doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.03.023

基于遥感 DSI 指数的干旱与冬小麦产量相关性分析*

黄健熙[1]　张　洁[2]　刘峻明[1]　马鸿元[1]　苏　伟[1]　张晓东[1]
(1. 中国农业大学信息与电气工程学院, 北京 100083; 2. 马里兰大学地理系, 马里兰州 20742)

摘要: 利用 2000—2012 年 MODIS ET/PET 和 NDVI 数据集构建干旱指数(DSI),监测山东省和河南省冬小麦主产区的农业干旱,并在地级市尺度上进一步评估冬小麦关键生育期干旱对冬小麦产量的影响。结果表明:2010 年 9 月—2011 年 2 月山东省特大干旱过程显示的 DSI 不仅能监测气象干旱,还能较好地反映农业干旱在空间上的差异性以及时间上的演变。不同冬小麦生育期干旱对冬小麦产量影响不同,灌浆期干旱对冬小麦产量的影响最大,干旱致使土壤水分亏缺,影响了作物正常的灌浆强度,进而导致作物减产;其次是拔节期;返青期干旱对产量基本没有影响。

关键词: 冬小麦　干旱指数　作物产量　蒸散　植被指数
中图分类号: TP79; S152.7+5　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2015)03-0166-08

Correlation Analysis between Drought and Winter Wheat Yields Based on Remotely Sensed Drought Severity Index

Huang Jianxi[1]　Zhang Jie[2]　Liu Junming[1]　Ma Hongyuan[1]　Su Wei[1]　Zhang Xiaodong[1]
(1. *College of Information and Electrical Engineering*, *China Agricultural University*, *Beijing* 100083, *China*
2. *Department of Geographical Sciences*, *University of Maryland*, *Maryland* 20742, *USA*)

Abstract: Drought is one of the most important agricultural meteorological disasters in China, resulting in significant impacts on winter wheat growth and yield. Satellite remote sensing can provide real-time and dynamic surface information and has become an effective tool for regional agricultural drought monitoring. In this study, the drought severity index (DSI) was first computed based on MODIS ET/PET and NDVI dataset from 2000 to 2012 for agricultural drought monitoring at prefecture-city level in winter wheat producing areas of both Shandong province and Henan province, and further evaluated the influence of agricultural drought on winter wheat yield during key phenological periods. The main conclusions from the study are as follows: the results from the Shandong province droughts occurring from September 2010 to February 2011 showed that DSI can not only monitor meteorological drought but can also reflect the spatial variations and temporal evolution for agricultural drought. Drought has varying impacts on winter wheat yield during different phenological stage of the growing season. Generally, the filling stage of winter wheat has the most important impact on winter wheat yield, during which drought induced soil water deficit affects the crops normal grouting intensity and results in reduction of winter wheat yield. The jointing stage follows and drought has negligible effect on winter wheat yield during the green-up stage. The research can provide important reference for agricultural drought monitoring and drought impacts on crop yield in other agricultural regions.

Key words: Winter wheat　Drought severity index　Crop yield　Evapotranspiration　Vegetation indexes

收稿日期: 2014-05-13　修回日期: 2014-07-09
*国家自然科学基金资助项目(41371326)和"十二五"国家科技支撑计划资助项目(2012BAH29B02)
作者简介: 黄健熙,副教授,博士生导师,主要从事农业定量遥感研究,E-mail: jxhuang@cau.edu.cn

引言

干旱是一种周期性发生的自然现象，它的发生过程复杂，通常表现为一种缓慢的自然灾害。干旱的发生依赖于所处地理位置的气候和地形地貌等要素。其复杂性导致至今还没有一个普适的干旱定义及监测方法。目前，普遍将干旱划分为 4 种基本类型：气象干旱、农业干旱、水文干旱和社会经济干旱[1]。其中农业干旱是以土壤含水量和植物生长形态为特征，反映土壤含水量低于植物需水量的程度。农业干旱被认为是各类干旱中最为复杂的一种。

目前，国内外研究者已开发出了基于 NDVI 的条件植被指数(VCI)[2]等干旱监测的方法。这些方法均适用于年度间相对干旱程度的监测。VCI 干旱监测方法的缺点是：未考虑降水与 NDVI 间的时间滞后关系；仅仅考虑了由于水分胁迫导致 NDVI 降低的状况，未考虑到其他因素导致 NDVI 降低的现实[3]。Kogan[4]提出了基于遥感亮度温度的干旱监测方法——条件温度指数(TCI)。TCI 的缺点是未考虑气象条件如净辐射和风速对热红外遥感的影响以及土地表面温度的季节性变化[3]。总之，应用单一指数的干旱监测方法具有较大的局限性。因此，基于多个指数组合的干旱指数被提出，如植被健康指数(VHI)[4]、温度植被指数(TVI)[3]、植被供水指数(VSWI)[3]、温度植被干旱指数(TVDI)[5]和条件植被温度指数(VTCI)[6]。Brown 等[7]基于多因子的数据挖掘技术构建了干旱监测指数，并获得了较高精度的监测应用效果。

干旱对作物产量影响的评估大多采用统计法、天气气候法等方法，且多是建立在静态和面上的综合评估。基于作物生长模型通过模拟农作物实际生长发育、灌浆过程、干物质的分配以及产量形成，进而确定减产程度用于评估农业干旱灾害的方法，具有一定的物理机理性[8]，然而基于作物模型研究干旱对产量影响的评估往往集中在田间小尺度和粗时间分辨率，大空间区域尺度和细时间分辨率的干旱对作物产量的影响还鲜有文献报道[9-10]。蒸散(ET)是植被蒸腾和土壤蒸发的总和值。潜在蒸散(PET)是指在一系列最佳条件下，土壤水分供应充足时的蒸散量，它表示在某个环境条件下对水分的最大需求，主要取决于太阳辐射能量和气象条件。因此，ET/PET 在一定程度上反映了农作物的水分胁迫信息。Anderson 等[11-12]提出了一种基于 ET/PET 的蒸散胁迫指数(ESI)，取得了较高的干旱监测精度。Mu 等[13-14]基于改进的 Penman－Monteith 公式计算蒸散(ET)，采用 Penman 公式计算潜在蒸散(PET)，并开发了全球的 MOD16 ET 产品。综合考虑 NDVI 反映农作物的生长状况和 ET/PET 反映农作物的水分胁迫信息，基于长时间序列 MOD16 ET/PET 和 NDVI，Mu 等[15]提出了一种干旱指数(Drought severity index，DSI)，并应用于全球尺度干旱监测，具有较大的应用潜力。但是，地级市尺度的 DSI 监测精度评价以及 DSI 对农作物产量的影响分析还未见文献报道。

本文采用 2000—2012 年 MODIS 按 8 d 合成的 1 km×1 km 分辨率 NDVI 和 ET/PET 数据集，构建干旱指数(DSI)，评估冬小麦不同生育期干旱对产量的影响，探讨 DSI 在地级市尺度农业干旱监测应用中的可行性。

1　研究区和数据源

1.1　研究区概况

选取我国黄淮冬麦区的山东省和河南省冬小麦主产区作为研究区(图 1)。土壤类型以石灰性冲积土为主，部分为黄壤与棕壤，质地良好，具有较高生产力。冬小麦和夏玉米的轮作为本区典型农业种植模式。全区气候温和，雨量季节差异性较大，70% 的雨量集中在玉米生育期，仅 30% 的雨量分布在冬小麦的关键生育期。由于雨量空间变异性以及雨量的季节和年际间变异，容易发生旱害，干旱已经成为限制本区域农作物生产最主要的农业灾害，选择该地区进行农业干旱监测以及干旱对产量的影响具有典型性。3 月中上旬为冬小麦返青期，4 月中上旬为拔节期，5 月中上旬为抽穗灌浆期，6 月上旬成熟收割期。总体来说，河南省的冬小麦物候期较山东省提前 1～2 旬。此外，山东省西北部和西南部、河南省北部以及中东部均具有较高的冬小麦种植密度。

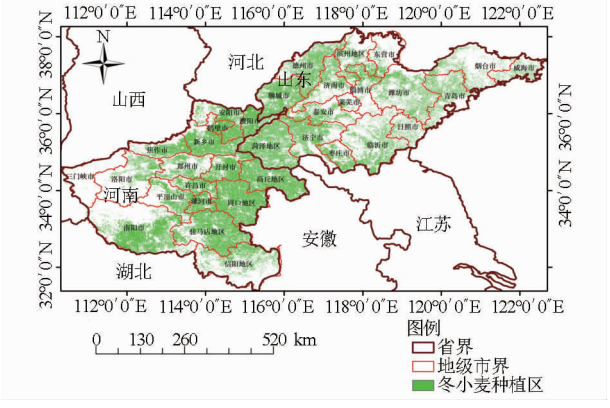

图 1　研究区

Fig. 1　Study area

1.2　数据源

研究中使用的遥感数据为 MOD13 NDVI 产品

(https://lpdaac.usgs.gov/)和 MOD16 ET/PET 产品(http://www.ntsg.umt.edu/project/mod16),时间分辨率统一为 8 d,空间分辨率为 1 km,原始数据均需经过镶嵌、投影、裁剪等预处理,形成 2000—2012 年的长时间序列数据集。另外,通过山东省和河南省统计局发布的数据获得 2000—2012 年地级市的冬小麦产量。

1.3 基于时间序列 MODIS NDVI 数据的冬小麦种植区提取

利用 2010 年 250 m 冬小麦关键生育期时间序列 MOD09A1 反射率数据,然后采用物候曲线特征匹配的分类方法提取了研究区的冬小麦种植区。基于野外调查的 70 个样本点验证(主要地物类型包括冬小麦、棉花、其他作物、建设用地、裸土、森林和水体),冬小麦的分类总体精度为 89.3%,Kappa 系数为 0.85。

2 DSI 监测方法

DSI 考虑了 NDVI 与 ET/PET 2 个基本要素,其中,NDVI 描述了农作物的光合作用以及生长状态,ET/PET 表示农作物的水分胁迫状况,通过两者累加能综合反映干旱的状况。在计算 DSI 过程中,首先计算标准化长时间序列 2000—2012 年 NDVI 和 ET/PET,具体算法为

$$Z_{NDVI}=\frac{R_{NDVI}-\overline{R}_{NDVI}}{\sigma_{NDVI}} \tag{1}$$

$$Z_{ET/PET}=\frac{R_{ET/PET}-\overline{R}_{ET/PET}}{\sigma_{ET/PET}} \tag{2}$$

式中 Z_{NDVI}——标准化后的 NDVI

$Z_{ET/PET}$——标准化后的 ET/PET

R_{NDVI}——2000—2012 年间某年的 NDVI 值

$\overline{R}_{NDVI}$——2000—2012 年 NDVI 的平均值

$R_{ET/PET}$——2000—2012 年间某年的 ET/PET 值

$\overline{R}_{ET/PET}$——2000—2012 年 ET/PET 的平均值

σ_{NDVI}——NDVI 的方差

$\sigma_{ET/PET}$——ET/PET 的方差

然后,对标准化后的 ET/PET 和 NDVI 相加,计算标准化,再获得 DSI。具体计算为

$$Z=Z_{ET/PET}+Z_{NDVI} \tag{3}$$

$$Z_{DSI}=\frac{Z-\overline{Z}}{\sigma_Z} \tag{4}$$

式中 σ_Z——Z 的方差

$\overline{Z}$——Z 的平均值

MOD16 中 ET 的估算方法是基于 Penman - Monteith 方程,即

$$\lambda E=\frac{s(R_n-G)+\dfrac{\rho C_p(e_s-e_a)}{r_c}}{s+\gamma\left(1+\dfrac{r_c}{r_a}\right)} \tag{5}$$

其中

$$\lambda=2\,498.9-2.33T \tag{6}$$

$$\gamma=0.645\,5+0.000\,64T \tag{7}$$

式中 λ——蒸发潜热,也称作汽化潜热,MJ/kg

E——蒸散发,mm/d

λE——潜热通量,W/m^2

s——饱和水汽压与温度的曲线斜率,Pa/℃

R_n——净辐射,$MJ/(m^2\cdot s)$

G——土壤的热通量,$MJ/(m^2\cdot s)$

ρ——空气密度,kg/m^3

C_p——空气定压比热容,MJ/(kg·K)

e_s——大气饱和水汽压,Pa

e_a——大气实际水汽压,Pa

γ——干湿表常数,Pa/℃

r_c——作物的水汽传输阻抗,s/m

r_a——空气动力学阻抗,s/m

3 结果与分析

3.1 山东省典型干旱过程监测

以 2010 年 9 月下旬以来(2010 年 9 月 21 日—2011 年 2 月 24 日)山东省出现的严重秋冬干旱过程为案例,分析 DSI 在干旱遥感监测上的时空适应性。此次干旱事件的选择具有典型性。2010 年 9 月下旬以来,全省平均降雨量 18.6 mm,较常年偏少 79.4%,是 1951 年以来同期最小值。半岛北部、鲁中局部和鲁西北部分地区在 30 mm 以上;鲁南大部、鲁中大部、鲁西北西部及半岛部分地区在 10 mm 以下;其他地区在 10 ~ 30 mm 之间。与常年同期相比,全省均偏少,鲁西北局部、鲁南、鲁中和半岛的部分地区偏少 90% 以上[16]。

首先,采用 2000—2012 年 MODIS 8 d 的 NDVI 和 ET/PET 数据集,构建了 1 km × 1 km 分辨率的 DSI,用于监测 2010 年 9 月—2011 年 2 月的山东省特大干旱(图 2)。从 DSI 的监测结果看,从 2010 年 DOY265 一直到 2011 年 DOY54,山东省处于严重干旱的状态,大多数地区 DSI 值处于 -1 到 -3 之间。DSI 监测结果表明最严重的地区集中在鲁南大部、鲁中大部、鲁西北西部等地区,DSI 数值处于 -2 到 -3 之间。鲁北部、半岛北部等有较轻的干旱。结果表明,DSI 的监测结果与气象观测的降雨区域有较好的一致性,说明 DSI 有较好的气象干旱监测精度。

由于此次干旱处于冬小麦的越冬和返青期,后

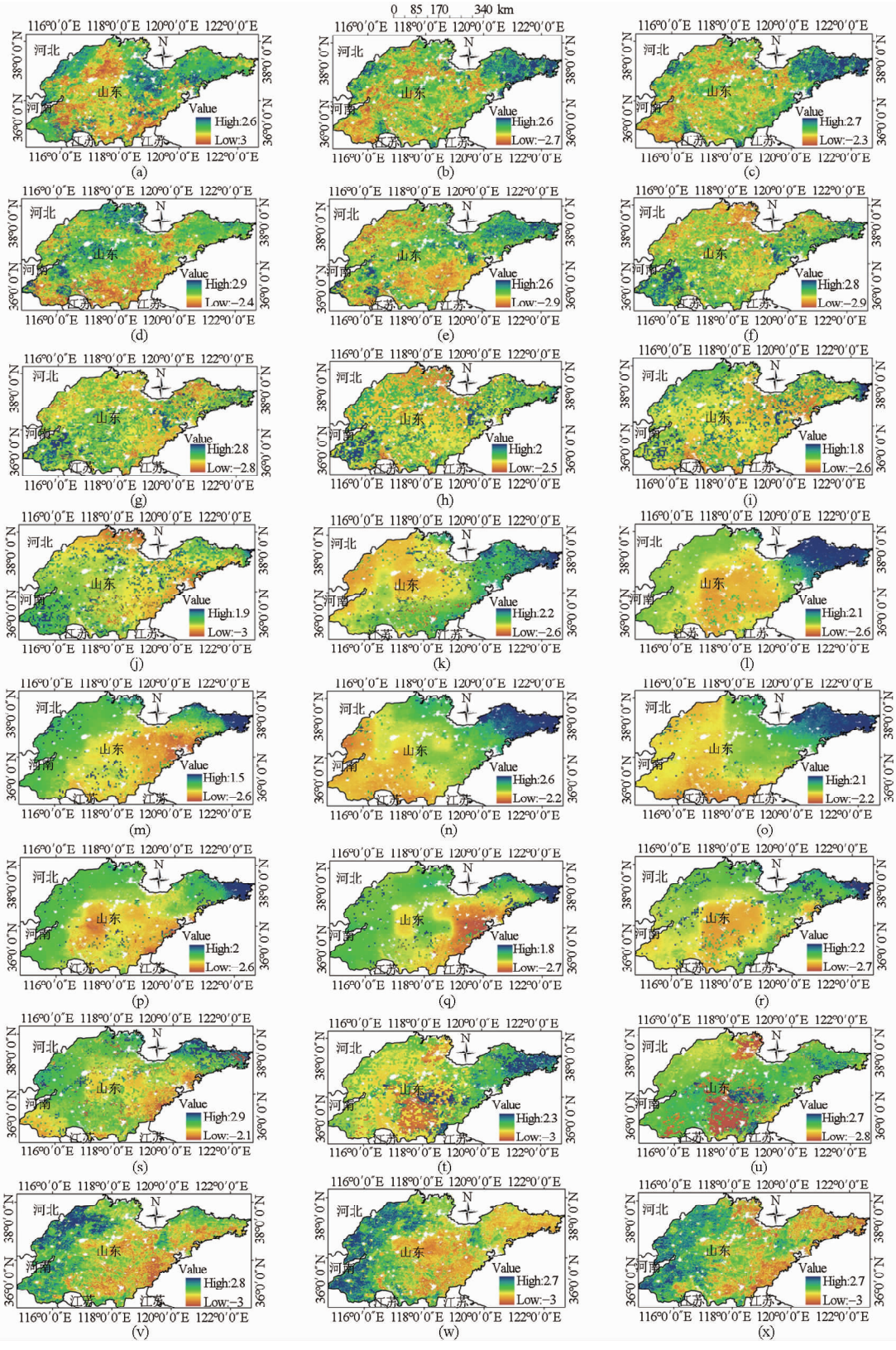

图 2　山东省典型干旱过程监测

Fig. 2　Typical drought event monitoring in Shandong province

(a) 2010-DOY265　(b) 2010-DOY273　(c) 2010-DOY281　(d) 2010-DOY289　(e) 2010-DOY297　(f) 2010-DOY305
(g) 2010-DOY313　(h) 2010-DOY321　(i) 2010-DOY329　(j) 2010-DOY337　(k) 2010-DOY345　(l) 2010-DOY353
(m) 2010-DOY361　(n) 2011-DOY001　(o) 2011-DOY009　(p) 2011-DOY017　(q) 2011-DOY025　(r) 2011-DOY033
(s) 2011-DOY041　(t) 2011-DOY049　(u) 2011-DOY057　(v) 2011-DOY105　(w) 2011-DOY121　(x) 2011-DOY145

续的降雨和人工灌溉对冬小麦的恢复有补偿作用，因此并没有造成山东省大面积的冬小麦减产。从统计产量数据来看，除枣庄、临沂、日照、莱芜、威海5市外，其他的地级市冬小麦产量跟往年基本持平，甚至有些地级市略有增产。为此，采用DSI监测了冬小麦后续3个关键生育期DOY105（拔节期）、DOY121（抽穗期）、DOY145（灌浆期）的干旱程度（图2），结果显示，鲁东南部和半岛大部都有持续的干旱。统计产量数据表明，枣庄、临沂、日照、威海4市有最为严重的冬小麦减产，表明冬小麦抽穗灌浆期的干旱对冬小麦产量影响最大，DSI监测结果与统计产量结果相符。

3.2 DSI与冬小麦产量的相关性分析

影响冬小麦产量的因素很多，一般来说，主要由气象和技术进步2大因素组成。为了消除技术进步因素的影响与干扰，将地级市单元的2000—2012年冬小麦单产数据作长时间序列的标准化处理，并将1 km ET/PET以及NDVI合并到地级市尺度，计算获得每个地级市的DSI，然后计算两者在冬小麦生育期DOY001—DOY177时间序列上的相关性。

3.2.1 全生育期8 d合成DSI与冬小麦产量相关性分析

图3为山东省不同地级市DSI与冬小麦产量的相关系数曲线。总体来说，山东省不同地级市表现出较为一致的时间变化趋势。其中，在冬小麦的越冬期（DOY001—DOY065），从相关性结果来看，两者之间没有明显的相关性，甚至出现负相关（相关系数为-0.4～-0.6），可能是由于越冬期温度较低和冬小麦无绿色植被的原因，因此，ET和NDVI都处于低值，造成DSI存在较大误差。另外，越冬期土壤墒情与产量没有明显的相关关系。从农学角度分析，越冬期的温度和太阳辐射对冬小麦的生长尤为重要。如果有积雪反而更好，因为积雪能保温，还能让返青后水分更充足。从图3可以看出，DOY89—DOY121期间，冬小麦处于拔节期，相关性突然呈现增大的趋势，多数地级市的相关系数达到0.2～0.8，表明冬小麦拔节期的干旱程度对冬小麦产量有重要影响。从曲线特征可以看出，DOY145—DOY153期间，冬小麦处于灌浆期，DSI与产量有最高的相关性（相关系数为0.4～0.8），表明冬小麦灌浆期的干旱程度对产量有最为重要的影响。DOY153—DOY177期间，冬小麦处于成熟与收获期，DSI与产量的相关性呈现一个下降的趋势，说明成熟与收获期对产量的影响较小。其中，东营市和莱芜市出现了较为异常的相关性时间变化曲线，可能是冬小麦种植密度比较低或受其他夏季作物影响的缘故。

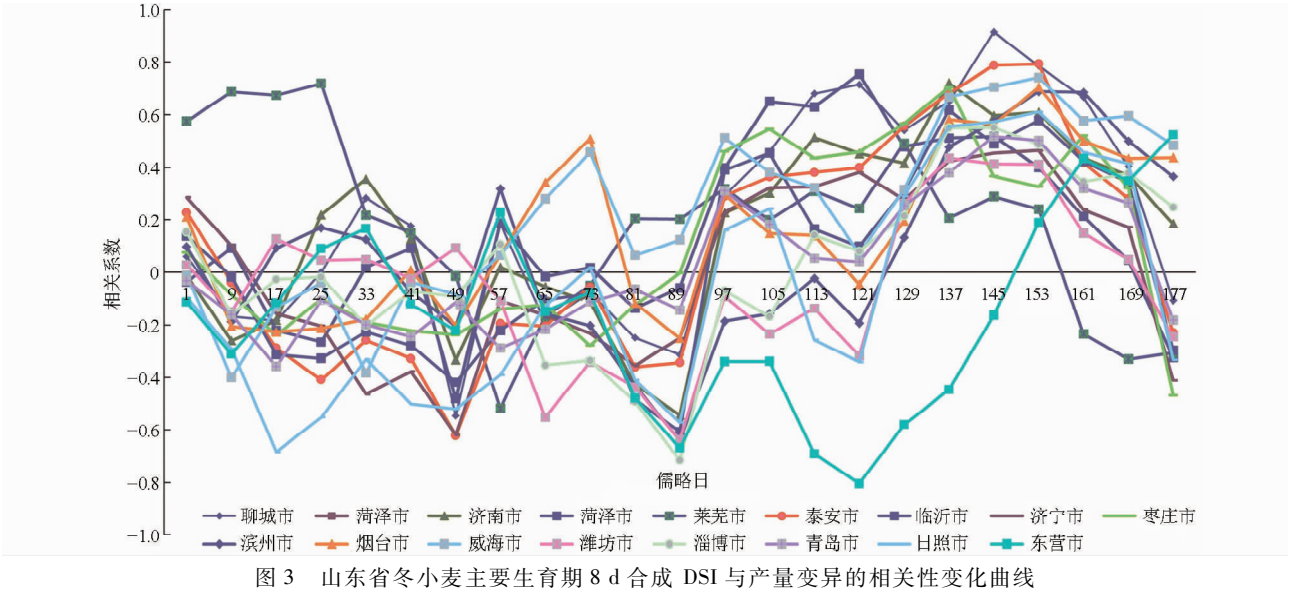

图3 山东省冬小麦主要生育期8 d合成DSI与产量变异的相关性变化曲线

Fig. 3 Correlation between 8 d DSI and winter wheat yield during main growing season in Shandong province

相对于山东省的相关性时间变化曲线，河南省地级市DSI与产量的相关性时间序列呈现出更小的波动性，整体上表现出更为一致的时间变化规律（图4）。其中，在冬小麦的越冬期（DOY001—DOY065），除了DOY33和DOY57有明显的正相关性（可能这2个时期是由于具有较高的气温和太阳辐射条件），其他时期都呈现明显的负相关（相关系数为-0.2～0.7）。在DOY89—DOY121和DOY145—DOY153期间，冬小麦分别处于拔节期和抽穗期，DSI与产量表现出较高的正相关性（相关系数为0.2～0.8）。其中，三门峡市和焦作市也表现出比较异常的时间变化特征，可能原因是冬小麦种植密度较低，易受其他夏季作物和土壤背景影响的缘故。

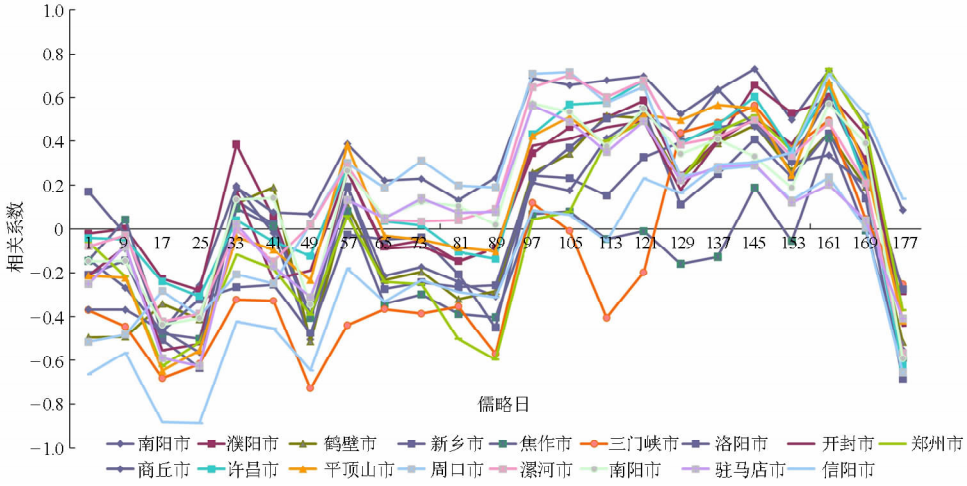

图 4　河南省冬小麦主要生育期 8 d 合成 DSI 与产量变异的相关性变化曲线

Fig. 4　Correlation between 8 d DSI and winter wheat yield during main growing season in Henan province

3.2.2　月合成 DSI 与冬小麦产量的相关性分析

从山东省月合成 DSI 与冬小麦产量的相关性结果(图 5)，3 月份 DSI 与产量变异在山东省呈现出一定的负相关(R^2 = 0.044 4)。可能的原因是，3 月份处于冬小麦的生长初期，冬小麦经过越冬期后的生长更多需要充足的太阳辐射(晴天)进行光合作用，才能使得冬小麦长得壮实，在这个阶段气温是关键，因此适当的干旱对冬小麦增产创造有利条件。4—6 月份 DSI 与产量呈现明显的正相关关系，表明干旱对冬小麦产量有较大影响。其中处于抽穗-灌浆期的 5 月份呈现最高的正相关性(R^2 = 0.262 2)，表明抽穗-灌浆期干旱对冬小麦的产量影响最大；4 月份拔节期的干旱对产量并没有表现出太大的影响，两者呈现弱正相关(R^2 = 0.051 6)。同时 4—6 月份散点图的分布趋势表明，湿润条件会造成冬小麦增产，干旱条件会导致冬小麦减产。

从河南省月合成 DSI 与冬小麦产量的相关性结果(图 6)，3 月份的 DSI 与产量变异在河南省呈现一定的负相关(R^2 = 0.018 3)，可能跟河南省气温条件和冬小麦的物候提前有关。其中，4 月份的 DSI 与产量变异表现出最好的相关性(R^2 = 0.211 1)，5 月份次之(R^2 = 0.160 8)，6 月份月合成 DSI 与产量基本无相关性。可能的原因是，河南省冬小麦的物候期比山东省提前 1 ~ 2 旬，进入 6 月份河南省普

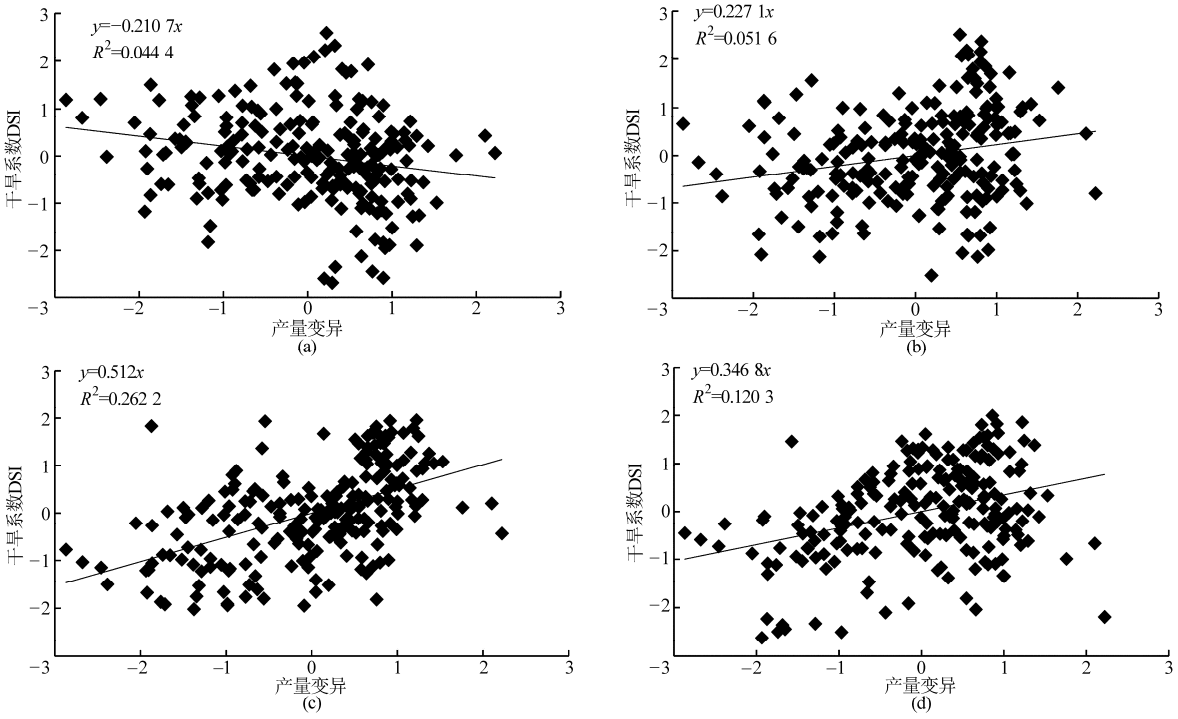

图 5　山东省月合成 DSI 与冬小麦产量变异相关性

Fig. 5　Scatter plots of correlation between monthly DSI and winter wheat yield in Shandong province

(a) 3 月份　(b) 4 月份　(c) 5 月份　(d) 6 月份

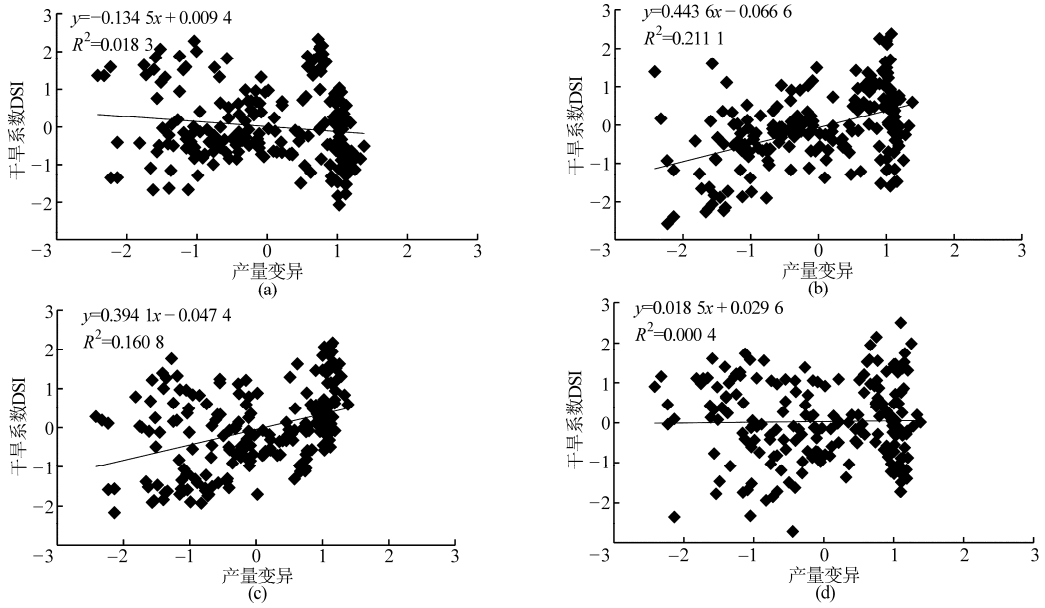

图 6 河南省月合成 DSI 与冬小麦产量变异相关性

Fig. 6 Scatter plots of correlation between monthly DSI and winter wheat yield in Henan province

(a) 3 月份 (b) 4 月份 (c) 5 月份 (d) 6 月份

遍进入冬小麦的收割期。

4 讨论

DSI 作为一种新的农业干旱监测指数,有些关键问题尚需深入探讨,主要有:

(1) DSI 的精度依赖于 ET/PET 的精度,目前由于 MOD16 ET 产品是面向全球尺度开发的,并且算法中采用了分辨率较粗的 MERRA GMAO 气象再分析数据,原始空间分辨率约为 0.5° × 0.6°,导致 MOD16 ET 产品的区域尺度精度不高。因此,结合当地气象资料提高 ET 的空间分辨率能进一步提高区域尺度监测精度。

(2) DSI 的 2 个基本要素 NDVI 与 ET/PET 对干旱的响应不同步,ET/PET 能及时反映水分胁迫以及干旱的状况,而 NDVI 对干旱的响应具有一定的滞后性。因此,针对 ET/PET 与 NDVI 之间存在的时间响应不同步问题,提出一个 NDVI 的时间滞后修正因子,能进一步提高 DSI 的干旱监测精度,具体算法还有待深入研究。

(3) DSI 综合考虑水分胁迫与植被生长状态对农作物的干旱程度的影响,植被叶面状态与水分胁迫对农作物干旱反映的敏感性较难确定,目前基于经验采用 0.5 为二者的权重系数,没考虑 DSI 指数在时空上对干旱贡献度的差异。由于土壤湿度作为农作区干旱评价标准,在实际旱情监测中有广泛的使用价值,采用 NDVI 和 ET/PET 与土壤相对湿度相关系数作为确定权重的贡献度将更为合理。

5 结论

(1) 本文基于 2000—2012 年 MODIS 的 1 km × 1 km 分辨率 NDVI 和 ET/PET 数据集,构建地级市尺度的 8 d 合成与月合成的 DSI,评估区域空间尺度上冬小麦不同生育期干旱对冬小麦产量的影响,探讨了 DSI 在山东省和河南省两省地级市尺度农业干旱监测应用中的可行性。

(2) 由于 DSI 综合考虑了长时间序列植被生长信息(NDVI)和水分胁迫信息(ET/PET),在 2010 年 9 月—2011 年 2 月的山东典型干旱过程监测中,DSI 不仅能够反映气象干旱,并且较好地反映农业干旱在空间区域的差异性以及时间上演变特征。

(3) 不同冬小麦生育期的干旱对冬小麦产量有不同的影响。从 8 d 合成和月合成 DSI 与冬小麦产量的相关性分析结果来看,灌浆期干旱对产量的影响为最大,可见干旱致使土壤水分亏缺,影响了作物正常的灌浆强度,进而导致作物减产;其次是拔节期,返青期干旱对产量影响最小。从月合成 DSI 与冬小麦产量的相关性分析可以得出,湿润条件会造成冬小麦增产,干旱条件会导致冬小麦减产,这与田间农学作物规律相符。

参 考 文 献

1 Wilhite D A. Drought and water crises: science, technology, and management issues[M]. Boca Raton: CRC Press, 2005.

2 Kogan F N. Remote sensing of weather impacts on vegetation in non-homogeneous areas[J]. International Journal of Remote Sensing, 1990, 11(8): 1405 – 1419.

3 McVicar T R, Jupp D L B. The current and potential operational use of remote sensing to aid decisions on drought exceptional circumstances in Australia: a review[J]. Agricultural Systems, 1998, 57(3): 399 – 468.

4 Kogan F N. Application of vegetation index and brightness temperature for drought detection[J]. Advances in Space Research, 1995, 15(11): 91 – 100.

5 Sandholt I, Rasmussen K, Anderson 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.

6 王鹏新, 龚健雅, 李小文. 条件植被温度指数及其在干旱监测中的应用[J]. 武汉大学学报:信息科学版, 2001, 26(5): 412 – 418.
Wang Pengxin, Gong Jianya, Li Xiaowen. Vegetation temperature condition index and its application for drought monitoring[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2001, 26(5):412 – 418. (in Chinese)

7 Brown J, Wardlow B, Tadesse T, et al. The vegetation drought response index (VegDRI): a new integrated approach for monitoring drought stress in vegetation[J]. GIScience & Remote Sensing, 2008, 45(1): 16 – 46.

8 张建平, 赵艳霞, 王春乙, 等.不同发育期干旱对冬小麦灌浆和产量影响的模拟[J]. 中国生态农业学报, 2012,20(9): 1158 – 1165.
Zhang Jianping, Zhao Yanxia, Wang Chunyi, et al. Impact simulation of drought disaster at different developmental stages on winter wheat grain-filling and yield[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2012, 20(9): 1158 – 1165. (in Chinese)

9 孙丽,王飞, 李保国, 等. 基于多源数据的武陵山区干旱监测研究[J].农业机械学报,2014,45(1):247 – 252.
Sun Li,Wang Fei, Li Baoguo, et al. Study on drought monitoring of Wuling mountain area based on multi-source data[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014,45(1):247 – 252. (in Chinese)

10 田苗,王鹏新,张树誉, 等. 基于条件植被温度指数的冬小麦产量预测[J].农业机械学报,2014,45(2): 240 – 245.
Tian Miao,Wang Pengxin,Zhang Shuyu, et al. Winter wheat yield forecasting based on vegetation temperature condition index [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014,45(2):240 – 245. (in Chinese)

11 Anderson M C, Hain C, Wardlow B, et al. Evaluation of a drought index based on thermal remote sensing of evapotranspiration over the continental U. S.[J]. Journal of Climate, 2011, 24(8): 2025 – 2044.

12 Anderson M C, Hain C, Wardlow B, et al. A climatological study of evapotranspiration and moisture stress across the continental U.S. based on thermal remote sensing: 2. Surface moisture climatology[J]. Journal of Geophysical Research, 2007, 112(D11):1 – 7.

13 Mu Q, Zhao M, Running S W. Improvements to a MODIS global terrestrial evapotranspiration algorithm[J]. Remote Sensing of Environment, 2011, 115(8): 1781 – 1800.

14 Mu Q, Heinsch F A, Zhao M, et al. Development of a global evapotranspiration algorithm based on MODIS and global meteorology data[J]. Remote Sensing of Environment, 2007, 111(4): 519 – 536.

15 Mu Q Z, Zhao M S, Kimball J S, et al. A remotely sensed global terrestrial drought severity index[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2013, 94(1): 83 – 98.

16 石春玲,李峰,孟祥新,等. 山东省 2010—2011 年秋冬连旱特征及成因[J]. 干旱气象,2012,30(3):323 – 326.
Shi Chunling, Li Feng, Meng Xiangxin, et al. Characteristics and causes of continuous drought from autumn 2010 to winter 2011 in Shandong province[J]. Journal of Arid Meteorology, 2012, 30(3):323 – 326. (in Chinese)