

引用格式: Li Lei, Zheng Xingming, Zhao Kai, *et al.* Precision Evaluation of Drought Index based on CCI Soil Moisture Products and Its Effect on Grain Yield in Northeast China[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2020, 35(1): 111-119. [李雷, 郑兴明, 赵凯, 等. 基于CCI土壤水分产品的干旱指数精度评价及其对东北地区粮食产量的影响[J]. 遥感技术与应用, 2020, 35(1): 111-119.]
doi: 10.11873/j.issn.1004-0323.2020.1.0111

基于CCI土壤水分产品的干旱指数精度评价及其对东北地区粮食产量的影响

李 雷^{1,2}, 郑兴明^{1,3}, 赵 凯^{1,3}, 李晓峰^{1,3}, 王广蕊^{1,2}

(1. 中国科学院东北地理与农业生态研究所, 吉林 长春 130102;

2. 中国科学院大学, 北京 100049;

3. 中国科学院长春净月潭遥感实验站, 吉林 长春 130102)

摘要: 土壤水分是监测作物旱情的基本因子, 以欧空局1978~2014年微波遥感土壤水分产品、中国经济与社会发展统计数据库以及气象数据为基础, 结合土壤水分亏缺指数(Soil Water Deficit Index, SWDI)分析东北地区的干旱程度与玉米亩产的关系。结果表明: ①东北三省干旱程度空间上呈现自东北向西南逐渐加重的空间分布模式; ②基于CCI (Climate Change Initiative) 土壤水分产品计算的SWDI干旱指数与降雨量和气温有良好的相关关系, 可用于评估干旱发生的严重程度; ③玉米生长季关键需水期——7月的SWDI与玉米产量的相关性最好, 二者在黑龙江、吉林和辽宁省的 R^2 分别为0.43、0.78和0.38, 非常适合用于评估干旱对玉米单产的影响。该结论对于研究大范围土壤水分含量对农作物产量的影响以及相关农业决策具有重要指导意义。

关键词: 微波遥感; 土壤水分; 干旱指数; 玉米产量; 东北地区

中图分类号: TP79 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-0323(2020)01-0111-09

1 引言

干旱是世界范围内普遍发生的一种复杂的自然现象, 波及范围广, 持续时间长, 是农业生产和人类生活中最严重的自然灾害之一^[1-2]。近几十年, 随着人口增加、环境恶化等因素, 干旱的影响逐渐升级。由于依赖于农作物不同生长阶段的水资源和土壤水分储备, 农业通常是干旱发生后第一个受影响的领域^[3-5]。

干旱程度可以通过标准降雨指数(Standardized Precipitation Index, SPI)、Palmer干旱指数(Palmer Drought Severity Index, PDSI)、Z指数(Z-index)、归一化植被指数(Normalized Difference Vegetation

Index, NDVI)和温度植被指数(Temperature Vegetation Diness Index, TVDI)等进行监测^[2,4]。基于气象数据计算的指数虽然准确, 但是数据稀疏, 不能对干旱情况在时间和空间上进行及时准确的探测。相比于气象指数, 利用遥感数据可以实时快速地获取地表信息, 且具有空间连续性, 可以监测大尺度区域的干旱程度。植被指数多是基于遥感数据获得, 例如NDVI、VCI和TCI等, 都是结合植被生长状态和地表温度进行间接监测, 存在滞后性。光学遥感类的干旱指数虽然是国内外研究热点之一, 但是受天气影响严重, 具有局限性^[6-7]。被动微波遥感可以穿透薄云和稀疏植被, 受天气和植被影响较小, 且被动微波传感器的双极化波段对土壤水

收稿日期: 2019-12-20; 修订日期: 2020-01-18

基金项目: 吉林科技发展计划优秀青年人才工程项目(20170520078JH), 国家自然科学基金面上项目(41971323)。

作者简介: 李 雷(1991—), 男, 河北定州人, 博士研究生, 主要从事土壤水分、定量遥感研究。E-mail: lilei@iga.ac.cn。

通讯作者: 郑兴明(1984—), 男, 四川中江人, 副研究员, 主要从事微波遥感、土壤水分反演算法研究。E-mail: zhengxingming@iga.ac.cn。

分也有着十分敏感的探测能力。土壤水分是研究植物水分胁迫、监测作物旱情的最基本因子^[8-9]。Champagne 等^[5]直接利用微波遥感土壤水分产品,建立土壤水分异常指数,用于监测农田土壤的干旱情况。

东北三省的玉米在其生长发育过程中经常受到干旱、洪涝和低温冷害等多种灾害的威胁。80年代以来,东北地区干旱发生频率增加,受灾面积增大,是造成粮食减产的主要原因^[10]。赵先丽等^[11]对辽宁省 1988~2007 年主要农业气象灾害受灾面积和粮食总产量的关联度进行动态分析,发现辽宁干旱受灾面积呈上升趋势,对辽宁农业粮食生产造成的影响最大。已有研究表明东北地区长时间范围内(1948~2010 年),整个东北地区农作物根区 0~200 cm 土壤水分均呈现降低趋势,该研究结合东北地区气象数据计算作物需水量并定量评价了东北地区玉米种植范围的适宜性区域,为土壤水分评估及其对玉米产量研究提供了参考^[12]。

本研究针对东北地区 35 a 土壤水分变化情况,结合土壤质地计算土壤水分亏缺指数(SWDI),下文称干旱指数,进而对东北三省玉米亩产与 SWDI 间的关系进行研究与分析。通过分析长时间序列的干旱发生的严重程度,以期发现干旱发生的时间及其对农作物产量的影响程度,为农业管理决策提供一定的指导和建议作用。

2 研究区及数据

2.1 研究区

东北地区地处我国中高纬度带(118.83°~135.09° E, 38.72°~54.56° N),包括黑龙江省、吉林省和辽宁省三省,从北向南地跨寒温带、中温带及暖温带。东北地区总面积约 80 万 km²,谷类作物种植面积占该地区总面积的 50% 以上,是我国最大的商品粮输出基地,其中玉米种植面积约占全国玉米种植面积的一半,产量约占全国总产量的 40%。该区域年降水量在 400~800 mm 之间,约 80% 的降水量集中在 6~8 月,对农作物生长十分重要^[11]。东北地区农业生产以“雨养”为主,降水量地域间差异很大,年际波动也较大,农作物生长季的干旱将会严重制约粮食生产。同时,该地区未来农作物生长季干旱趋势预估的研究工作还很缺乏,亟需加强对东北地区的干旱研究工作^[15]。为本研究后续分析农田区域,将东北地区土地利用类型进行合并归类,

如图 1 所示(土地利用数据来源:中科院资源环境科学数据中心)。

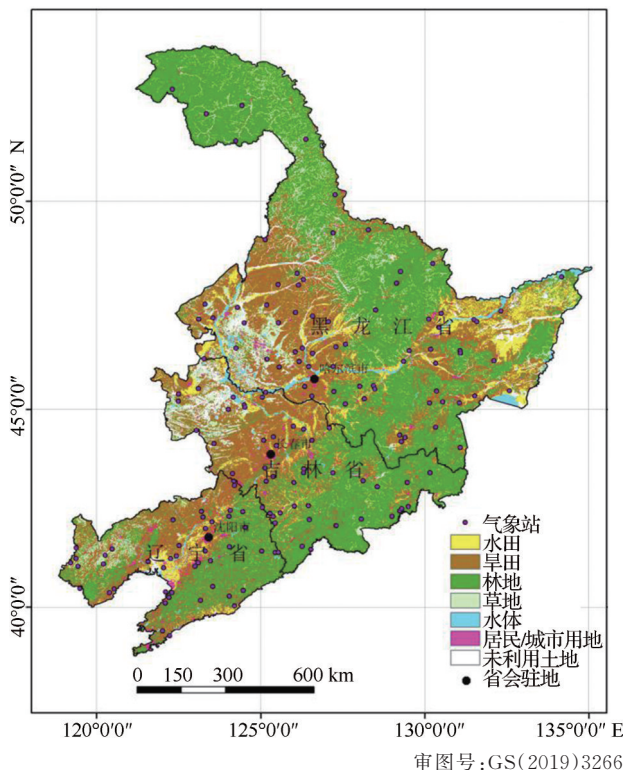


图 1 东北三省土地利用类型及气象站点分布

Fig.1 Land use and distribution of meteorological stations in Northeast China

2.2 数据

2.2.1 ESA CCI 土壤水分产品

欧空局综合多种主被动微波遥感器(包括 SMMR、SSM/I、TMI、AMS-R-E、Windsat、ERS 和 METOP 等)形成一套 1978~2014 年的土壤水分融合产品。研究中使用的数据版本为 V02.2,时间区间为 1979~2014 年,该数据产品针对各传感器反演得到各自土壤水分,主被动土壤水分均重采样至相同的空间格网和时间尺度,然后分别进行融合得到融合后的主动土壤水分数据和被动土壤水分数据,最终将主被动融合得到 ESA CCI(European Space Agency Climate Change Initiative)土壤水分产品^[20]。数据的时间分辨率为日,空间分辨率为 0.25°×0.25°,单位为 m³/m³。该数据集保留各种来源的土壤水分数据的动态变化,包括季节和年际变化^[16-18]。由于其具有高时间分辨率的优势,作为融合产品具有更好的精度^[40-41],进而一定程度上能够及时监测到土壤水分的即时状态,对于农业干旱的监测和预警具有重要意义(数据下载地址:https://www.esa-

soilmoisture-cci.org/node/145)。

2.2.2 全球土壤数据集

该数据库由联合国粮农组织(FAO)等机构于2009年3月发布(Harmonized World Soil Database, HWSD),网格大小为 $30' \times 30'$ (约 $1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$)。数据库提供了各个网点的土壤类型(FAO-74、85、90)、土壤理化性状(0~100 cm)(16个指标)等信息^[19-20]。我国土壤质地分类标准兼顾了我国南北土壤特点,例如北方土中含有1~0.05 mm砂粒较多,因此砂土组将1~0.05 mm砂粒含量作为划分依据;粘土组主要考虑南方土壤情况,以小于0.001 mm细粘粒含量划分;壤土组的主要划分依据为0.05~0.001 mm组粉粒含量(数据下载地址:http://webarchive.ia-sa.ac.at/Research/LUC/External-World-soil-database/HTML/HWSD_Data.html?sb=4)。

2.2.3 气象站数据

数据集为中国基本、基准和一般地面气象观测站1981~2010年,包括气压、气温、降水和风等要素的日气候标准值数据(中国地面累年值月值数据集)。由各省上报的全国地面月报信息化文件,基于《气候资料统计整编方法(1981-2010)(发布版)》,进行整编统计而得。气象数据时间区间为1981~2010年,时间分辨率为月,研究中使用的1981~2010年气象数据包含于土壤水分数据时间区间内,选择此完整数据集可以确保数据质量,且时间区间的差异不会对分析研究产生影响。研究中将气象数据中160个站点1981~2010年的降水和气温与SWDI分别进行相关性分析,用以验证基于土壤水分产品的SWDI的可靠性(数据下载地址:<http://data.cma.cn/data/detail/dataCode/A.0029.0004.html>)。

2.2.4 作物产量数据

中国经济与社会发展统计数据库是目前国内最大的连续更新的以统计年鉴为主体的统计资料数据库,其中的农业数据包含各省市多年农作物种植面积(hm^2)与产量(kg)。本研究使用黑龙江省、吉林省和辽宁省三省的玉米产量数据,时间范围为1979~2014年(<http://tongji.cnki.net/kns55/Navi/NaviDefault.aspx>)。

3 研究方法

本研究基于长时间序列的土壤水分产品数据,计算了该时间范围的干旱指数,并根据指数结果以及东北地区土壤和农田实际情况对东北地区干旱

等级进行划分。基于干旱指数等级,对东北地区土壤水分对玉米单产的影响进行定性分析和定量评价。

3.1 土壤水分亏缺指数

土壤水分亏缺指数(Soil Water Deficit Index, SWDI),是基于长时间序列的土壤水分发展的用于表征农业干旱的指标。相比于基于气象数据的干旱指数,如SPI、PDSI^[2-3,30],SWDI具有更好的空间连续性,对于大范围农业干旱的描述更加方便、准确。相比于基于植被数据的干旱指数,如NDVI、VegDRI (Vegetation Drought Response Index),SWDI对干旱的响应更加及时^[3,23]。此外,基于光学遥感的干旱指数,受天气影响较大。因此,引入SWDI进行研究分析,计算方法如公式(1)所示^[21-22]。

$$\text{SWDI} = \frac{\theta - \theta_{FC}}{\theta_{AWC}} \quad (1)$$

其中: θ 是土壤含水量(cm^3/cm^3), θ_{FC} 表示田间持水量(cm^3/cm^3), θ_{WP} 表示凋萎湿度(cm^3/cm^3), θ_{AWC} 表示可用土壤水分含量(available water content,即AWC),是 θ_{FC} 与 θ_{WP} 之间的差值,即 $\theta_{AWC} = \theta_{FC} - \theta_{WP}$ 。当SWDI为正时,土壤中含有过量水;当它等于零时,土壤含水量为田间持水量;结合东北地区的土壤质地,SWDI为负值且小于-0.5时表示发生农业干旱,此外,SWDI与该点的作物类型和干旱发生前的可用土壤水分之间也存在一定关系^[23-24]。

3.2 田间持水量和凋萎湿度

田间持水量和凋萎湿度均是土壤的物理性质,它们的大小与土壤的结构、质地(砂土含量、黏土含量)和有机质含量以及土地利用状况等因素有关,计算中采用公式(2)和(3)计算田间持水量和凋萎湿度^[25-26]。

$$\theta_{FC} = 0.186 + (-0.00127 \times \text{sand}) + (0.00325 \times \text{clay}) \quad (2)$$

$$\theta_{WP} = 0.113 + (-0.00121 \times \text{sand}) + (0.00327 \times \text{clay}) \quad (3)$$

公式(2)和(3)中sand和clay分别表示砂土百分比含量和黏土百分比含量(质量百分比)。经公式(2)和(3)计算得到的田间持水量和凋萎湿度均为重量含水量,而欧空局土壤水分产品为体积含水量,因此需利用土壤容重将重量含水量转化为体积含水量,如公式(4)所示。

$$\theta_v = m_g \times \rho_b \quad (4)$$

式中: θ_v 表示体积含水量(cm^3/cm^3), m_g 表示重量含水量(g/g), ρ_b 表示土壤容重(g/cm^3)。

3.3 干旱等级划分

结合东北地区土壤质地与玉米的生长条件等因素,并基于农业干旱等级国家标准,确定以土壤

水分亏缺指数为干旱指标的东北三省农业干旱分级标准,将东北地区农业干旱划分为重旱、中旱、轻旱和无旱4个等级,如表1所示^[27-28]。

表 1 基于 SWDI 的干旱分级
Table 1 Drought grades based on SWDI

SWDI 值	干旱程度	干旱影响程度
$SWDI > -0.5$	无旱	地表正常或湿润
$-1.0 < SWDI \leq -0.5$	轻旱	地表蒸发量较小,近地表空气干燥
$-2.0 < SWDI \leq -1.0$	中旱	土壤表面干燥,地表植物叶片有萎蔫现象
$SWDI \leq -2.0$	重旱	土壤出现厚干土层,植物萎蔫、叶片干枯

3.4 SWDI 的精度评估

3.4.1 SWDI 与降雨量之间的关系

为评估 SWDI 的精度和可靠性,将降雨量与 SWDI 进行相关性分析^[29-31]。自然降水是东北地区雨养农田水分的主要来源,是影响干旱的首要因素,特别是对地下水位深、无灌溉条件的地区而言降水则是唯一的水分来源。降水直接导致土壤含水量的变化,也即影响 SWDI 的数值,降水与土壤水分呈现明显的正相关关系,且基于土壤水分计算的干旱指数与降水也存在较强相关性。

研究中所用土壤水分产品为面尺度数据,气象

数据为点尺度数据(160个),为平衡降水数据的点尺度与 SWDI 的面尺度,采取分段平均方式,即将降水数据与对应的干旱指数进行空间的归一化处理,每 20 个数据进行平均,以此类推,至 160 个气象站数据整理后得到 8 个分段平均数据。基于东北三省气象站月平均降雨数据,分析降水与干旱指数的相关关系,如图 2 所示。玉米生长季 5~9 月,东北地区月平均降水量与干旱指数的决定系数 R^2 均高于 0.55,最高达到 0.93,显著性检验 p 值均小于 0.01,各月降水数据与干旱指数存在显著的线性相关关系。

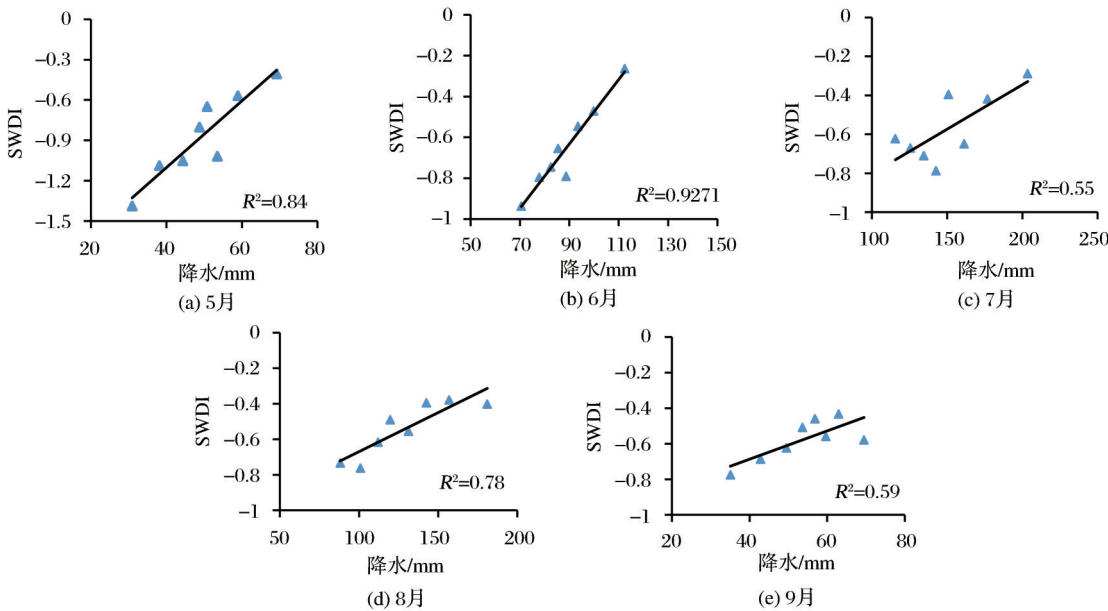


图 2 降水与干旱指数的相关关系

Fig.2 Correlation between precipitation and SWDI

通过分析降水数据与干旱指数的相关性证明了土壤水分产品的可靠性,对后文中分析干旱指数与农作物产量的关系奠定了基础。

3.4.2 SWDI 与气温之间的相关性

温度是影响作物的重要气象因子^[32],温度升高

加快了田间蒸散和作物蒸腾作用,在一定程度上能够证明 SWDI 与温度相互影响,进而可以建立温度和 SWDI 的相关关系。如图 3 所示。由于东北三省南北纬度跨度大,随着纬度升高,温度呈现一定程度降低,建立温度与 SWDI 的关系时,需去除由于纬

度变化对温度产生的影响。通过将不同纬度的气象站温度绘制趋势图方法,将此变化趋势予以去除,进而建立去除纬度影响后的温度(Temp-De-trend)与SWDI的相关关系。

本研究将三省不同纬度气象站点温度进行统计回归,得出线性方程,对各个站点温度进行去趋势分析。基于东北三省气象站月平均温度数据,分析 Temp-De-trend 与干旱指数(SWDI)的相关关系,

如图3所示。5~7月温度与干旱指数表现出明显的负相关性,表明植被低矮与稀疏时期,随着温度升高,干旱程度逐渐加重。随着时间的发展,温度与干旱指数的负相关关系逐渐减弱,于8月降至最低,相关性基本为零,并于9月转变为正相关。温度与土壤水分间的相互影响关系较复杂,随着环境条件的变化,温度与干旱指数间的关系也变得复杂化。

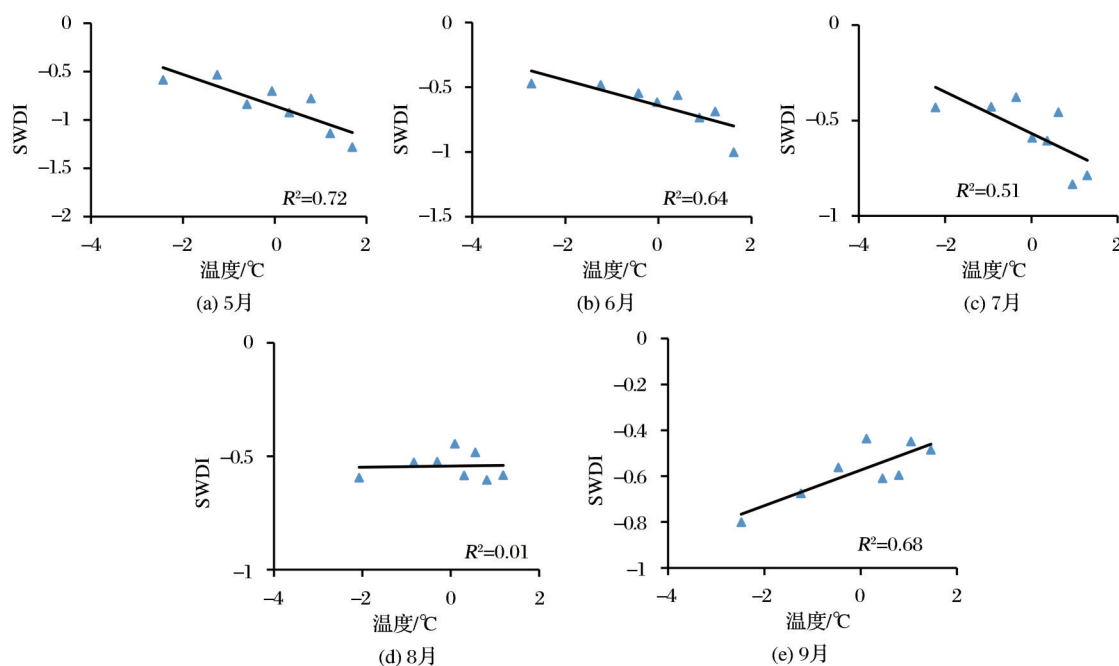


图3 温度与干旱指数相关关系

Fig.3 Correlation between temperature and SWDI

温度与干旱指数的相关关系随时间逐渐变差,最后甚至呈现正相关关系。东北地区玉米种植时间集中在4月下旬至5月上旬,因此,5月卫星反演的土壤湿度主要为裸土。随着植物生长发育,6月和7月作物逐渐成型,因此相比于五月份,温度与SWDI的相关关系逐渐变差,但整体仍呈现良好的相关性。8月是玉米植株高度明显增加的月份,降雨量充沛的8月与东北地区玉米的生长高峰期较为一致,玉米植株高度的快速变化也伴随着植被生物量、含水量等因素的变化。同时,气象站点温度传感器高度一般位于1.5~2.0 m,此高度可能会被玉米遮挡,无论传感器是否安置在玉米田内,均会受到周边较高玉米作物(2.5~3.0 m)的影响。其次,8月和9月植物生物量和植被含水量达到峰值,微波虽具有较好穿透能力,但是仍会受到茂密的农作物的影响,导致土壤水分反演精度变差。当温度升高时,蒸腾作用增强,导致土壤水分数据降低,也

即干旱指数增加。

3.5 玉米单产去趋势分析

随着农业技术和新品种推广,东北地区各粮食作物产量随时间(年份)有明显的上升趋势,如图4所示^[33]。分析长时间序列的东北三省玉米产量与土壤水分缺失指数的关系时,需将由环境与技术等因素导致的产量增加趋势予以去除。依据图4中玉米单产随年份的逐年增加趋势拟合线性关系式,认为此线性增加趋势由农业技术和科技发展占主导因素,因此通过将每年的实际亩产与在图4中拟合的线性关系式的单产进行作差,得到消除由于技术等因素导致产量增加的因素,在此基础上分析去除趋势的产量与SWDI的相关关系^[34-35]。

4 结果分析

4.1 东北地区SWDI空间分布特征

利用欧空局1978~2014年土壤水分产品融合

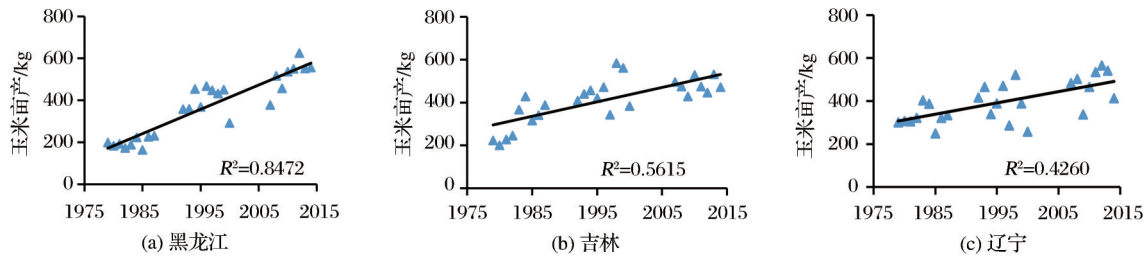


图4 东北三省玉米亩产散点图及变化趋势

Fig.4 Scatter and trend of maize yield in Northeast China

数据生成东北地区30余年的月平均土壤水分产品数据,基于上述公式(1)计算东北地区干旱指数。东北地区种植制度为一年一季,每年农作物生长季为5~9月,因此选择黑龙江省、吉林省、辽宁省三省的5~9月干旱情况进行分析。

由图5可知,东北三省整体干旱情况呈现东北向西南逐渐加重趋势,这与张淑杰等,杨晓静等的研究一致。9月黑龙江省北部出现较为严重干旱,这与该地所处纬度有关,较早出现土壤的冻结现象以及较早的冬季降雪。黑龙江省西南部、吉林省西部、辽宁省西南部在生长季的各个月份均存在不同程度的干旱情况,5月的干旱严重程度与范围明显高于6~9月。

此外,黑龙江省河流、湿地较多,多个月份均呈现较湿润状态。吉林省自东向西干旱程度逐渐加重,西部地区多为盐碱地,蓄水储水能力弱;东部地区东南部地区河流较多且森林山区较多,整体表现为较湿润状态。

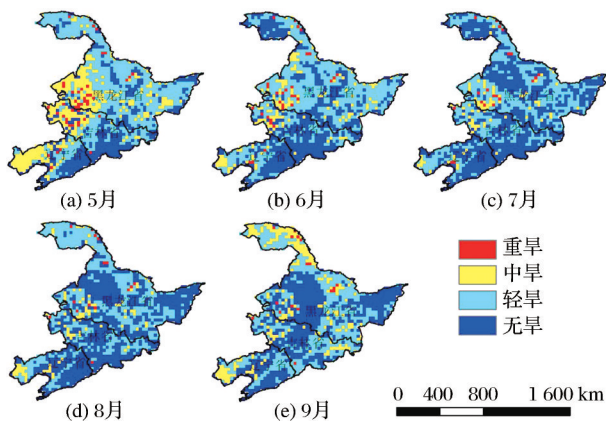


图5 东北三省干旱程度时空分布

Fig.5 Spatial-temporal distribution of drought level in Northeast China

辽宁省发生的干旱区域主要集中在西南地区,且作物生长季的各个月份,辽宁省西南部均呈现较为干旱的状态,较之辽宁省中部和东部沿海地区有

更高的干旱发生频率。

4.2 干旱像元百分比与玉米亩产的相关性分析

综合黑龙江省、吉林省和辽宁省三省的1979~2014年的玉米亩产数据,分析长时间序列下的各省中旱程度以上(即 $SWDI \leq -1$)的像元个数(即干旱面积)与玉米亩产的关系。为研究SWDI与玉米单产之间的关系,采用与3.5节中去趋势的方法得到去除趋势影响的玉米产量。基于去除趋势后的玉米亩产与干旱指数,计算各省中旱程度以上的像元个数所占百分比与去除趋势后的玉米亩产的相关关系,如表2所示。

表2 中旱重旱像元百分比与玉米亩产相关性

Table 2 Correlation between drought pixel percentage and corn yield

R	5月	6月	7月	8月	9月
黑龙江省	-0.14*	-0.18*	-0.66**	-0.23*	0.45**
吉林省	0.76**	-0.05	-0.88**	-0.58**	-0.16*
辽宁省	-0.51**	-0.72**	-0.62**	-0.68**	-0.16*

注:*表示通过95%显著性检验,**表示通过99%显著性检验

7月是东北三省雨量充足月份,同时也是玉米需水关键期^[36],干旱像元个数百分比与去趋势玉米亩产呈现显著负相关关系,吉林省为东北三省玉米种植范围最大省份,相关系数达到-0.88。黑龙江省西部和北部地区森林覆盖面积大,土壤水分产品的精度在一定程度上受森林覆盖的影响^[37],在影响土壤水分产品精度的同时也在一定程度上影响了SWDI的稳定性,因此相关性也较弱,相关系数为-0.66。辽宁省为东北三省玉米种植面积最小的省份,因此受到种植范围、空间异质性以及其它气候环境因素的影响,导致其成为三省中相关性较弱的省份,相关系数为-0.62。虽然不同省份的7月干旱指数与玉米亩产相关性略有差异,但是整体仍能很好地反映玉米生长关键需水期干旱情况对产量的影响。针对吉林省5月和黑龙江省9月的正相关关系,虽然干旱像元占比较大,但是结合土地利用数

据可知,大部分干旱区域均为非农田区域,吉林西部草地干旱像元占比较大,黑龙江北部森林像元占比较大,这也是出现仅有的两个正值的主要原因。

本研究中对于东北地区干旱等级的划分,主要依赖于土壤质地、植被类型等因素,并结合农业干旱等级国家标准进行确定,因此在满足本研究的同时可能存在一定程度的局限性。温度与干旱指数的相关性在整个玉米生长季变化较大,主要是由于植被生物量在5~9月逐渐增加,并于9月达到峰值,导致土壤水分的测量与温度数据均出现一定程度的偏差,因此造成二者相关性由良好的负相关逐渐变为正相关。干旱指数与作物亩产只在7月表现出良好的相关性主要是由于整个7月是玉米关键需水期,而其他月份虽然对最终产量有影响,但是相比于7月较弱。随着研究的不断深入,将逐步对影响作物产量的多种因素进行考虑和分析,其中包括病虫害、洪涝灾害以及遥感土壤水分产品的不确定性等,均是造成相关性较差的潜在因素。

5 结语

本文基于长时间序列土壤水分产品开展干旱事件的发生对于玉米产量的影响研究,利用土壤水分产品计算土壤水分亏缺指数,分析干旱程度的空间分布状态,发现东北三省干旱程度空间上呈现自东北向西南逐渐加重的趋势,这也与前人研究具有一致性^[10,12-14]。主要结论如下:

(1)通过分析SWDI与降水和气温之间的相关性,证明了基于CCI土壤水分产品的SWDI指数的可靠性,为本研究的后续分析奠定了基础。

(2)SWDI的空间分布特征显示东北地区具有东北-西南方向的干旱变化趋势,这与该地区土地利用类型以及土壤质地空间分布导致的土壤蓄水能力(田间持水量、凋萎系数等)具有较好的空间一致性。

(3)中旱和重旱两种干旱程度的像元百分比与去趋势玉米亩产的相关分析结果表明:玉米关键需水期干旱指数与玉米产量具有很好的相关性。

东北三省农作物生长季主要为5~9月,作物不同的生长时期对水分的需求量不同,因此各个月份的干旱情况对于作物最终产量的贡献不尽相同。通过本研究中的分析得知,东北三省玉米生长季关键需水期的土壤水分亏缺指数与最终玉米产量表现出良好的相关性,其他月份则相对较弱。其中7

月相关性最好,这与7月降水的充沛以及植被覆盖程度相对8月和9月较小有关。较低的植被覆盖程度意味着较低的生物量,对于土壤水分产品的质量和精度大有裨益,综合以上因素,7月作为一个监测农业干旱的关键月份在未来的研究中将进行深入探讨研究,同时7月在未来的研究中对于粮食产量的监测具有重要价值。

总体而言,欧空局CCI土壤水分产品与气象数据(降水、气温)综合分析验证结果表明土壤水分产品具有可靠性,建立的干旱指数与玉米亩产具有较好的相关关系,该产品能够用于定量分析干旱对东北地区玉米亩产的影响。

参考文献(References):

- [1] Wilhite D A, Glantz M H. Understanding the Drought Phenomenon: the Role of Definitions [J]. *Water International*, 1985, 10(1):111-120.
- [2] Narasimhan B, Srinivasan R. Development and Evaluation of Soil Moisture Deficit Index (SMDI) and Evapotranspiration Deficit Index (ETDI) for Agricultural Drought Monitoring [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2005, 133(1): 69-88.
- [3] Su Z, Yacob A, Wen J, *et al.* Assessing Relative Soil Moisture with Remote Sensing Data: Theory, Experimental Validation, and Application to Drought Monitoring over the North China Plain[J]. *Physics and Chemistry of the Earth*, 2003, 28(1-3): 89-101.
- [4] Wu J, Zhou L, Liu M. Establishing and Assessing the Integrated Surface Drought Index (ISDI) for Agricultural Drought Monitoring in Mid-Eastern China[J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2013, 23(1): 397-410.
- [5] Champagne C, McNairn H, Berg A A. Monitoring Agricultural Soil Moisture Extremes in Canada Using Passive Microwave Remote Sensing[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2011, 115(10): 2434-2444.
- [6] Liu Zhiming, Zhang Bai, Yan Ming, *et al.* Some Research Advances and Trends on Soil Moisture and Drought Monitoring by Remote Sensing [J]. *Advance in Earth Sciences*, 2003, 18(4): 576-583.[刘志明,张柏,晏明,等.土壤水分与干旱遥感研究的进展与趋势[J].*地球科学进展*, 2003, 18(4): 576-583.]
- [7] Zhang Chao. Study of the Evaluate and Zone Methods on Winter Wheat Drought Risk Based on GIS in Jing-Jin-Ji Region [D]. Shijiazhuang: Hebei Normal University, 2010.[张超.基于GIS干旱风险评估与区划方法研究[D].石家庄:河北师范大学, 2010.]
- [8] Escorihuela M J, Quintana-Seguí P. Comparison of Remote Sensing and Simulated Soil Moisture Datasets in Mediterra-

- nean Landscapes [J]. Remote Sensing of Environment, 2016, 180(1): 99-114.
- [9] Al-Yaari A, Wigneron J P, Kerr Y. Testing Regression Equations to Derive Long-term Global Soil Moisture Datasets from Passive Microwave Observations [J]. Remote Sensing of Environment, 2016, 180(1): 453-464.
- [10] Gao Xiaorong, Wang Chunyi, Zhang Jiquan, *et al.* Crop Water Requirement and Temporal-spatial Variation of Drought and Flood Disaster During Growth Stages for Maize in Northeast During Past 50 Years [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2012, 28(12): 101-109. [高晓容, 王春乙, 张继权, 等. 近50年东北玉米生育阶段需水量及早涝时空变化[J]. 农业工程学报, 2012, 28(12): 101-109.]
- [11] Zhao Xianli, Zhang Yushu, Ji Ruipeng, *et al.* Characteristics of Temporal and Spatial Distribution of Main Agricultural Disasters in Liaoning Provinces [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2013, 31(5): 130-135, 256. [赵先丽, 张玉书, 纪瑞鹏, 等. 辽宁主要农业灾害时空分布特征[J]. 干旱地区农业研究, 2013, 31(5): 130-135, 256.]
- [12] Li Lei. Research on Water Suitability of Maize Planting Range in Northeast China [D]. Changchun: Jilin University, 2018. [李雷. 东北地区玉米种植范围的水分适宜性研究[D]. 长春: 吉林大学, 2018.]
- [13] Yang Xiaojing, Xu Zongxue, Zuo Depeng, *et al.* Spatio-Temporal Evolution Characteristics of Drought - Waterlogging in Three Provinces of Northeast China in Past 55 Years [J]. Journal of Natural Disasters, 2016, 25(4): 9-11. [杨晓静, 徐宗学, 左德鹏, 等. 东北三省近55a旱涝时空演变特征[J]. 自然灾害学报, 2016, 25(4): 9-11.]
- [14] Yang Ruozhi. Spatial-temporal Characteristics and Comprehensive Risk Assessment of Main Agro-meteorological Hazards for Maize in Northeast China [D]. Beijing: Chinese Academy of Meteorological Sciences, 2015. [杨若子. 东北玉米主要农业气象灾害的时空特征与风险综合评估[D]. 北京: 中国气象科学研究院, 2015.]
- [15] Fu Lin. Agricultural Climate Yields Assessment Research in Three Provinces of Northeast China [D]. Beijing: Chinese Academy of Meteorological Sciences, 2011. [符琳. 东北三省农业气候年景评估研究[D]. 北京: 中国气象科学研究院, 2011.]
- [16] Zheng Xingming, Zhao Kai, Li Xiaofeng, *et al.* Moisture Derived from Microwave Remote Sensing in Northeast China [J]. Scientia Geographica Sinica, 2015, 35(3): 334-339. [郑兴明, 赵凯, 李晓峰, 等. 利用微波遥感土壤水分产品监测东北地区春涝范围和程度[J]. 地理科学, 2015, 35(3): 334-339.]
- [17] Liu Zhijuan, Yang Xiaoguang, Wang Wenfeng, *et al.* Characteristics of Agricultural Climate Resources in Three Provinces of Northeast China Under Global Climate Change [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2009, 20(9): 2199-2206. [刘志娟, 杨晓光, 王文峰, 等. 气候变化背景下我国东北三省农业气候资源变化特征[J]. 应用生态学报, 2009, 20(9): 2199-2206.]
- [18] Liu Y Y, Dorigo W A, Parinussa R M. Trend-preserving Blending of Passive and Active Microwave Soil Moisture Retrievals [J]. Remote Sensing of Environment, 2012, 123(1): 280-297.
- [19] Liu Y Y, Parinussa R M, Dorigo W A. Developing an Improved Soil Moisture Dataset by Blending Passive and Active Microwave Satellite based Retrievals [J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2011, 15(1): 425-436.
- [20] Wagner W, Dorigo W, de Jeu R. Fusion of Active and Passive Microwave Observations to Create an Essential Climate Variable Data Record on Soil Moisture [J]. ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 2012, 1(7): 315-321.
- [21] Shi X Z, Yu D S, Warner E D, *et al.* Soil Database of 1:1 000 000 Digital Soil Survey and Reference System of the Chinese Genetic Soil Classification System [J]. Soil Survey Horizons, 2004, 45(1): 129-136.
- [22] Shi X Z, Yu D S, Warner E D, *et al.* Cross Reference System for Translating between Genetic Soil Classification of China and Soil Taxonomy [J]. Soil Science Society of America Journal, 2006, 70(1): 78-83.
- [23] Martínez-Fernández J, González-Zamora A, Sánchez N. Satellite Soil Moisture for Agricultural Drought Monitoring: Assessment of the SMOS Derived Soil Water Deficit Index [J]. Remote Sensing of Environment, 2016, 177(1): 277-286.
- [24] Yan Nana. The Method of Drought Monitoring by Remote Sensing [D]. Beijing: Institute of Remote Sensing and Digital Earth, Chinese Academy of Sciences, 2005. [闫娜娜. 基于遥感指数的旱情监测方法研究[D]. 北京: 中国科学院研究生院(遥感应用研究所), 2005.]
- [25] Allen R G, Pereira L S, Raes D, *et al.* Crop Evapotranspiration: Guidelines for Computing Crop Water Requirements [M]. FAO, Rome, 1998: 300. (Irrigation and Drainage Paper 56).
- [26] Savage M J, Ritchie J T, Bland W L. Lower Limit of Soil Water Availability [J]. Agronomy Journal, 1996, 88(1): 644-651.
- [27] Duan X W, Xie Y, Liu G. Field Capacity in Black Soil Region, Northeast China [J]. China Geography Science, 2010, 20(5): 406-413.
- [28] Saxton K E, Rawls W J. Soil Water Characteristic Estimates by Texture and Organic Matter for Hydrologic Solutions [J]. Soil Science Society of America Journal, 2006, 70(1): 1569-1578.
- [29] Carrao H, Russo S, Sepulcre-Canto G, *et al.* An Empirical Standardized Soil Moisture Index for Agricultural Drought Assessment from Remotely Sensed Data [J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2016, 48(1): 74-84.
- [30] McKee T B, Doeskin N J, Kleist J. The Relationship of Drought Frequency and Duration to Time Scales [J]. American Meteorological Society, 1993, 1(1): 179-184.
- [31] Hulme M, Osborn T J, Johns T C. Precipitation Sensitivity

- to Global Warming: Comparison of Observations with Had-CM2 Simulations[J]. *Geophysical Research Letters*, 1998, 25 (17): 3379-3382.
- [32] Lobell D B, Burke M B. Why are Agricultural Impacts of Climate Change so Uncertain? The Importance of Temperature Relative to Precipitation[J]. *Environmental Research Letters*, 2008, 3(3): 1-9.
- [33] Portoghesi I, Vurro M, Lopez A. Assessing the Impacts of Climate Change on Water Resources: Experiences from the Mediterranean Region [M]. Germany, Springer International Publishing, 2015.
- [34] Meng Fanchao. Observation and Simulation Study on Maize Growth and Yield Under Climate Change in Northeast China [D]. Beijing: Chinese Academy of Meteorological Sciences, 2015. [孟凡超. 气候变化对东北玉米生长和产量影响的观测与模拟[D]. 北京: 中国气象科学研究院, 2015.]
- [35] Cheng Yeqing. Spatial Pattern Change and Its Driving Factors of Grain Per Unit Area Yield in Northeast China[J]. *Journal of Natural Resources*, 2009, 24(9): 1541-1549. [程叶青. 东北地区粮食单产空间格局变化及其驱动因素分析[J]. *自然资源学报*, 2009, 24(9): 1541-1549.]
- [36] Niyogi D, Liu X, Andresen J, *et al.* Crop Models Capture the Impacts of Climate Variability on Corn Yield[J]. *Geophysical Research Letters*, 2015, 42(1): 3356-3363.
- [37] Yang Xiaochen, Ming Bo, Tao Hongbin, *et al.* Spatial Distribution Characteristics and Impact on Spring Maize Yield of Drought in Northeast China[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2015, 23(6): 758-767. [杨晓晨, 明博, 陶洪斌, 等. 中国东北春玉米区干旱时空分布特征及其对产量的影响[J]. *中国生态农业学报*, 2015, 23(6): 758-767.]
- [38] Zhang Shujie, Zhang Yushu, Ji Ruipeng, *et al.* Analysis of Spatio-Temporal Characteristics of Drought for Maize in Northeast China[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2011, 29(1): 231-236. [张淑杰, 张玉书, 纪瑞鹏, 等. 东北地区玉米干旱时空特征分析[J]. *干旱地区农业研究*, 2011, 29(1): 231-236.]
- [39] Kurum M, Lang R H, O'Neill P E, *et al.* L-band Radar Estimation of Forest Attenuation for Active/Passive Soil Moisture Inversion[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2009, 47(9): 3026-3040.
- [40] Zeng J Y, Li Z, Chen Q, *et al.* Evaluation of Remotely Sensed and Reanalysis Soil Moisture Products over the Tibetan Plateau Using In-situ Observations[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2015, 163(15): 91-110.
- [41] Dorigo W A, Gruber A, De Jeu R A M, *et al.* Evaluation of the ESA CCI Soil Moisture Product Using Ground-based Observations [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2015, 162 (1): 380-395.

Precision Evaluation of Drought Index based on CCI Soil Moisture Products and Its Effect on Grain Yield in Northeast China

Li Lei^{1,2}, Zheng Xingming^{1,3}, Zhao Kai^{1,3}, Li Xiaofeng^{1,3}, Wang Guangrui^{1,2}

(1. Northeast Institute of Geography and Agroecology, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130102, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3. Changchun Jingyuetan Remote Sensing Test Site of Chinese Academy of Sciences, Changchun 130102, China)

Abstract: Soil moisture is the basic factor for monitoring crop drought. Based on the microwave remote sensing soil moisture products of ESA from 1978 to 2014, the statistical database of China's economic and social development and meteorological data, combined with the Soil Moisture Deficit Index (SWDI), the relationship between the degree of drought in Northeast China and corn yield was analyzed. The results show that: (1) the drought level of the three provinces is increasing from northeast to southwest; (2) the SWDI drought index calculated based on CCI (Climate Change Initiative) soil moisture products has a good correlation with rainfall and temperature, which can be used to evaluate the severity of drought; (3) the correlation between SWDI and maize yield is the best in the key water demand period (July), and R^2 of Heilongjiang, Jilin and Liaoning provinces are 0.43, 0.78 and 0.38 respectively, which is very suitable for quantifying the effect of drought on maize yield. This conclusion has important guiding significance for the study of the influence of soil moisture content on crop yield and the relevant agricultural decision-making.

Key words: Microwave remote sensing; Soil moisture; Drought index; Corn yield; Northeast China