响应,为农业部门的合理灌溉及科学管理提供了科学有力的理论依据。

参考文献 (References):

- [1] The GLACE Team, Koster R D, Dirmeyer P A, Guo Z C, Bonan G, Chan E, Cox P, Gordon C T, Kanae S, Kowalczyk E, Lawrence D, Liu P, Lu C H, Malyshev S, McAvaney B, Mitchell K, Mocko D, Oki T, Oleson K, Pitman A, Sud Y C, Taylor C M, Versegny D, Vasic R, Xue Y K, Yamada T. Regions of strong coupling between soil moisture and precipitation. *Science*, 2004, 305(5687): 138-1140.
- [2] 张蕾, 吕厚荃, 王良宇, 杨冰韵. 中国土壤湿度的时空变化特征. *地理学报*, 2016, 71(9): 1494-1508.
- [3] 张翀, 雷田旺, 宋佃星. 黄土高原植被覆盖与土壤湿度的时滞关联及时空特征分析. *生态学报*, 2018, 38(6): 2128-2138.
- [4] 高蓉, 石圆圆, 陈少勇. 西北干旱半干旱过渡区近 50 年气候变化特征分析及对粮食产量的影响//中国气象学会 2008 年年会干旱与减灾——第六届干旱气候变化与减灾学术研讨会分会场论文集. 北京: 中国气象学会, 2008: 10-10.
- [5] 徐海亚, 朱会议. 基于自然地理分区的 1990—2010 年中国粮食生产格局变化. *地理学报*, 2015, 70(4): 582-590.
- [6] 王凤, 刘艳芳, 孔雪松, 陈奕云, 潘佳威. 中国县域粮食产量时空演变及影响因素变化. *经济地理*, 2018, 38(5): 142-151.
- [7] 康蕾, 张红旗. 我国五大粮食主产区农业干旱态势综合研究. *中国生态农业学报*, 2014, 22(8): 928-937.
- [8] 罗那那, 巴特儿·巴克, 吴燕锋. 基于集合经验模态分解新疆降水多尺度变化特征. *水土保持研究*, 2017, 24(4): 362-367.
- [9] 吴燕锋, 巴特儿·巴克, 李维, 魏小琴, Rasulov H H. 基于 EEMD 的杜尚别市 1950—2013 年降水多尺度分析. *干旱区资源与环境*, 2015, 29(6): 152-157.
- [10] 刘可, 杜灵通, 侯静, 胡悦, 朱玉果, 宫菲. 近 30 年中国陆地生态系统 NDVI 时空变化特征. *生态学报*, 2018, 38(6): 1885-1896.
- [11] 胡悦, 杜灵通, 侯静, 刘可, 朱玉果. 基于 SPI 指数的宁夏中部干旱带 1960—2012 年干旱特征研究. *干旱地区农业研究*, 2017, 35(2): 255-262.
- [12] Price J C. Using spatial context in satellite data to infer regional scale evapotranspiration. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1990, 28(5): 940-948.
- [13] Carlson T N, Gillies R R, Perry E M. A method to make use of thermal infrared temperature and NDVI measurements to infer surface soil water content and fractional vegetation cover. *Remote Sensing Reviews*, 1994, 9(1/2): 161-173.
- [14] Sandholt I, Rasmussen K, Andersen J. A simple interpretation of the surface temperature/vegetation index space for assessment of surface moisture status. *Remote Sensing of Environment*, 2002, 79(2/3): 213-224.
- [15] Nemani R, Pierce L, Running S, Goward S. Developing satellite-derived estimates of surface moisture status. *Journal of Applied Meteorology*, 1993, 32(3): 548-557.
- [16] Moran M S, Clarke T R, Inoue Y, Vidal A. 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] Wu Z H, Huang N E. A study of the characteristics of white noise using the empirical mode decomposition method. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 2004, 460(2046): 1597-1611.
- [18] Huang N E, Shen S S. *Hilbert-Huang Transform and Its Applications*. 2nd ed. New Jersey: World Scientific, 2014: 107-127.
- [19] Wu Z H, Huang N E. Ensemble empirical mode decomposition: a noise-assisted data analysis method. *Advances in Adaptive Data Analysis*, 2009, 1(1): 1-41.
- [20] 韩丽娟, 王鹏新, 王锦地, 刘绍民. 植被指数-地表温度构成的特征空间研究. *中国科学 D 辑 地球科学*, 2005, 35(4): 371-377.
- [21] 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.
- [22] 张晓光, 黄标, 梁正伟, 赵永存, 孙维侠, 胡文友. 松嫩平原西部土壤盐碱化特征研究. *土壤*, 2013, 45(2): 332-338.
- [23] 郑树峰, 张柏, 王宗明. 松嫩平原西部草地退化与气候变化研究//中国地理学会百年庆典学术论文摘要集. 北京: 中国地理学会, 2009: 1-1.
- [24] 路春燕, 王宗明, 刘明月, 欧阳玲, 贾明明, 毛德华. 松嫩平原西部湿地自然保护区保护有效性遥感分析. *中国环境科学*, 2015, 35(2): 599-609.
- [25] 纪仰慧, 王晨轶, 朱海霞, 姜丽霞, 张剑侠. 松嫩平原土壤湿度时序变化特征. *中国农学通报*, 2013, 29(2): 154-159.
- [26] 罗新正, 朱坦, 孙广友. 人类活动对松嫩平原生态环境的影响. *中国人口·资源与环境*, 2002, 12(4): 94-99.
- [27] Dai A G. Erratum: Drought under global warming: a review. *WIREs Climate Change*, 2011, 2(1): 45-65.
- [28] 李正国, 杨鹏, 唐华俊, 吴文斌, 陈仲新, 刘佳, 张莉, 谭杰扬, 唐鹏钦. 近 20 年来东北三省春玉米物候期变化趋势及其对温度的时空响应. *生态学报*, 2013, 33(18): 5818-5827.
- [29] 徐岩岩. 基于 MODIS 数据提取东北地区水稻物候时空变化特征[D]. 北京: 中国气象科学研究院, 2012.