

DOI: 10.5846/stxb201801190153

周洪奎, 武建军, 李小涵, 刘雷震, 杨建华, 韩忻忆. 基于同化数据的标准化土壤湿度指数监测农业干旱的适宜性研究. 生态学报, 2019, 39(6):

Zhou H K, Wu J J, Li X H, Liu L Z, Yang J H, Han X Y. Suitability of assimilated data-based standardized soil moisture index for agricultural drought monitoring. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(6):

基于同化数据的标准化土壤湿度指数监测农业干旱的适宜性研究

周洪奎^{1,2}, 武建军^{1,2,*}, 李小涵^{1,2}, 刘雷震^{1,2}, 杨建华^{1,2}, 韩忻忆^{1,2}

1 北京师范大学环境演变与自然灾害教育部重点实验室, 北京 100875

2 北京师范大学地理科学学部, 北京 100875

摘要: 农业干旱是导致作物减产的主要灾害之一, 及时、准确地监测农业干旱状况有助于制定区域减灾策略, 降低灾害损失。标准化土壤湿度指数(SSMI)是基于历史土壤湿度时间序列构建的一种农业干旱指数, 目前分析该指数监测农业干旱的适宜性研究十分缺乏。本文以黄淮海平原为研究区, 利用数据同化的根区土壤湿度数据构建 SSMI, 并通过与标准化降水蒸散指数(SPEI)、农业干旱灾害记录数据的对比以及与冬小麦产量的关系分析, 综合评价 SSMI 监测农业干旱的适宜性。结果表明, SSMI 与 SPEI 具有良好的一致性, 二者之间具有极显著相关关系($P < 0.001$); 利用 SSMI 识别的农业干旱与农气站点干旱灾害记录是基本一致的, SSMI 能够有效反映干旱发生、发展直至减轻的演变过程; 冬小麦生长季 SSMI 与减产率显著相关, 利用 SSMI 识别的农业干旱发生区域与基于统计数据计算的减产区域基本相符, SSMI 能够对农业干旱引起的冬小麦减产起到一定的指示作用。综上所述, 基于同化数据构建的 SSMI 能够反映黄淮海平原的农业干旱状况, 利用 SSMI 监测区域农业干旱状况是适宜的。本研究可为基于土壤湿度的农业干旱监测业务化运行提供依据, 为黄淮海平原的抗旱减灾提供科学参考。

关键词: 农业干旱; 标准化土壤湿度指数; 适宜性; 黄淮海平原

Suitability of assimilated data-based standardized soil moisture index for agricultural drought monitoring

ZHOU Hongkui^{1,2}, WU Jianjun^{1,2,*}, LI Xiaohan^{1,2}, LIU Leizhen^{1,2}, YANG Jianhua^{1,2}, HAN Xinyi^{1,2}

1 Key Laboratory of Environment Change and Natural Disaster, Ministry of Education, Beijing Normal University, Beijing 100875, China

2 Faculty of Geographical Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China

Abstract: Drought is a recurring extreme climate event. Frequent droughts have serious impacts on agriculture and threaten food security. The Huang-Huai-Hai (HHH) Plain is one of the most important food-producing areas in China, and agricultural drought is one of the main factors leading to the decline of grain production in this region. Therefore, accurate and effective agricultural drought monitoring is of great significance to develop disaster mitigation strategies and reduce disaster losses. The standardized soil moisture index (SSMI) is an agricultural drought index based on historical soil moisture time series. Currently, the suitability of SSMI for monitoring agricultural drought is scarce. In previous studies, an agricultural drought index was mainly evaluated by comparisons with other commonly used drought indices or meteorological elements. Only a few studies considered the drought disaster records and the impact of drought on crop yield. In this study, the SSMI was established by using the assimilated root zone soil moisture to monitor agricultural drought in the HHH Plain.

基金项目: 国家自然科学基金项目(41671424); 教育部创新团队资助项目(IRT1108)

收稿日期: 2018-01-19; **网络出版日期:** 2018-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: jjwu@bnu.edu.cn

The SSMI-based results showed that several drought events occurred between 2002 and 2010. Of these droughts, the moderate or extreme droughts occurred in 2002, 2004, and 2006, matching well with the reality. Subsequently, the suitability of the SSMI was evaluated by comparing with the standardized precipitation-evapotranspiration index (SPEI), agricultural drought records, and winter wheat yield. The results showed that the average correlation coefficient between the SSMI and SPEI was 0.52, indicating a significant correlation ($P < 0.001$). As a whole, the SSMI and SPEI showed good agreement, which could accurately identify large-scale agricultural droughts. From a regional perspective, the SSMI could effectively track drought occurrence, evolution, and mitigation. The comparisons at site scales showed that the SSMI-based drought results were consistent with the drought records of agro-meteorological sites, and the SSMI could accurately monitor the intensity of agricultural drought. Crop yield is the ultimate performance of the crops affected by drought, and the relationship between the drought index and crop yield is an important aspect of testing the effectiveness of a drought index. We observed that the SSMI was closely related to the winter wheat yield loss ratio, and the SSMI-based drought areas generally existed in accordance with the statistical data-based yield reduction areas. To some extent, the SSMI provided an indication of the drought-induced yield reduction. In summary, the assimilated data-based SSMI could effectively reflect the drought conditions in the HHH Plain, and it was highly appropriate to use the SSMI to monitor agricultural drought. This study will facilitate the operational soil moisture-based agricultural drought monitoring and provide a scientific reference for drought prevention and mitigation in the HHH Plain.

Key Words: agricultural drought; standardized soil moisture index; suitability; Huang-Huai-Hai Plain

干旱是一种多发的极端气候事件,同时也是最具破坏性的自然灾害之一。频繁发生的干旱灾害给农业生产带来严重影响,威胁粮食安全^[1-2]。黄淮海平原是我国最重要的粮食生产基地之一,准确、有效地监测黄淮海平原的农业干旱状况对于及时制定区域的减灾策略,降低灾害损失具有重要意义。

农业干旱是作物生长过程中因土壤水分不足,阻碍作物正常生长,影响粮食产量的水量供需不平衡现象^[3-4]。在农业干旱监测中,土壤湿度扮演着十分重要的角色^[5-7]。当土壤水分低于土壤田间持水量时,会产生水分亏缺,植被开始不处于最佳生长状态;当水分进一步降低,即会产生水分胁迫,影响植被生长,进而影响植被生产力。因此,利用土壤湿度进行农业干旱监测也具有农学意义。

近年来,已经有学者提出了一些基于土壤湿度的农业干旱监测指数,主要分为两类:(1)基于历史时间序列数据,确定当前状态相对于历史正常范围的偏离程度建立的干旱指数,如标准化土壤湿度指数(SSMI, standardized soil moisture index)、土壤湿度距平(SMA, soil moisture anomaly)、土壤湿度百分位数(SMP, soil moisture percentile)等。该类指数仅利用土壤湿度数据,无需获取其他数据源,并且不同地区的监测结果具有可比性,能够用于区域干旱监测与评估。Mishra 等^[8]基于历史时间序列数据,利用标准化土壤湿度指数详细剖析了局地尺度的农业干旱。(2)从土壤可利用水的角度,基于土壤湿度和土壤特性参数构建的干旱指数,如土壤湿度指数(SMI, soil moisture index)^[9-10]、土壤水分亏缺指数(SWDI, soil water deficit index)^[5]等。该类指数的优点在于从土壤可利用水的角度出发,考虑了不同地区土壤性质对于水分亏缺的影响差异,但对于区域农业干旱监测而言,准确获取不同地区土壤属性参数是十分困难的,因而在区域或更大尺度上的应用受到一定的限制。

标准化土壤湿度指数(SSMI)是基于历史土壤湿度时间序列构建的一种农业干旱指数,具有计算简单易行,考虑数据分布特征等优点,探讨其在区域农业干旱监测中的适宜性能够为区域业务化的农业干旱监测以及干旱影响评估提供基础。然而,由于根区土壤湿度获取的不易性以及土壤湿度的估算精度不高等问题,目前该指数在农业干旱监测中的适宜性研究还十分缺乏。此外,现有的农业干旱指数评价研究中,主要通过与其他常用干旱指数或者气象要素的对比来评价^[5,11],考虑干旱灾害记录以及干旱影响的评价研究较少。实际上,我国的主要农业区拥有比较完善的农业气象观测网络,记录了作物生长发育状况和农业气象灾害发生情

况,这对于评价农业干旱指数的适宜性是十分有用的数据源。因此,本文采用数据同化后的根区土壤湿度数据构建标准化土壤湿度指数来监测黄淮海平原的农业干旱状况,通过与标准化降水蒸散指数(SPEI, standardized precipitation-evapotranspiration index)、农业干旱灾害数据的对比以及与冬小麦产量的关系分析,综合评价其农业干旱监测的适宜性,以期为黄淮海平原农业干旱监测业务化运行以及防灾减灾策略的制定提供理论依据和科学参考。

1 研究区概况

黄淮海平原是我国重要的粮食主产区且干旱灾害频发,已有许多学者以此为研究区开展干旱相关研究^[12-14]。黄淮海平原地处我国北方,位于 32° — 41° N 和 112° — 123° E 之间,面积约为 39 万 km^2 。在行政区划上包括天津、山东以及北京南部、河北大部、河南大部、安徽和江苏北部地区(图 1)。根据我国农业综合区划图,黄淮海平原可分为燕山太行山山麓平原区、冀鲁豫低洼平原区、黄淮平原区和山东丘陵农林区。

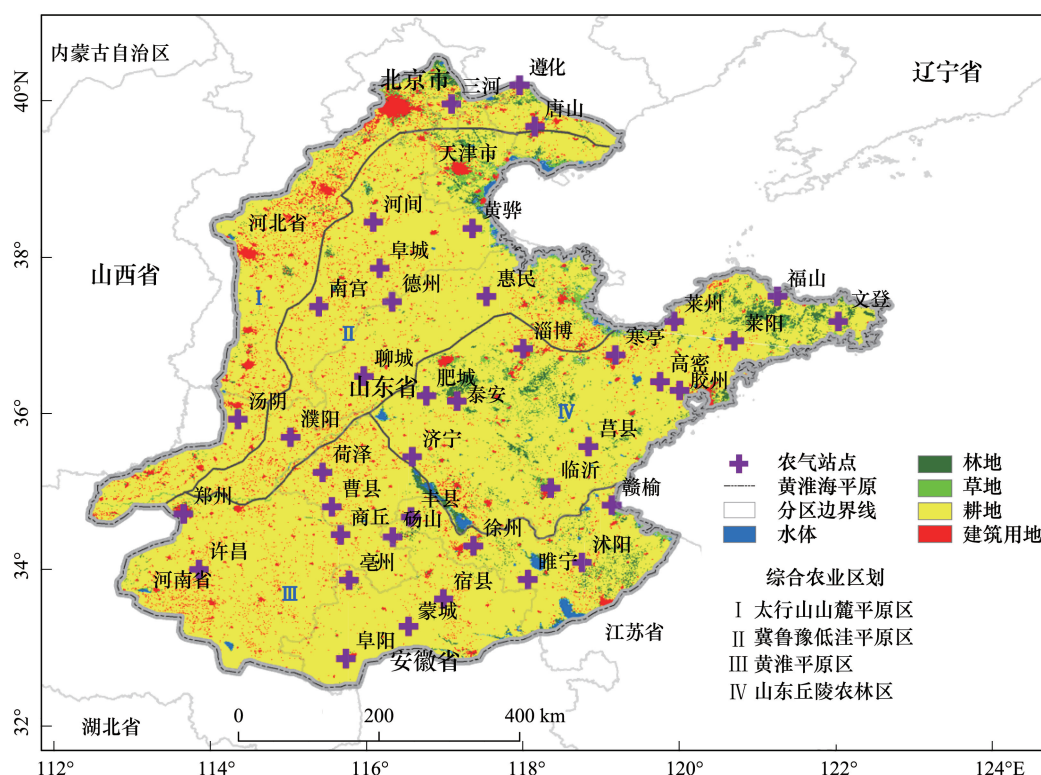


图 1 研究区位置示意图

Fig.1 Location of the study area

冬小麦和夏玉米的轮作是该地区主要种植模式,冬小麦生长季在区域南北部稍有差异,主要集中在每年 9 月下旬/10 月中上旬—次年 5 月下旬/6 月中上旬;夏玉米生长季则为 6 月中上旬—9 月中下旬。年降水量差异较大,在 500—950 mm 之间,且 60%—70%降水集中在夏季。因此,相对而言,冬小麦更容易受到干旱威胁^[14]。根据中国气象局农气站点记录的农业气象灾害中,黄淮海平原经常发生不同程度和持续时间的干旱事件,在本文研究时段(2002—2010 年)内,2002、2004、2006 年发生了较为严重的干旱事件。

2 资料与方法

2.1 数据来源与预处理

本文所用到的数据包括根区土壤湿度同化数据、标准化降水蒸散指数数据、农业气象站点灾害数据和冬小麦产量数据。

(1) 根区土壤湿度同化数据

本文所使用的土壤湿度数据是将 LPRM 模型反演的微波土壤湿度同化到双层帕默尔水量平衡模型中得到的根区土壤湿度数据^[15-16]。已有研究表明,根区土壤湿度相比于某一固定深度的土壤湿度数据更适合于农业干旱监测^[8]。该根区土壤湿度数据代表的是土壤深度为 1m 内的土壤水分状况,该深度能够满足大部分作物根部水分、营养吸收的需求^[17]。该数据覆盖时段为 2002 年 6 月至 2010 年 12 月,分辨率为 0.25 度的逐日数据,数据格式为 NetCDF 格式,可从 Reverb 平台下载(<http://reverb.echo.nasa.gov/reverb/>)。数据预处理过程为:首先利用计算机程序将 NetCDF 格式数据转换为 TIFF 格式,然后对数据无效值(负值)进行剔除,最后利用 GIS 软件裁剪获得黄淮海平原根区土壤湿度数据。

(2) 标准化降水蒸散指数数据

标准化降水蒸散指数(SPEI)是 Vicente-Serrano 等^[18]提出的一种应用非常广泛的干旱指数。SPEI 是在考虑降水的基础上,加入了温度信息,利用降水与潜在蒸散发之间的水量平衡关系来表征干旱。SPEI 具有多尺度特征,研究表明,3 个月尺度 SPEI(SPEI-3)适合监测农业干旱^[12,19],因此,文中将 SPEI-3 与 SSMI 进行对比分析,作为评价 SSMI 监测农业干旱适宜性的一个方面。SPEI 的计算方法:(1)获得某一时间尺度(如 3 个月)内降水累计值与潜在蒸散发累计值的差值的多年时间序列,一般要求时间序列的长度为 30 年以上^[18]。根据气象数据的可获得性,潜在蒸散发的计算可以采用 Penman-Monteith、Thornthwaite、Hargreaves 等方法^[20-21]。(2)对该时间序列进行 Log-Logistic 概率分布拟合,获得概率分布函数。(3)最后将概率分布函数进行正态标准化得到 SPEI 值,具体计算公式参考 Vicente-Serrano 等^[18]的文献。本研究使用的 SPEI 数据集是由提出者 Vicente-Serrano 等生产的全球 SPEI 数据集^[22],可以在以下网址(<http://sac.csic.es/spei/index.html>)下载。该数据格式为 NetCDF 格式,空间分辨率为 0.5 度,时间分辨率为每月,数据时段为 1901 年 1 月—2015 年 12 月,包含 1—48 月尺度的 SPEI 数据。为了与土壤湿度数据时段保持一致,本研究选取黄淮海平原 2002 年 6 月至 2010 年 12 月的 SPEI 格网数据集。

(3) 农业气象站点灾害数据

由于大范围地获取完整、详细的灾害记录数据是较为困难的,因此,干旱观测数据对于评价干旱指数的监测效果是十分宝贵的数据源。我国黄淮海平原拥有比较密集的农业气象站点,记录了农业干旱的相关信息。中国气象局根据农业气象台站上报的农业气象旬月报报文资料整理形成农业气象站点灾害旬值数据集,该数据集包括灾害名称、灾害发生日期、灾害强度、灾害面积以及受害百分比等主要字段,该数据可以从中国气象数据网下载(<http://data.cma.cn/>)。根据农业干旱国家标准中作物形态指标,灾害记录中干旱强度分为轻度、中度和重度干旱^[23]。本研究在全国农气站点的灾害记录中筛选出了 2002—2010 年间黄淮海平原共 40 个农气站点的 1244 条干旱灾害记录。

(4) 冬小麦产量数据

本文还收集了黄淮海平原主要省市天津、河北、山东、河南、安徽 35 个县级行政单位的 1994—2013 年冬小麦产量数据来评价干旱指数与作物产量之间的关系。数据来源是从各省市统计年鉴资料中获取。在预处理过程中,对产量数据进行了多项式去趋势处理,从实际产量中去除科技进步等人为因素对冬小麦产量的影响,得到气候要素为主要影响因素的产量(即气象产量)。文中用减产率作为农业干旱对作物造成的影响的表达指标,减产率(YLR, yield loss ratio)可通过公式(1)计算:

$$YLR = \frac{Y - \bar{Y}}{\bar{Y}} \times 100\% \quad (1)$$

式中, Y 为气象产量; $\bar{Y}$ 为多年平均气象产量,用其表示正常产量。YLR 负值表示减产;正值表示增产。

2.2 标准化土壤湿度指数(SSMI)

本文选用标准化土壤湿度指数作为评价农业干旱的指标,对根区土壤湿度进行标准化。对数据标准化的过程中,需确定土壤湿度数据的概率分布。常用于干旱指数构建的概率分布函数包括伽玛分布、皮尔逊 III 型

分布、经验累积概率分布、正态分布、Log-Logistic 分布等^[24]。利用 Kolmogorov - Smirnov 方法检验,结果显示土壤湿度数据符合正态分布,与 Mishra 等的结果相同^[8]。因此,SSMI 的构建方法如下:

$$SSMI = \frac{SM - \overline{SM}}{\sigma} \quad (2)$$

式中, SM 为某一时间尺度的土壤湿度值, $\overline{SM}$ 为该时间尺度上多年土壤湿度均值, σ 为该时间尺度上多年土壤湿度标准差。SSMI 小于 0 代表土壤湿度小于正常值,呈现土壤水分亏缺的状态;反之,SSMI 大于 0 表示土壤湿度大于正常值,呈现土壤水分盈余的状态,值的大小表示偏离正常值的程度。按照 McKee 等^[25]和世界气象组织(WMO)^[26]提出的干旱分类体系,干旱等级分为轻度干旱、中度干旱、重度干旱和极端干旱,不同干旱等级间的分隔点为数据的 1σ (σ 为标准差)、 1.5σ 和 2σ 。经检验,土壤湿度数据符合正态分布特征,计算得到的 SSMI 服从标准正态分布 ($\mu = 0; \sigma = 1$),因而,SSMI 干旱等级划分如表 1 所示。按照正态分布的特征,出现轻度、中度、重度和极端干旱的概率分别为 34.1%、9.2%、4.4% 和 2.3%;干旱事件出现概率的倒数即为重复周期,出现轻度、中度、重度和极端干旱的重复周期分别约为 3、10、20 和 50 年。由于 SPEI、农气站点灾情观测记录、作物产量数据的时间分辨率不同(SPEI 为月值数据;灾情观测记录为旬值数据;作物产量为生长季尺度数据),本文分别采用了月、旬、生长季尺度的 SSMI 与上述数据进行综合对比分析,从不同时间尺度上分析 SSMI 在农业干旱监测上的适宜性。不同尺度的 SSMI 的计算方法为:首先,将逐日的根区土壤湿度按照取均值的方法合成为相应尺度(旬、月、生长季)的土壤湿度数据;其次,按照公式(2)计算相应尺度的 SSMI。

表 1 标准化土壤湿度指数(SSMI)干旱等级划分

Table 1 Drought classification of standardized soil moisture index (SSMI)

类别 Categories	取值范围 Data ranges	概率 Probability / %	重复周期 Return period / a
轻度干旱 Mild drought	$(-1, 0]$	34.1	3
中度干旱 Moderate drought	$(-1.5, -1]$	9.2	10
重度干旱 Severe drought	$(-2, -1.5]$	4.4	20
极端干旱 Extreme drought	$(-\infty, -2]$	2.3	50

3 结果与分析

3.1 基于 SSMI 的黄淮海平原干旱监测结果

根据 2.2 节描述的 SSMI 的计算方法,利用根区土壤湿度数据计算得到了 2002—2010 年间黄淮海平原 SSMI 的干旱监测结果。图 2 展示了黄淮海平原内所有栅格数据 SSMI 月均值数据序列。根据 SSMI 的干旱等级划分,黄淮海平原在 2002—2010 年间共发生 12 次干旱事件,其中达到重度干旱事件 1 次(2002.6—2003.8),中度干旱事件 3 次(2004.1—2004.7、2005.3—2005.8、2006.8—2007.1),其余为轻度干旱事件。

3.2 SSMI 与 SPEI 的对比分析

由于 SPEI 和 SSMI 数据在时间尺度和空间分辨率上不同,为了对二者进行对比分析,需要将二者整合成统一的时空分辨率上。在空间分辨率上,SPEI 数据的空间分辨率为 0.5 度,SSMI 数据的空间分辨率为 0.25 度,文中将 SSMI 数据按照双线性内插法重采样为 0.5 度数据用于对比分析。在时间分辨率上,由于 SPEI 是逐月数据,为与 SPEI 数据序列保持一致,采用 SSMI 月值数据用于分析二者之间的关系,SSMI 月值数据的计算方法见 2.2 节。

本研究选用 3 个月尺度的 SPEI(SPEI-3)来与 SSMI 进行对比分析。SPEI-3 即综合考虑当前月份前 3 个月的降水和蒸散发量之差,按照上述 SPEI 的计算方法得到当前月份 SPEI 值,按照月份顺序依次滑动计算得到不同月份的 SPEI-3 值,最终形成逐月的 SPEI-3 时间序列。首先从整个黄淮海平原尺度上对比分析 SSMI 和 SPEI 之间的关系,将黄淮海平原内所有栅格数据进行取均值处理,得到 2002 年 6 月至 2010 年 12 月共 103

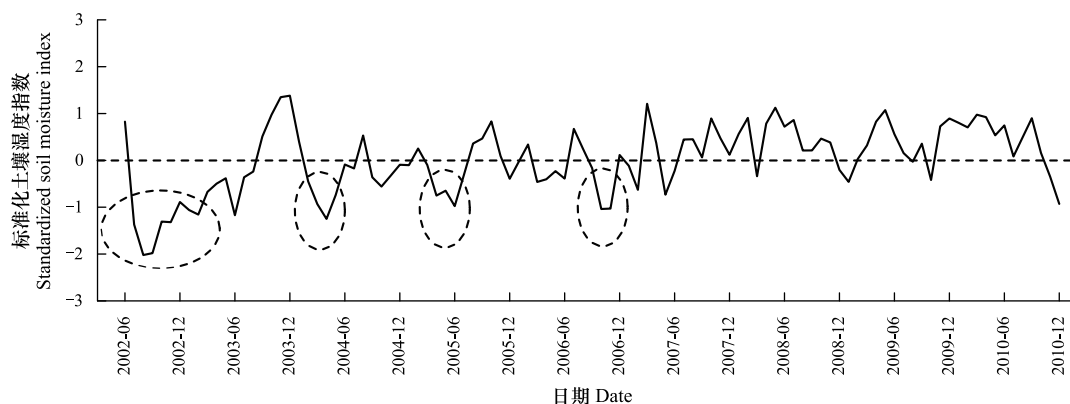


图2 黄淮海平原 SSMI 月均值时间序列

Fig.2 Time series of monthly SSMI in the Huang-Huai-Hai Plain

个月的 SSMI 和 SPEI 时间序列数据,结果如图 3 左图所示。结果显示,从整个黄淮海平原尺度来看,SPEI 与 SSMI 具有较好的一致性,相关系数达到 0.63,呈现极显著的相关关系。在 2002、2004、2006 年发生的农业干旱中,二者均具有良好地识别效果。在栅格尺度上,进一步分析 SSMI 与 SPEI 的相关程度,2002—2010 年月尺度 SSMI 与 SPEI 的相关性如图 3 右图所示。可以发现,SSMI 与 SPEI 之间的相关系数在 0.3—0.8 之间,平均相关系数为 0.52,每个栅格参与相关性计算的样本数量为 103 个,所有栅格均通过 0.001 显著性水平检验。以上分析结果表明,SSMI 与 SPEI 之间具有极显著的相关性和较好的一致性,以 SPEI 作为参照指标,SSMI 能够反映黄淮海平原的干湿状况。

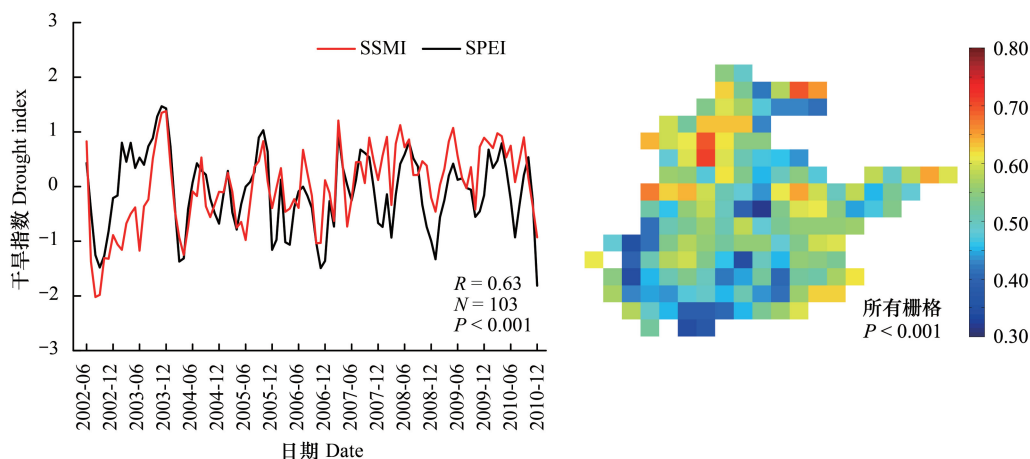


图3 黄淮海平原月尺度 SSMI 与 SPEI 的对比分析

Fig.3 Comparisons of the monthly SSMI and SPEI in the Huang-Huai-Hai Plain

3.3 SSMI 与干旱灾害观测记录的比较

本节分别从黄淮海平原整体情况和典型农气站点上对干旱灾害观测记录与 SSMI 进行对比分析。在分析黄淮海平原整体情况时,由于灾害观测记录为旬值数据集,时间序列较长,为了便于空间上展示,按照逐月方式对干旱灾害记录进行了整理归纳;在典型农气站点尺度上,采用旬尺度数据进行对比分析,从相对较小的时间尺度上进一步检验 SSMI 的干旱监测效果。表 2 是根据农气站点的灾害记录整理出的 2002—2010 年间的主要干旱事件。从表中可以发现,黄淮海平原每年都会有干旱发生,仅是在持续时间和发生范围上有所差别,文中重点分析了 2004、2006 年较长持续时间的干旱过程。图 4 展示了 2004 和 2006 年黄淮海平原从干旱发生到逐步加重直至干旱减轻的时空演变过程。按照农气站点灾害记录,从 2004 年 3 月开始,黄淮海平原就

已经有零星分布的干旱发生,至 4—6 月,干旱范围已经扩展为黄淮海平原大部分地区。在 2004 年 3—6 月间,黄淮海平原共有 18 个站点记录发生干旱,平均受害百分比为 40%—50%,平均受旱面积超过 2.5 万 hm^2 ,山东菏泽、安徽蒙城、宿县、亳州等地受害百分比甚至达到 90%—100%,平均受旱面积超过 6.7 万 hm^2 。在 2004 年 7 月—11 月,干旱范围有所减小,主要集中在安徽、江苏北部,以及山东、河南部分地区。在 2006 年 4—12 月间,共有 30 个站点显示发生干旱灾害,平均受害百分比为 47%—57%,平均受旱面积超过 2.8 万 hm^2 。在干旱空间分布来看,在 7—9 月干旱得到部分缓解;在 10—11 月,由于降水不足,干旱又逐渐加重;直至 12 月,黄淮海平原大部分地区干旱逐渐解除,只在山东胶东半岛和河北部分地区干旱持续。综合 2004、2006 年两次农业干旱事件,从图 4 可以看出,在空间分布上,SSMI 的干旱监测结果与农气站点灾害记录是基本符合的。

表 2 农气站点记录的黄淮海平原主要农业干旱事件

Table 2 Drought events from agro-meteorological sites in the Huang-Huai-Hai Plain

干旱事件 Drought events	受害范围 Drought affected areas	干旱强度 Drought intensity
2002.6—2002.12	黄淮海平原大部	大部分地区以轻度和中度干旱为主,山东和河北部分地区有重度干旱发生
2003.1—2003.7	黄淮海平原大部(其中,1 至 3 月干旱主要集中在山东)	大部分地区以轻度和中度干旱为主,山东和河南部分地区有重度干旱发生
2004.4—2004.6	黄淮海平原大部	轻度、中度干旱
2004.7—2004.11	安徽、江苏北部、山东、河南部分地区	轻度、中度干旱
2005.4—2005.7	黄淮海平原大部	轻度、中度干旱
2006.4—2006.12	黄淮海平原大部(其中,8、9 月份干旱范围主要集中在山东以及安徽北部;12 月集中在山东胶东半岛)	大部分地区以轻度和中度干旱为主,山东胶东半岛和安徽北部地区有重度干旱发生
2007.4—2007.6	黄淮海平原大部	大部分地区以轻度干旱为主,山东胶东半岛、河南南部地区有中、重度干旱发生
2008.10—2009.3	黄淮海平原大部	轻度干旱
2009.5—2009.11	胶东半岛	主要以轻度干旱为主,部分地区在 9—10 月有重度干旱发生
2010.11—2010.12	黄淮海平原大部	大部分地区以轻度干旱为主,安徽北部有中度干旱发生

为了进一步评估 SSMI 在农业干旱监测中的准确性,从站点尺度上分析干旱指数监测结果与灾害记录的一致性。根据农气站点灾害数据的完整性,选取德州、菏泽、泰安、商丘、蒙城、亳州 6 个站点用于对比分析。图 5 中分别用数值-1、-2、-3 来表示农气站点记录的轻度、中度和重度干旱事件。另外,农气站点还记录了洪涝灾害,其轻、中、重强度分别用 1、2、3 表示。从图 5 中可以发现,各站点 SSMI 所代表的干旱强度与干旱灾害记录是基本一致的,总体上 SSMI 能够较为准确地反映区域农业干旱强度特征。从干旱监测的时效性方面,旬值尺度的 SSMI 与干旱灾害记录也基本吻合,说明利用 SSMI 在旬尺度上监测农业干旱也具有较大的应用潜力。

3.4 农业干旱对冬小麦产量的影响分析

在进行农业干旱监测时,分析干旱指数与作物产量的关系是检验干旱指数监测效果的重要方面。本文搜集到黄淮海平原 35 个县市 1994—2013 共 20 年的冬小麦产量数据。为了使不同县市之间的产量数据能够进行类比,本文采用减产率来分析农业干旱监测结果与冬小麦产量的关系。首先,计算得到了所有县市 2002—2010 年 8 个生长季 SSMI 与冬小麦减产率的相关性(图 6 左图)。结果显示,SSMI 与冬小麦减产率呈现极显著的正相关关系($R=0.68, P<0.001$)。图 6 右图展示了各县市生长季 SSMI 与减产率之间的相关性,在 35 个县市中,有 24 个可以通过 0.05 水平显著性检验,11 个未通过显著性检验。根据农气站点灾害记录显示,河北保定、石家庄、邢台等地的冬小麦在 2002—2003 生长季遭遇病虫害、大风的灾害影响,山东菏泽在 2003—2004 生长季遭受渍害影响,并非都因干旱引起冬小麦减产。因此,总体上,生长季 SSMI 与冬小麦减产

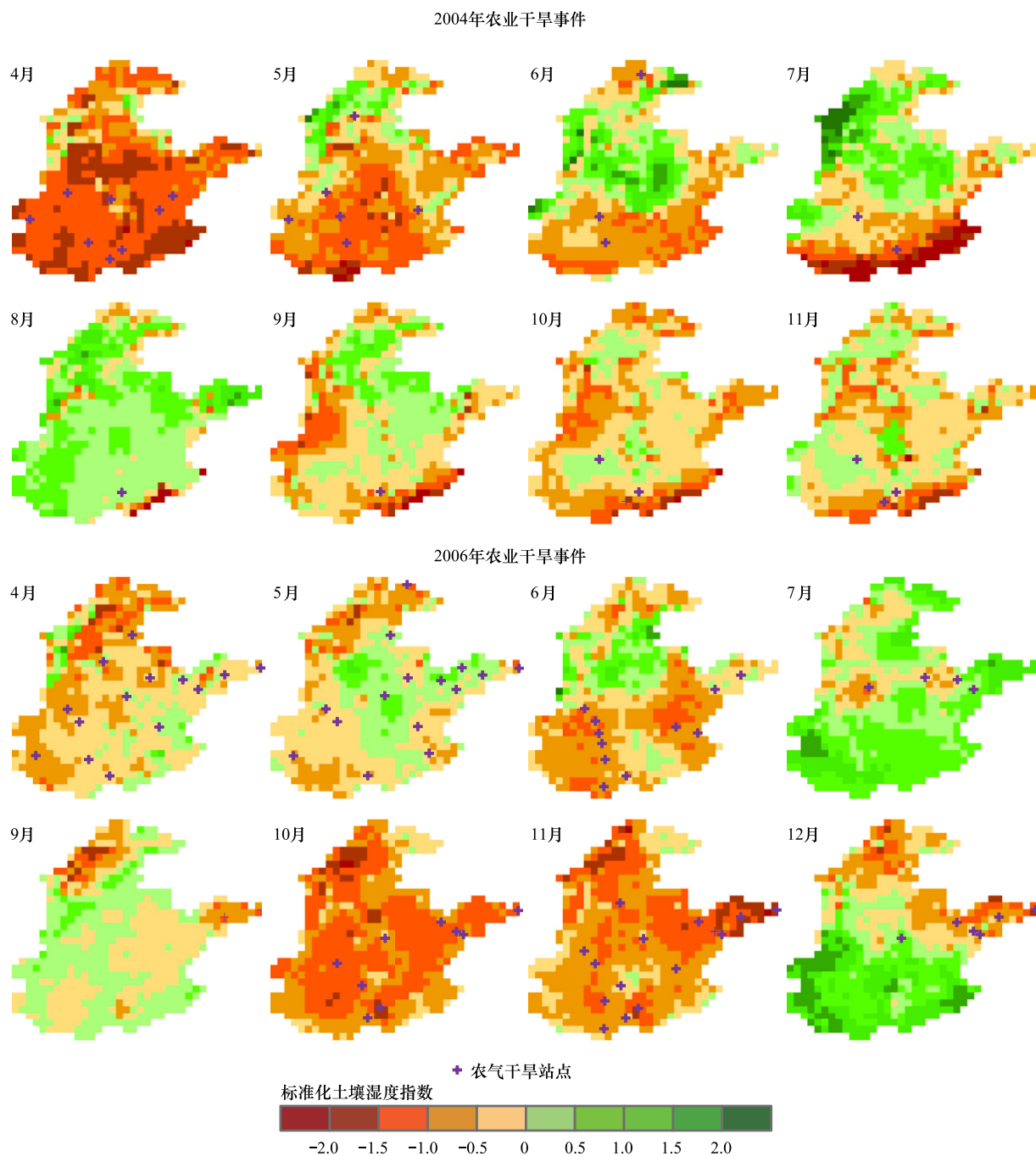


图 4 2004、2006 年黄淮海平原干旱空间演变过程

Fig.4 The evolutions of drought in 2004 and 2006 in the Huang-Huai-Hai Plain

率是显著相关的,SSMI 能够对农业干旱引起的冬小麦减产起到一定的指示作用。

本文选取 2002—2003 年发生在冬小麦生长季内的干旱事件,进一步分析 SSMI 干旱监测结果与冬小麦减产率的关系。从图 7 中可以发现,黄淮海平原 2002—2003 生长季冬小麦产量基本都呈现减产状态,减产幅度在 15%以内。根据 SSMI 识别结果,除了河北保定、石家庄、邢台(图中绿色显示区域)外,其余区域均处于干旱状态。总体上,基于统计数据得到的冬小麦发生减产的区域与基于 SSMI 识别的干旱发生区域具有较好地一致性。在数值上,有些区域减产率和 SSMI 可能无法很好地一一对应,即减产程度并不完全随着 SSMI 的减小而增加。主要原因在于粮食减产可能有多种原因引起,在农业气象灾害范畴内,除干旱外,还可能由大风、渍害、干热风、冰雹等引起减产。如图 7 中河北保定、石家庄、邢台(绿色区域)SSMI 显示为正常或湿润状态,

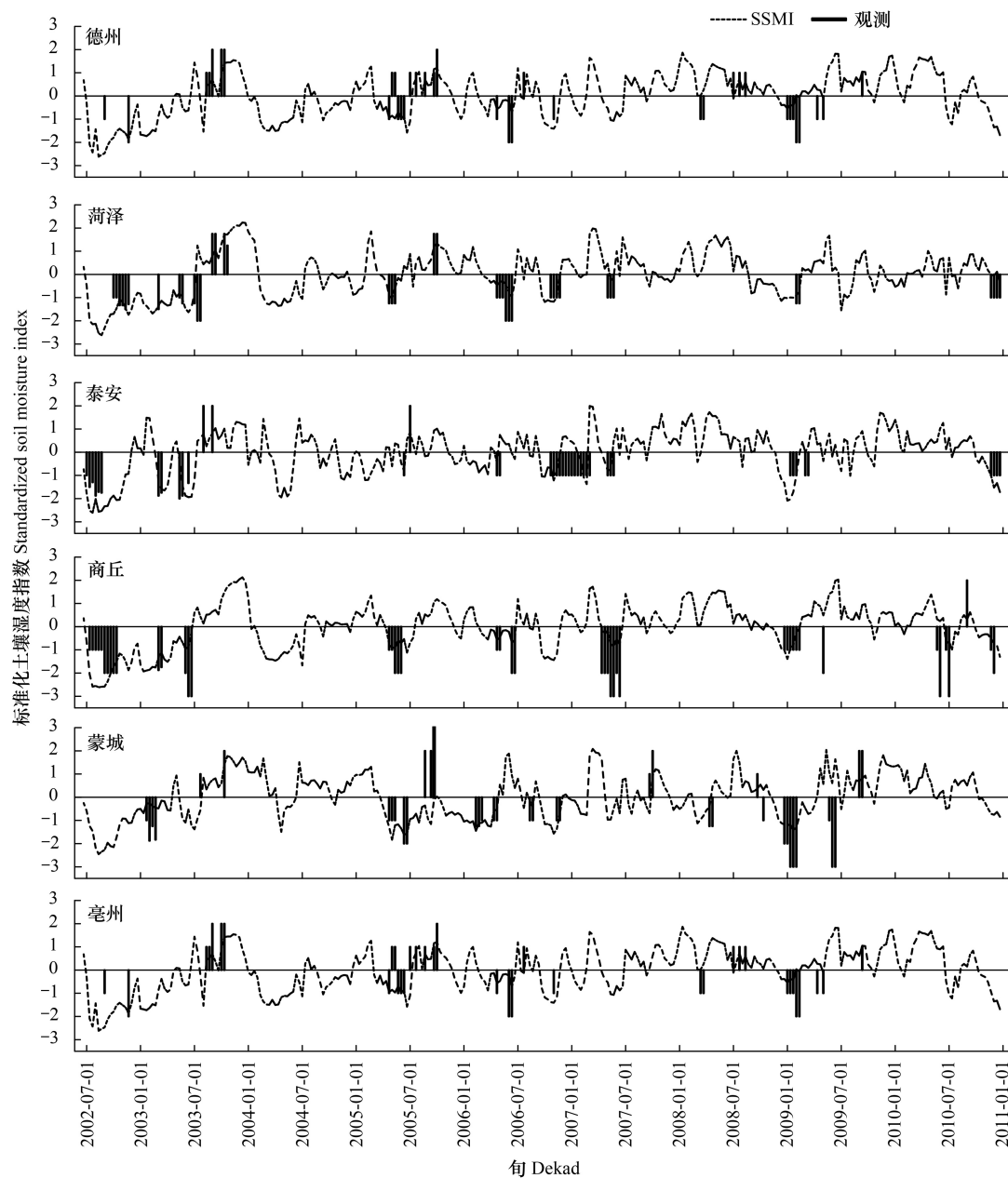


图 5 SSMI 旬值与农气站点干旱记录的对比

Fig.5 Comparison of the 10-day SSMI and drought records from agro-meteorological sites

而产量却呈现减产状况,其主要原因在于受到病虫害、大风的灾害影响。2002—2003 生长季内保定、石家庄、邢台的降水量分别为 101.7 mm、247.4 mm 和 177.6 mm,占平均降水量的 94%、185%和 134%,显示该生长季降水接近或者多于平均降水量,冬小麦产量减少可能并非受到干旱影响。另外,不同生育期内即使出现相同等级的干旱发生,对作物产量的影响也不尽相同,这也是导致 SSMI 与减产率无法很好地一一对应的原因之一。

4 结论和讨论

本文利用数据同化后的根区土壤湿度数据构建了标准化土壤湿度指数(SSMI),通过与常用的干旱指数 SPEI、农业干旱灾害数据以及冬小麦减产率的对比分析,综合评价了利用 SSMI 监测农业干旱的适宜性。研究表明,SSMI 能够有效反映黄淮海平原的农业干旱状况,利用 SSMI 监测农业干旱是适宜的。具体研究结论

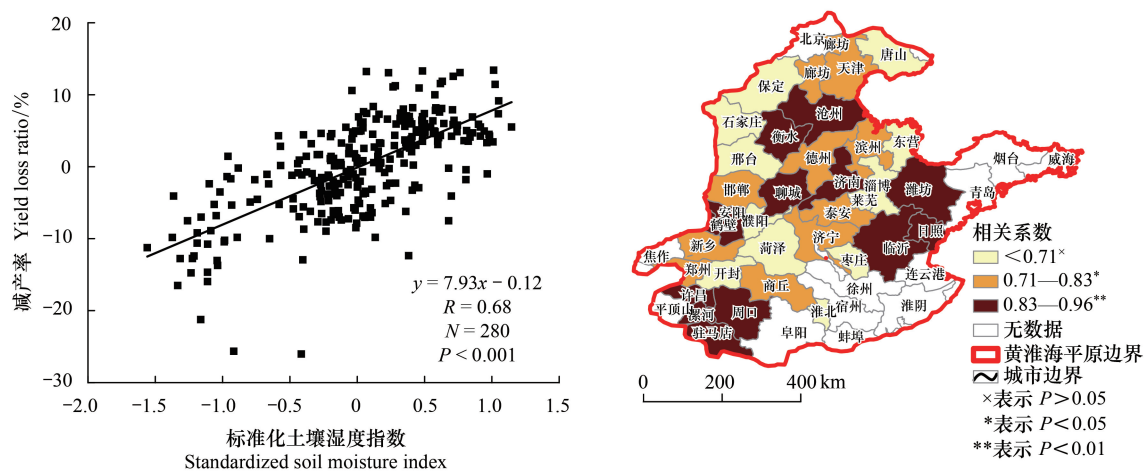


图6 冬小麦生长季 SSMI 与减产率的相关关系

Fig.6 Correlations of the SSMI during the growing season and winter wheat yield loss ratio

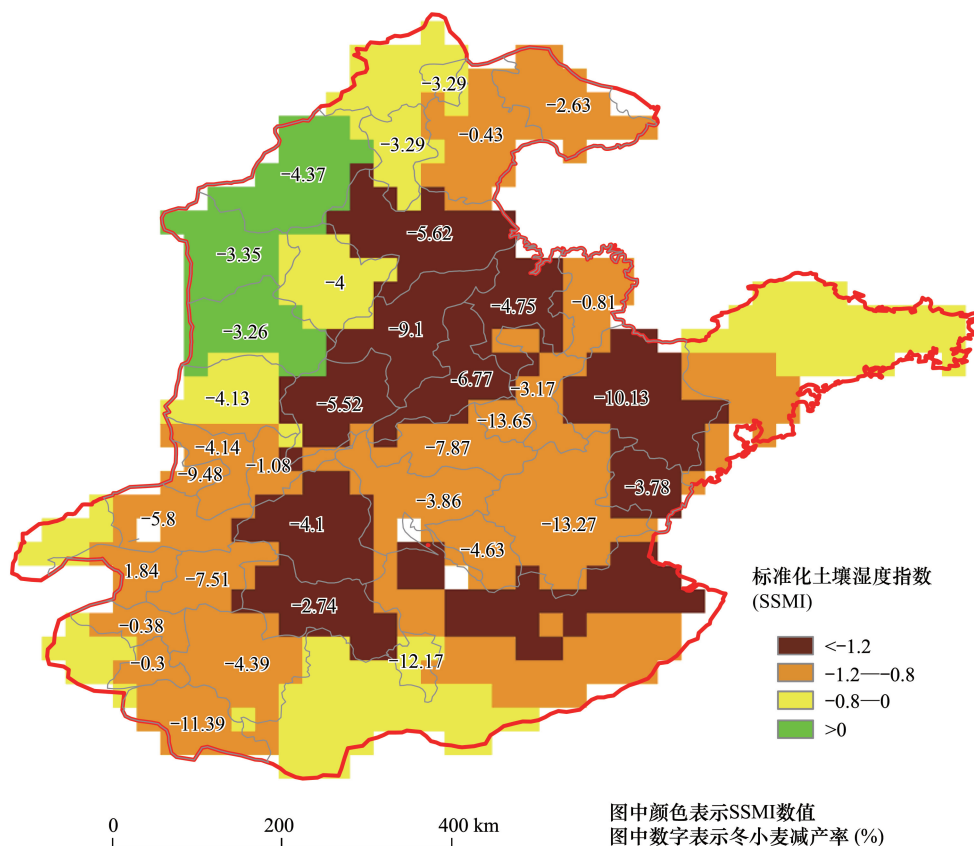


图7 2002—2003 生长季 SSMI 区域统计值与冬小麦减产率

Fig.7 The zonal SSMI statistics and winter wheat yield loss ratio during the growing season of 2002—2003

如下:

(1) 黄淮海平原格网尺度 SSMI 与 SPEI 之间的平均相关系数达到 0.52, 具有极显著相关关系 ($P < 0.001$)。从整个黄淮海平原来看, SSMI 与 SPEI 也具有良好的一致性, 能够准确识别该区大范围农业干旱。

(2) 从区域尺度上看, SSMI 能够有效反映干旱发生、发展直至减轻的演变过程。通过与德州、菏泽、泰安、商丘、蒙城、亳州 6 个农气站点干旱灾害记录的对比分析表明: 在站点尺度上, 利用 SSMI 识别的农业干旱与农

气站点干旱灾害记录是基本一致的,SSMI 能够较为准确地监测农业干旱的强度。

(3) 冬小麦生长季 SSMI 与减产率具有显著的相关性和良好的对应关系,基于 SSMI 识别的农业干旱发生区域与基于统计数据得到的冬小麦减产区域是基本一致的,SSMI 能够对农业干旱引起的冬小麦减产起到一定的指示作用。

相比于气象干旱,农业干旱是一种更为复杂的干旱类型,与气象条件和作物生长状况密切相关^[5,8],因而,在评价农业干旱指数的适宜性时,需要从不同方面综合评价^[27]。在以往的农业干旱指数评价中,往往通过与其他指数的对比来评价干旱指数的监测效果^[5,11]。由于不同干旱指数的构建原理不同,仅利用对比分析指数间的一致性不足以说明干旱指数的适宜性。本文从干旱指数、灾害观测记录对比以及干旱对产量影响的角度综合评价了标准化土壤湿度指数(SSMI)监测农业干旱的适宜性,在干旱指数的适宜性评价方法上更加全面,研究结果可以为黄淮海平原农业干旱监测业务化运行以及防灾减灾策略的制定提供理论依据和科学参考。

此外,由于数据条件的限制,本研究还存在一些不足之处。首先,由于采用的根区土壤湿度数据是同化模型模拟结果和遥感数据所得,土壤湿度数据时间序列相对较短。随着 SMOS(soil moisture ocean salinity)、SMAP(soil moisture active passive)等卫星土壤湿度产品的增多,空间分辨率也会更高,后续研究还需采用更长时间序列数据用于农业干旱监测及影响评价。其次,在探讨干旱对作物影响时,还需进一步考虑灌溉等人为因素的影响。本文研究区黄淮海平原的大部分地区为灌溉农业区,为了减轻干旱对产量的影响,大部分区域会进行人为灌溉,所以在发生干旱时导致产量可能并未降低,在分析干旱对作物生长及产量影响时,人为灌溉则会增加分析结果的不确定性。本文所利用的土壤湿度为同化后的根区土壤湿度数据,数据同化过程中用到了微波遥感土壤湿度数据,微波遥感信号可以捕捉到地面灌溉的信息^[28],因而该数据在一定程度上考虑了人为灌溉的信息。此外,在利用作物产量统计数据时,先进行了去趋势处理,去除了人为因素导致的科技进步对产量的影响,其中也包含人为灌溉因素,因此,本研究在分析干旱对作物产量影响时部分考虑了灌溉因素的影响。即便如此,在分析 SSMI 与冬小麦减产率之间的关系时,有些区域仍然出现减产率和呈现的干旱状况不完全一致的情况。因而,未来还需获取农田灌溉数据深入考虑灌溉因素可能带来的影响。最后,目前研究工作仅在黄淮海平原开展,进一步研究还需在更多区域(如雨养农业区、不同气候区)进行 SSMI 的验证评价工作。

参考文献(References):

- [1] Tubiello F N, Soussana J F, Howden S M. Crop and pasture response to climate change. *Proceedings of the National Academy of Science of the United States of America*, 2007, 104(50): 19686-19690.
- [2] Geng G P, Wu J J, Wang Q F, Lei T J, He B, Li X H, Mo X H, Luo H Y, Zhou H K, Liu D C. Agricultural drought hazard analysis during 1980-2008; a global perspective. *International Journal of Climatology*, 2016, 36(1): 389-399.
- [3] Crow W T, Kumar S V, Bolten J D. On the utility of land surface models for agricultural drought monitoring. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2012, 16(9): 3451-3460.
- [4] Panu U S, Sharma T C. Challenges in drought research: some perspectives and future directions. *Hydrological Sciences Journal*, 2002, 47(S1): S19-S30.
- [5] Martínez-Fernández J, González-Zamora A, Sánchez N, Gumuzzio A. A soil water based index as a suitable agricultural drought indicator. *Journal of Hydrology*, 2015, 522: 265-273.
- [6] Mozny M, Trnka M, Zalud Z, Hlavinka P, Nekovar J, Potop V, Virag M. Use of a soil moisture network for drought monitoring in the Czech Republic. *Theoretical and Applied Climatology*, 2012, 107(1/2): 99-111.
- [7] 李柏贞,周广胜. 干旱指标研究进展. *生态学报*, 2014, 34(5): 1043-1052.
- [8] Mishra A K, Ines A V M, Das N N, Prakash Khedun C, Singh V P, Sivakumar B, Hansen J W. Anatomy of a local-scale drought: application of assimilated remote sensing products, crop model, and statistical methods to an agricultural drought study. *Journal of Hydrology*, 2015, 526: 15-29.
- [9] Sridhar V, Hubbard K G, You J S, Hunt E D. Development of the soil moisture index to quantify agricultural drought and its "User Friendliness" in severity-area-duration assessment. *Journal of Hydrometeorology*, 2008, 9(4): 660-676.

- [10] Hunt E D, Hubbard K G, Wilhite D A, Arkebauer T J, Dutcher A L. The development and evaluation of a soil moisture index. *International Journal of Climatology*, 2009, 29(5): 747-759.
- [11] Carrão H, Russo S, Sepulcre-Canto G, Barbosa P. An empirical standardized soil moisture index for agricultural drought assessment from remotely sensed data. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2016, 48: 74-84.
- [12] Wang Q F, Shi P J, Lei T J, Geng G P, Liu J H, Mo X Y, Li X H, Zhou H K, Wu J J. The alleviating trend of drought in the Huang-Huai-Hai Plain of China based on the daily SPEI. *International Journal of Climatology*, 2015, 35(13): 3760-3769.
- [13] Wang Q F, Wu J J, Li X H, Zhou H K, Yang J H, Geng G P, An X L, Liu L Z, Tang Z H. A comprehensively quantitative method of evaluating the impact of drought on crop yield using daily multi-scale SPEI and crop growth process model. *International Journal of Biometeorology*, 2017, 61(4): 685-699.
- [14] 徐建文, 居辉, 梅旭荣, 刘勤, 杨建莹. 近 30 年黄淮海平原干旱对冬小麦产量的潜在影响模拟. *农业工程学报*, 2015, 31(6): 150-158.
- [15] Bolten J D, Crow W T. Improved prediction of quasi-global vegetation conditions using remotely-sensed surface soil moisture. *Geophysical Research Letters*, 2012, 39(19): L19406.
- [16] Bolten J D, Crow W T, Zhan X W, Jackson T J, Reynolds C A. Evaluating the utility of remotely sensed soil moisture retrievals for operational agricultural drought monitoring. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2010, 3(1): 57-66.
- [17] Natural Resources Conservation Service. National irrigation guide//National Engineering Handbook. Somerset, NJ: NRCS, 2005.
- [18] Vicente-Serrano S M, Beguería S, López-Moreno J I. A multiscalar drought index sensitive to global warming: the standardized precipitation evapotranspiration index. *Journal of Climate*, 2010, 23(7): 1696-1718.
- [19] Seiler R A, Hayes M, Bressan L. Using the standardized precipitation index for flood risk monitoring. *International Journal of Climatology*, 2002, 22(11): 1365-1376.
- [20] Allen R G, Pereira L S, Raes D, Smith M. Crop Evapotranspiration: Guidelines for Computing Crop Water Requirements. Rome, Italy: FAO, 1998.
- [21] 王兆礼, 李军, 黄泽勤, 钟睿达, 陈佳颖, 邱卓辉. 基于改进帕默尔干旱指数的中国气象干旱时空演变分析. *农业工程学报*, 2016, 32(2): 161-168.
- [22] Vicente-Serrano S M, Beguería S, López-Moreno J I, Angulo M, El Kenawy A. A new global 0.5° gridded dataset (1901-2006) of a multiscalar drought index: comparison with current drought index datasets based on the palmer drought severity index. *Journal of Hydrometeorology*, 2010, 11(4): 1033-1043.
- [23] 中国气象局. GB/T 32136-2015 农业干旱等级. 北京: 中国标准出版社, 2016.
- [24] Qin Y, Yang D W, Lei H M, Xu K, Xu X Y. Comparative analysis of drought based on precipitation and soil moisture indices in Haihe basin of North China during the period of 1960-2010. *Journal of Hydrology*, 2015, 526: 55-67.
- [25] McKee T B, Doesken N J, Kleist J. The relationship of drought frequency and duration to time scales//Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology. Boston, MA: American Meteorological Society, 1993.
- [26] World Meteorological Organization (WMO). Standardized Precipitation Index User Guide. WMO-No. 1090, Geneva: WMO, 2012.
- [27] Zhou H K, Wu J J, Geng G P, Li X H, Wang Q F, Lei T J, Mo X Y, Liu L Z. Enhancing the ability of a soil moisture-based index for agricultural drought monitoring by incorporating root distribution. *Journal of the American Water Resources Association*, 2017, 53(6): 1409-1423.
- [28] Zhou H K, Wu J J, Wang Q F, Mo X Y, Lei T J, Geng G P, Li X H. A simple method to estimate irrigation date for soil moisture modeling and agricultural drought monitoring in irrigated regions//Drought: Research and Science-Policy Interfacing. Leiden: CRC Press, 2015: 225-230.