

气候变化背景下华北地区冬小麦生育期的变化特征

杨建莹^{1,2} 梅旭荣^{1,2*} 刘勤^{1,2} 严昌荣^{1,2} 何文清^{1,2} 刘恩科^{1,2} 刘爽^{1,2}

¹中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所, 北京, 100081; ²农业部旱作节水农业重点开放实验室, 北京, 100081

摘要 以21世纪初近10年的冬小麦(*Triticum aestivum*)生育期调研数据和气象站点数据为基础, 利用“多元逐步回归分析+残差插值”方法, 绘制了2000年后华北地区冬小麦生育期等值线图, 通过研究两个时期(1971–1980年和21世纪初近10年)华北地区气候资源及冬小麦生育期的变化, 探讨了气候变化对华北地区冬小麦生育期的影响。结果表明: (1)华北地区北部年均气温及 ≥ 10 °C积温增加显著, 但降水减少, 暖干趋势明显, 中部和南部年平均气温和 ≥ 10 °C积温也呈现增加趋势, 但降水增多, 日照下降, 出现暖湿趋势; (2)除南部江苏、安徽两省冬小麦播种期无明显变化外, 华北地区冬小麦播种期普遍推迟, 一般在7–10天; 冬小麦返青期变化较为复杂, 西部地区的冬小麦返青期推迟2–10天, 而东南部的山东、安徽及江苏地区冬小麦返青期明显提前, 一般在5–7天; 华北地区冬小麦的拔节期提前, 北部地区幅度较大, 为5–10天; 冬小麦抽穗期推迟明显, 以华北中部和北部最为明显, 为10–15天; 除华北南部胶东半岛外, 华北大部分地区冬小麦成熟期推迟, 一般在5–10天; (3)气候要素的波动是引起华北地区冬小麦生育期变化的主要原因: 日照时数与冬小麦返青期和拔节期呈显著相关, 日照时数减少, 冬小麦返青期和拔节期提前, 而受年平均气温升高的影响, 冬小麦抽穗期有所推迟, 积温的增加对冬小麦成熟期有推迟作用, 同时降水对冬小麦生长的拔节和抽穗有促进作用。

关键词 气候变化, 生育期, 华北地区, 冬小麦

Variations of winter wheat growth stages under climate changes in northern China

YANG Jian-Ying^{1,2}, MEI Xu-Rong^{1,2*}, LIU Qin^{1,2}, YAN Chang-Rong^{1,2}, HE Wen-Qing^{1,2}, LIU En-Ke^{1,2}, and LIU Shuang^{1,2}

¹Institute of Environment and Sustainable Development in Agriculture, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China; and ²Key Laboratory of Dry Land Agriculture, Ministry of Agriculture, Beijing 100081

Abstract

Aims Climate change is generally accepted to be a critical problem. It affects crop growth stages through changes in sunlight, heat and moisture. Our objective is to investigate the development of winter wheat growth stages under climate changes in northern China to determine possible causes of changes.

Methods Based on data of winter wheat growth stages and meteorology, we used multiple stepwise regression + residual interpolation to determine changes in winter wheat growth stages in northern China since 2000. Changes were investigated for two periods: 1971–1980 and after 2000.

Important findings The north part of northern China, including Beijing, Tianjin, Hebei and Shanxi Provinces, showed a significant warming and drying trend. In Henan and Shandong Provinces, temperature and precipitation had increased and sunlight had decreased. Jiangsu and Anhui Provinces also showed a trend of decreased sunlight and increased annual average temperature and accumulated temperature over 10 °C; however, the changes were small. Variations in climate cause changes in the growth stages of winter wheat. Compared to the 1970s, the sowing period had been delayed about 7–10 days after 2000 in most parts of northern China except Jiangsu and Anhui Provinces. The greening stage had advanced in the southeast, but was delayed in the northwest part of northern China. The jointing stage had advanced in northern China, especially in Beijing, Tianjin, Hebei, Shanxi and Shandong Provinces. It postponed the heading stage about 2–15 days. The harvesting stage had been postponed in most parts of northern China by 5–10 days. Variations in climate factors, mainly sunlight, temperature and precipitation, are the main influences on winter wheat growth stages. Greening and jointing stages showed significant correlations to annual average sunlight hours. An increase of annual average temperature more strongly affected the heading stage. An increase of accumulated temperature over 10 °C can postpone maturity of the stage. Precipitation can promote the stages of jointing and heading.

Key words climate change, growth stages, northern China, winter wheat

全球气候变化是人类迄今面临的重大环境问题,已成为国内外的研究热点(Houghton *et al.*, 1990, 1995; IPCC, 2001; 江志红等, 2008)。20世纪80年代以来,中国年平均气温明显增加,升幅为0.5–0.8 °C,北方升幅最高(李海涛等, 2003; 赵宗慈等, 2007)。对农业生产而言,气候变化通过改变农作物生长发育过程中光照、热量、水分的分配而影响其生产力,从而对作物生长、产量、农业布局和种植制度产生影响(Myneni *et al.*, 1997; 唐国平等, 2000; 王铮和郑一萍, 2001; 肖国举等, 2007)。20世纪80年代初,崔读昌等(1984)绘制了《中国主要农作物气候资源图集》,此后,随着气候变化的加剧,气候变化对作物生育期的影响引起广泛关注,许多学者在这方面作了大量的研究。一些学者利用作物模拟模型定量研究气候变化与作物生育期之间的关系,描述气候驱动与作物生育期之间的因果联系(Kramer, 1994; Maak & von Storch, 1997; Setiyono *et al.*, 2007; 韩小梅和申双和, 2008),但是,目前植物生育期在物候模型、生长模型和参数变量的获得等方面都有很多不确定性(裴顺祥等, 2009; 王连喜等, 2010);同时,遥感技术在作物生育期的研究和应用已取得许多进展,该方法适合大范围、快速监测作物的物候期(辛景峰等, 2001),但由于遥感数据精度验证的系统研究目前尚少见(李正国等, 2009),遥感技术应用于作物生育期的研究还需要进一步完善。随着农业和气象资料的逐渐完善,大多数学者采用了作物生育期调研方法或利用农业气象站点作物生育期资料,对作物生育对气候变化的响应作了相关研究,这种方法精确度高,可行性强(郑景云等, 2002; 张学霞等, 2005; 陆佩玲等, 2006),然而,目前我国在监测评估和预测气候引起作物物候变化方面的研究还不够充分,对大中尺度上气候因素变化对作物生育期的影响程度还需要进一步的研究。

华北地区是我国重要的农作物产区,粮食产量在全国粮食总产中的比重逐年增加,已由1998年的29.6%上升到2008年的38.9% (NBSC, 2009),同时,该地区也是我国受气候变化影响最大的地区之一,增温最快且范围最大,平均每10年增温0.6 °C,降水减少,干旱趋势加重(高歌等, 2003)。气候的变化对华北地区作物种植及生长都产生一定的影响。在

气候变化的情况下,对该地区主要作物冬小麦(*Triticum aestivum*)生育期变化特征进行研究,有助于增进对作物响应气候变化的理解,为准确评估作物生产力,指导农业生产、田间管理等提供依据。我们在1971–1980和21世纪初近10年两个时间阶段上,利用调研数据与气象资料相结合的方法,揭示气候变化下华北地区冬小麦生育期变化特征,并探讨气候因素的变化对小麦生育期的可能影响。

1 资料和方法

1.1 研究区概况

华北地区主要指长城沿线以南,淮河、秦岭和白龙江以北,黄土高原以东,汾河渭河以东地区,包括晋、冀、鲁、豫、京、津的全部和苏、皖等省(市)部分地区,共计587个县市(杨建莹等, 2010)。据统计,华北地区耕地面积约3.66亿亩,其中水田占3%,水浇地占54%,旱地占43%。年平均降水量500–800 mm,降水年变率高,季节分布不均,种植作物以一年两熟或两年三熟为主,是我国小麦、玉米(*Zea mays*)、棉花(*Gossypium hirsutum*)、花生(*Arachis hypogaea*)等优势农产品的主产区。

1.2 资料来源

本文采用的气象资料来源于国家气象局。从华北地区及周边筛选出120个具有2000–2009年完整观测序列的气象站点作为分析对象(华北地区内85个气象站点和华北地区周边35个气象站点)。数字高程模型(DEM)数据来自美国地质勘探局(USGS)生产的全球30 s数字高程模型(GTOPO30),其空间分辨率为30" (约1 km)。1971–1980年冬小麦生育期数据来源于崔读昌等(1984)《中国主要农作物气候资源图集》,2000–2009年生育期数据来源于对华北各县市的冬小麦生育期调研资料。

1.3 研究方法

1.3.1 数据收集整理

利用华北地区及周边120个气象站点2000–2009年的逐日降水量(mm)、平均气温(°C)、日照时数(h)以及经纬度和高程数据(DEM),采用Kriging插值方法获取研究区气候资源空间分布图(邵晓梅等, 2006; 刘勤等, 2009)。以调研的冬小麦种植县(市、区)的几何中心点为生育期空间栅格化的依据,借

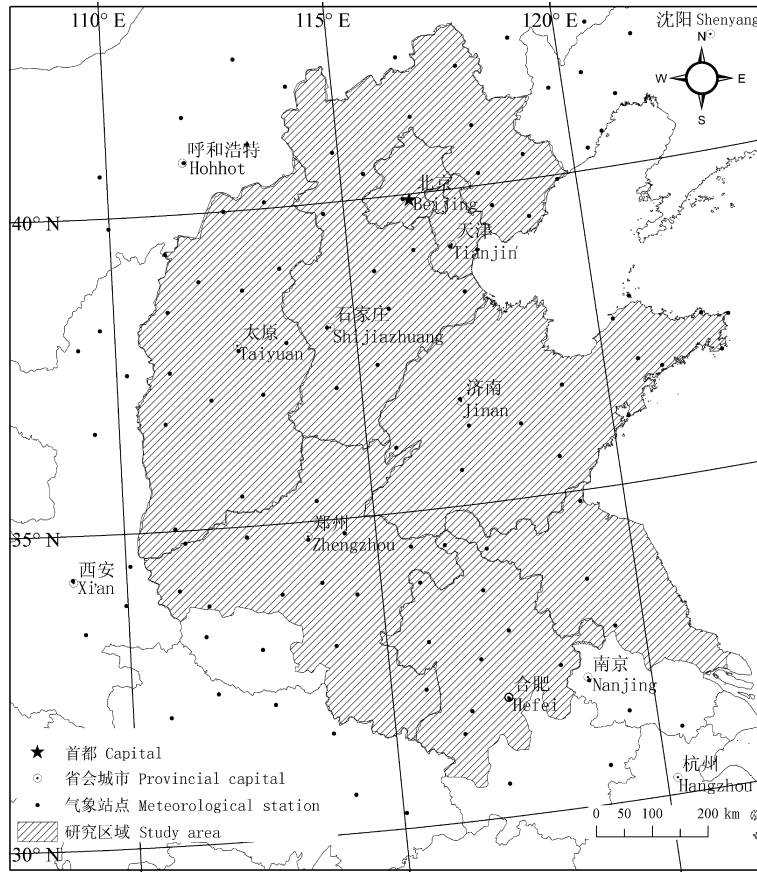


图1 华北地区气象站点分布图。
Fig. 1 Distribution of meteorological stations in and around Northern China.

助GIS工具获取这些点的DEM高度(顾卫等, 2002)、日照时数、年平均气温、 $\geq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 积温和年降水量。

1.3.2 生育期栅格化方法

回归分析是研究因变量(Y)和自变量(X)之间变动比例关系的一种方法。在实际研究中,影响因变量Y的因素可能有很多,而这些因素之间又可能存在多重共线性,利用多元逐步回归分析法,可以有效地从众多影响Y的因素中挑选出对Y贡献大的变量,在它们和Y的观测数据基础上建立“最优”的回归方程(唐启义和冯远光, 2007)。本文充分考虑各气候因子对冬小麦生育期的影响,在逐步回归分析的基础上对生育期进行栅格化。以冬小麦各生育期(Y)为因变量,对应点的经度(x_1)、纬度(x_2)、海拔高度(x_3)、日照时数(x_4)、年平均气温(x_5)、 $\geq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 积温(x_6)和降水量(x_7)为自变量进行多元逐步回归分析,获取计算研究区冬小麦各生育期(播种期 Y_1 、返青期 Y_2 、拔节期 Y_3 、抽穗期 Y_4 、收获期 Y_5)栅格面的代数

方程((1) – (5)式)。其中(1)、(3)、(4)式逐步回归方程极显著($p < 0.01$), (2)式和(5)式显著($p < 0.05$)。利用逐步回归方程进行模拟栅格面的输出,提取模拟栅格面上对应气象站点值,并对模拟值与真实值间的残差进行空间插值,运算得到相应的栅格数据(张燕卿等, 2009)。

$$Y_1 = 335.1319 - 1.4094 \times X_2 - 1.6189 \times X_5 + 0.0264 \times X_7$$

$$r = 0.83 \quad p = 0.0002 < 0.01 \quad (1)$$

$$Y_2 = 198.2297 - 1.6424 \times X_1 + 0.0105 \times X_3 + 0.0228 \times X_4$$

$$r = 0.84 \quad p = 0.0108 < 0.05 \quad (2)$$

$$Y_3 = 228.1108 - 1.2111 \times X_1 + 0.0188 \times X_4 + 3.2864 \times X_5 - 0.0171 \times X_6 - 0.0084 \times X_7$$

$$r = 0.8 \quad p = 0.0034 < 0.01 \quad (3)$$

$$Y_4 = -2.6614 + 3.3924 \times X_2 + 1.0584 \times X_5 - 0.0165 \times X_7$$

$$r = 0.91 \quad p = 0.0000 < 0.01 \quad (4)$$

$$Y_5 = 165.4556 - 1.2893 \times X_1 + 3.1917 \times X_2 + 0.0053 \times X_3 - 0.0062 \times X_6$$

$$r = 0.83 \quad p = 0.0145 < 0.05 \quad (5)$$

2 结果分析

2.1 华北地区农业气候资源变化特征

利用1971–1980年和21世纪初近10年两个阶段气候资源的变化情况,对华北地区农业气候资源的变化特征进行分析。通过两个时间阶段气候资源差值分布图(图2)可以看出,30年间华北地区气候资源发生了显著的变化:(1)与20世纪70年代相比,21世纪初近10年华北地区的年日照时数明显减少,减少幅度均在50 h以上,其中,华北中部地区,即北京、天津、河北南部、河南及山东地区下降剧烈,年日照时数减少在300 h以上,西北部的河北北部、山西以及华北南部的江苏、安徽等地年日照时数下降相对缓和,幅度在50–200 h之间;(2)年平均气温和 $\geq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 积温表现出相同的变化趋势,与20世纪70年代相比,年平均气温和年 $\geq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 积温都有所增加,华北地区北部和南部地区的年平均气温及 $\geq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 积温上升明显,其中河北北部、山西北部的年平均气温较70年代比上升幅度可达 $1.6\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\geq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 积温上升达 $500\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{a}^{-1}$,中部河南、山东及安徽北部地区热量资源的增加幅度较小,年平均气温升高在 $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下, $\geq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 积温上升幅度在 $350\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{a}^{-1}$ 以下;(3)与70年代相比,21世纪初近10年降水表现出明显的南部增多北部减少的趋势,北部北京、天津、山西、河北地区年降水量减少,最高减少 $75\text{ mm}\cdot\text{a}^{-1}$,而南部鲁、苏、皖地区年降水量增多,增加幅度可达 $75\text{ mm}\cdot\text{a}^{-1}$ 。

总体来说,华北地区北部北京、天津、河北、山西除日照时数有所下降外,主要的变化为年平均气温及 $\geq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 积温增加显著,但降水减少,表现出明显的暖干趋势。华北中部河南、山东两省日照下降剧烈,年平均气温和 $\geq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 积温增长幅度相对较小,降水增多。对于华北南部江苏、安徽两省来说,日照下降,温度和 $\geq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 积温增幅较大,降水增多。

2.2 1971–1980年和21世纪初近10年冬小麦生育期的变化

2.2.1 播种期的变化

除南部小部分地区外,华北地区冬小麦的播种期推迟,一般在7–10天。从播种期各等值线的变化情况上看,10月1日等值线变化跨度最大,原处于河北邯郸—山东济南一线,现北迁至石家庄—北京一线,北移了3–4个纬度。其次为10月11日等值线也由

原来的江苏北部北移至河南北部新乡—山东北部济南地区,约2个纬度。10月21日等值线变化最不明显。整个华北地区除安徽和江苏两省冬小麦播种期无明显变化外,其他各省冬小麦播种期都明显推迟,幅度为7–10天。

2.2.2 返青期的变化

21世纪初后,华北地区冬小麦返青期表现为西北部推迟,东南部提前。华北西北部的山西北部地区出现4月1日等值线。3月21日等值线和3月11日等值线在山西省有明显南移,其中3月21日等值线南移幅度较大,由原来的山西忻州地区南移至山西南部临汾地区,约2–3个纬度。这两条等值线在华北东北部地区没有明显变化。3月1日和2月21日等值线在华北西南部河南省内略有南移,但在华北东南部山东、安徽及江苏地区北移明显,幅度在1–3个纬度。与上世纪70年代相比,冬小麦返青期在华北西部山西和河南两省内表现出明显的推迟,推迟天数在2–10天,其中山西省内冬小麦返青期推迟严重,推迟天数在5天以上。华北东南部的山东、安徽及江苏地区冬小麦返青期明显提前,提前幅度为5–7天。

2.2.3 拔节期的变化

除华北西部小部分地区外,大部分地区冬小麦的拔节期提前。20世纪70年代,冬小麦拔节期4月16日等值线贯穿山西、河北、天津和北京,2000年之后迁移至山西地区。4月1日等值线在河南、河北两省出现南移,但在山东地区发生北移,由原来的山东临沂地区北移至济南地区,北移1–2个纬度。3月16日等值线整体北移,但幅度较小,北移小于1.5个纬度。华北大部分地区,包括北京、天津、河北、山西、山东、安徽、江苏七省市冬小麦的拔节期都有所提前,提前2–10天。其中北部省市提前幅度较大,为5–10天。华北西部河南省冬小麦拔节期推迟,但推迟幅度不大,为2–5天。

2.2.4 抽穗期的变化

华北地区冬小麦抽穗期明显推迟,各生育期等值线南移规律明显。5月21日、5月11日、5月1日、4月21日等值线都有所南移,跨度在1–2个纬度。各等值线在北京、天津、河北和山东等省市南移幅度较大。5月21日等值线原处于河北张家口一带,现南移至天津—石家庄一线;5月11日等值线在华北东部地区南移幅度最大,由石家庄—北京—天津一线

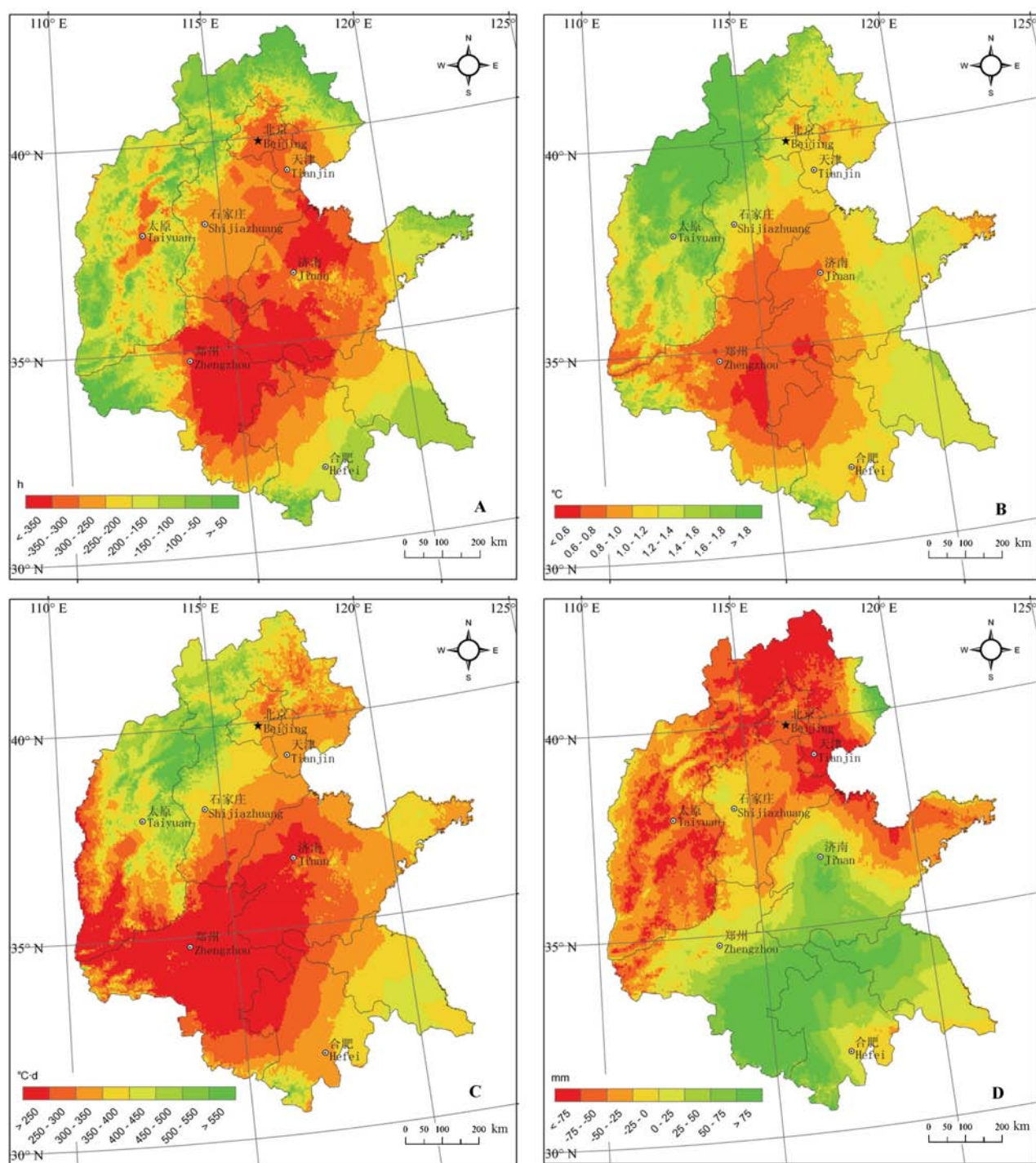


图2 华北地区气候资源的空间变化。A, 年日照时数的空间变化。B, 年平均气温的空间变化。C, 年 $\geq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 积温的空间变化。D, 年降水量的空间变化。

Fig. 2 Spatial variation of climate resource in Northern China. A, Spatial variation of annual average sunlit hours. B, Spatial variation of annual average temperature. C, Spatial variation of accumulated temperature over $10\text{ }^{\circ}\text{C}$. D, Spatial variation of annual precipitation.

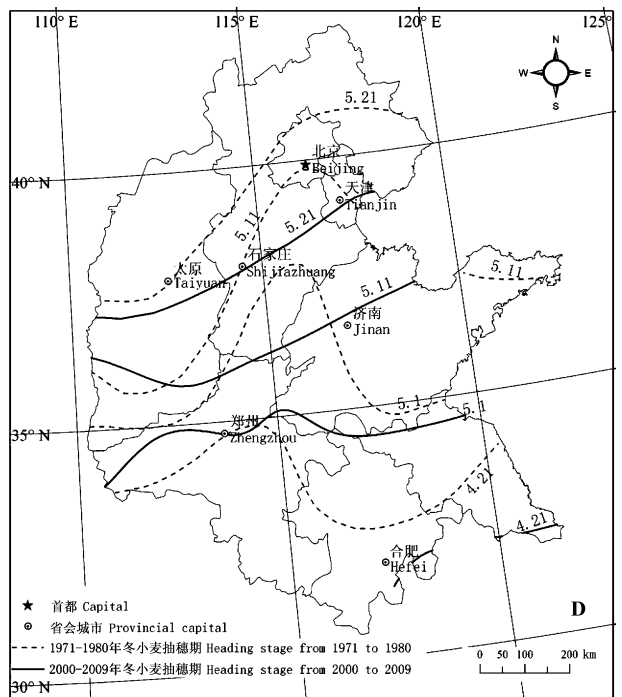
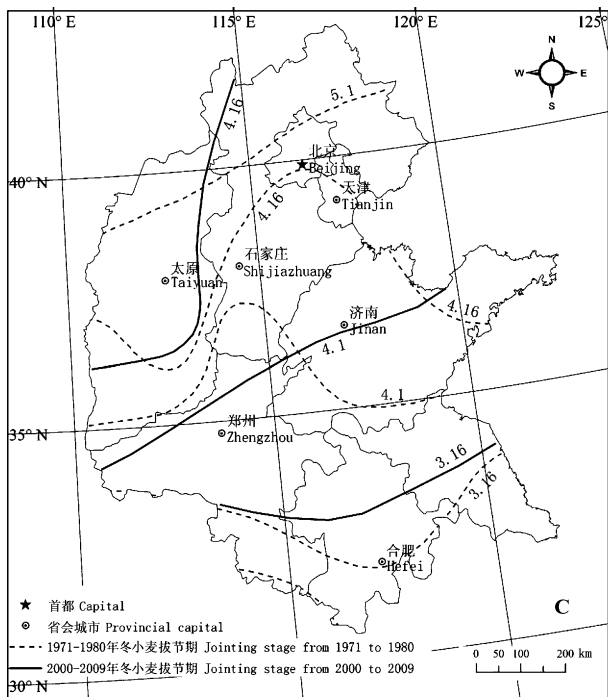
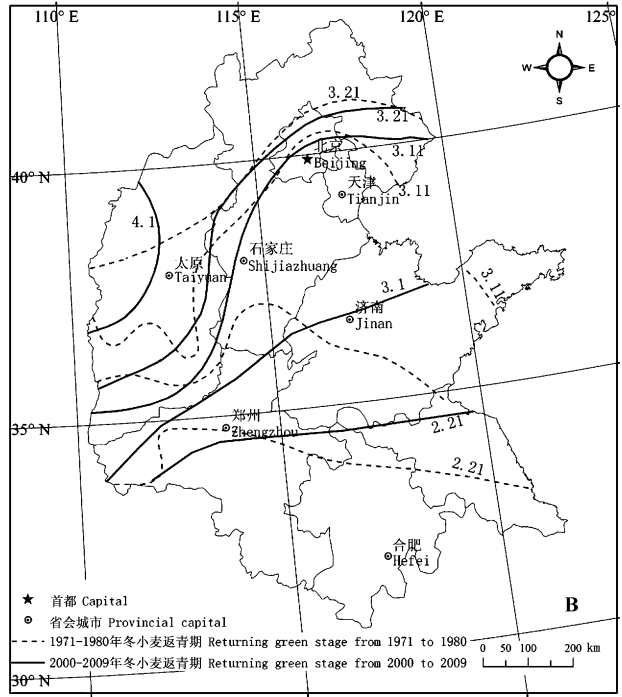
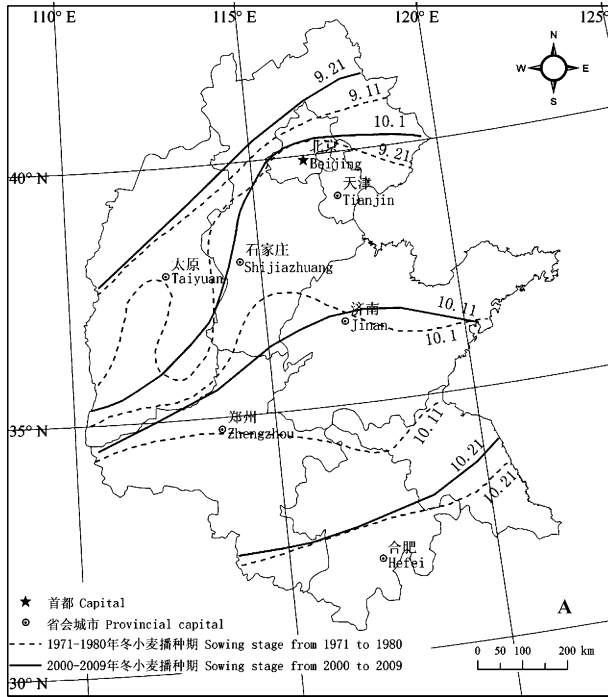
南移至山东。5月1日等值线由石家庄—济南地区南移至郑州。整个华北地区冬小麦抽穗期都明显推迟,

其中以华北中部和北部的河北、山东、河南三省冬小麦抽穗期向后推迟幅度最大, 为10–15天。

2.2.5 成熟期的变化

2000年后, 除南部江苏安徽两省外, 华北大部分地区冬小麦成熟期推迟。7月1日等值线与6月21日等值线变化相似, 均向南迁移约1个纬度。6月11日等值线原处于河南、河北两省的部分有明显南移, 南移约1.5个纬度。但在山东的东部胶东半岛地区, 6

月11日等值线北移1–2个纬度。6月1日等值线在安徽和江苏两省北移1–2个纬度。华北南部江苏、安徽两省及山东胶东半岛冬小麦的成熟期有所提前, 提前幅度2–5天。除这部分地区外, 华北地区, 包括北京、天津、河北、山西、河南、山东西部地区冬小麦成熟期均表现出明显推迟, 推迟5–10天。



3 讨论

影响物候的气候因素中,日照是一个重要因素,植物具有光敏色素,其生活史中许多阶段与光有关。缩短光照时间能促进短日照植物生长发育(Vergara & Chang, 1985; 徐雨晴等, 2004),对于冬小麦这种长日照植物来说,日照时数的变化主要影响冬小麦的返青期和拔节期。在关于华北地区冬小麦各生育期的研究中发现,日照时数与近10年的冬小麦返青日期和拔节日期相关,日照时数的减少对冬小麦返青期和拔节期的提前有正向作用。日照时数减少,则冬小麦的返青期和拔节期提前。可以认为,如果单纯考虑光照因素,年日照时数每减少100 h,返青期提前2.28天,拔节期提前1.88天。21世纪初的近10年与20世纪70年代相比,日照资源显著下降,尤其在华北中部和东部地区,日照资源的显著下降是东部冬小麦返青期和拔节期提前的一

个重要原因。

全球变暖使植物开始和结束生长的日期发生相应的变化,尽管这种变化的时间长度在不同物种、不同地区是不同的,但变化的倾向是相同的(裴顺祥等, 2009),而且不同季节的温度及温度变化对植物生育期的影响效果是不同的(张福春, 1995)。植物生长发育期的前期与气温之间有显著的相关性(Myking, 1997; 徐雨晴等, 2004; 张学霞等, 2005; 李荣平等, 2006),在不考虑其他因素影响的情况下,华北地区年平均气温每升高1 °C,冬小麦的播种期提前约2天。但是,本文的研究结果表明,21世纪初近10年冬小麦的播种期较20世纪70年代明显推迟,主要原因是受到了玉米生育期延长收获期推迟的影响(王石立等, 2003; 邓振镛等, 2007)。冬小麦的抽穗期,受年平均气温升高的影响有所推迟,尤其在华北的北部地区,21世纪初近10年华北北部地区年平均气温较20世纪70年代升高幅度较大,导致抽穗期在这部分地区推迟的幅度也较大。成熟期的变化主要与年≥10 °C积温有关,积温的增加对冬小麦成熟期有推迟作用,在不考虑其他因素的影响下,年≥10 °C积温每增加100 °C·a⁻¹,成熟期向后推迟约1天。21世纪初近10年华北地区年≥10 °C积温增加是导致大部分地区冬小麦成熟期推迟的主要原因。

水是影响植物物候期的另一重要气候因子,干旱会延缓植物的生长发育,使发育的物候期推迟,当干旱发生时,光、热条件再好,植物也不能利用,在这种情况下,水就成为影响植物生长发育的主要生态因子(Walker *et al.*, 1995; Cavender-Bares *et al.*, 2000; 陈效逵和张福春, 2001)。在一定光照条件下,改变空气湿度能引起植物物候变化,如24 h光照条件下,空气湿度增加,能稍微促进作物发育(Mortensen & Fjeld, 1998)。本文研究结果表明,降水对21世纪初近10年冬小麦生长的拔节期和抽穗期有促进作用,当光照和热量条件满足时,年降水量每增加100 mm,冬小麦的拔节期和抽穗期将分别提前0.84和1.65天。

冬小麦生育期的变化除了受到气候变化的影响外,还受到人为因素、社会因素及技术进步的影响,尤其是冬小麦品种的更新,地膜覆盖技术的应用等。由于这些因素无法实现定量化分析,本文在绘制21世纪初近10年华北地区冬小麦生育期等值

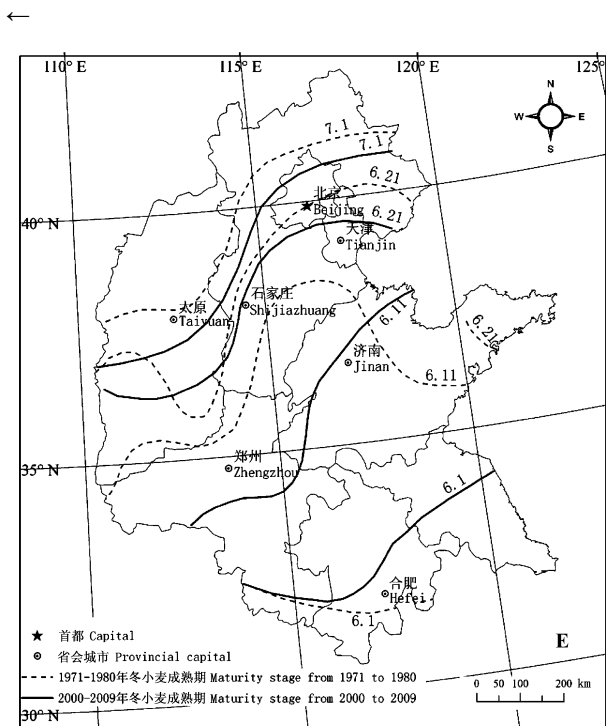


图3 华北地区冬小麦生育期变化对比(1971-1980/2000-2009)。A, 播种期变化对比。B, 返青期变化对比。C, 拔节期变化对比。D, 抽穗期变化对比。E, 成熟期变化对比。
 Fig. 3 Comparisons of changes in winter wheat growth steps in Northern China (between 1971 to 1980, and period after 2000). A, Comparisons of changes in sowing stage. B, Comparisons of changes in returning green stage. C, Comparisons of changes in jointing stage. D, Comparisons of changes in heading stage. E, Comparisons of changes in maturity.

线图时重点考虑了地理、气候因素对冬小麦生育期的影响,关于人为因素及技术进步对作物生育期的影响还需进一步研究。气候条件变化合理分区及区域尺度下作物生育期变化的影响因素分析也将是下一步研究的重点。

致谢 Globale Environmental Foundation (GEF)项目:农业综合开发适应气候变化项目课题研究、国家基础性工作专项“中国农业气候资源数字化图集编制”项目、“十二五”国家科技支撑课题、亚太地区气候变化与粮食安全项目和2010基本科研业务费(BSRF201006)项目资助。

参考文献

- Cavender-Bares J, Potts M, Zacharias E, Bazzaz FA (2000). Consequences of CO₂ and light interactions for leaf phenology, growth and senescence in *Quercus rubra*. *Global Change Biology*, 6, 877–887.
- Chen XQ (陈效逖), Zhang FC (张福春) (2001). Spring phenological change in Beijing in the last 50 years and its response to the climatic changes. *Chinese Journal of Agrometeorology* (中国农业气象), 22(1), 1–5. (in Chinese with English abstract)
- Cui DC (崔读昌), Liu HS (刘洪顺), Min JR (闵谨如), He JM (贺菊美) (1984). *Atlas of China's Major Agricultural Climate Resources* (中国主要农作物气候资源图集). China Meteorological Press, Beijing. (in Chinese)
- Deng ZY (邓振镛), Zhang Q (张强), Liu DX (刘德祥), Pu JY (蒲金涌), Guo H (郭慧), Zhang YF (张宇飞), Zhang MC (张谋草), Zhang HL (张惠玲) (2007). Effects of climate warming on cropping structure and crop growth in Gansu Province. *Journal of Desert Research* (中国沙漠), 27, 627–632. (in Chinese with English abstract)
- Gao G (高歌), Li WJ (李维京), Zhang Q (张强) (2003). Climatic change and its impact on water sources and water resources pre-assessment in 2003 in North China. *Meteorological Monthly* (气象), 29(8), 26–30. (in Chinese)
- Gu W (顾卫), Shi PJ (史培军), Liu Y (刘杨), Xie F (谢锋), Cai XP (蔡雪鹏) (2002). The characteristics of temporal and spatial distribution of negative accumulated temperature in Bohai Sea and north Yellow Sea. *Journal of Natural Resources* (自然资源学报), 17, 168–173. (in Chinese with English abstract)
- Han XM (韩小梅), Shen SH (申双和) (2008). Research progress on phenological models. *Chinese Journal of Ecology* (生态学杂志), 27(1), 89–95. (in Chinese with English abstract)
- Houghton JT, Jenkins GJ, Ephraums JJ (1990). *IPCC: Climate Change, the IPCC Scientific Assessment*. Cambridge University Press, Cambridge, UK. 365.
- Houghton JT, Meira Filho LG, Callander BA, Harris N, Kattenberg A, Maskell K (1995). *IPCC: Climate Change 1995: the Science of Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, UK. 572.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) (2001). *Climate Change 2001: the Scientific Basis*. Cambridge University Press, Cambridge, UK. 140–165.
- Jiang ZH (江志红), Zhang X (张霞), Wang J (王冀) (2008). Projection of climate change in China in the 21st century by IPCC-AR4 Models. *Geographical Research* (地理研究), 27, 787–799. (in Chinese with English abstract)
- Kramer K (1994). A modeling analysis of the effects of climatic warming on the probability of spring frost damage to tree species in The Netherlands and Germany. *Plant, Cell & Environment*, 17, 367–377.
- Li HT (李海涛), Yu GR (于贵瑞), Yuan JZ (袁嘉祖) (2003). Pattern and cause of current climate change in China and prediction of climate scenarios. *Chinese Journal of Agrometeorology* (中国农业气象), 24(4), 1–4. (in Chinese with English abstract)
- Li RP (李荣平), Liu XM (刘晓梅), Zhou GS (周广胜) (2006). The characteristics of phragmites phenology in Panjin wetland and its responses to climatic change. *Journal of Meteorology and Environment* (气象与环境学报), 22(4), 30–34. (in Chinese with English abstract)
- Li ZG (李正国), Yang P (杨鹏), Zhou QB (周清波), Wang YL (王仰麟), Wu WB (吴文斌), Zhang L (张莉), Zhang XF (张小飞) (2009). Research on spatiotemporal pattern of crop phenological characteristics and cropping system in North China based on NDVI time series data. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 29, 6216–6226. (in Chinese with English abstract)
- Liu Q (刘勤), Yan CR (严昌荣), He WQ (何文清), Du JT (杜建涛), Yang J (杨捷) (2009). Dynamic variation of accumulated temperature date in recent 40 years in the Yellow River Basin. *Journal of Natural Resources* (自然资源学报), 24, 146–153. (in Chinese with English abstract)
- Lu PL (陆佩玲), Yu Q (于强), He QT (贺庆棠) (2006). Responses of plant phenology to climatic change. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 26, 923–929. (in Chinese with English abstract)
- Maak K, von Storch H (1997). Statistical downscaling of monthly mean air temperature to the beginning of flowering of *Galanthus nivalis* L. in Northern Germany. *International Journal of Biometeorology*, 41, 5–12.
- Mortensen LM, Fjeld T (1998). Effects of air humidity, lighting period and lamp type on growth and vase life of roses. *Scientia Horticulturae*, 73, 229–237.
- Myking T (1997). Effects of constant and fluctuating temperature on time to budburst in *Betula pubescens* and its relation to bud respiration. *Trees*, 12, 107–112.

- Myneni RB, Keeling CD, Tucker CJ, Asrar G, Nemani RR (1997). Increased plant growth in the northern high latitudes from 1981 to 1991. *Nature*, 386, 698–702.
- NBSC (National Bureau of Statistics of China) (中华人民共和国国家统计局) (2009). Annual data. <http://www.stats.gov.cn/tjsj/ndsjs/>. Cited 22 Oct. 2010.
- Pei SX (裴顺祥), Guo QS (郭泉水), Xin XB (辛学兵), Hong M (洪明), Kang Y (康义) (2009). Research on plant phenological responses to climate change abroad. *World Forestry Research* (世界林业研究), 22(6), 31–37. (in Chinese with English abstract)
- Setiyono TD, Weiss A, Specht J, Bastidas AM, Cassman KG, Dobermann A (2007). Understanding and modeling the effect of temperature and daylength on soybean phenology under high-yield conditions. *Field Crops Research*, 100, 257–271.
- Shao XM (邵晓梅), Yan CR (严昌荣), Wei HB (魏红兵) (2006). Spatial and temporal structure of precipitation in the Yellow River Basin based on Kriging method. *Chinese Journal of Agrometeorology* (中国农业气象), 27(2), 65–69. (in Chinese with English abstract)
- Tang GP (唐国平), Li XB (李秀彬), Fischer G, Prieler S (2000). Climate change and its impacts on China's agriculture. *Acta Geographica Sinica* (地理学报), 55, 129–138. (in Chinese with English abstract)
- Tang QY (唐启义), Feng MG (冯明光) (2007). *DPS Data Processing System* (DPS数据处理系统). Science Press, Beijing. 636–644. (in Chinese)
- Vergara BS, Chang TT (1985). *The Flowering Response of the Rice Plant to Photoperiod* 4th edn. IRRI, Los Baños. 61.
- Walker MD, Ingersoll RC, Webber PJ (1995). Effects of inter-annual climate variation on phenology and growth of two alpine forbs. *Ecology*, 76, 1067–1083.
- Wang LX (王连喜), Chen HL (陈怀亮), Li Q (李琪), Yu WD (余卫东) (2010). Research advances in plant phenology and climate. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 30, 447–454. (in Chinese with English abstract)
- Wang SL (王石立), Zhuang LW (庄立伟), Wang FT (王馥棠) (2003). Impacts of climate warming on thermal and moisture conditions in Northeast China in recent 20 years. *Journal of Applied Meteorological Science* (应用气象学报), 14, 152–164. (in Chinese with English abstract)
- Wang Z (王铮), Zheng YP (郑一萍) (2001). Impacts of global change on China's food security. *Geographical Research* (地理研究), 20, 282–289. (in Chinese with English abstract)
- Xiao GJ (肖国举), Zhang Q (张强), Wang J (王静) (2007). Impact of global climate change on agroecosystem: a review. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 18, 1877–1885. (in Chinese with English abstract)
- Xin JF (辛景峰), Yu ZR (宇振荣), Driessen PM (2001). Monitoring phenological key stages of winter wheat with NOAA NDVI data. *Journal of Remote Sensing* (遥感学报), 5, 442–447. (in Chinese with English abstract)
- Xu YQ (徐雨晴), Lu PL (陆佩玲), Yu Q (于强) (2004). Review and prospect in the researches of influence of climate change on plant phenology. *Resources Science* (资源科学), 26(1), 129–137. (in Chinese with English abstract)
- Yang JY (杨建莹), Mei XR (梅旭荣), Yan CR (严昌荣), Liu Q (刘勤) (2010). Study on spatial pattern of climatic resources in North China. *Chinese Journal of Agrometeorology* (中国农业气象), 2010, 31(S1), 1–5. (in Chinese with English abstract)
- Zhang FC (张福春) (1995). Effects of global warming on plant phenological events in China. *Acta Geographica Sinica* (地理学报), 50, 403–408. (in Chinese with English abstract)
- Zhang XX (张学霞), Ge QS (葛全胜), Zheng JY (郑景云), Zhang FC (张福春) (2005). Responses of spring phenology to climate changes in Beijing in last 150 years. *Chinese Journal of Agrometeorology* (中国农业气象), 2, 263–267. (in Chinese with English abstract)
- Zhang YQ (张燕卿), Liu Q (刘勤), Yan CR (严昌荣), He WQ (何文清), Liu S (刘爽) (2009). Methodology for rasterizing accumulated temperature data in the Yellow River Basin. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 29, 5580–5585. (in Chinese with English abstract)
- Zhao ZC (赵宗慈), Wang SW (王绍武), Luo Y (罗勇) (2007). Assessments and projections of temperature rising since the establishment of IPCC. *Advances in Climate Change Research* (气候变化研究进展), 3, 183–184. (in Chinese with English abstract)
- Zheng JY (郑景云), Ge QS (葛全胜), Hao ZX (郝志新) (2002). Effect of climate warming on plant phenology change in China in last 40 years. *Chinese Science Bulletin* (科学通报), 47, 1584–1587. (in Chinese with English abstract)

责任编辑: 李凤民 责任编辑: 李敏