

康凌艳, 芦清水, 邵宏波, 等. 干旱对滨州灌区冬小麦归一化植被指数( *NDVI* ) 的影响[ J ]. 江苏农业学报, 2017, 33( 1 ): 87-93.  
doi: 10.3969/j.issn.1000-4440.2017.01.014

## 干旱对滨州灌区冬小麦归一化植被指数( *NDVI* ) 的影响

康凌艳<sup>1,2</sup>, 芦清水<sup>1</sup>, 邵宏波<sup>1,3</sup>, 施 平<sup>1</sup>

(1. 中国科学院烟台海岸带研究所, 山东 烟台 264003; 2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 江苏省农业科学院农业生物技术研究所, 江苏 南京 210014)

**摘要:** 在中国北方, 干旱是冬小麦生育期内常见的灾害, 对冬小麦的生长及产量有直接的影响。本研究以滨州灌区为例, 分析了灌溉作用下干旱对冬小麦生长的影响。利用 1951–2014 年气象观测站的气象资料和 MODIS 数据, 计算滨州灌区的标准化降水指数( *SPI* )、蒸散量、有效降水量和冬小麦的水分亏缺量及其生育期内的 MODIS-*NDVI* 值。结果表明, 在冬小麦生育期内, 该区的干旱月份占总月份的 70.1%, 在冬小麦生长关键的 3 月份、4 月份、5 月份、6 月份, 其干旱频率分别为 92.2%、60.9%、39.1%、9.4%。在冬小麦生育期内, 干旱月份平均水分亏缺量为 697.6 mm。灌溉只能减弱干旱对冬小麦归一化植被指数( *NDVI* ) 的影响, 但不能完全消除。通过分析灌溉对干旱情况下小麦的作用, 可以为今后该区域冬小麦种植措施的实施提供有益借鉴。

**关键词:** 干旱; 标准化降水指数( *SPI* ); 水分亏缺量; 归一化植被指数( *NDVI* ); 冬小麦

**中图分类号:** S512.1+10.71 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4440(2017)01-0087-07

## Effects of drought on *NDVI* of winter wheat growth in Binzhou irrigation region

KANG Ling-yan<sup>1,2</sup>, LU Qing-shui<sup>1</sup>, SHAO Hong-bo<sup>1,3</sup>, SHI Ping<sup>1</sup>

(1. Yantai Institute of Coastal Zone Research Chinese Academy of Sciences, Yantai 264003, China; 2. University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Institute of Agro-biotechnology, Jiangsu Academy of Agricultural Sciences, Nanjing 210014, China)

**Abstract:** Droughts are one of normal disasters during the winter wheat-growing seasons in northern China. Irrigation is one effective way to combat droughts. Analyzing the effects of irrigation under drought conditions is very important for water resource-reasonable utilization. The meteorological data and MODIS data recorded from 1951 to 2014 were used in this study to analyze this issue in Binzhou region, Shandong Province, as a case study. Standard precipitation index( *SPI* ), evapotranspiration, effective precipitation( *EP* ), crop water deficit and *NDVI* were calculated. The results indicated that the percentage of drought months to all months for winter wheat-growing season from 1951 to 2014 was 70.1%. The drought frequency in November, March, April, May and June was 92.2%, 60.9%, 39.1% and 9.4%, respectively. Average annual crop water deficit during winter wheat-growing season was 697.6 mm. Irrigation could only reduce the impact of drought on the *NDVI* of winter wheat, but it couldn't completely eliminate its impact. This will help to provide more guidance and

management suggestions for winter wheat growth in the region.

**Key words:** drought; *SPI*; water deficit; *NDVI*; winter wheat

收稿日期: 2016-04-05

基金项目: 中国科学院创新团队国际合作伙伴计划( KZCX2-YW-T14 )

作者简介: 康凌艳( 1980- ), 女, 山东陵县人, 硕士, 主要从事水文水资源和环境遥感研究。( E-mail ) lykang@yic.ac.cn

通讯作者: 邵宏波, ( E-mail ) shaohongbochu@126.com

小麦是中国主要的粮食作物之一, 在中国农业生产中占有相当重要的地位, 其种植面积和产量均占谷物总面积和总产量的 1/4 以上, 小麦的收购、销

售和库存量均占粮食总量的 1/3 左右。因此,小麦是关系粮食安全的农作物之一。干旱一直是影响小麦产量的重要因素,据资料显示,从 1950–2010 年,中国平均每年受灾面积为  $1.4 \times 10^6 \text{ hm}^2$ ,平均每年成灾面积为  $6.4 \times 10^5 \text{ hm}^2$ ,平均每年因灾害损失粮食  $1.6 \times 10^7 \text{ t}$ 。近 60 年来,干旱灾害的受灾面积、成灾面积和粮食损失总体上呈递增趋势<sup>[1]</sup>。据统计,2014 年中国作物受干旱影响面积  $2.3 \times 10^7 \text{ hm}^2$ 、受灾面积  $1.2 \times 10^7 \text{ hm}^2$ 、成灾面积  $5.7 \times 10^6 \text{ hm}^2$ 、绝收面积  $1.5 \times 10^6 \text{ hm}^2$ ,因干旱造成粮食损失达  $2.0 \times 10^7 \text{ t}$ ,经济作物损失  $2.8 \times 10^{10}$  元,直接经济总损失  $9.1 \times 10^{10}$  元。大量研究结果表明,干旱胁迫不仅会限制冬小麦生长,影响植株的株高、地上部干质量、根干质量和总生物量,还会导致冬小麦穗数、千粒质量和穗粒数显著降低,从而影响到冬小麦的产量。於琨等通过设置不同土壤水分条件和不同生育期受旱的处理,研究土壤水分条件对冬小麦生长发育的影响<sup>[2]</sup>。张建平通过研究不同生长阶段干旱对小麦产量的影响,指出干旱发生的阶段和程度不同,造成作物的减产率也不同<sup>[3]</sup>。陈晓远等人研究了水分胁迫效应对作物根、冠生长关系及产量的影响,结果表明,冬小麦根、冠间存在异速生长关系,导致根冠比随植株发育进程的推进呈指数下降<sup>[4]</sup>。大多数研究仅通过试验模拟干旱对冬小麦产量的影响,对干旱和作物水分亏缺量之间的关系研究较少。

遥感监测技术具有及时、客观、成本低、监测面积大、光谱分辨率高等优点。植被指数被广泛应用于作物调查、长势监测和产量预测等方面。MODIS (Moderate resolution imaging spectrometer) 影像的空间分辨率为中等,其近红外波段和红光波段均较窄,近红外波段的水汽吸收区被剔除,因而其红光波段对叶绿素更为敏感,衍生出的归一化植被指数 (NDVI) 对植被有较强的探测能力。同时,MODIS-NDVI 的高时间分辨率特性使其能够及时捕捉作物的物候变化,同时将作物的长势信息反映在生长季 NDVI 值的变化中<sup>[5-8]</sup>,因此被广泛应用于作物分布识别和长势监测的研究中。冬小麦的长势对于降水和灌溉变化的响应比较灵敏,而植被指数作为遥感技术发展的产物,是对植被覆盖度和生长状况的直观反映<sup>[9-10]</sup>。

本研究拟利用气象站点长期观测数据,计算标准化降水指数 (SPI),该指数按月把冬小麦生长期

分为干旱和非干旱 2 类,并计算不同干旱状况下冬小麦的水分亏缺量及其对 NDVI 值动态变化的响应情况,进而分析造成这种现象的原因。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

山东省滨州市位于黄河下游的鲁北平原 (图 1),濒临渤海,辖区面积  $9\,600 \text{ km}^2$ ,现有耕地面积  $3\,900 \text{ km}^2$ ,总人口约  $3.7 \times 10^6$  人,其中农业人口占全市总人口的 87.7%,属于典型的农业区。滨州市位于黄河以北,以黄河冲积平原为主,主要粮食作物是小麦、玉米,主要经济作物是棉花。滨州市属暖温带半湿润季风气候,近 64 年 (1951–2014 年) 气象观测数据显示,该地区夏季月平均气温为  $25.5 \text{ }^\circ\text{C}$ ,冬季月平均气温为  $-1.7 \text{ }^\circ\text{C}$ ,年降水量在  $297.9 \text{ mm}$  到  $864.1 \text{ mm}$  之间,受自然、地理和气候的影响,年降水量变化非常明显。根据滨州市水利志记载,历史上该地区旱灾频发<sup>[11]</sup>。因此,正确应对干旱灾害的发生,合理利用有限的水资源进行灌溉对于滨州市农业的可持续发展有着极其重要的作用。

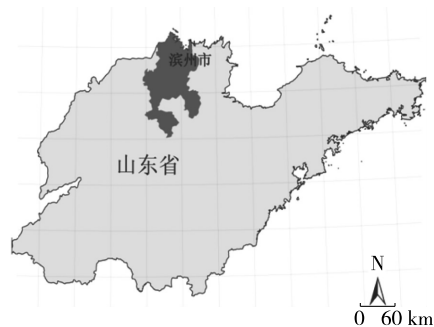


图 1 滨州市位置图

Fig.1 Location map of Binzhou

### 1.2 数据来源

本文所采用的数据分为 4 类:气象站观测数据、MODIS 遥感数据、农业统计资料、野外调查数据。

气象观测资料由滨州市境内的中国气候基准站 (惠民) 提供,采用站点 1951 年至 2014 年逐日的降水量 (mm)、平均气温 ( $^\circ\text{C}$ )、最低气温 ( $^\circ\text{C}$ )、最高气温 ( $^\circ\text{C}$ )、日照时数 (h)、风速 (m/s) 和平均相对湿度 (%) 等气象数据来计算冬小麦整个生育期内的标准化降水指数 (SPI) 和水分亏缺量。

由于 MODIS 遥感数据具有数据共享、高时间分

分辨率、中等空间分辨率、较高的光谱分辨率等优点,本文采用2001年至2014年空间分辨率为250 m的MODIS-NDVI 16 d合成的时间序列数据(数据由NASA提供,下载地址:<https://ladsweb.nascom.nasa.gov/data/>)。

灌溉数据由滨州市农业局提供。

土地利用数据、作物种植结构区划数据、作物物候期数据从野外实地调查数据和遥感图像中获取。

### 1.3 指标的计算方法

1.3.1 标准化降水指数(SPI) SPI的计算原理是将某一时间尺度的降水量看作服从某种分布,通过降水量这种分布的概率密度函数推求累积概率,然后将累积概率转化成标准正态分布。利用气象观测站1951–2014年的观测数据计算冬小麦生育期内的干旱情况。SPI计算公式如下:

$$SPI = \begin{cases} -(t - \frac{c_0 + c_1 t + c_2 t^2}{1 + d_1 t + d_2 t^2 + d_3 t^3}) & \text{当 } 0 < H(x) \leq 0.5 \text{ 时} \\ (t - \frac{c_0 + c_1 t + c_2 t^2 + c_3 t^3}{1 + d_1 t + d_2 t^2 + d_3 t^3}) & \text{当 } 0.5 < H(x) < 1.0 \text{ 时} \end{cases} \quad (1)$$

$$t = \sqrt{\ln \frac{1}{[H(x)]^2}} \quad (2)$$

$$t = \sqrt{\ln \frac{1}{[1-H(x)]^2}} \quad (3)$$

$$H(x) = q + (1+q)G(x) \quad (4)$$

$$G(x) = \int_0^x g(x) dx \quad (5)$$

$$g(x) = \frac{1}{\beta^\alpha T(\alpha)} \int_0^x x^{\alpha-1} e^{-x/\beta} dx \quad \text{当 } x > 0 \text{ 时} \quad (6)$$

$$T(\alpha) = \int_0^\infty x^{\alpha-1} e^{-x} dx \quad (7)$$

$$\hat{\alpha} = \frac{1}{4A} \left( 1 + \sqrt{1 + \frac{4A}{3}} \right) \quad (8)$$

$$\hat{\beta} = \frac{\bar{X}}{\hat{\alpha}} \quad (9)$$

$$A = \ln(\bar{x}) - \frac{\sum \ln(x)}{n} \quad (10)$$

式中, $A$ 、 $T(\alpha)$ 、 $g(x)$ 、 $G(x)$ 、 $H(x)$ 和 $t$ 为中间变量(无量纲)。 $c_0$ 、 $c_1$ 、 $c_2$ 、 $d_1$ 、 $d_2$ 、 $d_3$ 值分别为2.516、0.803、0.010、1.433、0.189、0.001。 $X$ (mm)是月降水量, $q$ 为没有降水的月份, $\alpha$ 是一个形状参数, $\beta$ 是一个尺度参数。根据中华人民共和国国家标准GB/T 20481–2006划分干旱等级(表1)。

表1 标准化降水指数SPI的干旱等级

Table 1 Drought grade of standardized precipitation index(SPI)

干旱等级	类型	SPI 值
1	无旱	$-0.5 < SPI$
2	轻旱	$-1.0 < SPI \leq -0.5$
3	中旱	$-1.5 < SPI \leq -1.0$
4	重旱	$-2.0 < SPI \leq -1.5$
5	特旱	$SPI \leq -2.0$

1.3.2 冬小麦水分亏缺 水分亏缺指作物吸水量小于蒸散量,造成体内水分不足,妨碍正常生理活动的现象。根据联合国粮农组织(FAO)方法计算冬小麦水分亏缺(WWD),具体计算公式如下:

$$WWD = ET_c - EP - G_n \quad (11)$$

式中, $ET_c$ (mm)代表实际耗水蒸散量, $EP$ (mm)是有效降水量, $G_n$ (mm)是地下供水量,在该研究区 $G_n$ 值为0 mm。

作为计算有效降水量的重要参数,潜在蒸散量是计算冬小麦水分亏缺的一个关键因素。改进的Penman-Monteith公式被用来计算每日潜在蒸散量:

$$PE = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + r \frac{900}{T+273} U_2 (e_s - e_a)}{\Delta + r(1+0.34U_2)} \quad (12)$$

其中, $PE$ (mm/d)为潜在蒸散量, $R_n$ (MJ/m<sup>2</sup>·d)是净冠层辐射, $G$ (MJ/m<sup>2</sup>·d)是土壤热通量, $T$ (℃)是在2 m高度的空气温度, $U_2$ (m/s)是2 m高度的风速, $e_a$ (kPa)是实际水汽压, $e_s$ (kPa)是平均饱和水汽压, $\Delta$ (kPa/℃)是饱和蒸汽压力曲线的斜率, $r$ (kPa/℃)是常数, $T$ 、 $U_2$ 和 $e_a$ 的值是从日常的气象站获得。 $G$ 、 $\Delta$ 、 $r$ 和 $R_n$ 均为FAO推荐值。

根据每日蒸散量和降水量求和可以计算出10 d的蒸散量和降水量。然后根据以下公式计算出有效降水量<sup>[12]</sup>:

$$EP = \begin{cases} P & P \leq ET_c \text{ 时} \\ ET_c & P > ET_c \text{ 时} \end{cases} \quad (13)$$

$$ET_c = K_c PE \quad (14)$$

$$K_c = K_0 + [0.004(U_2 - 2) - 0.004(RH_{\min} - 45)] \left(\frac{3}{h}\right)^{0.3} \quad (15)$$

式中, $EP$ (mm)是有效降水量, $P$ (mm)是降水量, $ET_c$ (mm)是冬小麦蒸散量, $K_c$ 是冬小麦系数, $K_0$ 是采用联合国粮农组织提供的对应该区域的值,



$RH_{\min}(\%)$  是日最低相对湿度,  $h(m)$  是株高。

### 1.3.3 NDVI 的获取和冬小麦种植区面积的提取

本文采用最大合成法(MVC)获取月 NDVI 值, 即在每个像元中提取该像元 NDVI 的最大值作为该月 NDVI 值。该方法可进一步消除云、大气、太阳高度角等的部分干扰<sup>[13]</sup>。

2001–2014 年冬小麦种植面积是从 MODIS-NDVI 数据产品中提取。各种作物的生长都有各自的规律, 如播种和出苗的日期、生长最旺盛的时间、开始成熟的时间、收获的时间, 同一种作物在同一地区都有相对稳定的生长发育规律<sup>[11-12]</sup>。

研究区的主要作物有冬小麦、夏玉米、棉花、苹果树、梨树、枣树等。粮食作物种植模式主要以冬小麦-夏玉米轮作为主。10 月中下旬为冬小麦的播种期, 11 月中旬为出苗期, 12 月到次年 2 月中下旬为越冬期, 次年 2 月至 5 月返青, 长势逐渐旺盛, 叶面积指数逐渐增大。6 月中下旬为冬小麦收割期和夏

玉米出苗期, 而其他植被都处于生长旺盛时期。因此, 6 月中下旬冬小麦种植区的 NDVI 值要小于其他植被种植区的 NDVI 值。根据同一时间冬小麦与滨州市其他农作物 NDVI 值的差异性和野外调查资料来选择训练区, 反复试验建立冬小麦种植区域的提取规则为:  $NDVI_{10\text{月下旬}} < NDVI_{11\text{月中旬}}$ ,  $NDVI_{11\text{月}} > NDVI_{\text{次年2月}}$ ,  $NDVI_{\text{次年2月}} < NDVI_{\text{次年3月}}$ ,  $NDVI_{\text{次年3月}} < NDVI_{\text{次年4月}}$ ,  $NDVI_{\text{次年4月}} < NDVI_{\text{次年5月}}$ ,  $NDVI_{\text{次年6月中旬}} < NDVI_{\text{次年5月}}$ 。

考虑到不同地区冬小麦的长势差别, 使用 Arc-Map 的计算功能, 根据提取规则采用 NDVI 值相减的方法来确定冬小麦的种植区域<sup>[13]</sup>(图 2)。图 2 是采用 2001–2014 年 MODIS 数据提取的滨州灌区冬小麦种植区域的分布图, 根据野外调查取点(每年取点数目在 10~40)验证可知, 精度均在 90% 以上。

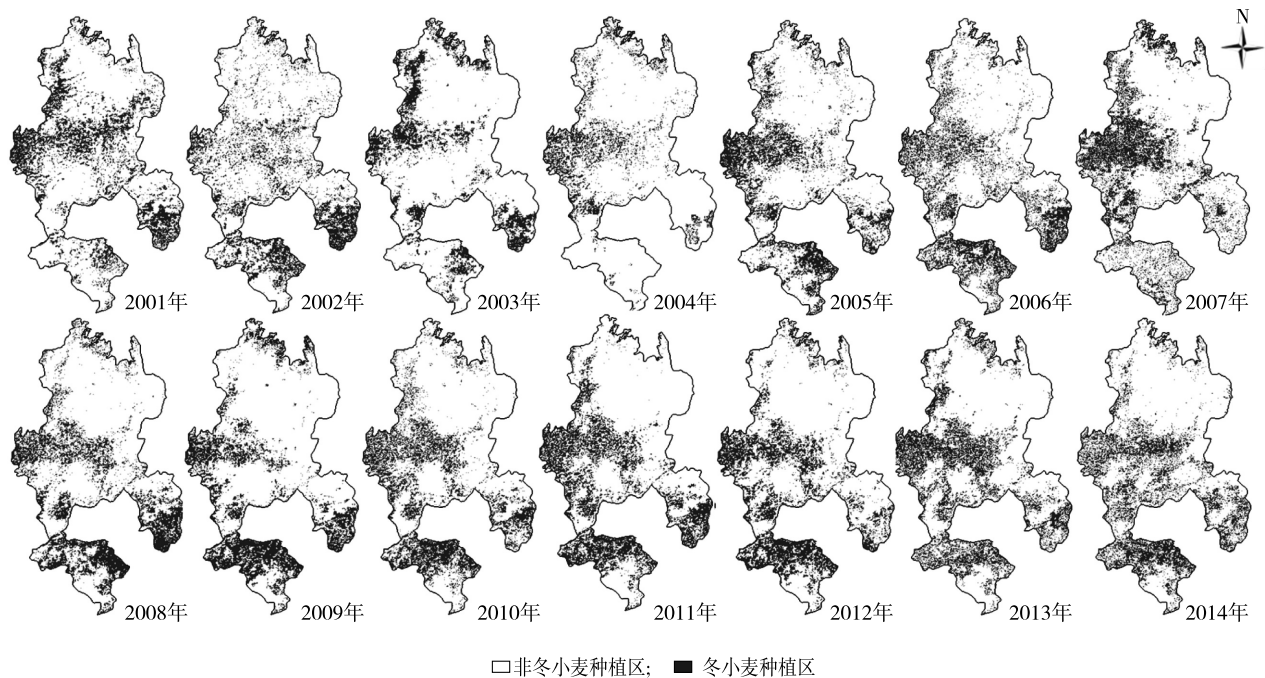


图 2 2001–2014 年滨州灌区冬小麦分布情况

Fig.2 Spatial distribution of winter wheat in Binzhou area from 2001 to 2014

## 2 结果与分析

### 2.1 近几十年干旱的变化特征

利用 1951–2014 年气象观测站点的观测数据,

计算获得了滨州灌区各月的干旱次数(表 2)。表 2 数据显示, 1951–2014 年在冬小麦的生育期内, 有 35 个 10 月份为干旱月, 52 个 11 月份为干旱月, 64 个 12 月份为干旱月, 63 个 1 月份为干旱月, 61 个 2 月

份为干旱月,59个3月份为干旱月,39个4月份为干旱月,25个5月份为干旱月,6个6月份为干旱月。其中,干旱发生的频率达到了70.1%,非干旱发生的频率为29.9%。这意味着在冬小麦生育期内,滨州地区的大多数月份都发生了干旱。

表 2 1951-2014 年各月出现干旱的次数  
Table 2 The number of drought months in winter wheat growing season from 1951 to 2014

月份	干旱(次)	非干旱(次)
10月	35	29
11月	52	12
12月	64	0
次年1月	63	1
次年2月	61	3
次年3月	59	5
次年4月	39	25
次年5月	25	39
次年6月	6	58

图3显示,1951-2014年在冬小麦生育期内,只有在成熟期的6月份,干旱发生的频率在20%以内,其他生长季节的干旱频率都相当高。在发芽出苗关键的11月份,干旱发生的频率在80%以上。2月份冬小麦返青后,干旱月份出现的频率逐渐降低,但是在冬小麦拔节期的4月份,干旱发生的频率仍然高于60%。5月份冬小麦进入抽穗、扬花、灌浆期,是小麦需水的关键期,但干旱发生的频率也接近40%。

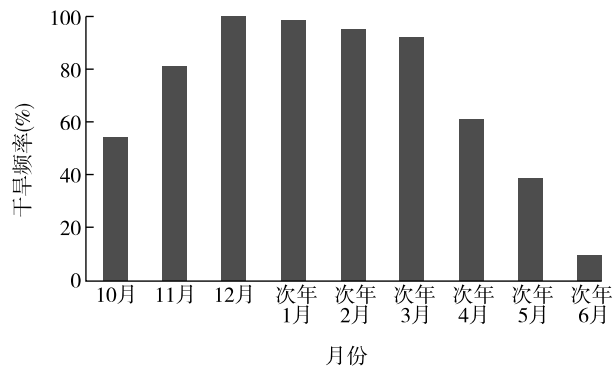


图3 冬小麦生育期内各月份出现干旱的频率  
Fig.3 Drought frequency in winter wheat growing season

2.2 冬小麦水分亏缺

采用气象站点观测数据和联合国粮农组织推荐

的算法,计算多年干旱月份的平均水分亏缺量。表3显示,无论干旱和非干旱的条件下,灌溉都是冬小麦正常生长的必要条件。而干旱情况下,冬小麦需要比非干旱情况下更多的水来维持正常的生长。水分亏缺比较严重的月份是3月、4月,这2个月份的水分亏缺平均值分别是150.3mm、162.0mm。非干旱月份冬小麦的水分亏缺平均值也比较高,分别是98.9mm、118.2mm。3月、4月是冬小麦拔节期,如果在这期间发生干旱会直接影响穗器官的发育,使穗粒数锐减,对产量影响较大。因此,在3月、4月必须适当灌溉,以保证冬小麦正常生长。5月冬小麦水分亏缺量的平均值虽然比3月、4月小一点,但是干旱和非干旱条件下水分亏缺量的平均值也分别为105.0mm、66.1mm。5月是冬小麦的抽穗、扬花和灌浆阶段,如果这期间发生干旱则会抑制籽粒灌浆以及干物质向籽粒的运输、积累,使小麦灌浆期缩短,千粒质量下降,直接影响到小麦的单产水平,所以需要进行适当的灌溉以保证产量。从表3的数据还可以看出冬小麦10月份水分亏缺的平均值相对较低,但是每年10月是冬小麦播种和出苗阶段,这个时期如果发生干旱会推迟出苗,苗情相对较差,所以在10月也要进行适当的灌溉来保证小麦的发芽率和出苗率。

表 3 在干旱和非干旱情况下冬小麦水分亏缺情况  
Table 3 Irrigation and crop water deficit under drought and non-drought conditions

月份	水分亏缺量(mm)		
	干旱	非干旱	灌溉
10月	19.4	13.0	135.0
11月	40.1	19.1	0
12月	20.7	0	0
次年1月	19.3	9.0	0
次年2月	24.0	11.7	0
次年3月	150.3	98.9	135.0
次年4月	162.0	118.2	135.0
次年5月	105.0	66.1	135.0
次年6月	156.8	114.2	0

2.3 NDVI 值的动态变化

由图4可知,10月份(冬小麦播种期、出苗期)为干旱月时NDVI值为0.300,为非干旱月时NDVI

值为 0.267,干旱对冬小麦 *NDVI* 值几乎没有影响。11 月份为干旱月时 *NDVI* 值为 0.441,为非干旱月时 *NDVI* 值为 0.596。次年 1 月份为干旱月时的 *NDVI* 值为 0.308,为非干旱月时 *NDVI* 值为 0.322。次年 3 月份为干旱月时的 *NDVI* 值为 0.464,为非干旱月时的 *NDVI* 值为 0.584。次年 4 月份为干旱月时的 *NDVI* 值为 0.662,为非干旱月时的 *NDVI* 值为 0.686。次年 5 月份为干旱月时的 *NDVI* 值为 0.661,为非干旱月时的 *NDVI* 值为 0.697。即次年 1

月份、3 月份、4 月份、5 月份为干旱月时冬小麦的 *NDVI* 值均低于为非干旱月时的 *NDVI* 值。受灌溉影响,次年 4 月份、5 月份发生干旱对冬小麦 *NDVI* 值的影响在减弱。虽然在 3 月份、4 月份发生干旱时对研究区进行了灌溉,但是这 2 个月份发生干旱时冬小麦的 *NDVI* 值仍然小于非干旱情况下的 *NDVI* 值。可见,灌溉并不能完全消除干旱对冬小麦的影响。

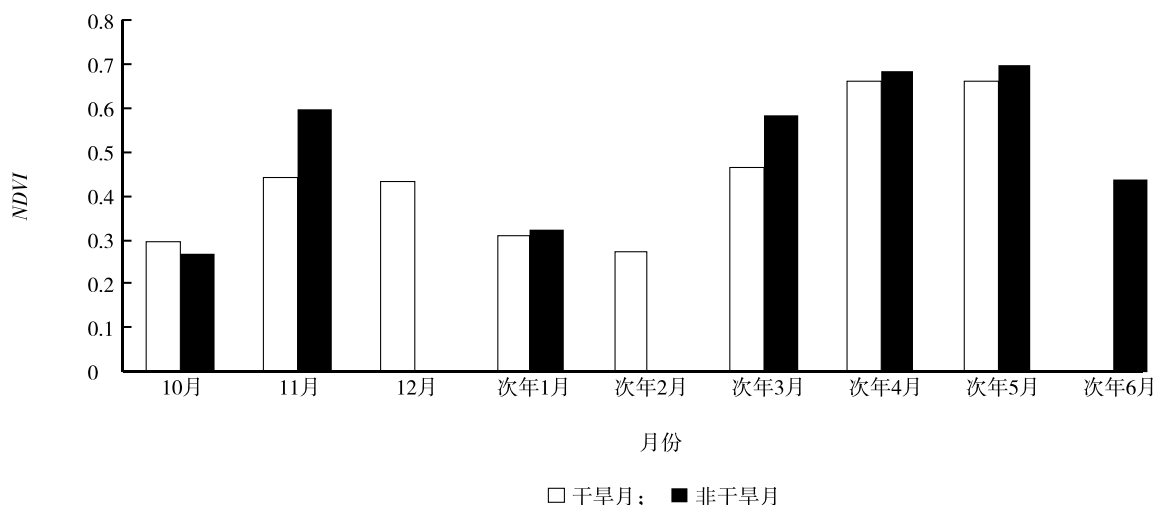


图4 干旱月和非干旱月冬小麦 *NDVI* 平均值

Fig.4 Monthly average *NDVI* of winter wheat under drought and non-drought conditions

### 3 讨论

国内外采用干旱指标分析干旱对作物生长影响的研究很多,但很少有研究对灌溉条件下干旱对冬小麦的影响进行分析<sup>[14-16]</sup>。因此,本研究选择滨州灌区的冬小麦为试验材料,分析在滨州灌区冬小麦生育期内干旱发生的频率,以及干旱对冬小麦生长的影响程度。

本研究采用 *SPI* 指标来表示干旱程度,在此基础上分析滨州灌区干旱对冬小麦长势的影响。在冬小麦生育期内干旱月份出现的频率达 70.1%,说明在滨州地区冬小麦生育期内发生干旱的概率较高。在冬小麦生长关键的 3 月、4 月、5 月、6 月干旱发生的频率分别是 92.2%、60.9%、39.1%、9.4%。根据 1951–2014 年的观测数据,计算得出冬小麦生育期内干旱月份平均水分亏缺量为 697.6 mm,远超过平均灌溉量(540.0 mm)。通过计算 2001–2014 年冬

小麦生育期内的 *NDVI* 值可知,灌溉只能减弱干旱对冬小麦 *NDVI* 值的影响,但不能完全消除。

虽然 *SPI* 指标具有多时间尺度和对于旱变化反应灵敏的优势,但 *SPI* 是 1 种气候干旱指数,在判定该地区的干旱程度时仅考虑了降水量,没有考虑作物蒸散量。因此,在分析干旱对冬小麦 *NDVI* 值影响时具有一定局限性,今后需改进干旱指数的计算方法,以便更准确地反映干旱情况。

### 参考文献:

- [1] 邱海军,曹明明,郝俊卿,等. 1950-2010 年中国干旱灾情频率—规模关系分析[J]. 地理科学,2013,33(5):576-580.
- [2] 於 琨,于 强,罗 毅,等. 水分胁迫对冬小麦物质分配及产量构成的影响[J]. 地理科学进展,2004,23(1):105-112.
- [3] 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.
- [4] 陈晓远,高志红,刘晓英,等. 水分胁迫对冬小麦根、冠生长关

- 系及产量的影响[J]. 作物学报, 2004, 30(7): 723-728.
- [5] BECK P S A, ATZBERGER C, HOGDA K A, et al. Improved monitoring of vegetation dynamics at very high latitudes: A new method using MODIS NDVI[J]. Remote Sensing of Environment, 2006, 100(3): 321-334.
- [6] AKIYAMA T, KAWAMURA K. Grassland degradation in China: methods of monitoring, management and restoration[J]. Grassland Science, 2007, 53(1): 1-17.
- [7] 陈燕丽, 龙步菊, 潘学标, 等. MODIS NDVI 和 AVHRR NDVI 对草原植被变化监测差异[J]. 遥感学报, 2011, 15(4): 831-845.
- [8] 熊勤学, 黄敬峰. 利用 NDVI 指数时序特征监测秋收作物种植面积[J]. 农业工程学报, 2009, 25(1): 144-148.
- [9] SELLERS P J. Canopy reflectance, photosynthesis and transpiration[J]. International Journal of Remote Sensing, 1985, 6(8): 1335-1372.
- [10] 罗亚, 徐建华, 岳文泽. 基于遥感影像的植被指数研究方法论述[J]. 生态科学, 2005, 24(1): 75-79.
- [11] 山东省惠民地区水利志办公室. 惠民地区水利志[M]. 青岛: 青岛出版社, 1991: 88.
- [12] ALLEN R G, PEREIRA L S, Raes D, et al. Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements [M]. Rome: FAO Irrigation and Drainage Paper, 1998: 56.
- [13] STOW D, PETERSEN A, HOPE A, et al. Greenness trends of arctic tundra vegetation in the 1990s: comparison of two NDVI data sets from NOAA AVHRR systems[J]. International Journal of Remote Sensing, 2007, 28(21): 4807-4822.
- [14] POTOP V, MOZNY M, SOUKUP J. Drought evolution at various timescales in the lowland regions and their impact on vegetable crops in the Czech Republic[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2012, 156: 121-133.
- [15] HLAVINKA P, TRNKA M, SEMERADOVA D, et al. Effect of drought on yield variability of key crops in Czech Republic[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2009, 149(3): 431-442.
- [16] TRNKA M, HLAVINKA P, SEMERADOVA D, et al. Agricultural drought and spring barley yields in the Czech Republic[J]. Plant Soil and Environment, 2007, 53(7): 306-316.

(责任编辑:王妮)