

干旱强度及发生时间对华北平原五省冬小麦产量影响

余慧倩^{1,2}, 张 强^{1,2}, 孙 鹏³, 宋长青^{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
减灾与应急管理研究院, 北京 100875; 3. 安徽师范大学国土资源与旅游学院, 芜湖 241002)

摘要: 本文利用2001-2016年时间分辨率为8 d的MOD09A1和MOD16A2的数据集, 构建了基于NDVI和ET/PET的干旱指数(DSI), 分析华北平原五省不同程度的干旱在时间和空间上的分布情况, 探究不同程度的干旱作用于冬小麦不同生长阶段对农作物产量产生的影响。研究表明: ① 年际分布上, 2001-2002年干旱最为严重, 其余年份干旱显著减缓, 年内分布上, 干旱主要集中在春季和秋季, 夏季次之, 冬季最少; ② 空间分布上, 河北北部、河南南部、安徽及江苏的中部和北部、山东东部是干旱多发区; ③ 干旱对冬小麦产量的影响研究表明, 越冬期发生初旱对产量起促进作用, 而在乳熟成熟阶段发生初旱则会导致农作物减产; 轻旱发生在乳熟期会对冬小麦产量产生显著影响, 而中旱发生在开花、乳熟成熟期都会对产量产生显著影响, 随干旱程度加重, 干旱对作物产量产生显著负作用的生长期越长; 此外, 在播种时若出现水分短缺也会对冬小麦的产量产生影响, 尤其是发生重旱和特旱。研究不同强度干旱发生在不同生长阶段对冬小麦产量的影响, 对研究区的灌溉时间规划以及保墒增产具有重要理论与现实意义。

关键词: 华北平原五省; 干旱强度; 作物产量; 粮食安全

DOI: 10.11821/dlxb201901007

1 引言

在全球气候变暖影响下, 高温、干旱、洪水等极端气象水文事件发生频次、强度和影响范围均不断增大^[1-2], 对社会经济的稳定和可持续发展造成严重影响^[3-7], 并对人类社会应对气候变化提出了挑战。在诸多气象水文极端事件中, 干旱由于其发生频率高、持续时间长、影响范围广等特点, 常导致严重的灾情, 如人畜饮水困难、地表植被枯死, 荒漠化程度加重、森林火灾等的发生, 给人类社会造成巨大的灾害损失。干旱对农业生产的影响最大, 长期持续的严重干旱会导致农作物的减产, 进而影响到粮食供给和粮食安全^[8]。Lesk等^[9]通过研究1964-2007年间极端事件对农作物产量影响, 发现干旱和极端高温最易致农作物大幅减产, 减产幅度达9%~10%。2009年9月-2010年3月, 中国西南地区发生罕见的秋冬春连旱, 直接造成中国西南地区6900多万人受灾, 农作物受灾面积达660万hm², 粮食减产43.62亿kg, 直接经济损失达400多亿元^[10-11], 干旱对农业生产的影响已引起人们的广泛关注^[12-15]。

收稿日期: 2018-01-15; 修订日期: 2018-11-28

基金项目: 国家基金委创新群体项目(41621061); 国家杰出青年科学基金项目(51425903); 国家自然科学基金项目(41771536) [Foundation: Fund for Creative Research Groups of National Natural Science Foundation of China, No.41621061; National Science Foundation for Distinguished Young Scholars of China, No.51425903, National Natural Science Foundation of China, No.41771536]

作者简介: 余慧倩(1994-), 女, 安徽黄山人, 硕士生, 从事气象水文学及农业灾害研究。E-mail: yuhuiqian123@163.com

通讯作者: 张强(1974-), 男, 山东沂水人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事气象水文极值理论及应用研究、灾害过程致灾成害机理、灾害信息化等相关领域的研究工作。E-mail: zhangq68@bnu.edu.cn

农业生产是关系世界粮食安全的重大经济社会问题,因而气候变化、洪旱灾害等对农业生产的影响一直是人们关注的热点,并已开展了大量研究^[16-20]。有研究表明^[21-22],在小麦生长过程中,旱灾发生频率高达79.21%,是影响小麦产量主要灾害类型。中国是世界上人口最多的国家,也是农业大国,粮食安全关系到中国社会稳定和国家长治久安^[23]。冬小麦是中国主要粮食作物之一,据统计,2015年我国冬小麦播种面积占全国农作物总播种面积的15%左右,占粮食作物总播种面积的21%,冬小麦产量占全国粮食产量的21%^[24]。其中安徽、江苏、河南、河北、山东五省的冬小麦产量占全国冬小麦产量的3/4左右,是中国冬小麦主产区,但同时又是干旱易发生地区^[25-26]。高强度、长历时且频发的干旱常会导致冬小麦减产甚至绝收,严重影响中国粮食供给,因而,研究干旱对冬小麦产量影响具有重要理论与现实意义。

但已有研究主要探讨干旱时空特征、机理及其监测与预报^[12, 27-28],而对于洪旱灾害对农业生产影响的相关研究中,多从建立洪旱灾害发生频率、强度等与农业因洪或因旱受灾与成灾面积等角度出发开展系统研究^[14, 29]。但是,农业生产包括的农作物种类较多,如冬小麦、玉米、水稻等粮食作物,而每种作物对水分短缺胁迫及响应均有不同,且每种农作物在不同生长发育期对水分短缺胁迫及响应也有差异,因此很有必要对其展开系统研究。本文从干旱强度和干旱发生时间对农作物产量影响的角度,系统开展干旱强度与干旱发生时间对冬小麦产量的影响,且以冬小麦主产区为研究区,即安徽、江苏、河南、河北、山东五省,以冬小麦为研究对象,系统研究冬小麦不同生长阶段不同强度干旱的时空差异对冬小麦产量变化的影响,为研究区冬小麦不同发育阶段开展定时定量灌溉保墒提供关键理论依据。

2 研究区

研究区(29°41'N~42°40'N, 110°21'E~122°43'E)地跨江苏、安徽、河南、河北、山东五省,以平原为主,耕地总面积达3225.3万 hm^2 ,占全国耕地总面积的26.69%,是中国重要的粮食生产基地之一。小麦播种面积达1618.02万 hm^2 ,占全国小麦播种总面积的67.02%,其中冬小麦产量占全国冬小麦产量的75.79%,是中国最大的冬小麦主产区^[24]。研究区主要为半湿润气候,年降水量400~800 mm,安徽南部及江苏南部降水量超过800 mm,属湿润气候。受季风影响,年内降水季节性差异大,而大部分冬小麦分布于半湿润气候区,降水总量不多。人口增长、社会经济发展以及农业灌溉都对水资源提出了挑战,该区同时也是区域性和阶段性干旱频发区^[30-31],水资源的丰缺很大程度上影响冬小麦的产量。

3 数据与方法

3.1 数据来源

研究所用数据分别为遥感数据和农作物灾情数据。计算干旱指数DSI所用遥感数据MOD09A1 V006和MOD16A2 V006均来源于<http://lpdaac.usgs.gov/>,时间分辨率为8 d,空间分辨率为500 m。MOD09A1数据集从2000年2月至今,其中2001年缺第166天和第177天的数据;MOD16A2数据集从2001年1月1日至今,其中2001年缺第177天的数据,2008年缺10个数据。考虑到数据在时间尺度上的连续性和一致性,选取2001-2016年共计16年数据,极少数缺失数据采用多年均值插补。通过对MOD09A1数据集进行大

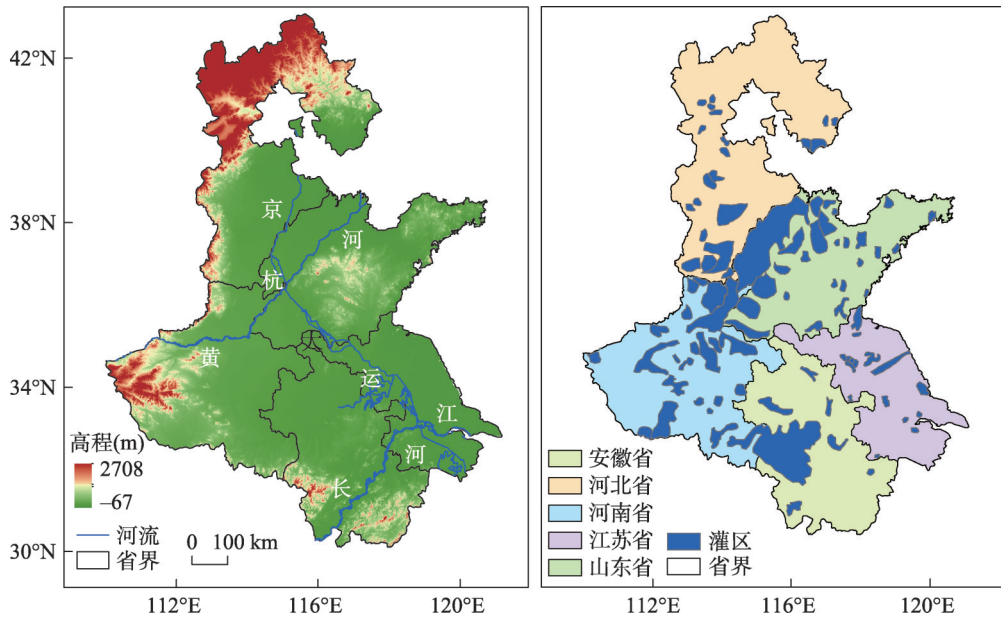


图1 研究区地形、水系、灌区及各省位置与省界示意图

Fig. 1 Study area (topography, river system, irrigation and provincial boundary)

气校正和去云等预处理之后，每个栅格的NDVI值由下式计算获得：

$$NDVI = \frac{R_{nir} - R_{red}}{R_{nir} + R_{red}} \quad (1)$$

式中： R_{nir} 为近红外波段反射率； R_{red} 为红外波段反射率。

2001-2016年各省冬小麦总产量来自国家统计局 (<http://www.stats.gov.cn/tjsj/ndsj/>) 公布的2002-2017年《中国统计年鉴》；山东省、安徽省、河南省、河北省各市的产量数据来源于各省统计年鉴；江苏省各市的产量数据来源于各市统计年鉴汇总而得。研究区五省冬小麦生长期农时数据来自于农业部种植业管理司的农时数据库 (<http://www.zzys.moa.gov.cn/>)，本文选择2010年7月-2017年7月共计7年农时数据，综合判定各省冬小麦生长节点和农时（表1）。

3.2 方法

3.2.1 干旱指数的计算 遥感数据因其观测面积大，观测时间长、实时性强等优点，常被用于监测植被的生长变化^[32-36]。Mu等^[37]基于遥感数据，结合NDVI和蒸散量提出了干旱强度指数（Drought Severity Index, DSI）。有研究表明，DSI在中国西南地区干旱监测中取得了良好监测效果，也适用于其他区域近实时的干旱监测研究^[38]。

MOD16A2对潜在蒸散量（Potential Evapotranspiration, PET）的计算是基于使用较为普遍的Penman-Monteith公式，而后求得ET/PET。DSI干旱指数的计算步骤为：分别对NDVI和ET/PET进行标准化，而后将其相加得到Z值，进一步标准化后即可得到DSI指数，具体计算过程如下：

$$Z_{ET/PET} = \frac{R_{ET/PET} - \bar{R}_{ET/PET}}{\sigma_{ET/PET}} \quad (2)$$

$$Z_{NDVI} = \frac{NDVI - \bar{NDVI}}{\sigma_{NDVI}} \quad (3)$$

表 1 各省冬小麦生长阶段及农时分布
Tab. 1 Growing period of the winter wheat in each province considered in this study

月份	旬	河北	江苏	安徽	山东	河南
10 月	上旬	播种	播种	播种	播种	播种
	中旬	播种出苗	播种	播种	播种出苗	播种出苗
	下旬	出苗三叶	播种出苗	播种出苗	出苗三叶	出苗三叶
11 月	上旬	出苗分蘖	出苗三叶	出苗三叶	三叶分蘖	三叶分蘖
	中旬	分蘖	出苗分蘖	出苗分蘖	分蘖	三叶分蘖
	下旬	分蘖	出苗分蘖	出苗分蘖	分蘖	分蘖
12 月	上旬	分蘖	分蘖	分蘖	分蘖越冬	分蘖
	中旬	越冬	分蘖	分蘖	越冬	分蘖
	下旬	越冬	分蘖	分蘖	越冬	分蘖越冬
1 月	上旬	越冬	越冬	分蘖越冬	越冬	越冬
	中旬	越冬	越冬	越冬	越冬	越冬
	下旬	越冬	越冬	越冬	越冬	越冬
2 月	上旬	越冬	越冬	越冬返青	越冬	越冬
	中旬	越冬	越冬返青	越冬返青	越冬返青	返青
	下旬	返青起身	返青起身	起身拔节	返青起身	返青起身
3 月	上旬	起身拔节	拔节	拔节	返青起身	起身拔节
	中旬	起身拔节	拔节	拔节孕穗	起身拔节	拔节孕穗
	下旬	拔节	孕穗抽穗	孕穗抽穗	拔节孕穗	孕穗抽穗
4 月	上旬	拔节孕穗	抽穗开花	抽穗开花	孕穗抽穗	抽穗
	中旬	抽穗开花	开花	开花	抽穗开花	抽穗开花
	下旬	开花	开花	开花乳熟	开花	开花
5 月	上旬	开花乳熟	开花乳熟	开花乳熟	开花乳熟	开花乳熟
	中旬	开花乳熟	乳熟成熟	成熟成熟	乳熟成熟	乳熟成熟
	下旬	乳熟成熟	乳熟成熟		乳熟成熟	乳熟成熟
6 月	上旬	乳熟成熟				
	中旬	乳熟成熟				
	下旬	乳熟成熟				

注：冬小麦的生长阶段包括：播种、出苗、三叶、分蘖、越冬、返青、起身、拔节、孕穗、抽穗、开花、乳熟、成熟，由于省份跨度大，存在南北地区处于两个不同阶段的情况。

$$Z = Z_{ET/PET} + Z_{NDVI} \tag{4}$$

$$DSI = \frac{Z - \overline{Z}}{\sigma_Z} \tag{5}$$

式中： $Z_{ET/PET}$ 为标准化的 ET/PET； $R_{ET/PET}$ 为 2001-2016 年间某年某一日期的 ET/PET 值； $\overline{R_{ET/PET}}$ 为 2001-2016 年该日期的 ET/PET 均值； $\sigma_{ET/PET}$ 为 2001-2016 年该日期的 ET/PET 标准差； Z_{NDVI} 为标准化后的 NDVI 值，NDVI 为 2001-2016 年间某年某一日期的 NDVI 值； \overline{NDVI} 为 2001-2016 年间该日期的 NDVI 均值； σ_{NDVI} 为 2001-2016 年间该日期的 NDVI 标准差； \overline{Z} 为 2001-2016 年该日期 Z 的均值； σ_Z 为 2001-2016 年间 Z 值标准差。Mu 等^[37]将 DSI 指数值划分成不同干旱等级（表 2）。

3.2.2 产量数据去趋势化处理 农作物产量一般由趋势产量、气候产量和随机产量三部分构成，趋势产量主要反映社会生产力发展对产量的影响，气候产量主要体现气候要素变

化而造成的产量波动（主要是农业气象灾害）。在研究干旱对冬小麦的产量影响时，需对原始数据进行去趋势处理，消除趋势产量，以期能够准确反映干旱所造成的冬小麦产量波动，常用的去趋势方法包括滑动平均法、指数平滑法、Logistic 拟合法、HP 滤波法等^[39-40]。本文利用 3a 滑动平均法、Logistic 拟合法、HP 滤波法对

表 2 DSI 干旱指数等级划分

Tab. 2 Drought categories by drought severity index (DSI)

DSI 指数值	等级	DSI 指数值	等级
≤ -1.5	极度干旱	0.3~0.59	初始湿润
-1.49~-1.2	重度干旱	0.6~0.89	轻度湿润
-1.19~-0.9	中度干旱	0.9~1.19	中度湿润
-0.89~-0.6	轻度干旱	1.2~1.49	重度湿润
-0.59~-0.3	初始干旱	≥ 1.5	极度湿润
-0.29~-0.29	正常		

2001-2016 年研究区内各市的冬小麦单产数据进行去趋势化处理，得到对应的气候产量。而后通过对各省市的社会技术发展、品种改良情况及相似气候区域的趋势产量变化特征是否一致进行分析，对比发现 HP 滤波方法计算结果更具科学性，因此选取 HP 滤波法对冬小麦单产进行去趋势处理，具体计算方法可参考相关文献^[40]。

3.2.3 Pearson 相关系数的计算 Pearson 相关系数是度量两个不同变量之间的线性相关关系的指标，在研究中应用较广^[41]。根据 DSI 值提取不同程度干旱的受灾面积，计算各地级市不同程度干旱的面积和冬小麦产量序列之间的相关系数，通过相关系数来反映在何时发生何种强度的干旱对冬小麦的产量影响最大。

4 结果与讨论

4.1 DSI 和冬小麦产量相关分析

图 2 反映的是 8 d 的 DSI 值及冬小麦逐年单产距平随时间变化情况。从图 2 中可以看出，研究区冬小麦产量与干旱程度大体呈反相关关系，随着时间的推移，研究区干旱程度逐步减弱，而冬小麦产量总体保持增长趋势。2001 年和 2002 年都是干旱十分严重的年份，根据 8 d DSI 值来看，2001 与 2002 年全年处于偏干旱状态，与之对应的冬小麦产量也明显低于多年均值。2003 年 1-3 月仍处于严重干旱状态，而后处于干旱和湿润相互转换的状态，干旱不如前两年严重，但 2003 年冬小麦产量也远低于平均值，甚至有所下降。有相关研究表明^[42-45]，多年来虽然研究区域内的整体干旱强度逐渐降低，但干旱的区

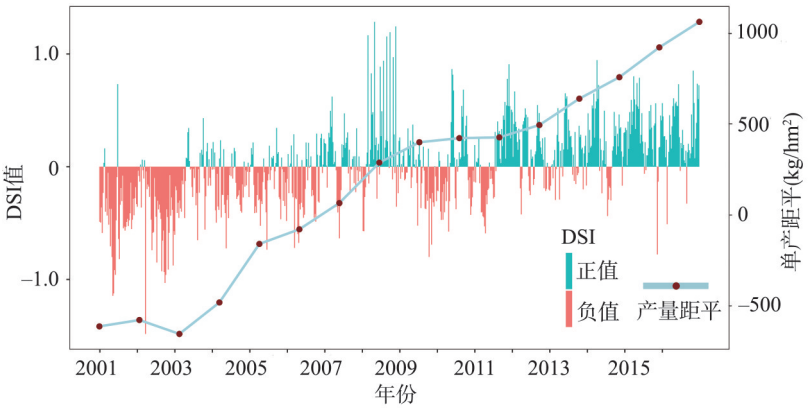
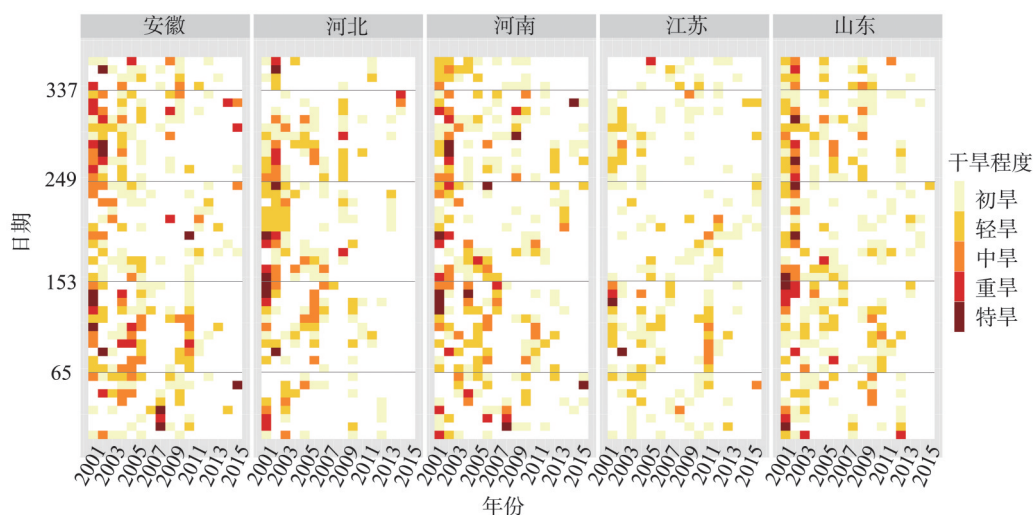


图2 2001-2016 年研究区 8 d DSI 值和冬小麦单产距平对比图
Fig. 2 Comparisons between DSI and winter wheat yield anomaly during 2001-2016

域性和阶段性特征愈发显著,局地的严重干旱常造成农作物减产甚至绝收。2004-2006年干旱的强度和历时都逐渐减小,与之对应的冬小麦产量也持续增加至均值水平。从2007年开始,除2009年冬季到2010年夏季和2011年之外,监测到DSI为正值的时间明显增多且占据主导地位,即研究区整体处于偏湿润状态,同样的,冬小麦单产距平也由负转正,冬小麦产量均高于平均水平,且逐年增加。2009年冬季到2010年夏季研究区域基本处于干旱状态,却发现2010年冬小麦的产量并未明显下降,甚至有小幅上升。从DSI值和单产距平的时间变化来看,整体而言干旱会对农作物产量产生负面影响,但个别年份如2003年干旱减轻但产量依旧很低,2009-2010年是干旱较为严重的年份,但产量并未受到太大影响,干旱强度和干旱发生时间的差异是否是造成这种现象的原因值得进一步研究。为尽量减小耕种制度、技术和作业方式等的影响,图2中的单产是去趋势后的气候产量,气候产量是指气候要素变化而造成的产量波动(主要是农业气象灾害),而相关研究表明旱灾是影响小麦产量的主要灾害类型之一^[21-22]。因此本文用气候产量表示干旱造成的产量波动。

4.2 不同强度干旱事件的时间分布特征

研究干旱是如何作用于农作物,进而对其的产量产生影响,首先得分析研究区域内干旱强度的时空演变情况。图3表示的是不同强度的干旱事件在年际和年内的分布情况,从图3可以看出,随着干旱程度的加重,干旱发生次数显著减少,初旱和轻旱虽然干旱强度不大,但发生频率高,而重旱和特旱发生次数较少但其影响力大,且主要集中分布于2001-2002年。5个省份的干旱年际分布规律具有一定的相似性,但江苏省的干旱强度和频率明显弱于其他省份。2001-2002年,五省整体呈现严重干旱状态,干旱持续时间长,安徽、河北、河南、山东全年一半以上时间处于中到重旱,甚至特旱状态,江苏省虽然干旱程度相对较轻,但与往年相比仍是干旱较为严重的年份。而之后的2003-2010年,虽然干旱强度不及2001年和2002年,但干旱发生的频率和覆盖范围仍然十分广,2011-2016年整体干旱的强度和发生频率显著降低,呈现偏湿润的状态,干旱的影响范围缩小。



注:春季:3-5月(Day065-Day145);夏季:6-8月(Day153-Day241);秋季:9-11月(Day249-Day329);
冬季:12月和1-2月(Day337-Day361和Day001-Day057)。

图3 研究区不同强度干旱事件发生时间分布图

Fig. 3 The temporal distribution of droughts with different intensities

图4统计了从2001-2016年间不同程度干旱在各个时间点发生的频次，以反应不同强度干旱在年内时间上的分布状况。竖轴线坐标表示2001-2016年共计16年间某个监测日期（如Day001）不同强度干旱发生的次数，圆圈外围的数字表示监测的日期，每个日期代表该日期后8 d内的干旱状况（如Day001表示每年1月1日-1月8日的干旱状况）。从图3和图4所反映的不同程度干旱的年内分布情况来看，总的来说干旱在春、秋两季发生频率较高，而夏季和冬季的发生频率则相应较低，尤其是夏季的7-8月。安徽省的干旱主要发生在3-6月和9-12月（图4a），2001-2016年中，初旱发生次数最多的日期达到9次（Day057），意味着一年的第57天发生干旱的概率高达56.25%，发生6次及以上干旱的监测日期高达24 d，超过监测日数的一半。中旱和重旱主要集中在3-4月（Day057-Day113）和9-11月（Day241-Day329），春秋两季旱情严重。在2001年和2002年均发生了连旱现象（图3），2001年4-5月、8月中下旬到10月中旬及11月、2002年9月中旬到11月中旬，干旱程度达到中旱以上，持续时间长，而秋季是冬小麦播种期，春季正好是冬小麦的生长关键期（表1），持续的严重干旱给冬小麦的产量造成严重影响。

河北省干旱年内分布规律与其他省份略有不同，除11-12月（Day305-Day361）和1-3月（Day001-Day089）之外，其余月份（4-10月）干旱频次分布较为均匀，夏季初旱发生频率为5~6次（图4b）。在典型干旱年，2001年5-7月中旬和2002年9-10月发生的严重的春夏连旱和秋季干旱（图3）。河南省干旱年内分布情况与安徽省类似，干旱主要分布在春秋两季，但在6-7月中旬干旱仍然多发且强度较高（图4a、4c）。江苏省干旱发生强度和频率都相对较低，主要以初旱和轻旱为主，干旱主要发生在春季（3-5月）。山东省干旱的全年分布较为均匀，初旱发生次数平均为5~6次，但山东省与安徽省和河南省两省不同的是中旱、重旱和特旱的发生频次较少，即干旱频发但干旱程度没有安徽省和河

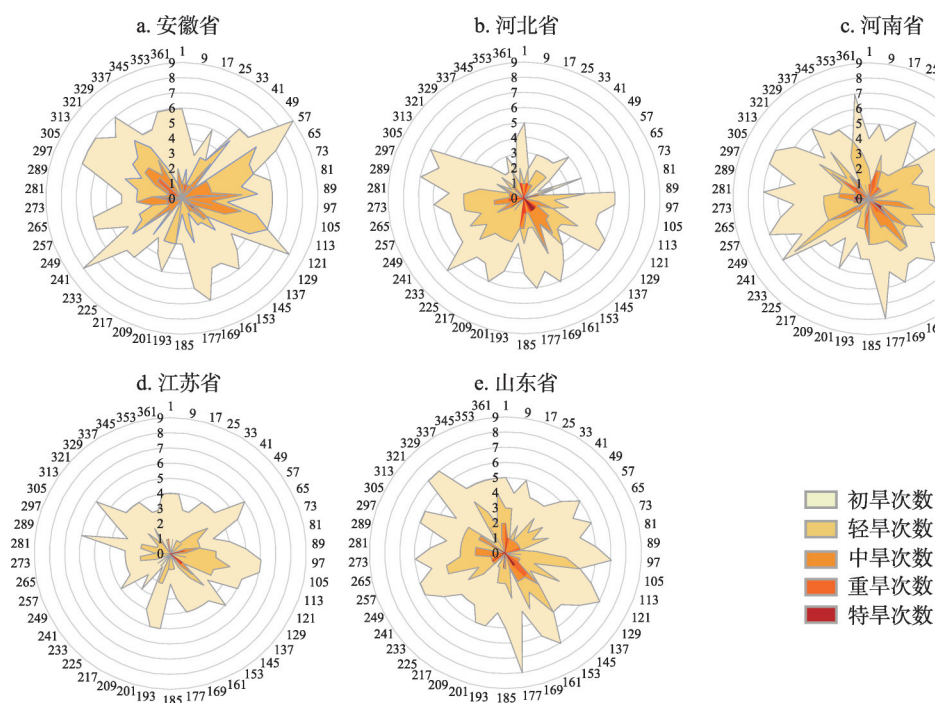


图4 不同强度干旱发生频次的年内分布图

Fig. 4 The temporal distribution of drought frequency with different intensity

南省严重(图4e)。2002年9-12月,山东省遭遇了很长的秋冬连旱过程,大部分时间处于中旱及重旱(图3)。

4.3 不同强度干旱事件的空间分布特征

研究区内轻旱发生频次高,覆盖范围广,很多区域在各个季节的轻旱发生频次高达40~50次(图5d、5h、5l、5p),占该季节16年来监测总次数的1/4左右。中到重旱的频次空间分布则存在明显的区域差异性,河北、河南、安徽、江苏中部和山东东部的中旱发生次数较多,尤其是在河北北部、河南南部和安徽北部,季节上则以春季最多,一般在30~40次,夏、秋季节次之,冬季最少。春、夏、秋季重旱主要集中在河北北部、河南东南部 and 安徽北部省份,尤其以春季最多,河北的冬季重旱频次分布与其他季

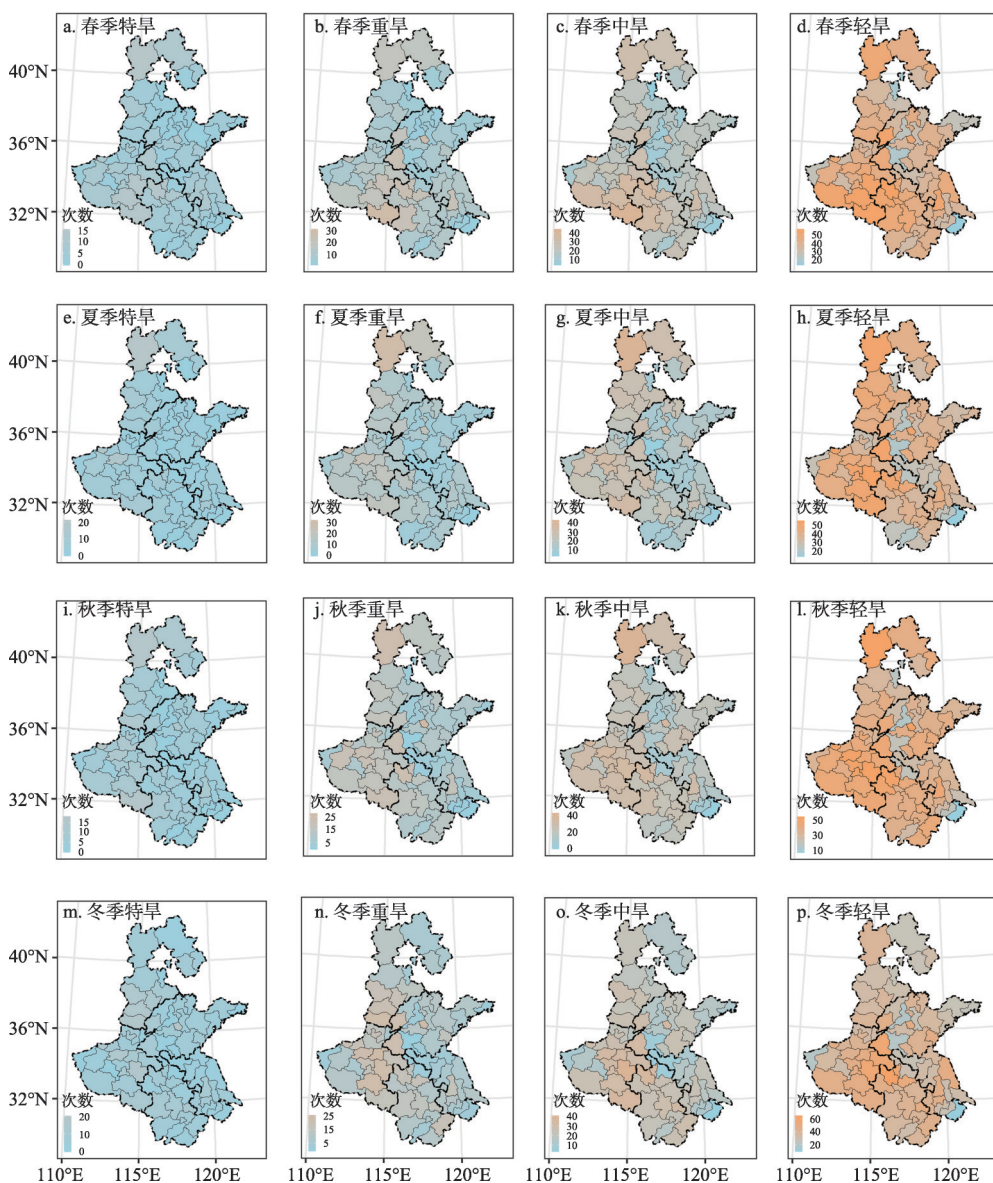


图5 不同程度干旱事件发生频次的空间分布

Fig. 5 The spatial distribution of drought frequency with different intensity

节不同, 呈现南边多而北边少的规律。特旱的发生频次显著降低, 一般只有5~10次, 极少数地区如春季河南南部及河北北部、冬季河北南部能够达到15~20次。

从空间上来看, 河北省除冬季重旱外, 其他季节各类型干旱发生频次均呈现北方地区的干旱发生频次略高于南方。山东省的干旱主要发生在山东东部和中部以及西部和河南河北接壤的两个地级市, 值得注意的是, 在山东中西部的济宁、泰安、济南等市干旱发生频次较低, 并形成一条带。河南省整体干旱发生频次普遍较高, 而南部的信阳市、驻马店市、周口市、南阳市等则尤为突出, 成为各类型干旱的多发区域, 同时该地区又是冬小麦的主产区。江苏省整体干旱不如其他省份严重, 主要发生在江苏省中部。在春、夏季, 安徽省干旱频率分布呈现北部高而南部偏低的趋势, 而在秋、冬季, 全省干旱分布均匀。

4.4 干旱对农作物产量的影响

已有的干旱研究注重于准确实时地监测干旱的发生和发展过程^[46-47], 但很少有人利用干旱指数研究干旱对生长期农作物的影响, 进而影响其产量。不同程度的干旱发生在不同的作物生长阶段对农作物所造成的产量影响是截然不同的^[48]。安徽、江苏、河南、山东、河北五省作为中国主要的冬小麦主产区, 研究在冬小麦的不同生长阶段, 发生何种程度的干旱会对其产量产生影响, 造成农业减产, 显得至关重要。

根据农业部种植业管理司的农时数据库所提供的冬小麦生长期农时分布情况(表1), 冬小麦一般在10月播种, 而在次年6月成熟收割, 因此某一年冬小麦的产量受前一年10-12月及该年1-6月的干旱状态的影响。研究中所搜集到的产量数据和计算干旱指数所用数据的时间尺度都是2001-2016年。因此, 通过分别对各市2001-2016年的1-6月(Day001-Day177)不同程度干旱面积和该年的冬小麦去趋势产量两组数据进行相关性分析, 然后对2001-2015年的10-12月(Day281-Day361)的不同程度干旱受灾面积和次年(即2002-2016年)的冬小麦去趋势产量数据进行相关性分析, 得到初旱、轻旱、中旱、重旱、特旱五种不同程度干旱面积和冬小麦产量之间的相关性, 以期探究在何时发生何种程度的干旱对于冬小麦产量的影响最大。其中相关性为正值, 表示干旱程度和冬小麦产量为正相关; 若相关性为负值说明干旱和冬小麦产量之间呈负相关, 干旱对冬小麦产量有负作用, 所有结果均通过了0.05的显著性检验, 加深色边框的区域表示该区域的相关性通过0.01的显著性检验。

根据表1所显示的农作物生长期农时来看, 5个省份的冬小麦播种时间基本都是10月上旬, 而后经历出苗、分蘖(三叶)、越冬等营养期, 河北、山东都是在12月中旬开始进入越冬期, 河南较之晚一句, 江苏和安徽比河北和山东要晚两旬左右, 这种差异主要是由于纬度差异所导致的热量分布不均衡所导致。而在冬季之后的拔节、抽穗、乳熟、成熟等生殖期, 江苏和安徽在4月上旬进入孕穗开花阶段, 而山东、河南、河北比安徽和江苏晚一至两旬, 最后的乳熟成熟阶段也具有类似的规律。

如图6所示, 在1-3月中旬(图6 Day001-Day081), 此时正处于冬小麦越冬和返青阶段, 研究区内大部分地区的DSI监测到的初旱面积与农作物之间呈现负相关关系, 局部地区存在着正相关关系。这意味着越冬和返青期发生初旱对冬小麦的产量并未产生严重影响, 甚至有可能使冬小麦的产量略有增加。有研究表明^[49], 降水 and 气温是影响农作物生长的主要气候因素, 但在农作物的不同生长阶段降水和气温对其影响不尽相同。不考虑具体作物生长阶段, 就整个作物生长期而言, 累积降水量(该生长期及之前生长期)的变化对冬小麦的影响最大, 前期持续的降水缺失会产生严重的累积效应, 影响冬小麦的生长, 进而对产量造成影响, 而温度对于冬小麦的影响一般具有同步性。研究区内降

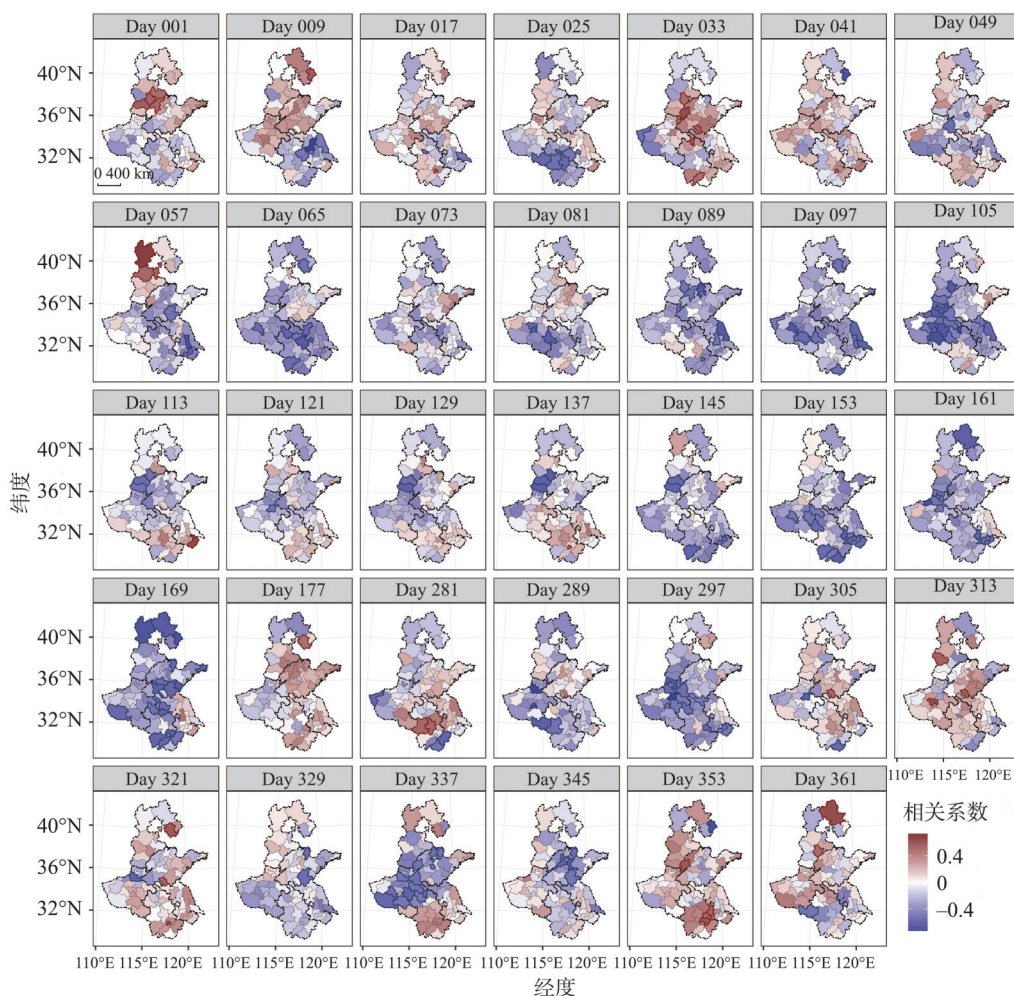


图6 初旱与冬小麦产量的相关性分布图

Fig. 6 The correlation distribution of incipient drought area and winter wheat yield

水主要集中在7-9月份,约占全年降水量的70%,播种期主要集中于10月,前期良好的土壤水分条件能为冬小麦的播种出苗及越冬提供很好的水分条件^[50]。而在经历了漫长和寒冷的越冬期后,冬小麦进入返青阶段,太阳辐射和温度的升高促进了作物的生长,尽管可能遭受一些轻微的水分胁迫,但温度和辐射带来的促进作用更为主要,从而对最终的粮食产量影响甚微。而当这些地区发生的干旱强度达到中旱以上,更为严重的水分缺失则会导致冬小麦减产,但对比图6和图5发现,减产较为严重的地区包括安徽和江苏中部及北部、河北北部、山东中西部,这些地区是4.3结论中所得的干旱发生频率较高区域,但同样干旱频发的河南北部和河北南部地区并未受干旱影响而严重减产,该区域大致呈条带状分布,对比研究区图(图1)发现,该地区是主要的灌区,受人为灌溉及其他因素的影响,可能会在一定程度上减弱干旱对农作物造成的不良影响。

而在4月上旬和中旬(图6 Day089-Day105),初旱与农作物产量的关系大体呈现负相关,但相关性不高,大部分地区尚未通过显著性检验,仅有河南南部、安徽和江苏北部部分地区通过了0.01的显著性检验,而对比表1发现,显著负相关的地区已经进入抽

穗开花阶段 (Day105), 其余相关性不够显著的地区处于拔节抽穗阶段。Innes 等^[51]的研究发现在开花前出现水分胁迫会减少穗粒数, 穗粒数的减少显然会影响冬小麦的最终产量。

轻旱影响面积和农作物产量之间的相关性如图7所示, 1-2月 (Day001-Day057) 相关性较低, 大部分地区未通过显著性检验。与初旱相比, 轻旱影响面积和冬小麦产量的相关性减小甚至为负相关, 即随干旱程度的加重, 冬小麦产量增加趋势变小甚至开始减产。这主要是由于干旱强度增加, 温度和辐射的促进作用不再显著, 水分亏缺对冬小麦的生长起主导作用。在4月上旬和中旬 (图7 Day097-Day105), 安徽北部、江苏西北部和河南南部地区呈现大范围负值区, 且通过了0.01的显著性检验, 此时对应三省的农时即为孕穗开花阶段。对比图6和图7发现, 该阶段轻旱对产量影响较初旱更为严重。在5月中下旬至6月中旬 (Day137-Day161) 小麦主产区呈现大面积的负相关, 且河南、山东、河北南部及安徽部分地区通过0.01的显著性检验, 呈显著负相关。这意味着此时发生轻旱会导致农作物产量的显著降低, 对应表1发现该时间段是乳熟成熟的阶段, 开花

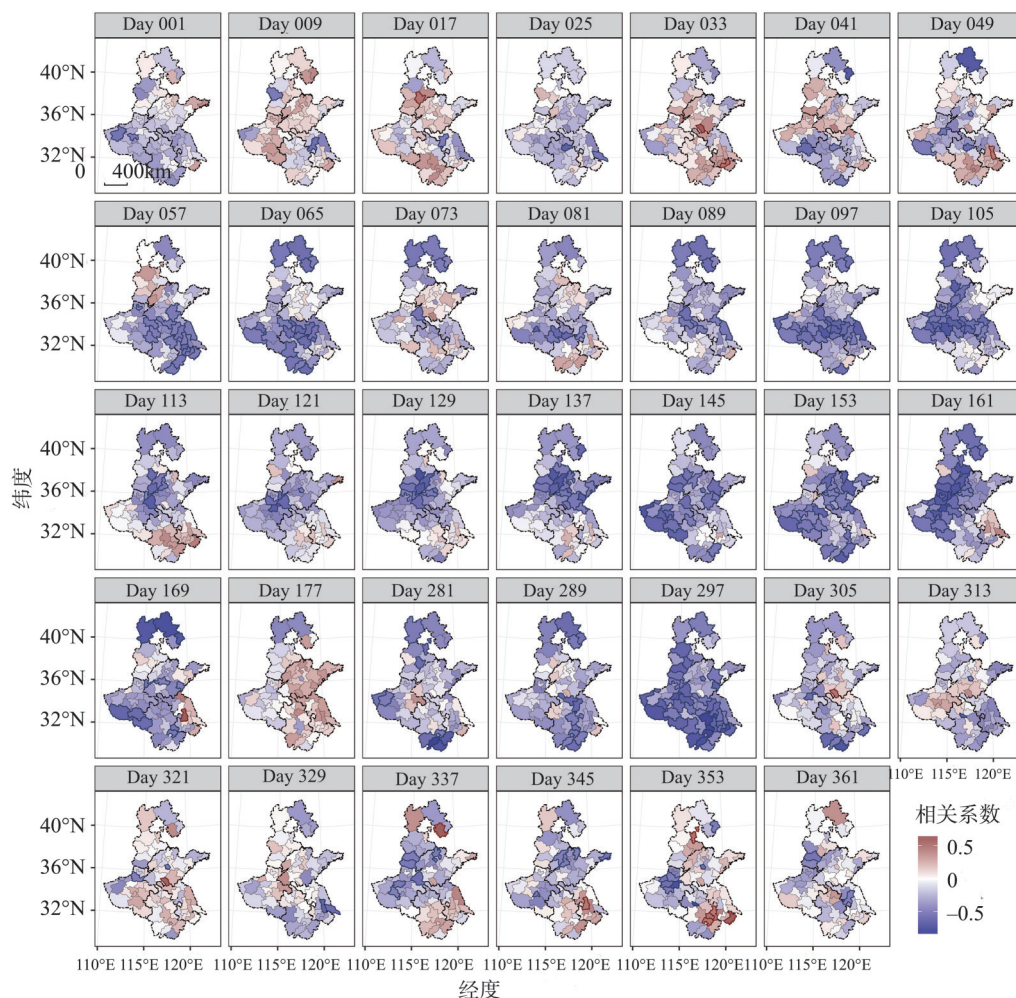


图7 轻旱与冬小麦产量的相关性分布图

Fig. 7 The correlation of mild drought area and winter wheat yield

后冬小麦进入灌浆期,灌浆速率及时间长短影响着颗粒的饱满程度^[52-53]。冬小麦在该阶段对水分的需求量相较于前期增长明显,长时间的干旱会导致小麦颗粒不够饱满,从而造成农作物产量降低^[54]。随干旱程度由轻旱到中旱再到重旱逐渐加重,冬小麦显著减产的面积逐渐增大,且有集中趋势。安徽和江苏的南部地区由于种植结构的不同,小麦播种面积不如北方大,且受梅雨的影响,减产效应不够显著。另外在冬小麦分蘖期(Day281-Day297),轻旱的发生也会导致冬小麦减产,尤其在安徽、河南和河北南部地区。与初旱相比,由于轻旱的干旱程度更严重(图6,图7),其与冬小麦产量的相关性也就越趋向于负相关,说明随着干旱强度的加剧,干旱对冬小麦产量起到抑制作用,在越冬返青期和乳熟成熟期尤为显著。

中旱和重旱对农作物产量的影响和轻旱相似,但在10月(Day281-Day305),中旱和重旱影响面积与冬小麦产量相关性更强,这主要是因为此时正处于冬小麦的播种和出苗阶段,严重的干旱会导致冬小麦的发芽率降低,从而对冬小麦产量产生影响,对于特旱而言,干旱影响面积和冬小麦产量之间的相关性则不如中旱和重旱显著。另外,从初旱到轻旱再到中旱,随着干旱程度的不断加重,对冬小麦产生减产作用的生长期也相应提前,即干旱程度越严重,对作物产量产生显著负作用的生长期越长。轻旱发生在乳熟期会对产量产生显著影响,而中旱发生在开花、乳熟期都会对产量产生显著影响。这也恰好印证了水分对冬小麦的影响主要体现在长期的累积效应^[49]。

5 结论

本文通过时间尺度为8 d的NDVI和蒸散量数据集,构建干旱强度指数DSI,利用DSI值划分不同程度的干旱,分析干旱在时间(年际、年内)和空间上的分布规律;计算不同程度干旱的影响面积和冬小麦实际产量之间的相关系数,借以探究在冬小麦生长的不同阶段发生不同程度干旱会对冬小麦的产量产生的影响,得出的主要结论如下:

(1) 2001-2016年,研究区的干旱在年际分布上呈现逐渐减弱的趋势,2001-2002年干旱持续时间长,影响范围广,2003-2010年区域性和阶段性干旱为主,旱情减轻,2011-2016年整体呈现湿润状态,干旱影响范围小。干旱的年内分布而言,安徽、河南、河北的干旱都集中发生在春秋季节,山东的干旱全年分布较为均,江苏的干旱强度明显弱于其他省份,且季节差异不显著。

(2) 随干旱程度的逐渐加深,发生的频次降低,但总体上而言,在河北北部、河南南部、安徽、江苏中部和北部、山东东部是干旱多发区,同时这些地区是冬小麦的主产区,频发的干旱会对冬小麦产量产生影响。

(3) 越冬期发生初旱对产量起促进作用,而在开花乳熟阶段发生初旱则会导致农作物减产;轻旱发生在乳熟期会对冬小麦产量产生显著影响,而中旱发生在开花、乳熟成熟期都会对产量产生显著影响;此外在播种时若发生水分短缺也会对冬小麦的产量产生影响,尤其是发生重旱和特旱。除了特定生长阶段发生特定程度的干旱外,从初旱、轻旱到中旱,随干旱强度的增加,对冬小麦产生减产作用的生长期也相应提前,即干旱程度越严重,对作物产量产生显著负作用的生长期越长。

由于计算干旱指数DSI所用数据集的时间序列较短,可能会影响DSI对干旱的反映不够准确。也需注意的是由于气候变化的影响,极端事件的出现频率和范围发生了巨大变化,用相对于近些年的状态表征干旱更为合理。总的来说时间尺度短、数据量不足仍

会使文章结论的不确定性增大。本文研究区内有大量灌区, 灌溉能在很大程度上缓解旱情, 减轻干旱对产量的影响。但由于灌溉时间, 灌溉水量及灌溉方式等相关数据无法获取, 灌溉对冬小麦产量的影响有待进一步研究。

参考文献(Reference)

- [1] Seneviratne S I, Nicholls N, Easterling D, et al. Managing the risks of extreme events and disasters to advance climate change adaptation: Changes in climate extremes and their impacts on the natural physical environment. *Journal of Clinical Endocrinology & Metabolism*, 2012, 18(6): 586-599.
- [2] Salinger M J, Stigter C J, Das H P. Agrometeorological adaptation strategies to increasing climate variability and climate change. *Agricultural & Forest Meteorology*, 2000, 103(1): 167-184.
- [3] Chen C, Wang E L, Yu Q, et al. Quantifying the effects of climate trends in the past 43 years (1961-2003) on crop growth and water demand in the North China Plain. *Climatic Change*, 2010, 100(3/4): 559-578.
- [4] Powell J P, Reinhard S. Measuring the effects of extreme weather events on yields. *Weather & Climate Extremes*, 2016, 12(C): 69-79.
- [5] Rosenzweig C, Iglesias A, Yang X B, et al. Climate change and extreme weather events: Implications for food production, plant diseases, and pests. *Global Change & Human Health*, 2001, 2(2): 90-104.
- [6] Battisti D S, Naylor R L. Historical warnings of future food insecurity with unprecedented seasonal heat. *Science*, 2009, 323(5911): 240-244.
- [7] Coumou D, Rahmstorf S. A decade of weather extremes. *Nature Climate Change*, 2012, 2(7): 491-496.
- [8] Park S, Im J, Jang E, et al. Drought assessment and monitoring through blending of multi-sensor indices using machine learning approaches for different climate regions. *Agricultural & Forest Meteorology*, 2016, 216: 157-169.
- [9] Lesk C, Rowhani P, Ramankutty N. Influence of extreme weather disasters on global crop production. *Nature*, 2016, 529(7584): 84.
- [10] China Meteorological Administration. China Meteorological Disaster Yearbook 2011. Beijing: China Meteorological Press, 2012. [中国气象局. 中国气象灾害年鉴2011. 北京: 气象出版社, 2012.]
- [11] The Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. Bulletin of Flood and Drought Disasters in China 2010. Beijing: China Water & Power Press, 2011. [中华人民共和国水利部. 中国水旱灾害公报2010. 北京: 中国水利水电出版社, 2011.]
- [12] Sun P, Zhang Q, Wen Q Z, et al. Multisource data based integrated agricultural drought monitoring in the Huai River basin, China. *Journal of Geophysical Research*, 2017, 122: 10751-10772.
- [13] Zhang Q, Gu X H, Vijay P. Singh, et al. Spatiotemporal behavior of floods and droughts and their impacts on agriculture in China. *Global and Planetary Change*, 2015, 131: 63-72.
- [14] Zhang Q, Sun P, Li J F, et al. Spatiotemporal properties of droughts and related impacts on agriculture in Xinjiang, China. *International Journal of Climatology*, 2015, 35(7): 1254-1266.
- [15] Qin Z, Tang H, Li W, et al. Modelling impact of agro-drought on grain production in China. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 2014, 7: 109-121.
- [16] Beddington, J R, Asaduzzaman M, Clark M E, et al. The role for scientists in tackling food insecurity and climate change. *Agriculture and Food Security*, 2012, 1(1): 10.
- [17] Devereux, S. The impact of droughts and floods on food security and policy options to alleviate negative effects. *Agricultural Economics*, 2007, 37: 47-58.
- [18] Douglas, I. Climate change, flooding and food security in South Asia. *Food Security*, 2009, 1: 127-136.
- [19] Godfray H C J, Beddington J R. Linking policy on climate and food. *Science*, 2011, 331(331): 1013-1014.
- [20] Lobell D B, Costa-Roberts J. Climate trends and global crop production since 1980. *Science*, 2011, 333(6042): 616-620.
- [21] Farhangfar S, Bannayan M, Khazaei H R, et al. Vulnerability assessment of wheat and maize production affected by drought and climate change. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 2015, 13: 37-51.
- [22] Zhang Zhao, Wang Pin, Chen Yi, et al. Spatio-temporal changes of agrometeorological disasters for wheat production across China since 1990. *Acta Geographica Sinica*, 2013, 68(11): 1453-1460. [张朝, 王品, 陈一, 等. 1990年以来中国小麦农业气象灾害时空变化特征. *地理学报*, 2013, 68(11): 1453-1460.]
- [23] Ghose B. Food security and food self- sufficiency in China: From past to 2050. *Food and Energy Security*, 2014, 3(2):

86-95.

- [24] National Bureau of Statistics of the People's Republic of China. China Statistical Yearbook 2016. Beijing: China Statistics Press, 2017. [中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴 2016. 北京: 中国统计出版社, 2017.]
- [25] Shi Peijun, Wang Jing-ai, Xie Yun, et al. A preliminary study of the climatic change, natural disasters of agriculture and grain yield in China during the past 15 year. *Journal of Natural Resources*, 1997, 12(3): 197-203. [史培军, 王静爱, 谢云, 等. 最近 15 年来中国气候变化、农业自然灾害与粮食生产的初步研究. *自然资源学报*, 1997, 12(3): 197-203.]
- [26] Qi Haixia, Zhi Xiefei, Bai Yongqing. Inter decadal variation and trend analysis of the drought occurrence frequency in China. *Transactions of Atmospheric Sciences*, 2011, 34(4): 447-455. [祁海霞, 智协飞, 白永清. 中国干旱发生频率的年代际变化特征及趋势分析. *大气科学学报*, 2011, 34(4): 447-455.]
- [27] Guo E L, Liu X P, Zhang J Q, et al. Assessing spatiotemporal variation of drought and its impact on maize yield in Northeast China. *Journal of Hydrology*, 2017, 553: 231-247.
- [28] Zhang Q, Li Q, Vijay P Singh, et al. Nonparametric integrated agrometeorological drought monitoring: Model development and application. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2018, 123(1): 73-88.
- [29] Sun P, Zhang Q, Cheng C, et al. ENSO-induced flood and drought hazards and related agricultural losses across Anhui Province, China. *Natural Hazards*, 2017, 89: 963-983.
- [30] Liu Jiajun, Dong Suocheng, Li Zehong. Comprehensive evaluation of China's water resources carrying capacity. *Journal of Natural Resources*, 2011, 26(2): 258-269. [刘佳骏, 董锁成, 李泽红. 中国水资源承载力综合评价研究. *自然资源学报*, 2011, 26(2): 258-269.]
- [31] Ma Jiehua, Liu Yuan, Yang Xiaoguang, et al. Characteristics of climate resources under global climate change in the North China Plain. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(14): 3818-3827. [马洁华, 刘园, 杨晓光, 等. 全球气候变化背景下华北平原气候资源变化趋势. *生态学报*, 2010, 30(14): 3818-3827.]
- [32] Waltershe A E, Peters A J. Drought monitoring with NDVI-based standardized vegetation index. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 2002, 68(1): 71-76.
- [33] Abduwasit G, Li Z L, Qin Q M, et al. A method for canopy water content estimation for highly vegetated surfaces-shortwave infrared perpendicular water stress index. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 2007, 50(9): 1359-1368.
- [34] Li Qihu, Chen Yaning. Response of spatial and temporal distribution of NDVI to hydrothermal condition variation in arid regions of Northwest China during 1981-2006. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2014, 36(2): 327-334. [李奇虎, 陈亚宁. 1981-2006 年西北干旱区 NDVI 时空分布变化对水热条件的响应. *冰川冻土*, 2014, 36(2): 327-334.]
- [35] Song Fuqiang, Xing Kaixiong, Liu Yang, et al. Monitoring and assessment of vegetation variation in Northern Shaanxi based on MODIS/NDVI. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(2): 354-363. [宋富强, 邢开雄, 刘阳, 等. 基于 MODIS/NDVI 的陕北地区植被动态监测与评价. *生态学报*, 2011, 31(2): 354-363.]
- [36] Zhao Wenliang, He Zhen, He Junping, et al. Remote sensing estimation for winter wheat yield in Henan based on the MODIS-NDVI data. *Geographical Research*, 2012, 31(12): 2310-2320. [赵文亮, 贺振, 贺俊平, 等. 基于 MODIS-NDVI 的河南省冬小麦产量遥感估测. *地理研究*, 2012, 31(12): 2310-2320.]
- [37] Mu Q Z, Zhao M S, Kimball J S, et al. A remotely sensed global terrestrial drought severity index. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2013, 94(1): 83-98.
- [38] Zhang X Q, Yamaguchi Y. Characterization and evaluation of MODIS-derived Drought Severity Index (DSI) for monitoring the 2009/2010 drought over southwestern China. *Natural Hazards*, 2014, 74: 2129-2145.
- [39] Zhao Dongni, Wang Yanhua, Ren Chuanyou, et al. Comparative analysis of three fitting methods of rice trend yield. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2017, 25(3): 345-355. [赵东妮, 王艳华, 任传友, 等. 3 种水稻趋势产量拟合方法的比较分析. *中国生态农业学报*, 2017, 25(3): 345-355.]
- [40] Wang Guizhi, Chen Jinshuai, Chen Keyao, et al. Exploration of method in separating climatic output based on HP filter. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2014, 35(2): 195-199. [王桂芝, 陆金帅, 陈克焱, 等. 基于 HP 滤波的气候产量分离方法探讨. *中国农业气象*, 2014, 35(2): 195-199.]
- [41] Kong Dongdong, Zhang Qiang, Gu Xihui, et al. Vegetation responses to drought at different time scales in China. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36(24): 7908-7918. [孔冬冬, 张强, 顾西辉, 等. 植被对不同时间尺度干旱事件的响应特征及成因分析. *生态学报*, 2016, 36(24): 7908-7918.]
- [42] Zhao Haiyan, Zhang Qiang, Gao Ge, et al. Characteristic analysis of agricultural drought disaster in China during 1951-2007. *Journal of Natural Disasters*, 2010, 19(4): 201-206. [赵海燕, 张强, 高歌, 等. 中国 1951-2007 年农业干旱的特征

- 分析. 自然灾害学报, 2010, 19(4): 201-206.]
- [43] Wang Suping, Zhang Cunjie, Li Yaohui, et al. Analysis of multi-timescale drought variation based on standardized precipitation index in China during 1960-2011. *Journal of Desert Research*, 2014, 34(3): 827-834. [王素萍, 张存杰, 李耀辉, 等. 基于标准化降水指数的1960-2011年中国不同时间尺度干旱特征. *中国沙漠*, 2014, 34(3): 827-834.]
- [44] Wang S S, Mo X G, Hu S, et al. Assessment of droughts and wheat yield loss on the North China Plain with an aggregate drought index (ADI) approach. *Ecological Indicators*, 2018, 87: 107-116.
- [45] Wang H S, Vicente-serrano S M, Tao Fulu, et al. Monitoring winter wheat drought threat in northern China using multiple climate-based drought indices and soil moisture during 2000-2013. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2016, 228-229: 1-12.
- [46] Liu Xianfeng, Zhu Xiufang, Pan Yaozhong, et al. Agricultural drought monitor: Progress, challenges and prospect. *Acta Geographical Sinica*, 2015, 70(11): 1835-1848. [刘宪锋, 朱秀芳, 潘耀忠, 等. 农业干旱监测研究进展与展望. *地理学报*, 2015, 70(11): 1835-1848.]
- [47] Aghakouchak A, Farahmand A, Melton F S, et al. Remote sensing of drought: Progress, challenges and opportunities. *Reviews of Geophysics*, 2015, 53(2): 452-480.
- [48] Recep Ç. Effect of water stress at different development stages on vegetative and reproductive growth of corn. *Field Crops Research*, 2004, 89(1): 1-16.
- [49] Huang Q, Wang L M, Chen Z X, et al. Effects of meteorological factors on different grades of winter wheat growth in the Huang-Huai-Hai Plain, China. *Journal of Integrative Agriculture* 2016, 15(11): 2647-2657.
- [50] Li F R, Zhao S L, Geballe G T. Water use patterns and agronomic performance for some cropping systems with and without fallow crops in a semi-arid environment of northwest China. *Agriculture Ecosystem Environment*, 2000, 79(2): 129-142.
- [51] Innes P, Blackwell R D. The effect of drought on the water use and yield of two spring wheat genotypes. *The Journal of Agricultural Science*, 1981, 96(3): 603-610.
- [52] Yang J C, Zhang J H. Grain filling of cereals under soil drying. *The New Phytologist*, 2006, 169(2): 223-236.
- [53] Zhang J H, Sui X Z, Li B, et al. An improved water-use efficiency for winter wheat grown under reduced irrigation. *Field Crops Research*, 1998, 59: 91-98.
- [54] Fang Q, Zhang X Y, Chen S Y, et al. Selecting traits to increase winter wheat yield under climate change in the North China Plain. *Field Crops Research*, 2017, 207: 30-41.

Impacts of drought intensity and drought duration on winter wheat yield in five provinces of North China plain

YU Huiqian^{1,2}, ZHANG Qiang^{1,2}, SUN Peng³, SONG Changqing^{1,2}

(1. Key Laboratory of Environmental Change and Natural Disaster, Ministry of Education, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 2. Faculty of Geographical Science & Academy of Disaster Reduction and Emergency Management, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 3. College of Territorial Resources and Tourism, Anhui Normal University, Wuhu 241000, Anhui, China)

Abstract: Based on the MOD09A1 and MOD16A2 datasets with a temporal resolution of 8 days during a period from 2001 to 2016, Drought Severity Index (DSI) was quantified to characterize spatiotemporal distribution of droughts of different drought intensities. The correlation coefficients were quantified between drought-affected cropland area and the climatic winter wheat yield. In addition, relevant impacts of droughts with different drought intensities were investigated on the winter wheat yield during different growing periods. The results show that: (1) drought regimes during 2001-2016 showed a declining trend in terms of drought intensity at annual and inter-annual scales. The most severe drought occurred during 2001-2002 while regional and intermittent droughts could be observed during 2003-2010, and were alleviated during 2011-2016 with persistent wetting tendency thereafter. In terms of annual drought distribution, droughts occurred mainly in spring and autumn, some occurred in summer and few droughts in winter; (2) Generally, in terms of the spatial distribution of droughts, central and northern Hebei, southern Henan, Anhui and Jiangsu, and eastern Shandong provinces were dominated by frequent droughts though droughts were in decreasing trends; (3) analysis results concerning effects of droughts on winter wheat yield show that the incipient drought during the winter period can promote the winter wheat yield, while in the milking stage of the winter wheat, occurrence of droughts may decrease crop yield. The mild drought potential has significant effects on winter wheat yield during the ripening interval, while the moderate drought occurs during flowering, milking and ripening periods can have a significant impact on the winter wheat yield. Meanwhile, droughts with higher degree of intensity will have more significant impacts on winter wheat at its earlier growing season. In addition, water shortage due to drought effects during planting periods will reduce the yield of winter wheat, and severe and extreme droughts in particular. Therefore, it is of great merits in quantification of impacts of droughts with different intensities on winter wheat yield in different growing seasons, and it has important theoretical and practical significance for the planning of irrigation and the increase of soil moisture in the study region.

Keywords: five provinces of the North China plain; drought intensity; crop yield; food security