

张雪花,郝彪,程扬,等. 气温变化对海河流域冬小麦物候期演变特征的影响[J]. 江苏农业科学,2018,46(20):55-61.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2018.20.014

气温变化对海河流域冬小麦物候期演变特征的影响

张雪花^{1,2,3}, 郝彪¹, 程扬¹, 冯婧^{2,3}

(1. 天津工业大学环境与化学工程学院, 天津 300387; 2. 天津工业大学环境科学与工程学院, 天津 300072;
3. 天津工业大学环境经济研究所, 天津 300387)

摘要:气候变化大背景下,海河流域呈现增温趋势,温度的升高影响了小麦的发育期长度、开始(结束)时间。以海河流域冬小麦农业生态站的作物生育期记录以及站点逐日的温度数据为基础,使用积温指标法重新确定了适播期的冬前积温范围为 454~632 °C·d,进而得到海河流域冬小麦的适播期,并对研究区进行尺度扩展,在此基础上使用基于过程的 WheatGrowth 模型中的顶端发育与物候期子模型来模拟海河流域小麦发育期的演变规律。结果表明,最适播种期、出苗期以及分蘖期总体上均呈显著推迟的趋势,生育期的开始时期变化趋势均表现为显著提前的趋势。海河流域冬小麦全生育期天数表现出明显的减少趋势,生育期明显缩短。研究结果可作为农业生产、计划决策及田间管理的重要依据。

关键词:海河流域;冬小麦;适播期;演变特征

中图分类号:S162.5+3 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-1302(2018)20-0055-07

近百年来,地球最显著的环境变化表现为气候变化,全球气候变暖正在对地球生态环境产生潜移默化的影响。IPCC 第 4 次评估报告指出:近 100 年来,全球气温上升了 0.74 °C,

1995—2006 年中有 11 个年份出现最暖气候,过去 50 年气温上升的速度是过去 100 年的 2 倍^[1]。近年来,很多国家的粮食生产安全受到了全球变暖的影响,引起学者的广泛关注。

我国主要的粮食作物包括小麦、水稻和玉米。我国主要粮食作物在 2010 年总产量达到 5 亿 t,其中小麦产量最多,为 2.12 亿 t,因此小麦的产量将极大可能影响未来农业粮食安全。由于农业生产与气候条件密切相关,所以农业受到气候变化的影响最为敏感,气候变化会影响农作物的生长发育过程,进而影响农作物的产量、布局、生长及种植制度^[2]。农业生产、计划决策及田间管理受作物物候期影响很大,也是研究

收稿日期:2017-05-24

基金项目:国家社会科学基金重点项目(编号:13AZD011);天津市创新发展重点课题(编号:ZFZX2014-XX)。

作者简介:张雪花(1967—),女,天津人,博士,教授,主要研究方向为流域水生态环境。E-mail:xuehua671231@163.com。

通信作者:郝彪,硕士,主要研究方向为流域水生态环境以及城市绿地规划。E-mail:2350573578@qq.com。

- [9] Novak J M, Busscher W J. Selection and use of designer biochars to improve characteristics of Southeastern USA Coastal Plain degraded soils[J]. *Advanced Biofuels and Bioproducts*, 2013, 42(11): 69-96.
- [10] 张伟明,孟军,王嘉宇,等. 生物炭对水稻根系形态与生理特性及产量的影响[J]. *作物学报*, 2013, 39(8): 1445-1451.
- [11] Knowles O A, Robinson B H, Contangelo A, et al. Biochar for the mitigation of nitrate leaching from soil amended with biosolids[J]. *Science of the Total Environment*, 2011, 409(17): 3206-3210.
- [12] Glaser B, Haumaier L, Guggenberger G, et al. The 'Terra Preta' phenomenon: a model for sustainable agriculture in the humid tropics[J]. *Naturwissenschaften*, 2001, 88(1): 37-41.
- [13] 刘玉学. 生物质炭输入对土壤氮素流失及温室气体排放特征的影响[D]. 杭州:浙江大学, 2011: 37-41.
- [14] 张千丰,元野,刘居东,等. 室内模拟:生物炭对白浆土和黑土中氮素淋溶的影响[J]. *土壤与作物*, 2013, 2(2): 88-96.
- [15] Yamato M, Okimori Y, Wibowo I F, et al. Effects of the application of charred bark of *Acacia mangium* on the yield of maize, cowpea and peanut, and soil chemical properties in South Sumatra, Indonesia[J]. *Soil Science and Plant Nutrition*, 2006, 52(4): 489-495.
- [16] Bruun S, Elzahery T, Jensen L. Carbon sequestration with biochar - stability and effect on decomposition of soil organic matter[C]//

IOP Conference Series (Earth and Environmental Science), 2009, 6(24): 242010.

- [17] 刘玮晶,刘焯,高晓荔,等. 外源生物质炭对土壤中铵态氮素滞留效应的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2012, 31(5): 962-968.
- [18] Major J, Rondon M, Molina D, et al. Maize yield and nutrition during 4 years after biochar application to a Colombian savanna oxisol[J]. *Plant and Soil*, 2010, 333(1/2): 117-128.
- [19] Zhang A, Cui L Q, Pan G X, et al. Effect of biochar amendment on yield and methane and nitrous oxide emissions from a rice paddy from Tai Lake plain, China[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2010, 139(4): 469-475.
- [20] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京:中国农业科学技术出版社, 2000: 186-189.
- [21] 易军,张晴雯,杨正礼,等. 宁夏引黄灌区稻田氮素浓度变化与迁移特征[J]. *中国生态农业学报*, 2011, 19(4): 771-777.
- [22] Lehmann J. Bio-energy in the black[J]. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2007, 5(7): 381-387.
- [23] Laird D A, Fleming P, Davis D D, et al. Impact of biochar amendments on the quality of a typical Midwestern agricultural soil[J]. *Geoderma*, 2010, 158(3/4): 443-449.

目前气候变化及分析农业生态系统的重要依据^[3]。通常情况,调整试播期、调整管理方式及更换作物品种是农业生产者经常使用的方法^[4]。因此,需要根据气候变化对作物的影响机制来调整作物种植期,这对于保证农业稳定持续生产具有重要意义。对于农业生态系统,开展针对农业生态环境进行的作物物候变化和特征研究具有非常重大的意义^[5]。

1 模型介绍

WheatGrowth 模型为南京农业大学曹卫星等研制的基于过程的机理性小麦生长模拟模型^[6]。该模型中的冬小麦生育期子模型,通过生理发育时间(PDT)来定量模拟小麦生育进程。严美春等将小麦生育过程对温度的函数改进为正弦函数指数和余弦函数指数的关系,通过温度敏感性(temperature sensitivity,简称 TS)、光周期敏感性(photoperiod sensitivity,简称 PS)、生理春化时间(physiological vernalization time,简称 PVT)、基本早熟性(intrinsic earliness,简称 IE)以及灌浆因子(FD)5 个参数来决定不同品种到达各发育阶段所需的生理发育时间^[7]。Yan 模型^[7]模拟预测生育期的指标阈值见表 1。

表 1 冬小麦各生育期生长度日及生理发育时间阈值

小麦物候期	生长度日 GDD (℃·d)	生理发育时间 PDT(d)
种子萌发	40	—
出苗	62	0
分蘖	TI(330.5)	—
越冬	日平均气温稳定下降到 3℃	—
返青	日平均气温稳定上升到 3℃	—
拔节	雌雄蕊原基分化期	16.1
孕穗	四分体	21.4
抽穗	抽穗期	26.8
开花	(105.8)	31.0
灌浆	(300.0)	39.0
成熟	(480.0)	56.0

2 资料与方法

2.1 数据来源

作物生育期数据采用中国气象科学数据共享服务网提供的《中国农作物生长发育和农田土壤湿度旬值数据集》,受地域的影响(行政区划),在海河流域行政区划的基础上,根据流域地貌,冬小麦种植面积分布以及气候特征,选取包括海河流域内部及周边的遵化、昌黎、河间、定州、栾城、南宫、肥乡、太谷、长治、密云、通州区、静海、惠明、德州、聊城、新乡 16 个农业站点的作物生育期数据,将 16 个农业站点的冬小麦生育期记录数据作为海河流域生育期模拟的观测值。该 16 个站点及其他 26 个站点的温度数据来源于国家气象信息中心提供的《中国国家级地面气象站基本气象要素日值数据集(V3.0)》。

2.2 研究方法

2.2.1 冬小麦适播期的确定 对海河流域内部及周围 16 个站点(遵化站、昌黎站、河间站、定州站、栾城站、南宫站、肥乡站、太谷站、长治站、密云站、通州站、静海站、惠明站、德州站、聊城站、新乡站)冬小麦的播种期记录进行统计分析,以冬前

积温、播种期的滑动平均温度为主要指标,根据冬小麦生理发育对温度的要求进行数据筛选。

一般而言,冬前壮苗标准一般主茎有 5~6 张叶,单株 3~5 个壮蘖,从播种到出苗约需积温 100~120℃,而后每长 1 张叶子约需 60~80℃的积温。从北方小麦实际情况看,形成冬前壮苗也需 550~600℃积温,小于 400℃难以形成壮苗;大于 750℃又往往造成旺苗。因此从原始资料中筛选出播种期的滑动平均温度大于 13.0℃且冬前积温介于 400~750℃的数据作为研究区播种期的观测值。因此本研究选取冬前积温 454~631℃·d 和日平均温度 16~19℃作为冬小麦适播期的温度指标。

2.2.2 模型参数率定 采用遗传算法^[8]对模型中的 5 个参数进行优化,选取 2003—2004 年度到 2007—2008 年度冬小麦播种、出苗、分蘖、返青、拔节、抽穗、收获(成熟)的 7 个生育日期作为参数率定期,2011—2012 年度作为模型验证期。以播种后的日数(days after sowing,简称 DAS)作为每个生育日期的观测值与模拟值。

算法中,种群大小设为 80,交叉率为 0.6,突变率设为 0.001,迭代次数直到全部种群个体适应度稳定为相同值为止,选择均方根误差值(RMSE)作为适应度,RMSE 值越小,模拟效果越好。由于遗传算法的初始值是随机的,随着迭代次数的增加,尽管全部个体适应度稳定在同一个值,但结果却不唯一,因此本研究进行 10 次的遗传算法,将 10 次优化值的平均值作为某一品种参数的最终优化结果。

$$fit = C_m - RMSE;$$
 (1)

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_{obs,i} - X_{mod,i})^2}{n}}。$$
 (2)

式中:fit 为适应度;C_m 为常数,取 10 000.0;RMSE 为均方根误差;X_{obs,i}为第 i 个观测值;X_{mod,i}为第 i 个模拟值;n 为观测值个数。

2.2.3 尺度扩展

2.2.3.1 研究区分区 由于 Yan 模型^[7]是基于单个品种的田间试验的模型,因此需要对其进行尺度扩展,对研究区进行分区。从国家气象信息中心提供的《中国国家级地面气象站基本气象要素日值数据集(V3.0)》可以得到全部 42 站点的逐日气象数据,包括日平均温度、最高温度、最低温度,然后利用 Yan 的生育期模型计算得到 42 站点的生育期。

2.2.3.2 冬小麦“生态型”品种参数 由于冬小麦的品种空间分布特征难以精确地收集和设定,本研究在行政区划的基础上,利用遵化、昌黎、河间、定州、栾城、南宫、肥乡 7 个农业站点的“生态型”品种参数代表河北地区的品种参数;太谷、长治 2 个农业站点的“生态型”品种参数代表山西东南部地区的品种参数;密云、通州 2 个农业站点的“生态型”品种参数代表北京地区的品种参数;静海农业站点的“生态型”品种参数代表天津地区的品种参数;惠明、德州、聊城 3 个农业站点的“生态型”品种参数代表山东西南部地区的品种参数;新乡农业站点的“生态型”品种参数代表河南北部地区的品种参数;由于内蒙古和辽宁地区涉及面积较少,因此以河北地区为依据。因此将海河流域分为 6 个区,分别为:河北地区、山西东部地区、北京地区、天津地区、山东西南部地区、河南北部地区(表 2、图 1)。

表 2 海河流域 16 站点“生态型”品种参数优化结果(1992—2012 年)

站点	温度敏感性 TS	生理春化时间 (d)	光周期敏感性 PS/103	基本早熟性 IE	返青期温度 (℃)	分蘖期生长期 (℃·d)	灌浆期 PDT(d)	成熟期 PDT(d)
定州	1.1	43.7	5.1	0.8	6.9	432.6	39.5	55.1
太谷	1.4	38.1	5.7	0.8	6.8	420.0	40.0	56.0
栾城	1.9	35.0	5.0	0.7	6.4	425.6	39.0	55.0
长治	1.3	44.1	5.8	0.9	7.0	436.8	40.2	55.2
肥乡	1.6	43.1	6.9	0.7	7.0	438.5	39.1	55.2
新乡	1.8	41.0	5.5	0.8	6.9	429.0	39.8	55.0
密云	1.2	41.2	4.7	0.8	6.9	440.9	38.9	54.6
遵化	1.4	37.4	6.0	0.8	7.0	427.3	39.8	56.2
通州	1.8	37.1	5.6	0.8	6.2	429.8	40.5	55.5
昌黎	1.8	39.7	5.2	0.8	7.0	429.9	40.1	55.8
河间	0.9	32.6	6.0	0.8	6.0	431.9	40.5	53.5
静海	1.5	44.9	7.0	0.8	6.3	433.7	40.1	55.7
南宫	1.3	39.9	6.1	0.8	7.0	436.9	38.5	54.7
德州	1.0	38.3	4.4	0.8	7.0	442.0	39.0	55.1
惠民	1.7	44.2	6.1	0.7	6.9	438.8	38.7	55.1
聊城	1.0	32.8	6.2	0.8	6.9	429.9	41.2	54.9
河北地区	1.4	38.8	5.7	0.8	6.7	431.8	39.5	55.1
北京地区	1.5	39.1	5.1	0.8	6.6	435.4	39.7	55.1
天津地区	1.5	44.9	7.0	0.8	6.3	433.7	40.1	55.7
山西南部地区	1.4	41.1	5.7	0.8	6.9	428.4	40.1	55.6
山东西南地区	1.2	38.5	5.6	0.7	6.9	436.9	39.6	55.0
河南北部地区	1.8	41.0	5.5	0.8	6.9	429.0	39.8	55.0

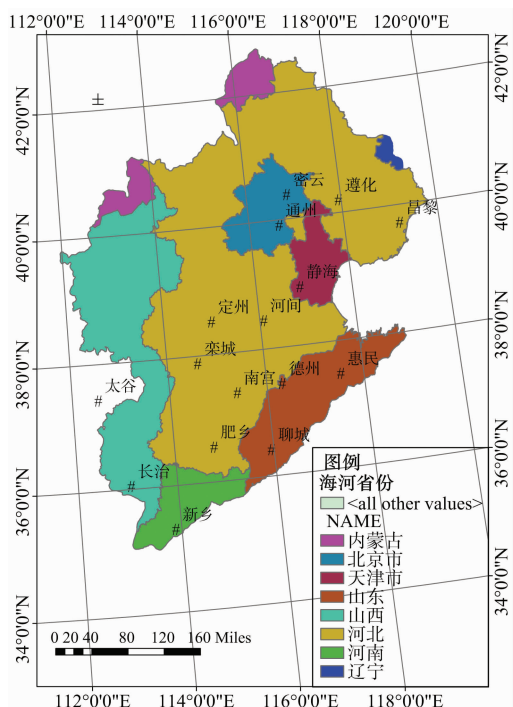


图1 海河流域16个站点冬小麦“生态型”品种分区

将这 16 个站点的“生态型”品种参数扩展到海河流域的 42 个站点(图 2),其中北京地区的站点有密云、北京;天津地区的站点有天津、塘沽;河北地区的站点有张北、蔚县、石家庄、榆社、多伦、丰宁、围场、张家口、怀来、承德、遵化、青龙、秦皇岛、廊坊、唐山、乐亭、保定、饶阳、沧州、泊头、黄骅、南宫、邢台;山西地区的站点有右玉、大同、五台山、五寨、原平、阳泉;山东地区的站点有德州、陵县、惠民、朝阳、济南、菏泽;河南地

区的站点有安阳、新乡、郑州。根据分区情况,可以得到 42 个站点“生态型”品种参数优化结果(表 3)。

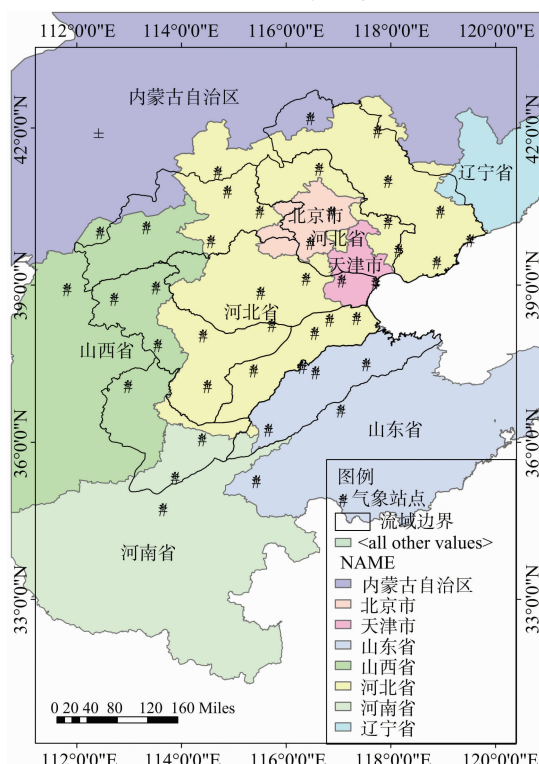


图2 海河流域42个站点冬小麦“生态型”品种分区

3 结果分析

3.1 单点生育期模拟结果分析

3.1.1 播种期模拟 对研究区16个农业试验站点1992—

表 3 海河流域 42 站点“生态型”品种参数优化结果(1992—2012 年)

站点编号	站名	温度敏感性	生理春化时间 (d)	光周期敏感性	基本早熟性	分蘖期生长期日 (℃·d)	返青期温度 (℃)	灌浆期 PDT(d)	成熟期 PDT(d)
53399	张北	1.4	38.8	0.005 7	0.8	431.8	6.7	39.5	55.1
53593	蔚县	1.4	38.8	0.005 7	0.8	431.8	6.7	39.5	55.1
53698	石家庄	1.4	38.8	0.005 7	0.8	431.8	6.7	39.5	55.1
53787	榆社	1.4	38.8	0.005 7	0.8	431.8	6.7	39.5	55.1
54208	多伦	1.4	38.8	0.005 7	0.8	431.8	6.7	39.5	55.1
54308	丰宁	1.4	38.8	0.005 7	0.8	431.8	6.7	39.5	55.1
54311	围场	1.4	38.8	0.005 7	0.8	431.8	6.7	39.5	55.1
54401	张家口	1.4	38.8	0.005 7	0.8	431.8	6.7	39.5	55.1
54405	怀来	1.4	38.8	0.005 7	0.8	431.8	6.7	39.5	55.1
54423	承德	1.4	38.8	0.005 7	0.8	431.8	6.7	39.5	55.1
54429	遵化	1.4	38.8	0.005 7	0.8	431.8	6.7	39.5	55.1
54436	青龙	1.4	38.8	0.005 7	0.8	431.8	6.7	39.5	55.1
54449	秦皇岛	1.4	38.8	0.005 7	0.8	431.8	6.7	39.5	55.1
54518	霸州	1.4	38.8	0.005 7	0.8	431.8	6.7	39.5	55.1
54534	唐山	1.4	38.8	0.005 7	0.8	431.8	6.7	39.5	55.1
53798	邢台	1.4	38.8	0.005 7	0.8	431.8	6.7	39.5	55.1
54539	乐亭	1.4	38.8	0.005 7	0.8	431.8	6.7	39.5	55.1
54602	保定	1.4	38.8	0.005 7	0.8	431.8	6.7	39.5	55.1
54606	饶阳	1.4	38.8	0.005 7	0.8	431.8	6.7	39.5	55.1
54616	沧洲	1.4	38.8	0.005 7	0.8	431.8	6.7	39.5	55.1
54618	泊头	1.4	38.8	0.005 7	0.8	431.8	6.7	39.5	55.1
54624	黄骅	1.4	38.8	0.005 7	0.8	431.8	6.7	39.5	55.1
54705	南宫	1.4	38.8	0.005 7	0.8	431.8	6.7	39.5	55.1
53478	右玉	1.4	41.1	0.005 7	0.8	428.4	6.9	40.1	55.6
53487	大同	1.4	41.1	0.005 7	0.8	428.4	6.9	40.1	55.6
53588	五台山	1.4	41.1	0.005 7	0.8	428.4	6.9	40.1	55.6
53663	五寨	1.4	41.1	0.005 7	0.8	428.4	6.9	40.1	55.6
53673	原平	1.4	41.1	0.005 7	0.8	428.4	6.9	40.1	55.6
53782	阳泉	1.4	41.1	0.005 7	0.8	428.4	6.9	40.1	55.6
53898	安阳	1.8	41.0	0.005 5	0.8	429.0	6.9	39.8	55.0
53986	新乡	1.8	41.0	0.005 5	0.8	429.0	6.9	39.8	55.0
57083	郑州	1.8	41.0	0.005 5	0.8	429.0	6.9	39.8	55.0
54527	天津	1.5	44.9	0.007 0	0.8	433.7	6.3	40.1	55.7
54623	塘沽	1.5	44.9	0.007 0	0.8	433.7	6.3	40.1	55.7
54416	密云	1.5	39.1	0.005 1	0.8	435.4	6.6	39.7	55.1
54511	北京	1.5	39.1	0.005 1	0.8	435.4	6.6	39.7	55.1
54714	德州	1.2	38.5	0.005 6	0.7	436.9	6.9	39.6	55.0
54715	陵县	1.2	38.5	0.005 6	0.7	436.9	6.9	39.6	55.0
54725	惠民	1.2	38.5	0.005 6	0.7	436.9	6.9	39.6	55.0
54808	朝城	1.2	38.5	0.005 6	0.7	436.9	6.9	39.6	55.0
54823	济南	1.2	38.5	0.005 6	0.7	436.9	6.9	39.6	55.0
54906	菏泽	1.2	38.5	0.005 6	0.7	436.9	6.9	39.6	55.0

2012 年的播种期进行统计分析,得到表 4。

由表 4 可知,16 个站点播种期观测值平均在第 280 天,即每年的 10 月 7 日左右。播种期最早的是长治站,为第 260 天(9 月 17 日);最晚的是聊城站,为第 310 天(11 月 5 日)。21 年间 16 个站点的播种期从最早的 9 月 17 日到最晚的 11 月 5 日,相差了 48 d。而对于每个站点来说 21 年间冬小麦播种期平均相差 18.8 d。

根据 16 个站点 1992—2012 年的播种期记录,计算了播种期前后的 5 d 滑动平均温度以及从播种到冬前的积温,并从原始资料中筛选出播种期的滑动平均温度大于 13.0℃且

冬前积温介于 400~750℃的数据作为研究区播种期的观测值。对筛选出的数据分别求冬前积温及播种期滑动平均温度的平均值及标准差,得到 16 个站点冬前的积温为(542.6±88.6)℃;播种期的滑动平均温度为(17.2±1.6)℃;日平均温度为(17.5±1.7)℃。因此本研究选取冬前积温 454~631℃·d 和日平均温度 16~19℃作为冬小麦适播期的温度指标。

利用积温指标法进一步对 16 个站点的最适播期进行模拟,并对 16 个农业生态站的最适播期范围与观测播期的差异进行了比较。其中,定州、太谷、栾城、长治、肥乡、新乡、遵化、

表 4 海河流域 16 个农业试验站点播种期 (1992—2012 年) d

站点	最大值	最小值	极差	平均值	标准差
定州	282	275	2.2	279.0	7
太谷	294	264	7.9	278.2	30
栾城	288	271	4.8	278.7	17
长治	281	260	5.0	269.4	21
肥乡	297	277	6.0	285.1	20
新乡	292	279	3.4	283.5	13
密云	287	269	6.8	278.7	18
遵化	280	268	3.3	273.6	12
通州	284	264	5.8	273.8	20
昌黎	286	269	5.2	277.2	17
河间	293	270	6.5	285.0	23
静海	285	267	5.3	276.6	18
南宫	297	279	4.5	288.5	18
德州	293	274	6.4	282.6	19
惠民	290	276	4.1	281.4	14
聊城	310	276	10.3	289.0	34
平均	289.9	271.1	0.0	280.0	18.8

河间、静海、德州、惠民、聊城的多年平均播种期观测值和模拟值相差时间在 7 d 以内,密云、通州、昌黎、南宫的多年平均播种期观测值和模拟值相差大于 7 d,但均不超过 10 d,具体各站观测模拟均值如表 5 所示。

其中,抽取新乡、密云、南宫、德州和惠民 1992—2012 年播种期的 85 个样本,并对 5 个农业生态站的模拟播期与观测

表 5 海河流域 16 个农业试验站点多年平均播种期
观测值与模拟值 (1992—2012 年)

站点	观测 DOY - ave (d)	模拟 DOY - ave (d)	相差 (d)
定州	279.0	282.1	3.1
太谷	278.2	283.6	5.4
栾城	278.7	272.5	6.2
长治	269.4	266.8	2.6
肥乡	285.1	291.2	6.1
新乡	283.5	285.9	2.4
密云	278.7	268.3	10.4
遵化	273.6	280.4	6.8
通州	273.8	282.4	8.6
昌黎	277.2	286.5	9.3
河间	285.0	291.1	6.1
静海	276.6	283.3	6.7
南宫	288.5	278.4	10.1
德州	282.6	283.6	1.0
惠民	281.4	278.9	2.5
聊城	289.0	295.3	6.3
平均	278.1	281.9	3.8

播期的差异进行了比较。对比发现,5 个农业站的实际播种期与模拟播种期大部分年份都在 7 d 之内,只有少数年份超过 10 d,尤其新乡和惠民站观测模拟差几乎都在 7 d 之内 (图 3)。

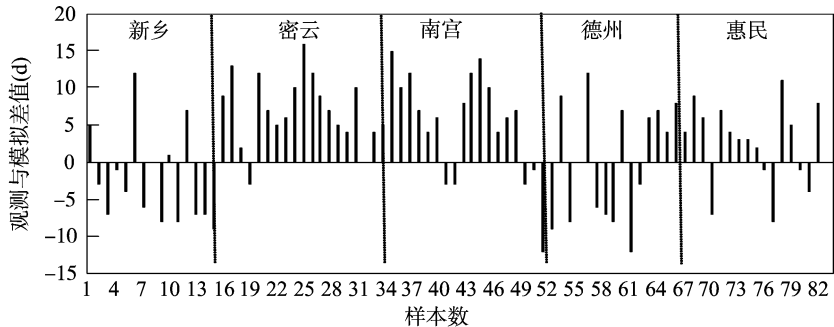


图 3 5 个生态农业站观测与模拟差值图

综上所述,冬小麦的播种期计算结果大部分在实测资料的范围之内,故此模拟方法理论上可行。

3.1.2 其他生育期模拟 以 16 个站点记录的冬小麦播种期作为模拟的播种日期,结合冬小麦“生态型”品种参数,利用生理发育模型模拟冬小麦其他生育期。图 4 展示了其中 8 个站点出苗期、分蘖期、越冬期、返青期、拔节期、抽穗期、灌浆期、成熟期 8 个时期的模拟值与观测值,两者之间有很强的相关性,决定系数 r^2 均在 0.98 以上。由此可知,Yan 模型可以有效地模拟海河流域冬小麦的发育进程。

3.2 海河流域冬小麦关键生育期演变规律

根据“2.2.3”节中尺度扩展的方法,以积温指标法模拟得到的适播期作为冬小麦的播种日期,并依据 42 个站点“生态型”品种参数,得到海河流域 1963—2013 年冬小麦播种、出苗、分蘖、越冬、返青、拔节、孕穗、抽穗、开花、灌浆、成熟共 11 个生育期逐年的日期变化规律 (图 5),并在此基础上分析冬小麦各生育期的演变规律。

表 6 展示了海河流域从 1963 到 2013 年冬小麦各生育期开始日期的变化趋势,Kendall 趋势检验表明,冬小麦最适播种期、出苗期以及分蘖期总体上均呈显著推迟的趋势,而从越冬期开始一直到冬小麦成熟,生育期的开始时期变化趋势均表现为显著提前的趋势。其中,冬小麦的越冬期和返青期会受到生长环境温度的控制。在所有的变化趋势中,冬小麦的返青期变化趋势最为明显,以气候倾向率为 -2.2 d/10 年的变化趋势显著提前。

由图 6 可以得出,1963—2013 年海河流域冬小麦全生育期天数表现出明显的减少趋势,生育期明显缩短,气候倾向率为 -3.5 d/10 年。其中,1970—1971 年度生育期天数最长,为 278.9 d,生育期最短的为 1998—1999 年度,为 253.2 d,相差了 25.7 d。

4 结论与讨论

随着气候的变化,温度的增加影响了小麦的正常演变规

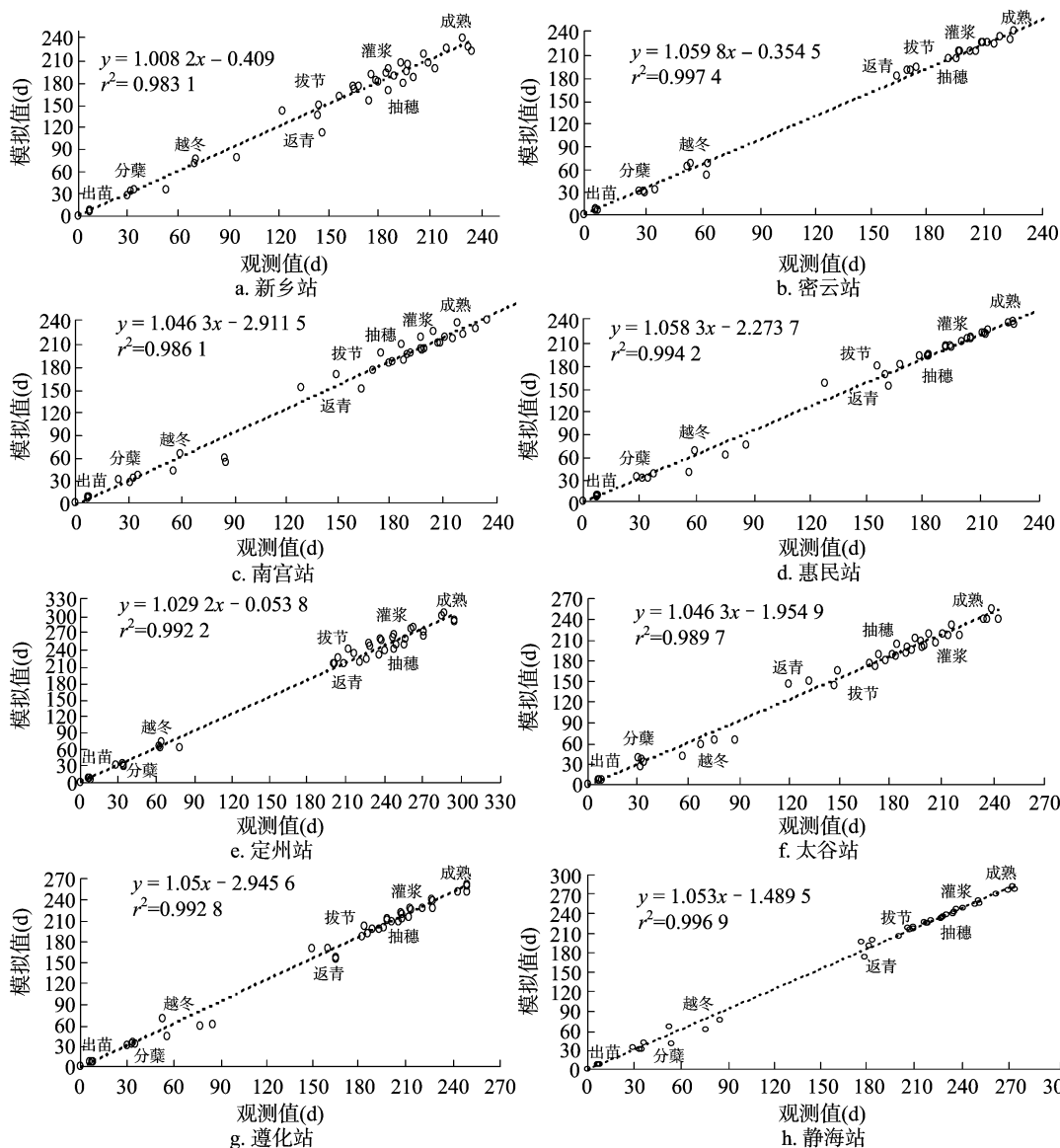


图4 冬小麦各生育期模拟值与观测值相关性

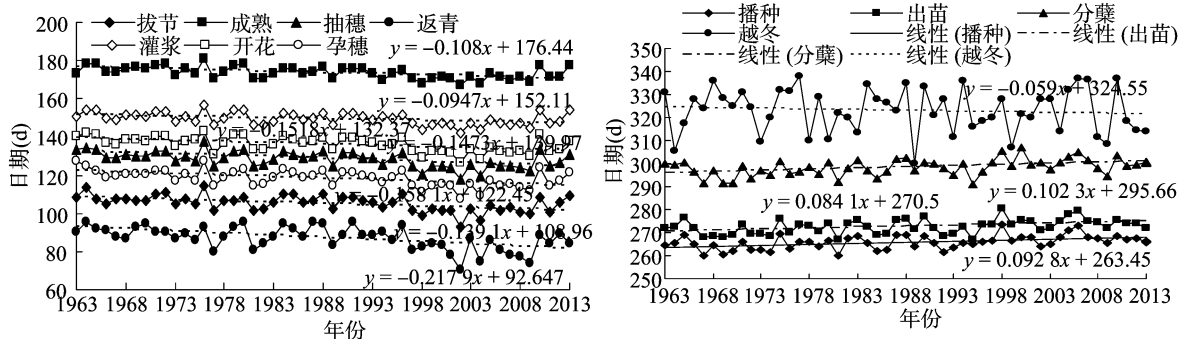


图5 海河流域各生育期开始日期变化趋势

律。本研究以海河流域冬小麦农业生态站的作物生育期记录以及站点逐日的温度数据为基础,使用 WheatGrowth 模型来模拟海河流域小麦发育期的演变规律,得出以下结论:

(1)通过重新计算海河流域冬小麦适播期的温度指标,确定冬前积温为 454 ~ 632 ℃,日平均温度为 15 ~ 19 ℃。并采用遗传算法对 Yan 模型中 16 个站点的 5 个参数进行优化,

得到 16 个站点冬小麦的“生态型”品种参数,进而通过尺度扩展,划分得到 42 个站点的“生态型”品种参数。Yan 模型很好地模拟了 16 个站点冬小麦的生育期,相关性达到 0.98 以上。结果表明,此模拟方法理论上可行,继而可以用来模拟海河流域 42 个站点的生育期。

(2)海河流域冬小麦生育期趋势表现为:最适播种期、出

表 6 冬小麦各生育期开始日期趋势分析

生育期	气候倾向率(d/10 年)	趋势
播种	0.9	显著推迟
出苗	0.8	显著推迟
分蘖	1.0	显著推迟
越冬	-0.6	显著提前
返青	-2.2	显著提前
拔节	-1.4	显著提前
孕穗	-1.6	显著提前
抽穗	-1.5	显著提前
开花	-1.5	显著提前
灌浆	-0.9	显著提前
成熟	-1.1	显著提前

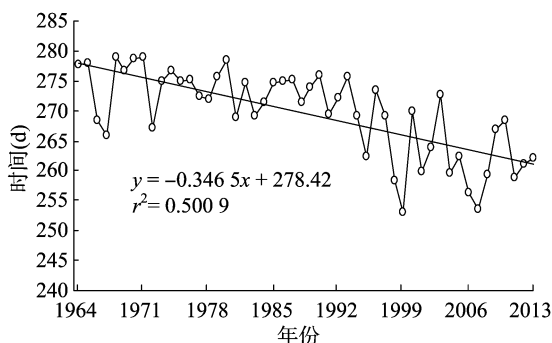


图 6 冬小麦全生育期变化(1963—2013)

苗期以及分蘖期总体上均呈显著推迟的趋势,而从越冬期开始一直到冬小麦成熟,生育期的开始时期变化趋势均表现为显著提前的趋势。其中,在所有的变化趋势中,冬小麦的返青期变化趋势最为明显,以气候倾向率为 -2.2 d/10 年的变化趋势显著提前,这是由于返青期会受到生长环境温度的控制。

(3) 1963—2013 年海河流域冬小麦全生育期天数表现出明显的减少趋势,生育期明显缩短,气候倾向率为 -3.5 d/10 年。其中,1970—1971 年度生育期天数最长,为 278.9 d,生育期最短的为 1998—1999 年度,为 253.2 d,相差了 25.7 d。

由以上分析可知,Yan 模型可以很好地模拟海河流域冬小麦的生育期。并得出冬小麦的最适播种期、出苗期以及分蘖期均呈显著推迟的趋势,而生育期的开始时期变化趋势均表现为显著提前的趋势。在冬小麦全生育期天数方面表现出明显的减少趋势,生育期明显缩短。根据这些变化可以适当通过调整适播期、调整管理方式及更换作物品种等方式来保证农业稳定持续生产。

参考文献:

- [1] Peiris D R, Crawford J W, Grashoff C, et al. A simulation study of crop growth and development under climate change[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1996, 79(4): 271–287.
- [2] 治明珠, 郭建平, 蒋跃林, 等. 气候变化对农作物气候适宜度影响研究进展[J]. *安徽农业科学*, 2011, 39(15): 9104–9105, 9134.
- [3] Anwar M R, Liu D L, Farquharson R, et al. Climate change impacts on phenology and yields of five broadacre crops at four climatologically distinct locations in Australia[J]. *Agricultural Systems*, 2015, 132:

133–144.

- [4] 龙冬平, 李同昇, 苗园园, 等. 中国农业现代化发展水平空间分异及类型[J]. *地理学报*, 2014, 69(2): 213–226.
- [5] 张峰, 吴炳方, 刘成林, 等. 区域作物生长过程的遥感提取方法[J]. *遥感学报*, 2004, 8(6): 515–528.
- [6] 曹卫星, 江海东. 小麦温光反应与发育进程的模拟[J]. *南京农业大学学报*, 1996(1): 9–16.
- [7] 严美春, 曹卫星, 罗卫红, 等. 小麦发育过程及生育期机理模型的研究 I. 建模的基本设想与模型的描述[J]. *应用生态学报*, 2000, 11(3): 355–359.
- [8] 霍军军, 尚松浩. 基于模拟技术及遗传算法的作物灌溉制度优化方法[J]. *农业工程学报*, 2007, 23(4): 23–28.
- [9] 牛纪苹, 栗晓玲, 孙聪影. 气候变化对石羊河流域农业灌溉需求的影响[J]. *灌溉排水学报*, 2013, 32(6): 41–45.
- [10] 赵春雨, 王颖, 张玉书, 等. 近 50 年辽宁省作物生长季气候条件变化及对农业生产的影响[J]. *灾害学*, 2009, 24(4): 102–106.
- [11] 孙华, 何茂萍, 胡明成, 等. 全球变化背景下气候变暖对中国农业生产的影响[J]. *中国农业资源与区划*, 2015, 36(7): 51–57.
- [12] Ching - Pin T, Douglas A H. Climate change, irrigation, and crop response[J]. *Journal of the American Water Resources Association*, 1998, 34(5): 1071–1084.
- [13] 张建平, 赵艳霞, 王春乙, 等. 未来气候变化情景下我国主要粮食作物产量变化模拟[J]. *干旱地区农业研究*, 2007, 25(5): 208–213.
- [14] 金之庆, 葛道阔, 石春林, 等. 东北平原适应全球气候变化的若干粮食生产对策的模拟研究[J]. *作物学报*, 2002, 28(1): 24–31.
- [15] Thomas A. Spatial and temporal characteristics of potential evapotranspiration trends over China[J]. *International Journal of Climatology*, 2000, 20(4): 381–396.
- [16] Thomas A. Agricultural irrigation demand under present and future climate scenarios in China[J]. *Global and Planetary Change*, 2008, 60(3/4): 306–326.
- [17] Fischer G, Franscesco N T, Velthuisen H V, et al. Climate change impacts on irrigation water requirements: effects of mitigation, 1990–2008[J]. *Technological Forecasting & Social Change*, 2007, 74(7): 1083–1107.
- [18] Jonathan A H, Edward R C, Bao Y. Climate change over the past 2000 years in Western China[J]. *Quaternary International*, 2009, 194(1–2): 91–107.
- [19] Allen R G, Pereira L S, Raes D, et al. Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements[R]. *Irrigation and Drainage Paper No. 56*. FAO, Rome, Italy. 1998: 17–27.
- [20] Liu C M, Zhang X Y, Zhang Y Q. Determination of daily evaporation and evapotranspiration of winter wheat and maize by large - scale weighing lysimeter and micro - lysimeter[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2002, 111(2): 109–120.
- [21] 马鹏里, 杨兴国, 陈端生. 农作物需水量随气候变化的响应研究[J]. *西北植物学报*, 2006, 26(2): 348–353.
- [22] 迟道才, 常秀华, 张玉清. 抚顺地区参考作物需水量与气候变化的关系分析[J]. *安徽农业科学*, 2006, 34(15): 3579–3581.
- [23] 尹军, 杨志勇, 袁喆, 等. 1961—2011 年黄淮海地区极端降水时空变化特征[J]. *灾害学*, 2015(3): 71–75.