苗晨,申双和,贾根锁. 2014. 华北平原不同生长发育期作物长势对气候因子的响应研究 [J]. 气候与环境研究, 19 (6): 703-712, doi: 10.3878/j.issn. 1006-9585.2014.13129. Miao Chen, Shen Shuanghe, Jia Gensuo. 2014. Response of cropland NDVI to climatic factors during different phenophases in the North China Plain [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 19 (6): 703-712.

华北平原不同生长发育期作物长势对气候 因子的响应研究

苗晨^{1,2} 申双和¹ 贾根锁²

1 南京信息工程大学应用气象学院,南京 2100442 中国科学院大气物理研究所东亚区域气候—环境重点实验室,北京 100029

摘 要利用卫星遥感归一化植被指数(NDVI)时间序列数据和站点气象数据,从农作物生长发育过程的角度, 分析了 1981~2008 年华北平原农田在 12 个生长发育期(冬小麦 8 个、夏玉米 4 个)对降水和温度不同的响应特 征。研究区农田植被指数对降水响应的滞后性强于对温度的滞后性,其中对降水最为敏感的是前 1 和前 2 个生长 发育期,对温度最为敏感的是同期和前 1 个生长发育期。不同种类作物在不同时期对气候因子响应不同:冬小麦 发育中后期、夏玉米发育中期,绝大多数站点植被指数与降水呈正相关;冬小麦生长发育前中期植被指数与温度 呈显著甚至极显著正相关。冬小麦出苗期温度、返青期温度和返青期降水分别与不同时期植被指数显著相关,出 苗期和返青期为研究区农田长势对气候因子响应的敏感期。

关键词 归一化植被指数 温度 降水 作物生长发育期 华北平原
文章编号 1006-9585 (2014) 06-0703-10
中图分类号 P49
文献标识码 A doi: 10.3878/j.issn.1006-9585.2014.13129

Response of Cropland NDVI to Climatic Factors during Different Phenophases in the North China Plain

MIAO Chen^{1, 2}, SHEN Shuanghe¹, and JIA Gensuo²

1 College of Applied Meteorology, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044

2 Key Laboratory of Regional Climate-Environment Research for Temperate East Asia, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

Abstract The heterogeneous responses of cropland Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) to temperature and precipitation were analyzed using Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR) NDVI time series and station-observed climate data from 1981 to 2008 during 12 phenophases including eight for winter wheat and four for summer maize over the North China Plain. The results showed that the lagged response of NDVI to precipitation was more noticeable than that to temperature and that NDVI was more sensitive to the precipitation (temperature) during the last and previous two phases (current and last phases). Additionally, the response varied among crop species and phenophases. The correlation coefficients between NDVI and precipitation were positive at most sites in the mid-late growing season (medium growing season) of winter wheat (summer maize). NDVI was also positively correlated to temperature at the significance level of 0.05 in the early-mid growing season of winter wheat. Furthermore, NDVI was strongly related to temperature (precipitation) during germination and turning-green (turning-green) phases. Therefore, germination and

作者简介 苗晨,女,1988年出生,硕士研究生,主要从事农业气象与生态遥感研究。E-mail: miaochen@tea.ac.cn

通讯作者 贾根锁, E-mail: jiong@tea.ac.cn

收稿日期 2013-07-29 收到, 2014-03-14 收到修定稿

资助项目 国家重点基础研究发展计划项目 2012CB956202

turning-green were the phases during which crop growing was largely influenced by climatic factors in the region. **Keywords** Normalized difference vegetation index (NDVI), Temperature, Precipitation, Phenophase, North China Plain

1 引言

植被是联结土壤和大气的自然纽带(陈述彭 等,1998),被称为全球变化研究中的"敏感指示 器"(Habib et al., 2008)。近年来,植被与气候的 交互特性成为气候变化乃至全球变化研究的焦点 之一。归一化植被指数(Normalized difference vegetation index, NDVI)作为表征地表植被覆盖和 生长状况、监测植被变化和解释气候、天气事件对 生物圈影响的主要参数之一,已在环境、生态和农 业等领域得以广泛应用(Jia et al., 2006;任建强等, 2006;Xu et al., 2013)。许多研究探寻了不同尺度 和区域植被指数对气候因子、土地利用变化、碳循 环变化等的响应(Albani et al., 2006;Lu and Jia, 2013),其中对植被生长影响最为重要和直接的即为 温度和降水(Braswell et al., 1997;Nemani et al., 2003)。

Wang et al. (2001)对北美大平原中部的研究 发现,该地区平均降水量变化能够较明确显示 NDVI 空间格局和梯度变化。Ichii et al. (2002)对 1982~1990年全球 NDVI 变化趋势,及其与气候因 子的相关关系研究表明,植被生长在北半球中高纬 地区很大程度上受到温度年际变化的影响,在半干 旱地区主要受到降水量的限制,这种影响和限制在 生长季 (growing season)尤为显著。进一步研究表 明,NDVI 对气候因子响应的空间分布与下垫面地 形和土地覆盖类型的不同有关:不同海拔地区,不 同植被类型的 NDVI 与温度和降水的相关性不同

(Peñuelas and Filella, 2001; Gao and Dennis, 2001; Boelman et al., 2005; 余振等, 2011)。生长季内 NDVI 与不同时间尺度的平均气温和累计降水量的 相关关系也不同,且存在明显的滞后效应,当前研 究的时间尺度主要集中于年、季节、月和旬(Ji and Peters, 2003; Piao et al., 2003, 2006; Wang et al., 2003; Cui and Shi, 2010; 严建武等, 2012)。

近年来,我国学者就植被对气候变化响应的研究也成为热点之一。杨元合和朴世龙(2006)对青藏高原 1982~1999 年的草地植被覆盖变化及其与 气候变化的关系进行研究,发现在不同季节不同类 型的草地植被对气候变化响应有所差异。郭铌等 (2008)分析了近 22 年我国西北地区 NDVI 与平 均温度和降水的关系,结果表明该地区除戈壁沙漠 外的植被指数与降水呈正相关,与温度呈负相关。 Mao et al. (2012)选取 2000~2009 年的 MODIS NDVI 数据和降水数据对我国东北地区进行研究, 发现植被分布特征与降水格局关系密切。严建武等 (2012)分析了我国西南地区 NDVI 与干旱指数的 相关性,得出结论草地和旱地农田对降水和干旱的 响应较为敏感。

大多研究的区域集中在我国东北、西北等地区, 对华北地区研究较少。而华北地区特别是华北平原 是我国的重要粮食产地,以农田为最主要的土地覆 盖类型。当前研究多以季节、月等自然时间为时间 尺度,对农田地区的研究没有充分考虑到到农作物 生长发育的具体过程。而理论研究表明,农田作物 在不同生长发育期对同样气候因子的胁迫表现出非 常不同的响应(Saini and Westgate, 1999; 郭相平 等,2006;刘丽平等,2012)。因此,本文选取1981~ 2008 年的高级甚高分辨率辐射仪(Advanced Very High Resolution Radiometer, AVHRR) NDVI 数据和 气象站点数据,以我国华北平原为研究区域,深入 讨论了单一下垫面——农田不同生长发育期的植 被指数对温度和降水的响应及其滞后效应,从符合 农作物生长发育过程的角度,在区域尺度上寻求作 物长势对关键气候因子的异质性响应及最为敏感 的生长发育时期,从而为该地区农田耕作和种植制 度提供参考依据。

2 数据与方法

2.1 研究区概况

本文以我国华北平原为研究区域。华北平原 是中国的第二大平原,位于(32°N~40°24'N, 112°48'E~122°45'E),处于黄河下游,由黄河、海 河、淮河等冲积而成,包括河北、河南、山东、安 徽、江苏、北京及天津等5省2市的大部分或部分 地区。华北平原属大陆性季风型暖温带半湿润气 候,季节差别明显,气温温差大,降水时空分布不 均,全年降雨量500~1000 mm。6~9月集中了全 年降雨量的 80%左右,在有暴雨的季节,常出现洪 涝灾害;而在春季,降水稀少,往往受冬春旱或春 旱威胁。该地区是我国重要的粮食产地,以冬小麦 夏玉米轮作为主要耕作制度,冬小麦耕种面积占全 国小麦播种总面积的 55.5% (刘明等,2010)。图 1 为研究区域土地覆盖类型分布,底图为欧洲空间局 通过全球合作生产的全球土地覆盖数据 Globcover 2009,空间分辨率为 300 m,根据联合国粮食与农 业组织 (FAO)分类体系分为 22 类覆盖类型 (Bicheron et al., 2010),本文根据需要将自然植被 合并为一类。由该数据得到,研究区农田占整体面 积的 82.9%。

2.2 数据介绍

本文选取的 NDVI 数据是标准的 AVHRR NDVI 数据集,该数据由 NOAA 7、9、11、14、16、17号卫星的 AVHRR 传感器获取,NOAA 气象卫星 是近极地、与太阳同步的卫星,高度为 833~870 km,轨道倾角 98.7°,成像周期 12 h。目前,NOAA 系列卫星采用双星运行,同一地区每天可有 4 次过 境机会。该数据集覆盖时间为 1981 年 7 月至 2008 年 12 月,空间分辨率 8 km,15 d 最大值合成一幅 图像(即每月前 15 日合成一幅,剩余日数合成一

幅),数据投影为 Albers 等面积圆锥投影。该数据 集由 NASA 的全球建模与制图研究课题(Global Inventory Modeling and Mapping Studies, GIMMS) 工作组进行了定标、几何校正,消除了大部分云、 火山喷发气溶胶、大气污染和水汽引起的低信噪比等 影响。本数据集从时间跨度和精度上都有很大优 势,是全球植被变化研究的首选数据源并得到广泛 应用(Slayback et al., 2003)。

文章中所用的温度和降水数据是国家气象信 息中心气象资料室的气象台站 1950~2010 年的逐 日数据。气象站点的选取过程中,根据空间分辨率 为 30 m 的 Landsat/TM 数据,对研究区内的站点周 围下垫面进行目视解译,依次剔除了较为发达城市 (济南、郑州等),存在山体、水体的站点(秦皇 岛、三门峡等),保留了 1981~2008 年下垫面始终 为农田的 16 个气象站点(图 1)。其中,Landsat/TM 数据从美国地质调查局(U.S. Geological Survey, USGS)平台免费下载得到(http://earthexplorer.usgs. gov/[2013-03-29])。同时,结合谷歌地球(Google Earth)信息对选取的 16 个站点的经纬度进行精度 校正,保证站点在 8 km×8 km 范围内能够反映农 田信息,表 1 为本文选取的气象站点说明。



Fig. 1 Land cover and locations of weather stations within the study area

表1	本文选取的	气象站点说明

Table 1	Introduction	of weather	stations	used in	the study

农田站名称	校正后纬度	校正后经度	海拔/m
邢台	37°04′38.51″N	114°44′11.51″E	77.3
廊坊	39°07′22.42″N	116°33′35.42″E	9.0
乐亭	39°32′12.86″N	118°50′49.47″E	10.5
保定	38°47′44.08″N	115°51′47.09″E	17.2
饶阳	38°06′29.43″N	115°39'30.20"E	19.0
黄骅	38°14′07.07″N	117°21′16.26″E	6.6
南宫	37°23′30.92″N	115°35′41.16″E	27.4
安阳	35°59′37.83″N	114°34′28.88″E	62.9
许昌	34°02′48.91″N	114°02′16.53″E	66.8
开封	34°38′23.55″N	114°21′18.48″E	73.7
西华	33°44′30.09″N	114°22′46.93″E	52.6
驻马店	32°51′20.91″N	114°08′39.70″E	82.7
莘县	36°22′05.29″N	115°37′14.12″E	37.8
潍坊	36°39′49.44″N	118°45′16.31″E	22.2
兖州	35°38′34.43″N	116°39′20.29″E	51.7
莒县	35°41′46.67″N	118°51′11.06″E	107.4

2.3 研究方法

2.3.1 NDVI 年内变化

由于 AVHRR NDVI 数据的时间分辨率为 15 d, 将 1981~2008 年的 NDVI 数据做半月合成的 27 年 平均,发现研究区内 NDVI 年内变化与该区域农业 耕作制度有极密切的关系,可以清晰反映出冬小麦 一夏玉米轮作的特征:10 月初冬小麦播种后,冬季 NDVI 减小保持低值,2 月底开春后有所回升,4 月 初开始大幅度增长,直至 6 月初冬小麦收获时期 NDVI 显著降低,6 月底夏玉米播种后 NDVI 继续 增长,至9 月底夏玉米收获时期再次显著降低(图 2)。

因此,依据作物生长发育过程将每年 10 月到 次年 9 月划分为 12 个生长发育期作为本研究的时 间尺度(表 2),经查询该划分与中国农业部种植业 管理司农时数据库统计数据相符(http://www.zzys. moa.gov.cn/[2012-11-25])。

本文选取的 16 个站点均为冬小麦一夏玉米轮 作种植,根据各个站点的经纬度,利用 ENVI/IDL 批量提取站点所在像元灰度值(DN)值,该像元 的 NDVI 真实值由

 $N_{\rm DVI} = 0.0001 D_{\rm N}$ (1)

得到,其中,*N*_{DVI}代表该像元的 NDVI 真实值,*D*_N 代表所用数据中该像元的灰度值。按照生长发育期



图 2 研究区多年平均半月合成 NDVI 年内变化

Fig. 2 Intra-annual variation of half-month normalized difference vegetation index (NDVI) of multi-year

Table 2Definition of phenophases of study area						
时间	日序数	生长发育期				
10月1~15日	$274 \sim 288$	冬小麦播种				
10月16日至12月15日	289~349	冬小麦出苗				
12月16日至次年2月15日	350 至次年 46	冬小麦越冬				
2月16日至3月15日	47~74	冬小麦返青				
3月16日至4月15日	75~105	冬小麦拔节				
4月16~30日	$106 {\sim} 120$	冬小麦抽穗				
5月1~30日	121~151	冬小麦灌浆				
6月1~15日	$152 \sim 166$	冬小麦成熟				
6月16日至7月15日	167~196	夏玉米播种				
7月16~31日	197~212	夏玉米拔节				
8月1~15日	213~227	夏玉米抽雄				
8月16~30日	228~273	夏玉米成熟				

表 2 研究区生长发育期划分 Table 2 Definition of phenophases of study area

划分进行年平均,得到 1981~2008 年生长发育期内 NDVI值,并生成 1980年代、1990年代、2000年代年代际时间序列,均呈较为明显的双峰型,因此,站点 NDVI时间序列可以体现该地区种植制度。图3为研究区内所选 16站点 1980年代、1990年代和21世纪初期的 NDVI均值时间序列。

2.3.2 NDVI 与气候因子的相关分析

将降水日值资料和温度日值资料按照生长发 育期分别进行累计处理和平均处理,得到研究区作 物各个生长发育期降水量和平均温度时间序列。从 图4可知研究区降水量从冬小麦播种至抽穗始终保 持较低值,自冬小麦灌浆后开始显著增加,到夏玉 米拔节后有所下降。平均温度自冬小麦播种后持续 降低,到冬小麦越冬期间降至最低,之后温度回升, 至夏玉米拔节期间达到最高,而后下降。

分别对 16 个站点在每个生长发育期内 NDVI 的多年时间序列与同期降水量和平均温度的多年 时间序列做相关分析(如邢台站 1981~2008 年冬 小麦抽穗期 NDVI 与同期降水量),并进行显著性 检验。本文中以相关系数的值的大小和是否通过显 著性检验作为 NDVI 对气候因子响应是否敏感的指 标。考虑到响应的滞后效应,对各站点的每一生长



图 3 生长发育期内站点平均 NDVI 时间序列





图 4 生长发育期内站点平均 NDVI 与(a) 降水量和(b) 平均温度变化

Fig. 4 Variations of averaged NDVI of 16 stations with (a) precipitation and (b) temperature during 12 phenophases

发育期 NDVI 多年时间序列与该期之前的 1、2、3 个发育期内降水量和平均温度的多年时间序列进 行相关分析及显著性检验,以期探寻农田 NDVI 对 气候因子响应的特征及最为敏感的生长发育期。

3 结果与讨论

3.1 农田不同生长发育期植被指数对气候因子的 滞后响应

分别对 16 个站点每一生长发育期的 NDVI 与 同期、前 1、前 2、前 3 个生长发育期内降水量和 平均温度进行相关分析和显著性检验,其中,NDVI 与降水的相关性除南宫、西华站外,其他站点均通 过置信度 90%以上的显著性检验,NDVI 与温度的 相关性除开封站外,其他站点均通过置信度 90%以 上的显著性检验。我们发现大多数站点(除保定、 西华、潍坊、兖州站外)NDVI对前1、前2、前3 个生长发育期降水的响应强于对同期的响应,其中 最为敏感的是前1和2个生长发育期;而大多数站 点(除保定、驻马店、莘县站外)NDVI 对温度响 应最为敏感的时期则是同期和前1个生长发育期。 因此,农田 NDVI 对降水的响应滞后约1~3个生 长发育期,对温度的响应滞后约1个生长发育期, 农田长势对降水响应的滞后性强于对温度响应的 滞后性(图5)。

这可能主要是由于作物的生长发育在一定热 量条件范围内进行,温度对作物的影响主要是通过 热传递的方式,因此作物长势对温度的响应较为直 接和迅速。而根据土壤-植物-大气系统(SPAS)



图 5 NDVI 与不同生长发育期(a)降水量和(b)温度的相关系数最大值

Fig. 5 The maximum correlation coefficients between NDVI and (a) precipitation and (b) temperature in different phenophases

的水分平衡,降水要经由植物截留、地表径流等消耗,才能到达地面入渗土壤,补充土壤水分贮存, 作物通过根系吸收土壤水分从而满足自身需水量, 因此作物长势对降水的响应滞后效应更为显著(冯 秀藻和陶炳炎,1991)。

前人的研究结果也认为 NDVI 对降水响应的滞 后较温度更为显著。侯美亭等(2013)通过对植被 对气候响应研究的回顾发现与对降水的滞后响 应相比,植被对于温度的滞后响应并不是特别明 显。Cui and Shi (2010)认为中国东部植被 NDVI 总 体上对温度变化的响应大于对降水变化的响应,植 被对温度变化的最大响应滞后 10 d 左右,对降水变 化的最大响应滞后 30 d 左右; Wang et al. (2003) 对北美大平原 NDVI 对气候因子响应的研究发现, 农田 NDVI 对降水的响应滞后 28 d 左右,对温度的 响应滞后约 14 d。

3.2 农田不同生长发育期植被指数对气候因子的 最强响应

从表 3 可以看出,各站点 NDVI 与降水量和温度的相关系数最大值及其所处的生长发育期,因作物生长发育进程的不同以及作物种类的不同而有所差异:冬小麦发育中后期(拔节、抽穗、灌浆),夏玉米生长中期(拔节),NDVI 对降水响应较为敏感,大多数站点呈正相关,相关系数大多在 0.4~0.5之间,最高达到 0.698;冬小麦生长发育前中期(出苗至拔节)大多数站点与温度成显著正相关甚至极显著正相关,相关系数大多在 0.5~0.7之间,最高达到 0.734。表 3 中个别负值的出现可能是由于农田种植受到人为驱动十分显著,因此可能在个别时期由于人为影响的介入导致与大多数站点的规律而存在差异。

因华北平原夏季降水丰沛,土地底墒为冬小麦 播种、出苗提供充足的水分,而直至越冬阶段,温 度较低,对作物生长影响直接而迅速,因此冬小麦 生长前期主要受到温度影响;春季温度回升,小麦 返青后逐渐由营养生长阶段进入生殖生长阶段,株 型和叶面积均大幅增长,蒸散量增加,因此小麦耗 水量和需水量增加,发育中后期对降水响应敏感。 夏玉米在生长发育过程中,耗水量呈单峰变化,峰 值主要出现在拔节期间,这是由于拔节前株型小且 植株叶面积指数较小,耗水强度也比较低,而抽雄 后生物体机能下降导致耗水强度开始下降,至收获 前降至最低(肖俊夫等,2008;陈博等,2012)。玉 米生长发育的下限温度为 8~10 ℃,上限温度为 40 ℃ 以上(冯秀藻和陶炳炎,1991;张银锁等, 2001),因此华北平原的温度条件对于夏玉米的全生 育期较为适宜,从而夏玉米对温度响应并不敏感。

表3 作物 NDVI 对降水和温度的响应特征

Table 3 Responses of crop NDVI to precipitation andtemperature

	对降水的响应			对温度的响应		
	与降水	作物所处	滞后生	与温度	作物所处	滞后生
	最大相	生长发育	长发育	最大相	生长发育	长发育
站点	关系数	期	期个数	关系数	期	期个数
邢台	0.407*	冬小麦抽穗	3	0.734**	冬小麦拔节	2
廊坊	0.421*	冬小麦抽穗	2	0.591**	冬小麦越冬	1
乐亭	0.431*	冬小麦拔节	1	0.661**	冬小麦出苗	0
保定	0.391*	冬小麦抽穗	2	0.512**	冬小麦拔节	1
饶阳	0.609**	冬小麦拔节	1	0.557**	冬小麦拔节	1
黄骅	0.698**	冬小麦抽穗	2	0.587**	冬小麦越冬	1
南宫	-0.399*	冬小麦越冬	1	0.596**	冬小麦拔节	1
安阳	0.459*	冬小麦灌浆	3	-0.506**	冬小麦灌浆	2
许昌	0.481*	夏玉米拔节	1	0.648**	冬小麦出苗	0
开封	0.515**	夏玉米拔节	1	0.475*	冬小麦越冬	1
西华	-0.486*	夏玉米播种	0	0.643**	冬小麦拔节	0
驻马店	0.458*	冬小麦拔节	2	-0.476*	冬小麦灌浆	3
莘县	0.438*	冬小麦抽穗	2	0.670**	冬小麦拔节	1
潍坊	0.369	冬小麦拔节	2	0.603**	冬小麦返青	0
兖州	0.456*	冬小麦拔节	1	0.623**	冬小麦拔节	1
莒县	0.474*	夏玉米拔节	1	0.567**	冬小麦越冬	1

*双侧检验达到 0.05 水平显著, **双侧检验达到 0.01 水平显著。

此外,我们发现无论冬小麦还是夏玉米,其 NDVI 在收获期对于气候因子的响应均不敏感。这 可能是由于作物生长存在生命周期,如在小麦发育 后期,特别是灌浆后收获前,由于叶片衰老脱 落、叶片及籽粒中叶绿素含量下降和叶黄素含量上 升使得冬小麦植株由绿转黄,导致小麦光谱特性发 生变化,NDVI 值减小,此类现象与气候因子关系 并不密切,而是由小麦生长的生长发育特性决定。

3.3 农田植被指数对气候因子响应的敏感期

通过对各站点结果的分析,发现大多数站点多 个生长发育期 NDVI 对同一时期气候因子响应较为 敏感。其中冬小麦出苗、越冬期 NDVI 对出苗期温 度响应较强;冬小麦返青、拔节期的 NDVI 对返青 期温度响应较强;冬小麦拔节、抽穗、灌浆期的 NDVI 对返青期降水响应较为强烈(表 4)。

从小麦生长发育的角度来看,前期特别是出苗 阶段,是对温度最为敏感的时期:温度过低,影响 冬小麦分蘖,生长缓慢;温度过高,生长速度虽 快,但呼吸作用也强,根、芽生长不健壮,易徒

Table 4 Correlation coefficients between winter wheat NDVI and climatic factors during sensitive phases							
	相关系数						
	出苗 NDVI 与	越冬 NDVI 与	返青 NDVI 与	拔节 NDVI 与	拔节 NDVI 与	抽穗 NDVI 与	灌浆 NDVI 与
站点	出苗温度	出苗温度	返青温度	返青温度	返青降水	返青降水	返青降水
邢台	0.500**	0.475*	0.597**	0.734**	0.350	0.333	0.407*
廊坊	0.420*	0.591**	0.302	0.520**	0.243	0.421*	0.395*
乐亭	0.661**	0.630**	0.607**	0.462*	0.431*	0.380	0.267
保定	0.355	0.300	0.377	0.512**	0.279	0.356	0.271
饶阳	0.427*	0.503**	0.345	0.557**	0.609**	0.524**	0.489*
黄骅	0.527**	0.587**	0.395*	0.439*	0.588**	0.698**	0.636**
南宫	0.468*	0.445*	0.561**	0.596**	0.288	0.234	0.148
安阳	0.323	0.304	0.177	0.205	0.399*	0.431*	0.459*
许昌	0.648**	0.588**	0.247	0.331	0.430*	0.411*	0.408*
开封	0.124	0.475*	0.310	0.447*	0.040	0.141	0.053
西华	0.540**	0.527**	0.583**	0.603**	0.133	0.077	0.208
驻马店	0.312	0.337	0.224	0.229	0.222	0.367	0.426*
莘县	0.223	0.335	0.437*	0.670**	0.384	0.438*	0.288
潍坊	0.470*	0.404*	0.603**	0.306	0.060	-0.001	0.232
兖州	0.125	0.397*	0.364	0.623**	0.456*	0.370	0.245
莒县	0.126	0.567**	0.284	0.180	0.063	-0.006	-0.091

表 4 冬小麦敏感响应期 NDVI 与气候因子的相关性

*双侧检验达到 0.05 水平显著, **双侧检验达到 0.01 水平显著。

长,温度高于出苗上限温度 18 ℃ 时甚至抑制小 麦生长;只有温度适宜时才能平稳生长,出苗粗 壮。返青期间,冬小麦种子经过低温时段而后解除 冬性,获得春小麦特性,华北平原小麦需在 0~7 ℃ 的条件下完成这一过程(冯秀藻和陶炳炎,1991), 因此越冬至返青期间冬小麦生长发育主要受到温 度控制。小麦发育中后期,可能由于温度对作物生 长的轻微滞后效应,出苗阶段和返青阶段的温度分 别影响当前和推后一个生长发育期的作物长势。拔 节期间,华北平原平均温度高于 15 ℃,之后一直 平稳上升,对小麦生长不再起主要作用。

不同于对温度的响应,冬小麦对降水的敏感期 主要出现在返青之后。冬小麦在拔节前叶面蒸腾量 在总蒸散量中所占比例很低,在越冬前随着冬小麦 不断生长,叶面积指数有所增加,叶面蒸腾量也随 之增加,但随着冬小麦进入越冬期,叶面蒸腾量几 乎降低为0,农田蒸散量很小,因此冬小麦生长前 期需水量不高,由夏季降水和冬季降雪所补充的土 壤底墒即可满足。返青后,冬小麦由营养生长逐步 进入生殖生长,株型生长快,叶面积指数迅速增大, 土壤蒸发和叶面蒸腾也随着温度上升而增长,小麦 植株耗水量和需水量增大;抽穗灌浆阶段,冬小麦 时面积指数达到最大值,叶面蒸腾达到高峰(程维 新等,1994;任鸿瑞和罗毅,2004;陈博等,2012), 因此冬小麦发育中后期对水分响应十分敏感。由于 对降水响应的显著滞后,冬小麦拔节、抽穗、灌浆 等水分临界期都与返青期的降水密切相关。

因此,冬小麦出苗期温度、返青期温度和返青 期降水与不同时期 NDVI 关系密切,出苗期和返青 期为研究区农田植被指数对气候因子响应的敏感 期,该阶段气候因子对农田长势影响最为显著。这 些生长发育阶段的气候因子对农田生物量和产量 的影响还有待进一步探究。

4 结论

本文通过研究华北平原农田不同生长发育期 植被指数对关键气候因子的异质性响应,得到以下 结论:

(1)降水对农田 NDVI 的影响滞后性强于温度 影响的滞后性。NDVI 对前 1、前 2、前 3 个生长发 育期降水量的响应强于对同期的响应,其中最为敏 感的是前 1 和前 2 个生长发育期; NDVI 对温度响 应最为敏感的时期则是同期和前 1 个生长发育期。

(2)在站点尺度上,NDVI 与降水和温度最显 著相关性及其所处的生长发育期,因作物生长发育 进程的不同以及作物种类的不同而有所差异:冬小 麦发育中后期,夏玉米生长中期,NDVI 对降水响 应较为敏感,大多数站点呈正相关;冬小麦生长发 育前中期大多数站点与温度呈显著正相关甚至极

显著正相关。

(3) 冬小麦出苗期温度、返青期温度和返青期 降水与不同时期 NDVI 显著相关,出苗期和返青期 为研究区农田植被指数对气候因子的敏感期。

参考文献(References)

- Albani M, Medvigy D, Hurtt D C, et al. 2006. The contributions of land-use change, CO₂ fertilization, and climate variability to the Eastern US carbon sink [J]. Global Change Biology, 12 (12): 2370–2390.
- Boelman N T, Stieglitz M, Griffin K L, et al. 2005. Inter-annual variability of NDVI in response to long-term warming and fertilization in wet sedge and tussock tundra [J]. Ecosystem Ecology, 143 (3): 588–597.
- Bicheron P, Defourny P, Brockmann C, et al. 2010. GLOBCOVER 2009 Products description and validation report [R]. European Space Agency.
- Braswell B H, Schimel D S, Linder E, et al. 1997. The response of global terrestrial ecosystems to interannual temperature variability [J]. Science, 278 (5339): 870–872.
- 陈博, 欧阳竹, 程维新, 等. 2012. 近 50a 华北平原冬小麦一夏玉米耗水 规律研究 [J]. 自然资源学报, 27 (7): 1186–1199. Chen Bo, Ouyang Zhu, Cheng Weixin, et al. 2012. Water consumption for winter wheat and summer maize in the North China Plain in recent 50 years [J]. Journal of Natural Resources (in Chinese), 27 (7): 1186–1199.
- 陈述彭, 童庆禧, 郭华东. 1998. 遥感信息机理研究 [M]. 北京: 科学出版社, 397pp. Chen Shupeng, Tong Qingxi, Guo Huadong. 1998. Research on Mechanism of Remote Sensing Information [M] (in Chinese). Beijing: Science Press, 397pp.
- 程维新,赵家义,胡朝炳,等. 1994. 农田蒸发与作物耗水量研究 [M]. 北京: 气象出版社, 145pp. Cheng Weixin, Zhao Jiayi, Hu Chaobing, et al. 1994. Research on Evapotranspiration and Crop Water Consumption [M] (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 145pp.
- Cui L L, Shi J. 2010. Temporal and spatial response of vegetation NDVI to temperature and precipitation in eastern China [J]. Journal of Geographical Sciences, 20 (2): 163–176.
- 冯秀藻, 陶炳炎. 1991. 农业气象学原理 [M]. 北京: 气象出版社, 447pp. Feng Xiuzao, Tao Bingyan. 1991. Agrometeorology [M] (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 447pp.
- 郭铌,朱燕君,王介民,等. 2008. 近 22 年来西北不同类型植被 NDVI 变化与气候因子的关系 [J]. 植物生态学报, 32 (2): 319–327. Guo Ni, Zhu Yanjun, Wang Jiemin, et al. 2008. The relationship between NDVI and climate elements for 22 years in different vegetation areas of northwest China [J]. Journal of Plant Ecology (in Chinese), 32 (2): 319–327.
- 郭相平,张烈君,王琴,等. 2006. 拔节孕穗期水分胁迫对水稻生理特性 的影响 [J]. 干旱地区农业研究, 24 (2): 125–129. Guo Xiangping, Zhang Liejun, Wang Qin, et al. 2006. Effects of water stress on photosynthetic and physiological characteristics of rice in jointingbooting phase [J]. Agricultural Research in the Arid Areas (in Chinese), 24 (2): 125–129.
- Gao Z Q, Dennis O. 2001. The temporal and spatial relationship between NDVI and climatological parameters in Colorado [J]. Journal of

Geographical Sciences, 11 (4): 411-419.

- Habib A S, Chen X L, Gong J Y. 2008. Analysis of Sudan vegetation dynamics using NOAA-AVHRR NDVI data from 1982–1993 [J]. Asian Journal of Earth Sciences, 1 (1): 1–15.
- 侯美亭,赵海燕,王筝,等. 2013. 基于卫星遥感的植被 NDVI 对气候变 化响应的研究进展 [J]. 气候与环境研究,18 (3): 353–364. Hou Meiting, Zhao Haiyan, Wang Zheng, et al. 2013. Vegetation responses to climate change by using the satellite-derived normalized difference vegetation index: A review [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 18 (3): 353–364.
- Ichii K, Kawabat A, Yamaguchi Y. 2002. Global correlation analysis for NDVI and climatic variables and NDVI trends: 1982–1990 [J]. Int J Remote Sens, 23 (18): 3873–3878.
- Ji L, Peters A J. 2003. Assessing vegetation response to drought in the northern Great Plains using vegetation and drought indices [J]. Remote Sens Environ, 87 (1): 85–98.
- Jia G S, Epstein H, Walker D A. 2006. Spatial heterogeneity of tundra vegetation response to recent temperature changes [J]. Global Change Biology, 12 (1): 42–55.
- 刘丽平, 欧阳竹, 武兰芳, 等. 2012. 阶段性干旱及复水对小麦光合特性 和产量的影响 [J]. 生态学杂志, 31 (11): 2797–2803. Liu Liping, Ouyang Zhu, Wu Lanfang, et al. 2012. Effects of phased drought and re-watering on the photosynthetic characteristics and grain yield of winter wheat [J]. Chinese Journal of Ecology(in Chinese), 31 (11): 2797–2803.
- 刘明, 武建军, 吕爱锋, 等. 2010. 黄淮海平原雨养条件下冬小麦水分胁 迫分析 [J]. 地理科学进展, 29 (4): 427–432. Liu Ming, Wu Jianjun, Lü Aifeng, et al. 2010. The water stress of winter wheat in Huang-Huai-Hai Plain of China under rain-fed condition [J]. Progress in Geography (in Chinese), 29 (4): 427–432.
- Lu W, Jia G J. 2013. Fluctuation of farming-pastoral ecotone in association with changing East Asia monsoon climate [J]. Climate Change, 119 (3–4): 747–760.
- Mao D H, Wang Z M, Liu D W, et al. 2012. Responses of forest NDVI in Northeast China to precipitation change [C]. International Conference on WTCS 2009: 849–856.
- Nemani R R, Keeling C D, Hashimoto H, et al. 2003. Climate-driven increases in global terrestrial net primary production from 1982 to 1999 [J]. Science, 300 (5625): 1560–1563.
- Peñuelas J, Filella L. 2001. Responses to a warming world [J]. Science, 294 (5543): 793–795.
- Piao S L, Fang J Y, Zhou L M, et al. 2003. Interannual variations of monthly and seasonal normalized difference vegetation index (NDVI) in China from 1982 to 1999 [J]. J Geophys Res., 108 (D14), doi:10.1029/2002JD002848.
- Piao S L, Mohammat A, Fang J Y, et al. 2006. NDVI-based increase in growth of temperate grasslands and its responses to climate changes in China [J]. Global Environmental Chang, 16 (4): 340–348.
- 任鸿瑞, 罗毅. 2004. 鲁西北平原冬小麦和夏玉米耗水量的实验研究 [J]. 灌溉排水学报, 23 (4): 37–39. Ren Hongrui, Luo Yi. 2004. The experimental research on the water-consumption of winter wheat and summer maize in the northwest plain of Shandong Province [J]. Journal of Irrigation and Drainage (in Chinese), 23 (4): 37–39.

任建强, 陈仲新, 唐华俊. 2006. 基于 MODIS-NDVI 的区域冬小麦遥感

- Saini H S, Westgate M E. 1999. Reproductive development in grain crops during drought [J]. Advance in Agronomy, 68: 59–96.
- Slayback D, Pinzon J, Los S O, et al. 2003. Northern Hemisphere photosynthetic trends 1982–99 [J]. Global Chang Biology, 9 (1): 1–15.
- Wang J, Price K P, Rich P M. 2001. Spatial patterns of NDVI in response to precipitation and temperature in the central Great Plains [J]. Int J Remote Sens, 22 (18): 3827–3844.
- Wang J, Rich P M, Price K P. 2003. Temporal responses of NDVI to precipitation and temperature in the central Great Plains, USA [J]. Int. J. Remote Sens., 24 (11): 2345–2364.
- 肖俊夫,刘战东,陈玉民. 2008. 中国玉米需水量与需水规律研究 [J]. 玉 米科学, 16 (4): 21–25. Xiao Junfu, Liu Zhandong, Chen Yumin. 2008. Study on the water requirement and water requirement regulation of maize in China [J]. Journal of Maize Sciences (in Chinese), 16 (4): 21–25.
- Xu L, Myneni R B, Chapin F S, et al. 2013. Temperature and vegetation seasonality diminishment over northern lands [J]. Nature Climate Change, 3: 581–586.

严建武,陈报章,房世峰,等. 2012. 植被指数对旱灾的响应研究——以

中国西南地区 2009 年—2010 年特大干旱为例 [J]. 遥感学报, 16(4): 720–737. Yan Jianwu, Chen Baozhang, Fang Shifeng, et al. 2012. The response of vegetation index to drought: Taking the extreme drought disaster between 2009 and 2010 in Southwest China as an example [J]. Journal of Remote Sensing (in Chinese), 16 (4): 720–737.

- 杨元合, 朴世龙. 2006. 青藏高原草地植被覆盖变化及其与气候因子的 关系 [J]. 植物生态学报, 30 (1):1-8. Yang Yuanhe, Piao Shilong. 2006. Variations in grassland vegetation cover in relation to climatic factors on the Tibetan Plateau [J]. Acta Phytoecologica Sinica (in Chinese), 30 (1):1-8.
- 余振,孙鹏森,刘世荣. 2011. 中国东部南北样带主要植被类型归一化 植被指数对气候变化的响应及不同时间尺度的差异性 [J]. 植物生态 学报, 35 (11): 1117–1126. Yu Zhen, Sun Pensen, Liu Shirong. 2011. Response of normalized difference vegetation index in main vegetation types to climate change and their variations in different time scales along a north–south transect of eastern China [J]. Chinese Journal of Plant Ecology (in Chinese), 35 (11): 1117–1126.
- 张银锁, 字振荣, Driessen P M. 2001. 夏玉米植株及叶片生长发育热量 需求的试验与模拟研究 [J]. 应用生态学报, 12 (4): 561–565. Zhang Yinsuo, Yu Zhenrong, Driessen P M. 2001. Growing degree-days requirements for plant and leaf development of summer maize—An experimental and simulation study [J]. Chinese Journal of Applied Ecology (in Chinese), 12 (4): 561–565.