

张宸赫,王琳,赵天良,等. 气候变暖背景下中国冬小麦物候期的时空特征[J]. 江苏农业科学,2016,44(4):448-452.

doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2016.04.126

# 气候变暖背景下中国冬小麦物候期的时空特征

张宸赫<sup>1,2</sup>, 王琳<sup>2</sup>, 赵天良<sup>1</sup>, 苏航<sup>3</sup>

(1. 南京信息工程大学气象灾害预报预警与评估协同创新中心/中国气象局气溶胶与云降水重点实验室, 江苏南京 210044;

2. 江苏省农业气象重点实验室, 江苏南京 210044; 3. 沈阳中心气象台, 辽宁沈阳 110166)

**摘要:**利用国家农业气象试验站和国家基本气象站实测的冬小麦物候数据和气温数据,通过地理信息技术、5 日滑动平均法、相关性分析,探讨了 2003—2012 年我国冬小麦主要种植区内冬小麦返青期、拔节期、成熟期起始日期的时空分布特征及其对气温因素的响应。结果表明:近年来研究区域内冬小麦返青期、拔节期、成熟期起始日期在空间上自东南向西北逐渐推迟,在时间序列中返青期、拔节期、成熟期的发生时间主要呈延后趋势;农业界限温度初日自东南向西北逐渐推迟;农业界限温度的通过日期在西北地区呈提前趋势,在东部地区呈延后趋势;冬小麦物候期起始日期与农业界限温度初日呈极显著正相关,说明温度升高可以促进冬小麦生物过程进行,有利于冬小麦拔节期、成熟期等生育期发生,从而导致冬小麦物候期提前发生。

**关键词:**冬小麦;物候期;时空特征;气温因素;相关分析

**中图分类号:**S162.5 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-1302(2016)04-0448-05

植物物候是指植物受到气候和其他环境因子的影响而出现的具有一定周期的自然现象,包括发芽、展叶、开花、叶变色、落叶等<sup>[1]</sup>,是植物通过长期适应环境的季节性变化而形成的生长发育节律<sup>[2]</sup>。植物物候学实质上是研究植物生长发育与环境条件之间关系的科学<sup>[3]</sup>。在影响植物物候期的

众多因子中,气候是最主要、最活跃的因子<sup>[4]</sup>。物候期是作物对气候变化的响应信号之一。

2014 年联合国政府间气候变化专门委员会(IPCC)报告指出,1880—2012 年全球地表平均温度约升高 0.85℃,我国气温升高 0.91℃。自 1986 年以来,我国已经连续出现 19 个全国范围的暖冬<sup>[5]</sup>。赵宗慈对我国近 40 年来气温变化的研究指出,我国有明显变暖趋势,春季平均增温 0.34℃<sup>[6]</sup>。陈隆勋等研究发现,华北地区是我国变暖最明显的地区<sup>[7]</sup>。施雅风通过模拟我国变暖趋势认为,到 2050 年我国北方地区升温 1.5~2.0℃<sup>[8]</sup>。气候变暖导致生态环境改变,对农作物的熟制、布局、种植结构都产生较大影响,对农业生产可持续发展的负面影响逐渐显露<sup>[9-10]</sup>。

收稿日期:2015-03-29

基金项目:国家科技支撑计划(编号:2014BAC22B04);南京信息工程大学人才启动基金(编号:20110304)。

作者简介:张宸赫(1992—),男,辽宁抚顺人,硕士研究生,主要从事大气环境和应用气象学研究。E-mail:zch2010xb@163.com。

通信作者:赵天良,教授,博士生导师,主要从事大气环境和气候变化研究。E-mail:josef\_zhao@126.com。

[17] Czaczky K, Myszk K. Biosynthesis of extracellular polymeric substances (EPS) and its role in microbial biofilm formation[J]. Polish Journal of Environmental Studies, 2007, 16(6): 799-806.

[18] Johnsen A R, Karlson U. Evaluation of bacterial strategies to promote the bioavailability of polycyclic aromatic hydrocarbons[J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2004, 63(4): 452-459.

[19] Seo Y, Lee W H, Sorial G, et al. The application of a mulch biofilm barrier for surfactant enhanced polycyclic aromatic hydrocarbon bioremediation[J]. Environmental Pollution, 2009, 157(1): 95-101.

[20] Zhou Z, Sun H, Zhang W. Desorption of polycyclic aromatic hydrocarbons from aged and unaged charcoals with and without modification of humic acids[J]. Environmental Pollution, 2010, 158(5): 1916-1921.

[21] Busscher H J, van der Mei H C. Initial adhesion events: mechanisms and implications[M]//Allison D G, Gilbert P, Lappin-Scott H M, et al. Community structure and cooperation in biofilms. Cambridge: Cambridge University Press, 2000, 59: 25-36.

[22] Mayer C, Moritz R, Kirschner C, et al. The role of intermolecular interactions; studies on model systems for bacterial biofilms[J]. Inter-

national Journal of Biological Macromolecules, 1999, 26(1): 3-16.

[23] Morgan J W, Forster C F, Evison L. A comparative study of the nature of biopolymers extracted from anaerobic and activated sludges[J]. Water Research, 1990, 24(6): 743-750.

[24] Zhang Y, Wang F, Yang X, et al. Extracellular polymeric substances enhanced mass transfer of polycyclic aromatic hydrocarbons in the two-liquid-phase system for biodegradation[J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2011, 90(3): 1063-1071.

[25] 刘虹, 刘娜, 毕白云, 等. 糖脂类生物表面活性剂去除污染含水层中石油烃的研究[J]. 环境污染与防治, 2015, 37(5): 6-10.

[26] 赵东维. 生物表面活性剂产生菌对石油的降解及对石油烃的增溶作用研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2013: 38-45.

[27] Wilén B M, Jin B, Lant P. The influence of key chemical constituents in activated sludge on surface and flocculating properties[J]. Water Research, 2003, 37(9): 2127-2139.

[28] 彭青, 侯冰, 姚芬, 等. pH 值、温度、底物浓度对 L1 型金属  $\beta$ -内酰胺酶活性的影响[J]. 中国抗生素杂志, 2010, 35(1): 69-71, 76.

全球气候变暖背景下,农业生产受到影响。冬小麦是我国主要粮食作物之一,约占我国小麦总产量的 90%。冬小麦生育期长度会影响冬小麦产量与麦粒品质,这关系到冬小麦种植者的收入情况与国家相关粮食政策。冬小麦耐寒性较强,一般在 9 月中下旬至 10 月上旬播种,在晚秋、早春低温条件下生长发育,在次年初夏较高温度下灌浆成熟<sup>[11]</sup>,全生育期 8 个月左右<sup>[12]</sup>。冬小麦各物候期受温度影响最大。因此,研究近年来我国冬小麦主要种植区物候期的时空变化规律及其对气温变化的响应,有利于认知和适应气候变化,有利于充分利用气候和农业资源,从而为适时调整相应农事活动提供决策依据<sup>[13]</sup>。

近年来,国内外学者就作物生长发育、农业界限温度变化及二者间的关系做了大量研究工作<sup>[11,14-17]</sup>,其中有关冬小麦物候期与气温关系的研究也取得了很多成果。王胜等对 1961—2012 年安徽省冬小麦物候期的研究指出,淮北地区冬小麦物候期普遍提前,全生育期缩短,但各物候期空间变化趋势差异较大<sup>[13]</sup>。高强等对甘肃省天水地区冬小麦生长对气候变暖的响应研究指出,1980 年以来天水地区冬小麦返青期延迟,气温升高使冬小麦全生育期变短<sup>[18]</sup>。但以往研究大多是在某个省或一部分站点所做的小范围讨论,未能在大空间范围内对冬小麦物候期变化进行空间分布差异讨论。本研究利用地理信息技术,将我国冬小麦主要种植区作为完整的空间区块考虑,研究冬小麦物候期的空间分布情况,以期得出冬小麦物候期在整个研究区内的分布差异状况和变化趋势。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区域

本研究选择的研究区域是我国冬小麦主要种植区,处于 30°~35°N、103°~120°E,包括江苏、安徽、河南、湖北、陕西、宁夏、甘肃等 7 个省(区),地跨长江、黄河流域,地势西高东低;大部分地区属于温带季风气候,是北亚热带和南暖温带的过渡区,南北冷暖气团交锋频繁<sup>[13]</sup>,冬季干燥寒冷,夏季高温多雨,春季易发干旱;年平均温度 8~13℃。

### 1.2 数据来源

本研究采用的冬小麦物候期数据来自研究区域内中国气象局各农业气象试验站 2003—2012 年的实测记录。本研究选取了冬小麦 3 个处于生殖生长阶段的物候期作为研究对象,分别为返青期(G1)、拔节期(G2)、成熟期(G3)。这 3 个物候期出现在越冬后的春季,其发生时间会影响冬小麦组织生长和籽粒形成等生物过程,对冬小麦产量具有重要影响。为保证本研究的客观性,选取生育状态为普遍期的首日作为生育期的起始日期。为衡量物候期出现的先后状况,将冬小麦物候日期转换为距离同年 1 月 1 日的日期序数(以下简称日序)( $G_i$ )<sup>[19]</sup>。

当前对于冬小麦物候与气温之间关系的研究,主要采用平均气温或积温等指标来表征气温水平。本研究采用的是农业界限温度,农业界限温度初日、终日是其稳定通过某一温度的日期,应用该日期与物候期起始日期相比较可使结果更加直观。

本研究使用的电子行政区划图来源于国家基础地理信息系统。使用的气象数据下载于中国气象局网站,包括 2003—

2012 年研究区域内各基本气象站当年逐日平均气温数据。利用日平均气温数据可以计算出农业界限温度稳定通过 5℃ 的初日日期(D5)和农业界限温度稳定通过 10℃ 的初日日期(D10)。

### 1.3 数据处理与方法

本研究使用的数据处理软件包括 ArcGIS 10.1、Matlab 8.0、Excel 2003 软件。数据处理分为 3 部分:冬小麦物候期数据处理;农业界限温度数据处理;相关性分析。

1.3.1 冬小麦物候期数据处理 首先利用 Excel 2003 软件,将物候期起始日期换算成日序( $G_i$ ),并为各站点添加经度、纬度坐标。然后利用 ArcGIS 10.1 软件对物候期日序( $G_i$ )进行 UTM(universal transverse mercator)投影,并用边界图对  $G_i$  进行剪切提取和插值分析<sup>[20]</sup>,得到栅格图。最后使用 ArcGIS 10.1 软件中的栅格计算器将 2003—2012 年的  $G_i$  图像进行叠加计算,得到多年平均  $G_i$  空间分布图。

为了分析冬小麦物候期起始日期 10 年间的空间变化特征,对每年的  $G_i$  值与年份进行一元线性回归分析,即可模拟出  $G_i$  值的变化趋势,获得其在 10 年间的变化斜率( $\theta$ ),计算公式为<sup>[21]</sup>:

$$\theta = \frac{n \times \sum_{i=1}^n i \times G_i - \sum_{i=1}^n i \sum_{i=1}^n G_i}{n \times \sum_{i=1}^n i^2 - [\sum_{i=1}^n i]^2} \quad (1)$$

式中: $n$  为观测时间段的年数; $i$  为观测年份。如果  $\theta$  大于 0,  $G_i$  值为增加趋势,即物候期延迟;反之  $G_i$  值呈减小趋势,即物候期提前。若  $\theta$  通过 0.05 的显著水平,则认为  $G_i$  值的变化趋势显著,若  $\theta$  通过 0.01 的显著水平,则认为  $G_i$  值的变化极显著。

在 ArcGIS 10.1 中利用(1)式可得到相关系数  $\theta$  的空间分布图。在所有栅格图中,将每个栅格内的值利用相关性表格中的值进行分类,从而区分变化趋势的显著性。

1.3.2 农业界限温度数据处理 农业界限温度初日的处理方法选取了目前国内广泛使用的 5 日滑动平均法。利用 Matlab 8.0 软件得到各年的农业界限温度稳定通过 5℃ 的日期(D5)和农业界限温度稳定通过 10℃ 的日期(D10)的数据。上述农业界限温度数据也要在 ArcGIS 10.1 软件进行投影变换和差值分析等处理,从而得到研究区域内农业界限温度的空间分布图和变化趋势图。数据处理方式与冬小麦物候期数数据处理方式相同。

1.3.3 相关性分析 利用 ArcGIS 10.1 软件中的“Band Collection Statistics”模块,将冬小麦物候期 10 年平均起始日期空间分布图与 10 年平均农业界限温度初日空间分布图进行空间相关分析,算出各物候期多年平均物候期起始日期与农业界限温度初日的相关系数,并标记出相关性通过 0.05、0.01 显著性水平检验的数据,从而判断冬小麦物候起始日期与农业界限温度初日的相关水平。

## 2 结果与分析

### 2.1 农业界限温度及其变化趋势的空间分布规律

利用 ArcGIS 10.1 软件得到研究区域内 2003—2012 年农业界限温度 5、10℃ 初日的空间分布图(图 1)和 2003—2012 年农业界限温度 5、10℃ 初日的变化趋势图(图 2)。从图 1、

图 2 可见,2003—2012 年农业界限温度初日自东南向西北方向逐渐推迟,即西北地区农业界限温度初日较晚。这种分布差异是因为西北地区纬度较高,春季温度回暖比东部地区慢,造成该地区农业界限温度初日出现较晚。就变化趋势而言,

5℃ 初日在甘肃、宁夏、陕西地区显著提前;在江苏、安徽、河南、湖北地区延后。10℃ 初日在甘肃、宁夏地区提前;在江苏、安徽、河南、湖北、陕西地区延后,其中在河南部分地区显著延后。

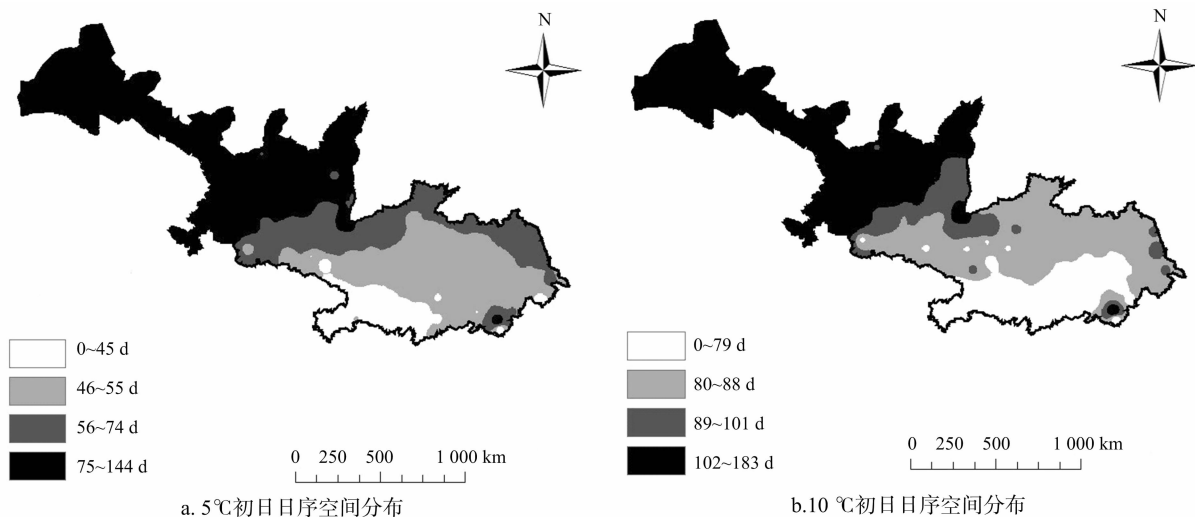


图1 2003—2012年研究区平均农业界限温度5、10℃初日日序空间分布

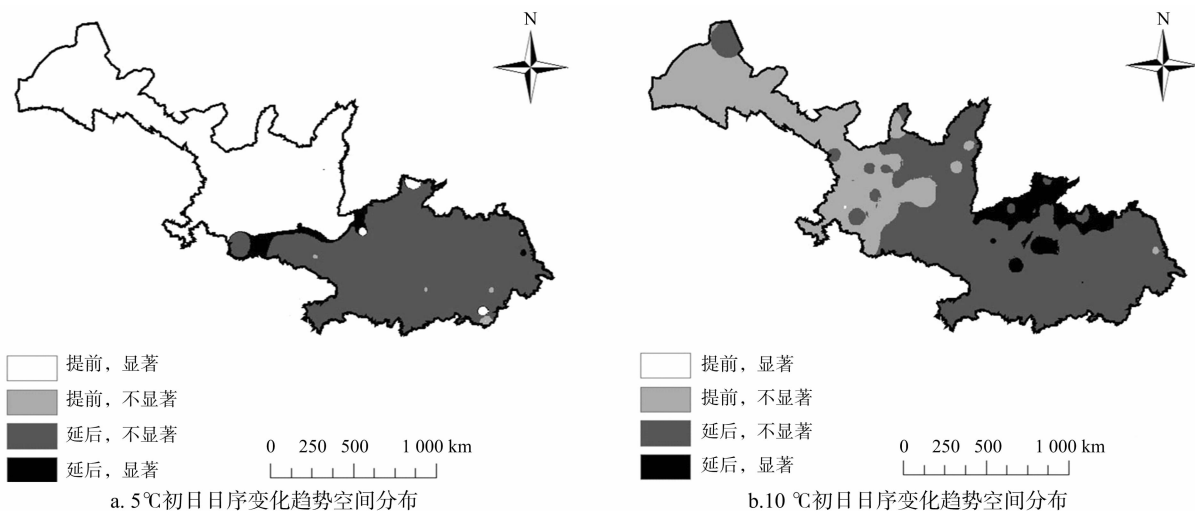


图2 2003—2012年研究区农业界限温度5、10℃初日日序变化趋势空间分布

总体来说,2003—2012 年农业界限温度初日在西北地区呈提前趋势。有研究指出,我国气候变暖最明显的地区是西北、华北、东北地区,其中西北地区(陕西省、甘肃省、宁夏)变暖的强度高于全国平均值,甘肃省黄土高原地区是受气候变暖影响比较明显的地区<sup>[22]</sup>。近 10 年西北地区升温趋势明显,导致该地区农业界限温度初日提前,这与本研究结果一致。东部地区农业界限温度初日呈延后趋势,但大部分地区没有达到显著水平,有研究指出近年来湖北地区和淮河流域春季气温升高幅度较大,农业界限温度初日提前<sup>[23-24]</sup>。造成该结论与本研究结论不同的原因可能是本研究采用的时间序列为 2003—2012 年,而上述对湖北地区与淮河流域的研究采用的时间序列为 20 世纪 60 年代至 21 世纪初,时间序列不同可能对农业界限温度变化趋势产生影响。

## 2.2 冬小麦物候期的空间分布

由图 3 可见,2003—2012 年研究区域冬小麦返青期、拔

节期、成熟期起始日期的空间分布特征基本一致,由东南地区向西北地区逐渐推迟。甘肃、宁夏及陕西西部地区为日序高值区;江苏、安徽、湖北和陕西南部地区为日序低值区。黄敬峰等认为,纬度愈高,海拔愈高,春季返青等物候期愈晚<sup>[25]</sup>。本研究中西北地区纬度、海拔均高于东部地区,冬小麦物候期起始时间也显示出“东南早,西北晚”的特征。

对返青期而言,在甘肃、宁夏、陕北地区,其起始日期大多迟于第 60 天;在陕西南部、湖北直至江苏等东部地区,返青期起始日期介于第 20~60 天;在东部地区,受纬度影响,季风活动频繁且距离海洋较近,春季温度回升较早,农业界限温度通过日期也较早,造成该地区冬小麦返青期较早发生,从而使返青期起始日期与西北地区存在差异。

对拔节期而言,在江苏、安徽、湖北 3 省的南部地区,其起始日期一般在第 80 天前,在其他地区都要明显晚于这个时间,介于第 80~140 天。造成这种现象的原因可能是江苏、安徽、

湖北 3 省南部地区处于长江流域,该区域热量条件优于北方地区,年内正积温较高且持续时间长,导致物候期开始较早。

成熟期起始日期在安徽省西部、河南省南部、陕西省南部和湖北地区都介于第 90~150 天,其他地区的成熟期发生均晚于第 150 天。这种分布差异可能是因为深处内陆的地区受

季风影响较弱,当地气温与受季风影响强烈的东部、西北地区存在差异,从而导致物候期起始日期的分布不同。

综上所述,由于气候随纬度、经度和海拔变化而存在的规律性变化,导致物候现象随纬度、经度和海拔的变化具有相同的推移性、规律性特点<sup>[4]</sup>。

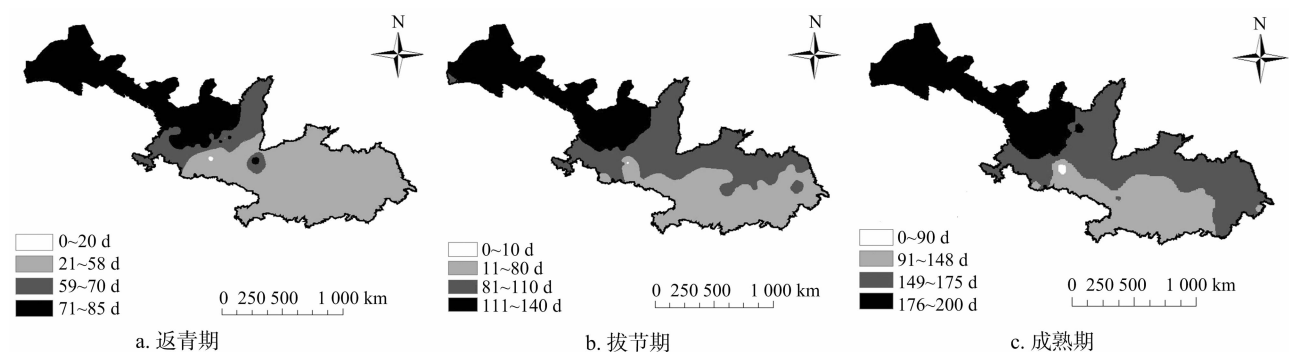


图3 2003—2012年研究区冬小麦返青期、拔节期、成熟期平均起始日期空间分布

### 2.3 冬小麦物候期的时间变化趋势

将 2003—2012 年冬小麦物候期起始日期数据代入公式(1),得到冬小麦各生育期起始日期随时间变化趋势的空间分布(图 4)。从图 4 可见,冬小麦不同物候期随时间变化趋势的空间分布差异较大,返青期在整个研究区域内的 90% 以上地区呈延后趋势。拔节期只有在甘肃西南部分地区呈提前趋势,其他大部分地区都是延后的。成熟期在甘肃地区和安徽省中部地区、湖北省东部地区的小部分地区呈提前趋势,其他地区都是延后的。

本研究所得的冬小麦物候期起始日期变化趋势与前人研究结果基本一致。林文等研究表明,陕西地区冬小麦返青期呈延后趋势<sup>[26]</sup>。有研究表明,春季平均温度升高时,土壤水分含量显著变化,这不利于冬小麦的正常返青<sup>[18]</sup>。李德等对安徽省宿州地区冬小麦物候期的研究得出,近年来受早播保苗观念影响,当地常在传统播期日限的前期甚至提早到上限之前播种,导致拔节期等物候期提早发生<sup>[27]</sup>。宁夏地区冬小麦拔节期呈延后趋势,甘肃地区冬小麦成熟期呈提前趋势,这与高强等<sup>[18]</sup>、王鹤龄等<sup>[28-29]</sup>的研究结果一致。

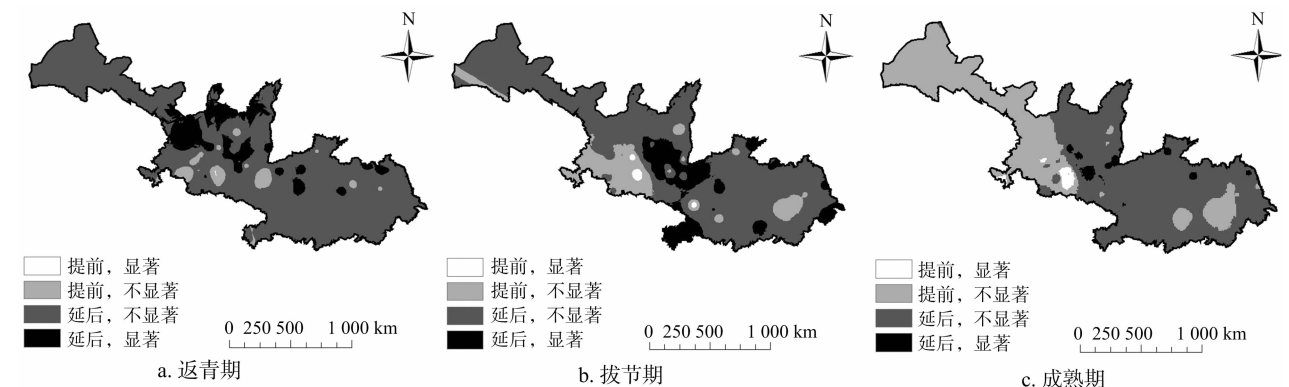


图4 2003—2012年研究区冬小麦返青期、拔节期、成熟期起始日期变化趋势空间分布

### 2.4 冬小麦物候期对农业界限温度因子的相关分析

如表 1 所示,研究区域内冬小麦返青期、拔节期、成熟期起始日期的空间分布与农业界限温度初日的空间分布均达到 0.01 显著性水平,表明 2003—2012 年间研究区域内冬小麦物候期起始日期与农业界限温度初日在空间分布上存在很好的相关性,冬小麦物候期的发生受到温度条件限制。

拔节期、成熟期等物候期须要在光合作用基础上进行。进入春季后日照增多,光合作用时间延长,有利于有机物质形成,使小麦生长加快,物候期提前发生<sup>[13]</sup>。物候期的发生实质上是植物生理活动,植物生理活动在微观上就是一系列生化反应。温度可以使酶的活性发生变化,温度升高可促进酶的活性,有利于加快植物物候期发生。在一定范围内,温度升高有利于光合作用进行,从而促进冬小麦抽穗、灌浆、乳熟的提前进行。温度升高,农业界限温度通过日期也就提前。因

此,冬小麦物候期与气温状况息息相关,各种物候期的开始日期与其前期气温之间有显著相关性<sup>[3]</sup>。

在一定范围内,温度升高对冬小麦生长具有促进作用,若温度过高,冬小麦物候期的发生可能会受到抑制。西北地区冬季气温有升高趋势<sup>[5]</sup>,而冬季温度升高会对冬小麦的春化及后期生长造成干扰,就会导致拔节期在一定程度延迟发生。研究表明,春季平均温度升高时,土壤水分显著变化,这不利于冬小麦正常返青<sup>[18]</sup>。

对比冬小麦物候期空间分布图与农业界限温度初日空间分布图,可以发现物候期起始日期梯度等值线与农业界限温度初日梯度等值线出现的位置与走向呈相同特征。这就说明,冬小麦物候期与农业界限温度具有较好的相关性。农业界限温度分布受经度、纬度、海拔、地形等自然因素影响。在研究区域内,从西北向东南存在自然条件梯度,这种差异就导

致温度在西北至东南走向存在梯度,并反映在农业界限温度的空间分布上,而温度分布的梯度也影响了冬小麦各物候期起始日期的空间分布。

表 1 2003—2012 年研究区冬小麦平均物候期起始日期与农业界限温度初日空间相关系数

物候期	相关系数	
	农业界限温度 5 ℃	农业界限温度 10 ℃
返青期	0.83 **	0.77 **
拔节期	0.89 **	0.80 **
成熟期	0.83 **	0.76 **

注:“ \*\* ”表示在 0.01 水平上显著。

3 结论与讨论

利用 ArcGIS 10.1、Matlab 8.0、Excel 2003 等软件,分析了 2003—2012 年我国冬小麦主要种植区各物候期起始日期的时空变化特征及其对农业界限温度因素的响应规律。结果表明:(1)在冬小麦主要种植区,农业界限温度初日自东南地区向西北地区逐渐推迟。西北地区农业界限温度初日呈提前趋势,东部地区农业界限温度初日呈延后趋势。(2)在冬小麦主要种植区,冬小麦返青期、拔节期、成熟期起始日期日序自东南地区向西北地区逐渐推迟,高纬度、低温地区日序大于低纬度、高温地区。返青期发生时间呈延后趋势;拔节期发生时间除在甘肃省南部地区呈提前趋势外,其他地区均呈延后趋势;成熟期发生时间只在甘肃地区呈提前趋势,其他地区均呈延后趋势。(3)冬小麦物候期起始日期与农业界限温度初日呈极显著正相关。春季温度升高,农业界限温度的通过日期提前,可以促进冬小麦生物过程,有利于冬小麦拔节期、成熟期等生育期发生,从而导致冬小麦物候期提前。但温度过高会抑制冬小麦生长,特别是冬季温度升高带来了正积温不利于冬小麦在春季进行返青生长,物候期可能延后发生。

冬小麦物候期除受气候因素影响外,还受土壤类型、作物品种、农业管理措施诸多因素的影响,这就可能导致相关研究在时空变化上存在一定差异。将上述因素进行综合分析值得进一步研究。此外,由于受到数据完整性的限制,本研究使用了近 10 年的物候期数据,若今后能够统一农作物物候期的观测规范以得到更多年份的完整数据,可使相关研究更为深入。

参考文献:

[1]陆佩玲,于强,贺庆棠. 植物物候对气候变化的响应[J]. 生态学报,2006,26(3):923-929.

[2]张学霞,葛全胜,郑景云. 北京地区气候变化和植被的关系——基于遥感数据和物候资料的分析[J]. 植物生态学报,2004,28(4):499-506.

[3]王小兰. 兰州市区 16 种树木春季物候期观测[J]. 甘肃林业科技,2005,31(3):74-75.

[4]王连喜,陈怀亮,李琪,等. 植物物候与气候研究进展[J]. 生态学报,2010,20(2):447-454.

[5]蒲金涌,姚玉璧,马鹏里,等. 甘肃省冬小麦生长发育对暖冬现象的响应[J]. 应用生态学报,2007,18(6):1237-1241.

[6]赵宗慈. 近 39 年中国的气温变化与城市化影响[J]. 气象,1991,17(4):14-17.

[7]陈隆勋,朱文琴,王文,等. 中国近 45 年来气候变化的研究

[J]. 气象学报,1998,56(3):2-16.

[8]施雅风. 全球和中国变暖特征及未来趋势[J]. 自然灾害学报,1996,5(2):5-14.

[9]秦大河,丁一汇,王绍武,等. 中国西部环境演变及其影响研究[J]. 地学前缘,2002,9(2):321-328.

[10]张厚垣. 中国种植制度对全球气候变化响应的有关问题 I. 气候变化对我国种植制度的影响[J]. 中国农业气象,2000,21(1):9-13.

[11]刘波. 陇东冬小麦的气象条件分析[J]. 甘肃农业,2004(10):121.

[12]侯颖. 豫东冬小麦物候期及其对气候变化的响应[J]. 贵州农业科学,2013,41(9):153-157.

[13]王胜,徐敏,宋阿伟,等. 1961—2012 年安徽省 24 节气气候变化及冬小麦和一季稻物候期的响应[J]. 生态学杂志,2013,32(9):2390-2397.

[14]刘德祥,董安祥,邓振镛. 中国西北地区气候变暖对农业的影响[J]. 自然资源学报,2005,20(1):119-125.

[15]林而达,杨修. 气候变化对农业的影响评价及适应对策[C]//气候变化与生态环境研讨会文集. 北京:气象出版社,2003:72-77.

[16]Chmielewski F M,Müller A,Bruns E. Climate changes and trends in phenology of fruit trees and field crops in Germany, 1961—2000[J]. Agricultural and Forest Meteorology,2004,121(1/2):69-78.

[17]宋水华,宋良变. 界限温度初终日期的确定及意义[J]. 沙漠与绿洲气象,2009,3(增刊 1):113-114.

[18]高 强,赵国良,姚小英,等. 天水市冬小麦生长对气候变暖的响应[J]. 干旱地区农业研究,2012,30(1):258-264.

[19]李 德. 近 30 年淮北平原冬小麦物候期演变特征[J]. 气象科技,2009,37(5):607-612.

[20]李正国,杨 鹏,唐华俊,等. 气候变化背景下东北三省主要作物典型物候期变化趋势分析[J]. 中国农业科学,2011,44(20):4180-4189.

[21]王 琳,景元书,李 琨. 江苏省植被 NPP 时空特征及气候因素的影响[J]. 生态环境学报,2010,19(11):2529-2533.

[22]丁一汇,孙 颖,徐 影. 中国近 50 年和未来 50 年气候变化[C]//气候变化与生态环境研讨会论文集. 北京:气象出版社,2003:57.

[23]刘志雄,陈正洪,万素琴. 湖北省近 45 年≥10 ℃界限温度的变化特征分析[J]. 湖北农业科学,2010,49(6):1349-1352.

[24]高 超,姜 彤,翟建青. 过去(1958—2007)和未来(2011—2060)50 年淮河流域气候变化趋势分析[J]. 中国农业气象,2012,33(1):8-17.

[25]黄敬峰,王秀珍,蔡承侠. 新疆冬小麦物候与气候条件研究[J]. 中国农业气象,2000,21(1):14-19.

[26]林 文,同延安,杨宪龙,等. 陕西冬小麦物候期对气候特征响应研究[J]. 干旱区资源与环境,2013,27(8):59-64.

[27]李 德,杨太明,张学贤. 气候变暖背景下宿州冬小麦适播期的确定[J]. 中国农业气象,2012,33(2):254-258.

[28]王鹤龄,王润元,赵 鸿,等. 中国西北冬小麦和棉花生长对气候变暖的响应[J]. 干旱地区农业研究,2009,27(1):258-264.

[29]王鹤龄,王润元,张 强,等. 甘肃省旱作区越冬作物对气候暖干化的响应及其原因研究[J]. 冰川冻土,2011,33(5):1040-1045.