

# 黄淮海地区冬小麦种植北界时空演变及未来趋势分析

唐晓培<sup>1,2</sup>, 宋妮<sup>1</sup>, 陈智芳<sup>1</sup>, 王景雷<sup>1\*</sup>

(1. 中国农业科学院农田灌溉研究所 农业农村部作物需水与调控重点实验室, 新乡 453002;  
2. 北京师范大学水科学研究院 城市水循环与海绵城市技术北京市重点实验室, 北京 100875)

**摘要:** 为探索黄淮海地区冬小麦种植北界的变化规律, 该文基于黄淮海及周边地区 94 个气象站 1961—2017 年逐日气象数据和代表性浓度路径 (representative concentration pathways, RCPs) RCP4.5、RCP8.5 情景下 2011—2100 年逐日温度数据, 采用 5 个气候指标对黄淮海地区冬小麦种植北界进行分析。主要结论如下: 1961—1970 年黄淮海地区冬小麦种植北界主要分布于天津—河北霸州—保定—石家庄—邢台—山西临汾一线; 1971—1980 年, 该线在河北境内北移约 65 km, 在山西境内北移约 40 km; 与 1971—1980 年相比, 1981—1990 年北界变化较小, 仅在河北唐山附近略南移, 山西运城附近略北移; 与 1981—1990 年相比, 1991—2000 年北界变化较大, 尤以山西地区为最, 将原本的正弦线趋势压缩为平滑抛物线趋势, 临汾附近南移, 阳城附近北移; 相较于 1991—2000 年, 2001—2010 年北界略北移; 相较于 2001—2010 年, 2011—2017 年北界呈南移现象。未来 RCP4.5 情景下, 2011—2040 年冬小麦种植北界主要分布在河北乐亭—唐山—北京—河北保定—石家庄—邢台—山西榆社—临汾一线; 2041—2070 年该线在河北境内北移至秦皇岛, 山西境内北移至介休; 与 2041—2070 年相比, 2071—2100 年北界在河北境内趋于稳定, 在山西境内北移至太原北部。RCP8.5 情景下, 冬小麦种植北界变化较大: 2011—2040 年北界位于河北秦皇岛—唐山—北京—河北保定—石家庄—山西临汾一线; 2041—2070 年, 该线在河北境内北移至遵化、青龙附近, 在山西境内北移至兴县、太原附近; 2071—2100 年, 北界北移至河北承德—丰宁—张家口—怀来—保定—山西原平—五寨—河曲一带。此外, 与 RCP8.5 相比, RCP4.5 情景下黄淮海地区冬小麦种植北界变化趋势较小。该研究可为黄淮海地区冬小麦种植敏感性地带适应气候变化提供理论依据和技术支撑。

**关键词:** 气候变化; 温度; 作物; 冬小麦; 种植北界; 黄淮海地区

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2019.09.016

中图分类号: S162.2

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2019)-09-0129-09

唐晓培, 宋妮, 陈智芳, 王景雷. 黄淮海地区冬小麦种植北界时空演变及未来趋势分析[J]. 农业工程学报, 2019, 35(9): 129—137. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2019.09.016 <http://www.tcsae.org>

Tang Xiaopei, Song Ni, Chen Zhifang, Wang Jinglei. Spatial-temporal distribution and change trend of northern limit of winter wheat planting in Huang-Huai-Hai Plain[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2019, 35(9): 129—137. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2019.09.016 <http://www.tcsae.org>

## 0 引言

全球气候变化已成为不可争议的事实。农业作为最易遭受气候变化影响的产业之一, 面临很大的挑战。黄淮海地区是中国优质小麦生产基地, 其稳定地生产产量对保障中国粮食安全意义重大。在众多气候因子中, 农业植被对温度的敏感性最强<sup>[1]</sup>, 1960—2009 年黄淮海农作区温度总体呈上升趋势<sup>[2]</sup>。冬前温度过高可促使麦苗生长旺盛, 冬小麦越冬时间后移<sup>[3]</sup>, 越冬期负积温减少, 冻害风险减小<sup>[4]</sup>, 冬小麦安全越冬的概率加大, 故冬小麦安全种植区域将发生变化, 特别是对温度最敏感的北界地

区, 变化较为显著<sup>[5-8]</sup>。因此, 研究气候变化情景下黄淮海地区冬小麦种植北界的变化趋势对合理利用该地区潜在地理、气候资源以及有效避免自然灾害、确保该地区小麦稳产高产具有重要的指导意义。

研究气候变化对冬小麦种植北界的影响, 关键是冬小麦种植北界气候指标地选择。影响冬小麦种植的潜在气候因子主要分 3 类, 第 1 类是能够承受的最低温度, 第 2 类是完整的生育期和需求的热量, 第 3 类是形成植株体所需的水量<sup>[9]</sup>。早期学者仅考虑第 1 类气候因子。如崔读昌<sup>[10]</sup>认为严寒低温是决定冬小麦冻害的主要因子, 并将最冷月平均最低气温 $-15^{\circ}\text{C}$ 和极端最低气温 $-22\sim-24^{\circ}\text{C}$ 作为中国冬春小麦品种分布气候区域的北界, 国内多位学者用此方法分别研究了中国冬小麦的种植北界及产量、可种植区域概率、农业气候资源及水资源盈亏等问题<sup>[11-15]</sup>。这种方法虽然考虑了冬小麦安全越冬的抗冻温度指标, 但未考虑其耐冻温度指标, 故此王宏<sup>[16]</sup>提出确定中国冬小麦安全种植北界的气候指标为最冷月平均温度 $-8^{\circ}\text{C}$ 、冬季最低温度小于等于 $-20^{\circ}\text{C}$ 的天数为 3 d 且 11 月平均气温为  $2^{\circ}\text{C}$ , 同时, 金之庆等<sup>[17-18]</sup>用此方法研究了未来气候变化情景下中国冬小麦种植北界可能发

收稿日期: 2018-09-13 修订日期: 2019-04-20

基金项目: 国家自然科学基金 (51609245、51709262); 中央级科研院所基本科研业务费专项资助项目 (FIRI2017-07); 中国农业科学院基本科研业务费专项院级统筹项目 (Y2019XK04); 河南省基础与前沿技术研究 (162300410168)

作者简介: 唐晓培, 博士生, 主要从事作物水分生理与高效利用。

Email: 1124897434@qq.com

\*通信作者: 王景雷, 研究员, 博士, 主要从事新理论新技术在节水农业中的应用研究。Email: firwjl@126.com

中国农业工程学会会员: 王景雷 (E041200185S)

生的地理位移及灌溉需水量等问题。近几年来,随着人们对冬小麦栽培学的深入了解,生育期热量指标和需水量指标逐渐被大家认识,如冬前积温、越冬期负积温、全生育期积温、蒸腾量和降雨量等。郝志新等<sup>[19]</sup>采用灰色关联分析方法对8个气候因子进行分析,认为冬小麦种植主要气候因子是越冬前积温,其次是越冬期负积温。钱锦霞等<sup>[20]</sup>通过对3个气候因子的分析,认为决定山西省冬小麦能否种植的关键因子是负积温和年极端最低气温。Sun等<sup>[21]</sup>采用最大熵法从18个因子中确定影响冬小麦分布区域的主导气候因子为越冬期负积温、最冷月平均温度、Penman模型估算的蒸腾量以及每年的降雨量。王连喜等<sup>[22]</sup>采用冬前积温、最冷月平均温度、越冬期负积温以及全生育期积温4个热量指标作为北界参量,从单个站点的热量资源角度以及不同站点坐标位置的纬度信息角度,分析了气候变暖背景下京津冀地区冬小麦种植北界的变化趋势,发现1961—2010年北界纬度以每年 $0.0043^{\circ}$ 的速率北移。此外,对冬小麦种植北界气候指标的确定还包括这些指标的临界点。对于冬小麦生物学冻害温度指标,大部分学者选择相同的临界点,如最冷月平均温度为 $-8^{\circ}\text{C}$ 、平均最低温度为 $-15^{\circ}\text{C}$ 以及极端最低气温 $-22\sim-24^{\circ}\text{C}$ 。而对于冬小麦耐冻温度指标,不同地区的临界点不同,如越冬期负积温,郝志新等<sup>[19]</sup>在中国东北采用 $-600^{\circ}\text{C}$ ,刘德祥等<sup>[23]</sup>在中国西北地区采用 $-500^{\circ}\text{C}$ ,郑小华等<sup>[24]</sup>在陕西省采用 $-400^{\circ}\text{C}$ ,王连喜等<sup>[22]</sup>在京津冀地区采用 $-450^{\circ}\text{C}$ ,高桂芹等<sup>[25]</sup>认为河北唐山地区冬小麦负积温在 $-350\sim-450^{\circ}\text{C}$ 之间可安全越冬。

气候变化对中国冬小麦种植北界产生重大影响。基于崔读昌<sup>[10]</sup>提出的冬小麦种植北界指标,杨晓光等<sup>[11]</sup>认为,与1951—1980年相比,1981—2007年冬小麦种植北界在辽宁省东部北移约120 km,西部北移约80 km,河北省北移约50 km,山西省北移约40 km,陕西省西部北移约47 km,内蒙古、宁夏一线北移约200 km,甘肃西扩20 km,青海西扩120 km。排放情景特别报告(special report on emissions scenarios, SRES)的高经济发展能源种类平衡发展排放情景A1B下,相较于1951—1980年,2011—2040年和2041—2050年种植北界在辽宁省、甘肃省和宁夏回族自治区继续北移,在青海省继续西扩<sup>[15]</sup>。张梦婷等<sup>[14]</sup>认为,区域气候模式PRECIS(providing regional climates for impact studies)在代表性浓度路径(representative concentration pathways, RCPs) RCP4.5情景下,与1981—2010年相比,2071—2097年种植北界将平均北移约147.8 km,其中辽宁省北移最明显,其次为山西省。由于以往对冬小麦种植北界的研究,或基于全国范围,面积较大,或基于单个站点,仅分析气象指标的变化趋势,此外,所选气候因子较为局限,所选情景较为单一,又因黄淮海地区为中国冬小麦重要产地,故此本研究以该地区为对象,从冬小麦生理学冻害温度以及生育期所需积温两方面选择5个气候指标(最冷月平均温度 $\geq -8^{\circ}\text{C}$ 、极端最低气温 $\geq -24^{\circ}\text{C}$ 、冬前积温 $\geq 400^{\circ}\text{C}$ 、越

冬期负积温 $\geq -450^{\circ}\text{C}$ 、全生育期积温 $\geq 1700^{\circ}\text{C}$ )作为北界参量,分析1961—2017年以及未来主要情景下2011—2100年黄淮海地区冬小麦种植北界的变化趋势,为黄淮海地区冬小麦种植区科学应对气候变化、气候资源最大化利用、趋利避害提供数据支撑。

## 1 数据来源与方法

### 1.1 历史气象数据

历史气象数据来自中国气象科学数据共享网(<http://cdc.nmic.cn/home.do>),包括黄淮海及周边地区共94个气象站1961—2017年逐日平均温度和最低温度气象资料。

### 1.2 未来气候模式与情景数据

联合国政府间气候变化专门委员会提出的代表性浓度路径新情景中,RCP4.5为中间稳定路径,接近当前实际发展,RCP8.5为高浓度路径,是发展的上限,故此本研究采用这2种情景来分析未来黄淮海地区冬小麦种植北界的变化趋势。大气环流模型(general circulation models, GCMs)采用加拿大气候模式与分析中心推出的CanESM2(the second generation of Canadian Earth System Model)气候模式。该气候模式与其他气候模式相比,在中国的年尺度和月尺度上对温度的模拟具有较高精度<sup>[26,27]</sup>,且黄淮海地区采用统计降尺度模型(statistical downscaling model, SDSM)对其处理后,日尺度上率定期和验证期的观测值与模拟值的确定性系数在0.95以上,均方根误差在0.3之内<sup>[28]</sup>,因此该模式适用于中国黄淮海地区。气候模式数据来自Canadian Climate Data and Scenarios(<http://www.cccsn.ec.gc.ca>),具体降尺度预测过程详见文献<sup>[28]</sup>。

### 1.3 冬小麦种植北界气象指标

黄淮海地区属于温带大陆性季风气候,冬小麦—夏玉米轮作是其主要种植模式。冬小麦一般在每年10月份播种,翌年6月份收获,大部分种植区的灌溉条件已经能够满足生长期的正常需水量<sup>[29]</sup>。因此,本研究在前人研究以及实际种植基础上,考虑冬小麦理论播种期(10月份日均温连续3 d低于 $18^{\circ}\text{C}$ <sup>[29]</sup>)以及不影响夏玉米收获日期,以冬小麦可种植最大机率来研究北界的演变趋势,将冬小麦播种期定为每年的10月1号,收获期定为翌年6月20号。采用5日滑动平均法在冬小麦生育期内将日平均温度稳定降至0和稳定升至0期间定为冬小麦越冬期,从冬小麦生理学冻害温度以及生育期所需积温两方面选择5个气象指标作为黄淮海地区冬小麦种植北界气象参数,分别为:最冷月平均气温 $\geq -8^{\circ}\text{C}$ <sup>[16]</sup>、极端最低气温 $\geq -24^{\circ}\text{C}$ <sup>[10]</sup>、冬前积温 $\geq 400^{\circ}\text{C}$ <sup>[22,30,31]</sup>、越冬期负积温 $\geq -450^{\circ}\text{C}$ <sup>[22,25,30]</sup>以及全生育期积温 $\geq 1700^{\circ}\text{C}$ <sup>[22,30,32]</sup>。

### 1.4 冬小麦种植北界确定方法

根据所选黄淮海地区冬小麦种植北界气象指标,同时满足5个指标的年份称其为可种植年份,该年份的可种植概率赋值为1,不满足任何一个指标的年份为不可种植年份,该年份的可种植概率赋值为0。

$$P_X = \begin{cases} 1, T_{A,X} \geq -8 \text{ and } T_{B,X} \geq -24 \text{ and } T_{C,X} \geq 400 \text{ and} \\ T_{D,X} \geq -450 \text{ and } T_{E,X} \geq 1700 \\ 0, T_{A,X} < -8 \text{ or } T_{B,X} < -24 \text{ or } T_{C,X} < 400 \text{ or} \\ T_{D,X} < -450 \text{ or } T_{E,X} < 1700 \end{cases} \quad (1)$$

式中  $P_X$  为  $X$  年份的可种植概率,  $X$  为实际 1961—2017 年以及未来 2 种情景下 2011—2100 年;  $T_{A,X}$ 、 $T_{B,X}$ 、 $T_{C,X}$ 、 $T_{D,X}$ 、 $T_{E,X}$  分别为  $X$  年的 1 月份平均气温、1 月份极端最低气温、冬前积温、越冬期负积温、全生育期积温,  $^{\circ}\text{C}$ 。

为了更好地探究冬小麦可种植北界的时空动态变化过程, 本研究将 1961—2010 年每 10 a 作为一个年代际进行划分, 1961—1970 年、1971—1980 年、1981—1990 年、1991—2000 年、2001—2010 年, 2011—2017 年 7 a 作为一个年代际划分; 基于农业种植制度变化的时间尺度, 未来情境下 2011—2100 年每 30 a 作为一个年代际进行划分, 分别为 2011—2040 年、2041—2070 年、2071—2100 年。采用王培娟等<sup>[12]</sup>提出的统计方法计算各个站点冬小麦可种植年代际概率, 具体计算公式

$$P_{Y,N} = \frac{\sum_{x=Y}^{x=Y+N-1} P_x}{N} \times 100\% \quad (2)$$

式中  $P_{Y,N}$  为  $Y$  年份所在  $N$  年代际的冬小麦可种植概率,  $Y$  为每个年代际的开始年份, 分别为 1961、1971……2011、2041、2071,  $N$  为年代际年数, 本研究为 10、7 和 30。

基于各站点冬小麦可种植年代际概率, 参照 80% 的气候保证率比例, 将年代际概率  $\geq 80\%$  的地区称其为冬小麦可种植区<sup>[19-20]</sup>, 年代际概率  $< 80\%$  的地区称其为不可种植区, 可种植区与不可种植区的分界线即为冬小麦种植北界。

## 2 结果与分析

### 2.1 黄淮海地区冬小麦种植北界偏移现状

基于确定的 5 个北界指标阈值估算出的冬小麦可种植年代际概率, 采用普通克里格法进行插值, 绘制出 1961—2017 年各个年代际 80% 气候保证率下冬小麦种植北界, 如图 1 所示。

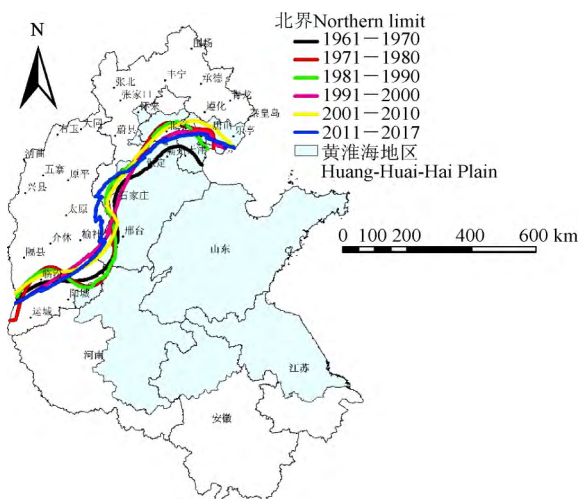


图 1 黄淮海地区各年代际冬小麦种植北界

Fig.1 Northern limit of winter wheat in different decades in Huang-Huai-Hai Plain

从图 1 可以看出, 1961—1970 年黄淮海地区冬小麦种植北界主要分布在天津—河北霸州—保定—石家庄—邢台—山西临汾一线; 1971—1980 年北界北移, 河北境内北移约 65 km, 到达北京、唐山附近, 山西境内北移约 40 km, 到达隰县附近; 与 1971—1980 年相比, 1981—1990 年北界变化很小, 仅在河北唐山附近略南移、山西运城附近略北移; 与 1981—1990 年相比, 1991—2000 年北界变化显著, 尤以山西境内为甚, 将原本的正弦线趋势压缩为平滑抛物线趋势, 临汾附近南移, 阳城附近北移, 同时, 北京附近南移, 河北唐山附近北移, 石家庄附近东移, 邢台附近西移; 2001—2010 年冬小麦种植北界与 1991—2000 年相比, 呈北移西扩趋势, 北京附近北移约 30 km, 河北石家庄附近西扩约 30 km, 山西临汾附近北移约 40 km, 西扩约 50 km; 2011—2017 年冬小麦种植北界与 2001—2010 年相比, 呈南移西扩趋势, 河北唐山附近南移约 40 km, 石家庄附近西扩约 30 km, 山西临汾附近南移约 40 km。由统计年鉴知, 相较于 2001—2010 年, 2011—2017 年河北省冬小麦种植面积减少 1.30%, 冬小麦大部分种植在邯郸、邢台、石家庄、保定、沧州、衡水、廊坊、唐山附近, 秦皇岛附近有小范围种植, 但逐年减少, 张家口、承德目前没有种植冬小麦<sup>[33]</sup>; 与 2001—2010 年相比, 2011—2017 年山西省冬小麦种植面积减少 3.88%, 大部分种植在南部的运城、临汾、阳城, 介休附近有少量种植, 中部隰县、榆社、河曲、五寨、原平、兴县、太原等附近几乎没有种植冬小麦, 北部右玉、大同由于平均气温更低, 更不适合冬小麦种植<sup>[34]</sup>, 这与本研究结果一致。

### 2.2 RCP4.5 情景下黄淮海地区冬小麦种植北界偏移状况

将 RCP4.5 情景下黄淮海地区 94 个站点 3 个年代际 2011—2040 年、2041—2070 年、2071—2100 年的冬小麦可种植概率进行插值并绘制 80% 保证率下冬小麦种植北界, 如图 2 所示。

从图 2 可以看出, 未来 RCP4.5 情景下 3 个年代际黄淮海地区及周边冬小麦可种植概率的空间分布非常相似, 均从东南方向向西北方向递减, 且随着时间推移, 不同年代际概率的分界线均逐渐向西北方向移动 (图 2a~2c)。冬小麦可种植年代际概率为  $> 0.2 \sim 0.8$  的区域主要分布在山西中部、山西与河北交界处以及北京北部。与 2011—2017 年黄淮海地区北界的实际趋势相比, RCP4.5 情景 80% 保证率下 2011—2040 年冬小麦种植北界整体趋势与之较一致, 在河北乐亭—唐山—北京—河北保定—石家庄—邢台—山西榆社—临汾一线, 但在河北唐山、乐亭附近, 北界北移约 45 km, 在河北石家庄附近, 北界东移约 40 km, 在山西临汾附近, 北界北移约 35 km (图 2d)。与 2011—2040 年相比, 2041—2070 年北界变化较大: 河北唐山、乐亭附近北移至秦皇岛; 山西临汾附近北移至介休, 榆社附近形成一个面积约 13 600 km<sup>2</sup> 的椭圆, 且为不可种植区域 (图 2d)。相较于 2041—2070 年, 2071—2100 年北界在河北境内趋于稳定, 在山西境内北移约 60 km, 到达太原北部, 且榆社附近的不可种植区域消失。

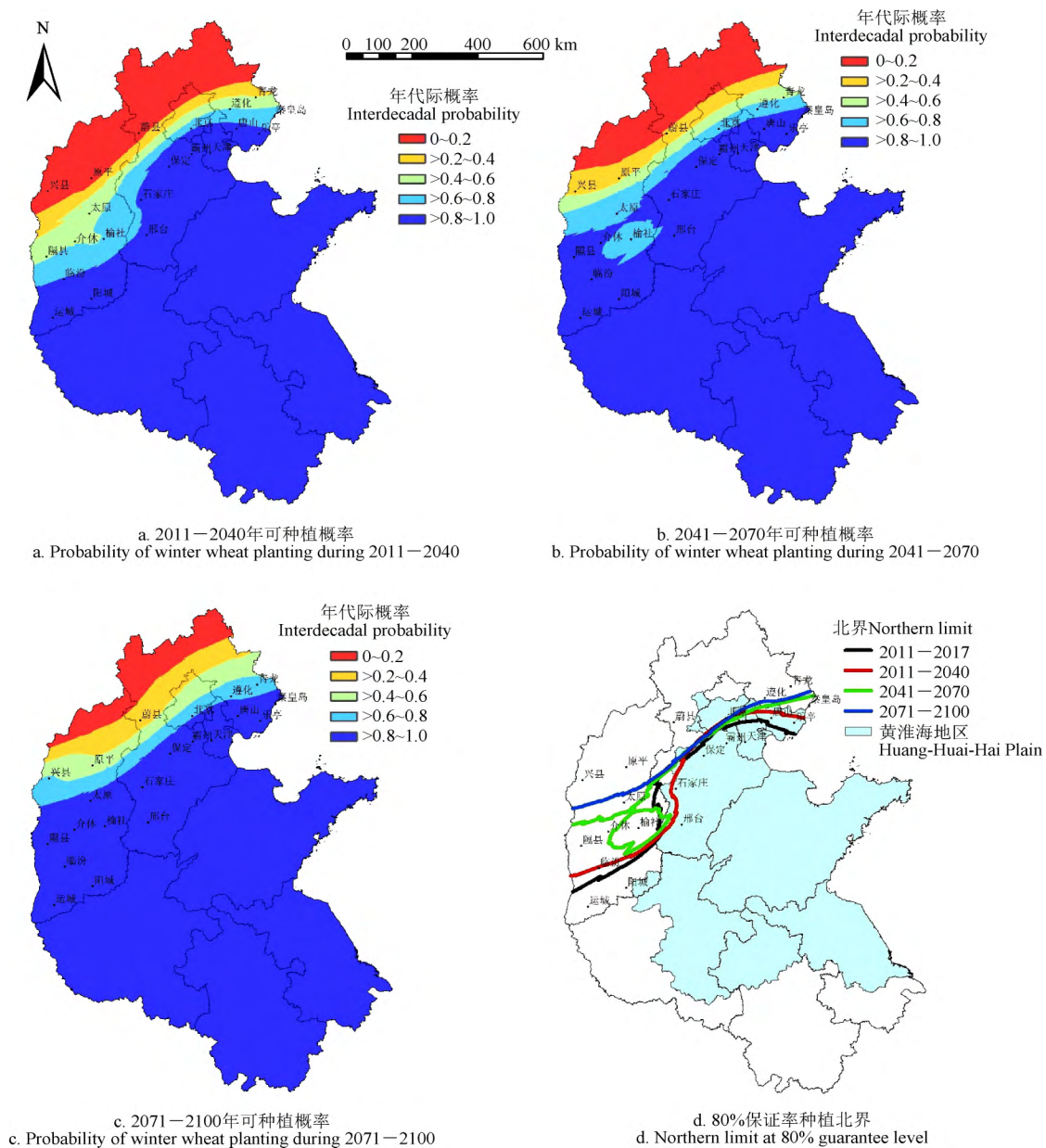


图2 RCP4.5情景下黄淮海地区冬小麦可种植年代际概率及80%保证率下种植北界

Fig.2 Probability of winter wheat planting and northern limit of winter wheat planting at 80% guarantee level under RCP4.5 in Huang-Huai-Hai Plain

### 2.3 RCP8.5情景下黄淮海地区冬小麦种植北界偏移状况

RCP8.5情景下黄淮海地区2011—2100年3个年代际的冬小麦可种植概率及80%保证率下种植北界如图3所示。

从图3可以看出,未来RCP8.5情景下3个年代际黄淮海地区及周边冬小麦可种植概率的空间分布差异较大,主要表现在不同年代际概率的分界线明显向西北方向移动,且呈“S”状。冬小麦可种植年代际概率为 $>0.2\sim 0.8$ 的区域,2011—2040年主要分布在山西太原附近、山西与河北交界处以及北京附近(图3a),2041—2070年则分布在山西五寨附近、河北张家口与丰宁附近(图3b),2071—2100年北移至山西河曲附近、西扩至河北张北附近(图3c)。与2011—2017年黄淮海地区北

界的实际趋势相比,RCP8.5情景80%保证率下2011—2040年冬小麦种植北界整体趋势与之较一致:主要分布在河北秦皇岛—唐山—北京—河北保定—石家庄—山西临汾一线。其中,在河北唐山与乐亭附近,北界北移约50 km,河北石家庄附近,北界东移约40 km,山西临汾附近,北界北移约35 km(图3d)。与2011—2040年相比,2041—2070年北界北移距离较大:河北境内北移至遵化、青龙附近,山西境内北移至兴县、太原附近。此外,榆社附近出现一个面积约4 800 km<sup>2</sup>的不可种植区域。2071—2100年北界呈“S”状,主要分布在河北承德—丰宁—张家口—怀来—保定—山西原平—五寨—河曲一线,与2041—2070年相比,河北境内北移约70 km,山西境内北移约75 km。

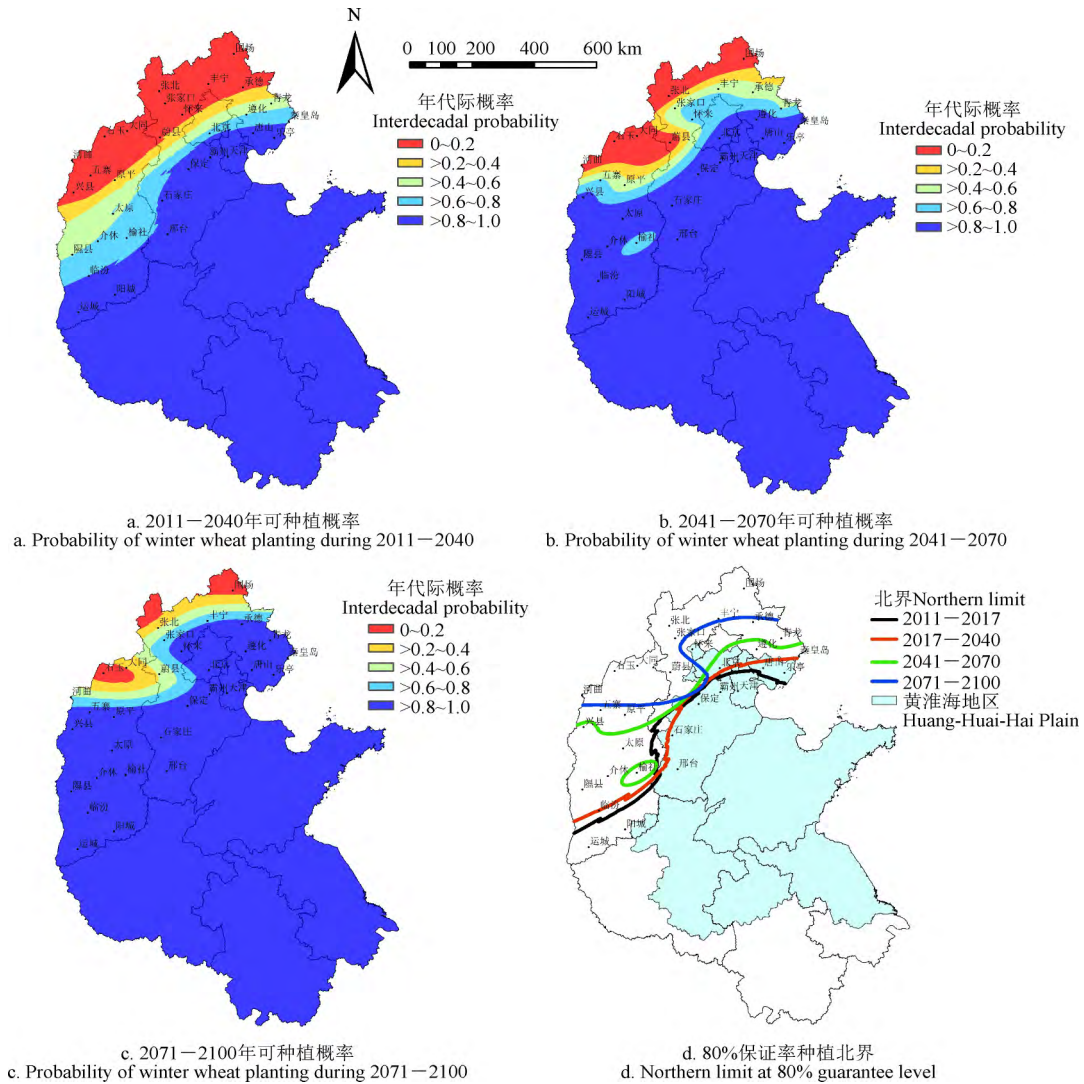


图 3 RCP8.5 情景下黄淮海地区冬小麦可种植年代际概率及 80% 保证率下种植北界  
 Fig.3 Probability of winter wheat planting and northern limit of winter wheat planting at 80% guarantee level under RCP8.5 in Huang-Huai-Hai Plain

### 3 讨论

黄淮海地区 1971—2017 年的 5 个年代际冬小麦种植北界，均与相邻前 1 个年代际相比，有所变动。其中，1971—1980 年北移距离最大，1981—1990 年北移距离最小，1991—2000 年整体变化幅度最大，2011—2017 年则呈南移现象（图 1）。北界的这种变化趋势与各个年代际冬季气温的变化情况紧密相关，北京、天津、河北省、山西省四省市冬季（12 月、1 月、2 月）积温 1971—1980 年较 1961—1970 年平均每年增加 61.36 °C，1981—1990 年较 1971—1980 年平均每年增加 9.40 °C，1991—2000 年较 1981—1990 年平均每年增加 106.64 °C，2011—2017 年较 2001—2010 年平均每年降低 19.10 °C。冬季气温骤然升高将导致北界大幅北移或整体变化幅度加剧，变化较小则表现为北界北移距离较小，温度降低则使北界南移，这与杨晓琳等<sup>[2-3,5]</sup>的结论一致。1961—1970 年山西省的冬小麦种植北界，李伟君等<sup>[3]</sup>认为到达山西中北部，王培娟等<sup>[12]</sup>认为到达山西中部，钱锦霞等<sup>[20]</sup>认为在临汾、晋

城附近，本研究则发现在临汾、阳城附近。前两者的结果与本研究结论差异较大，第三者的结果与本研究结论相近。出现上述现象的原因可能是所选气候指标的不同。前两者仅考虑了冬小麦的抗冻指标，第三者考虑了抗冻、耐冻指标，本研究则综合了冬小麦抗冻、耐冻、全生育期热量指标。基于 2011—2017 年河北省、山西省的统计年鉴资料<sup>[33-34]</sup>，河北省、山西省冬小麦的种植区域与本研究 2011—2017 年北界结果较一致，这在一定程度上说明所选指标的精确度较高。此外，所选区域的尺度大小以及站点的数量多少等都会对研究的结果产生一定影响。王连喜等<sup>[22]</sup>基于抗冻、耐冻、全生育期热量指标并结合栅格数和站点纬度信息，得到了京津冀地区冬小麦可种植北界的年代际回归方程，该方法对北界的变化趋势研究具有一定的价值，但不能直观的表现出各个地区北界的动态变化过程，因此，本研究选择普通克里格方法对各个年代际冬小麦可种植概率进行插值，以便更直接的观察到各个地区北界的动态变化过程。普通克里格方法通过对未知样点周围实测样点的平均权重系数对未

知样点进行线性无偏最优估计<sup>[35]</sup>,但也存在着过度平滑问题<sup>[36]</sup>。如2001—2010年和2011—2017年,考虑到山西介休站点周围隰县、榆社、太原等站点的权重系数,在估值过程中对介休站点的原始数据产生压缩作用及平滑效应,从而使该站点由可种植区域变为不可种植区域,这与实际情况不符。因此,采用该方法对变化较剧烈的空间属性进行估计和预测时,需要进一步深入研究。

未来2种情景下,RCP4.5冬小麦种植北界变化趋势明显小于RCP8.5。RCP4.5情景下,与2041—2070年相比,2071—2100年北界在河北境内趋于稳定,在山西境内北移且距离较小(图2d),RCP8.5情景下,与2041—2070年相比,2071—2100年北界在河北和山西境内均北移且距离较大(图3d)。分析认为,2种情景下河北、山西2省的不同表现,可能与不同情景下排放路径和两地区地理因素紧密相关:RCP4.5代表中浓度路径发展,辐射和温室气体浓度路径形状为不超过目标水平趋于稳定,而RCP8.5代表高浓度路径发展,辐射和温室气体排放持续上升<sup>[37]</sup>。RCP4.5情景下,随着温室气体排放量增加气温升高,但在河北境内受燕山山脉阻挡,热量资源向北传递速度较慢,因而北界北移速度较慢,在山西境内,由于山脉多为南北走向,热量资源向北传递速度较快,进而北界北移速度较快。RCP8.5情景下,气温增幅较快,燕山已无法阻挡热量资源向北传递的趋势,故河北境内北界的北移速度也较快。此外,未来2种情景下,2041—2070年山西境内均出现一个以榆社为中心的不可种植区域,这可能是由于榆社所处山地,海拔较高,气温较低,且四周为太原盆地、长治盆地、华北平原,极易形成四周为可种植区域,而中间为不可种植区域的现象,又由于RCP8.5情景下气温增加较大,所以RCP8.5情景下不可种植区域面积较小。

尽管冬小麦北界有北移西扩趋势,且这种趋势正在逐渐加剧,但冬小麦合理规划扩种并不是如此简单,需要考虑诸多因素。其中,北移冬小麦品种的选择为首要因素,现有品种在北移区种植可能会引起生育期改变<sup>[38]</sup>,因此,强冬性小麦品种亟需研发。其次为田间管理制度。冬小麦分蘖节深度与越冬期死亡率关系密切,必须采取相应措施确保冬小麦安全越冬<sup>[10]</sup>。此外还应提高对气象灾害的预判力,考虑北移冬小麦种植的经济性。

#### 4 结 论

本研究在前人研究的基础上选择最冷月平均温度 $\geq -8\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、极端最低气温 $\geq -24\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、冬前积温 $\geq 400\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、越冬期负积温 $\geq -450\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、全生育期积温 $\geq 1\ 700\text{ }^{\circ}\text{C}$ 作为冬小麦种植北界参数,系统地分析了黄淮海地区冬小麦种植北界的时间演变特点,并预测了不同情景下黄淮海地区冬小麦种植北界的未来变化趋势,得到主要结论如下:

1) 1961—1970年黄淮海地区冬小麦种植北界主要分布于天津—河北霸州—保定—石家庄—邢台—山西临汾一线;1971—1980年,该线在河北境内北移约65 km,在山西境内北移约40 km;与1971—1980年相比,1981—1990年北界变化较小,仅在河北唐山附近略南移,在

山西运城附近略北移;与1981—1990年相比,1991—2000年北界变化较大,尤以山西地区为最,将原本的正弦线趋势压缩为平滑抛物线趋势,临汾附近南移,阳城附近北移;相较于1991—2000年,2001—2010年北界略北移;相较于2001—2010年,2011—2017年北界呈南移现象。

2) 未来RCP4.5情景下,2011—2040年冬小麦种植北界主要分布在河北乐亭—唐山—北京—河北保定—石家庄—邢台—山西榆社—临汾一线;2041—2070年,该线在河北境内北移至秦皇岛,山西境内北移至介休;与2041—2070年相比,2071—2100年北界在河北境内趋于稳定,在山西境内北移至太原北部。

3) 未来RCP8.5情景下,冬小麦种植北界变化较大:2011—2040年,北界位于河北秦皇岛—唐山—北京—河北保定—石家庄—山西临汾一线;2041—2070年,该线在河北境内北移至遵化、青龙附近,在山西境内北移至兴县、太原附近;2071—2100年,北界北移至承德—丰宁—张家口—怀来—保定—山西原平—五寨—河曲一带。

#### [参 考 文 献]

- [1] 陈怀亮,徐祥德,杜子璇,等.黄淮海地区植被活动对气候变化的响应特征[J].应用气象学报,2009,20(5):513—520.  
Chen Huailiang, Xu Xiangde, Du Zixuan, et al. Vegetation activity responses to climate change in the Huang-Huai-Hai area based on GIMMS NDVI dataset[J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2009, 20(5): 513—520. (in Chinese with English abstract)
- [2] 杨晓琳,宋振伟,王宏,等.黄淮海农作区冬小麦需水量时空变化特征及气候影响因素分析[J].中国生态农业学报,2012,20(3):356—362.  
Yang Xiaolin, Song Zhenwei, Wang Hong, et al. Spatio-temporal variations of winter wheat water requirement and climatic causes in Huang-Huai-Hai Farming Region[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2012, 20(3): 356—362. (in Chinese with English abstract)
- [3] 李祎君,梁宏,王培娟.气候变暖对华北冬小麦种植界限及生育期的影响[J].麦类作物学报,2013,33(2):382—388.  
Li Yijun, Liang Hong, Wang Peijuan. Effects of climate warming on the planting boundary and developmental stages of winter wheat[J]. Journal of Triticeae Crops, 2013, 33(2): 382—388. (in Chinese with English abstract)
- [4] 李晴,甄文超.河北省冬小麦越冬冻害风险分析[J].安徽农业科学,2017,45(28):175—178.  
Li Qing, Zhen Wenchao. Analysis on the risk of freezing injury to winter wheat in Hebei province[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2017, 45(28): 175—178. (in Chinese with English abstract)
- [5] 邹立坤,张建平,姜青珍,等.冬小麦北移种植的研究进展[J].中国农业气象,2001,22(2):53—57.  
Zou Likun, Zhang Jianping, Jiang Qingzhen, et al. Research and development of winter wheat growing in northern

- region[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2001, 22(2): 53—57. (in Chinese with English abstract)
- [6] 蔡剑, 姜东. 气候变化对中国冬小麦生产的影响[J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(9): 1726—1733.  
Cai Jian, Jiang Dong. The effect of climate change on winter wheat production in China[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2011, 30(9): 1726—1733. (in Chinese with English abstract)
- [7] 李克南, 杨晓光, 慕臣英, 等. 全球气候变暖对中国种植制度可能影响Ⅷ—气候变化对中国冬小麦冬春性品种种植界限的影响[J]. 中国农业科学, 2013, 46(8): 1583—1594.  
Li Kenan, Yang Xiaoguang, Mu Chenying, et al. The possible effects of global warming on cropping systems in China Ⅷ: The effects of climate change on planting boundaries of different winter-spring varieties of winter wheat in China[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2013, 46(8): 1583—1594. (in Chinese with English abstract)
- [8] 俄有浩, 霍治国, 马玉平. 北方春小麦种植区小麦种植结构变化的气候依据与冻害风险[J]. 自然灾害学报, 2015, 24(5): 149—159.  
E Youhao, Huo Zhiguo, Ma Yuping. Climate cause for the change in cropping structure from spring wheat to winter wheat and its freeze injury risk in north China[J]. Journal of Natural Disasters, 2015, 24(5): 149—159. (in Chinese with English abstract)
- [9] Woodward F I. Climate and Plant Distribution[M]. London: Cambridge University Press, 1987.
- [10] 崔读昌. 寒地小麦越冬冻害指标及其防御措施[J]. 气象, 1978(2): 4—5.  
Cui Duchang. The freezing damage index and defensive measures of winter wheat in cold region[J]. Meteorological Monthly, 1978(2): 4—5. (in Chinese with English abstract)
- [11] 杨晓光, 刘志娟, 陈阜. 全球气候变暖对中国种植制度可能影响 I —气候变暖对中国种植制度北界和粮食产量可能影响的分析[J]. 中国农业科学, 2010, 43(2): 329—336.  
Yang Xiaoguang, Liu Zhijuan, Chen Fu. The possible effects of global warming on cropping systems in China I: The possible effects of climate warming on northern limits of cropping systems and crop yields in China[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2010, 43(2): 329—336. (in Chinese with English abstract)
- [12] 王培娟, 张佳华, 谢东辉, 等. 1961—2010年我国冬小麦可种植区变化特征[J]. 自然资源学报, 2012, 27(2): 215—224.  
Wang Peijuan, Zhang Jiahua, Xie Donghui, et al. Spatial characteristic analysis on planting area of winter wheat in China from 1961 to 2010[J]. Journal of natural resources, 2012, 27(2): 215—224. (in Chinese with English abstract)
- [13] 胡实, 莫兴国, 林忠辉. 气候变化对海河流域主要作物物候和产量影响[J]. 地理研究, 2014, 33(1): 3—12.  
Hu Shi, Mo Xingguo, Lin Zhonghui. The contribution of climate change to the crop phenology and yield in Haihe River Basin[J]. Geographical Research, 2014, 33(1): 3—12. (in Chinese with English abstract)
- [14] 张梦婷, 张玉静, 佟金鹤, 等. 未来气候情景下冬小麦潜在北移区农业气候资源变化特征[J]. 气候变化研究进展, 2017, 13(3): 243—252.  
Zhang Mengting, Zhang Yujing, Tong Jinhe, et al. Variations of agro-climatic resources under a future climate scenario in the potential northward region of winter wheat[J]. Climate Change Research, 2017, 13(3): 243—252. (in Chinese with English abstract)
- [15] 杨晓光, 刘志娟, 陈阜. 全球气候变暖对中国种植制度可能影响Ⅵ—未来气候变化对中国种植制度北界的可能影响[J]. 中国农业科学, 2011, 44(8): 1562—1570.  
Yang Xiaoguang, Liu Zhijuan, Chen Fu. The possible effects of global warming on cropping systems in China Ⅵ: Possible effects of future climate change on northern limits of cropping system in China[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2011, 44(8): 1562—1570. (in Chinese with English abstract)
- [16] 王宏. 农业生态环境研究[M]. 北京: 气象出版社, 1989: 94—101.
- [17] 金之庆, 方娟, 葛道阔, 等. 全球气候变化影响我国冬小麦生产之前瞻[J]. 作物学报, 1994, 20(2): 186—197.  
Jin Zhiqing, Fang Juan, Ge Daokuo, et al. Prospect to the impacts of climate change on winter wheat production in China[J]. Acta Agronomica Sinica, 1994, 20(2): 186—197. (in Chinese with English abstract)
- [18] 江敏, 金之庆, 高亮之, 等. 全球气候变化对中国冬小麦生产的阶段性影响[J]. 江苏农业学报, 1998, 14(2): 90—95.  
Jiang Min, Jin Zhiqing, Gao Liangzhi, et al. Gradual impacts of climate change on winter wheat production in China[J]. Jiangsu Journal of Agricultural Sciences, 1998, 14(2): 90—95. (in Chinese with English abstract)
- [19] 郝志新, 郑景云, 陶向新. 气候增暖背景下的冬小麦种植北界研究—以辽宁省为例[J]. 地理科学进展, 2001, 20(3): 254—261.  
Hao Zhixin, Zheng Jingyun, Tao Xiangxin. A study on northern boundary of winter wheat during climate warming: A case study in Liaoning province[J]. Progress in Geography, 2001, 20(3): 254—261. (in Chinese with English abstract)
- [20] 钱锦霞, 李娜, 韩普. 冬季气候变暖对山西省冬小麦可种植区的影响[J]. 地理学报, 2014, 69(5): 672—680.  
Qian Jinxia, Li Na, Han Pu. Influence of climate warming in winter on the winter wheat cultivable area in Shanxi Province[J]. Acta Geographica Sinica, 2014, 69(5): 672—680. (in Chinese with English abstract)
- [21] Sun Jingsong, Zhou Guangsheng, Sui Xinghua. Climatic suitability of the distribution of the winter wheat cultivation zone in China[J]. European Journal of Agronomy, 2012, 43: 77—86.
- [22] 王连喜, 刘畅, 李琪, 等. 气候变暖背景下京津冀地区冬小麦种植北界变化[J]. 作物杂志, 2017, 176(1): 61—67.  
Wang Lianxi, Liu Chang, Li Qi, et al. The northern boundary

- variation of winter wheat in Beijing-Tianjin-Hebei under climate warming[J]. *Crops*, 2017, 176(1): 61—67. (in Chinese with English abstract)
- [23] 刘德祥, 董安祥, 陆登荣. 中国西北地区近 43 年气候变化及其对农业生产的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2005, 23(2): 195—201.  
Liu Dexiang, Dong Anxiang, Lu Dengrong. Climatic change of northwest China and its influence on agricultural production in recent 43 years[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2005, 23(2): 195—201. (in Chinese with English abstract)
- [24] 郑小华, 屈振江, 鲁渊平, 等. 气候变化对陕西省冬小麦种植布局的影响分析[J]. *干旱地区农业研究*, 2012, 30(3): 244—251.  
Zheng Xiaohua, Qu Zhenjiang, Lu Yuanping, et al. Impact of climate change on planting distribution of winter wheat in Shaanxi Province[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2012, 30(3): 244—251. (in Chinese with English abstract)
- [25] 高桂芹, 齐作辉. 冬季负积温变化特征及其对冬小麦的影响[J]. *气象科学*, 2007, 35(3): 404—406.  
Gao Guiqin, Qi Zuohui. Impact of negative accumulated temperature variation on winter wheat[J]. *Meteorological Science And Technology*, 2007, 35(3): 404—406. (in Chinese with English abstract)
- [26] 张艳武, 张莉, 徐影. CMIP5 模式对中国地区气温模拟能力评估与预估[J]. *气候变化研究展*, 2016, 12(1): 10—19.  
Zhang Yanwu, Zhang Li, Xu Ying. Simulation and projections of the surface air temperature in China by CMIP5 models[J]. *Climate Change Research*, 2016, 12(1): 10—19. (in Chinese with English abstract)
- [27] Chen Liang, Frauenfeld Oliver W. Surface air temperature changes over the twentieth and twenty-first centuries in China simulated by 20 CMIP5 models[J]. *Journal of Climate*, 2014, 27(11): 3920—3937.
- [28] 唐晓培, 宋妮, 陈智芳, 等. 未来主要气候情景下黄淮海地区参考作物蒸散量时空分布[J]. *农业工程学报*, 2016, 32(14): 168—176.  
Tang Xiaopei, Song Ni, Chen Zhifang, et al. Spatial and temporal distribution of  $ET_0$  under main climate scenarios in future across Huang-Huai-Hai Plain[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2016, 32(14): 168—176. (in Chinese with English abstract)
- [29] 胡实, 莫兴国, 林忠辉. 气候变化对黄淮海平原冬小麦产量和耗水的影响及品种适应性评估[J]. *应用生态学报*, 2015, 26(4): 1153—1161.  
Hu Shi, Mo Xingguo, Lin Zhonghui. Evaluating the response of yield and evapotranspiration of winter wheat and the adaptation by adjusting crop variety to climate change in Huang-Huai-Hai Plain[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2015, 26(4): 1153—1161. (in Chinese with English abstract)
- [30] 林文, 同延安, 韩仲宇, 等. 1961—2001 年间陕西冬小麦种植北界北移的热量资源分析与评价[J]. *中国生态农业学报*, 2013, 21(6): 772—778.  
Lin Wen, Tong Yanan, Han Zhongyu, et al. Analysis and assessment of heat resource for winter wheat northward moving during 1961—2001 in Shaanxi Province[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2013, 21(6): 772—778. (in Chinese with English abstract)
- [31] 吴乾慧, 张勃, 马彬, 等. 气候变暖对黄土高原冬小麦种植区的影响[J]. *生态环境学报*, 2017, 26(3): 429—436.  
Wu Qianhui, Zhang Bo, Ma Bin, et al. Impact of climate warming on winter wheat planting in the Loess Plateau[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2017, 26(3): 429—436. (in Chinese with English abstract)
- [32] 王海洋, 赵德才, 顾根宝, 等. 气象因素对盐城小麦生育、产量及其构成因素的影响与对策[J]. *小麦研究*, 2000, 21(1): 10—13.  
Wang Haiyang, Zhao Decai, Gu Genbao, et al. Effect and countermeasures of meteorological factors on winter wheat growth, yield and its components[J]. *Journal of Wheat Research*, 2000, 21(1): 10—13. (in Chinese with English abstract)
- [33] 河北省人民政府办公厅河北省统计局编. 河北农村统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2001—2017.
- [34] 山西省统计局国家统计局山西调查总队. 山西统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2001—2017.
- [35] 姜勇, 梁文举, 李琪. 利用与回归模型相结合的克里格方法对农田土壤有机碳的估值及制图[J]. *水土保持学报*, 2005, 19(5): 99—102, 128.  
Jiang Yong, Liang Wenju, Li Qi. Prediction and mapping of soil organic carbon in farmland using Kriging combined with Regression[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2005, 19(5): 99—102, 128. (in Chinese with English abstract)
- [36] 张唯, 郑海波, 张剑波. 非线性克里格方法在日降水量分布估算中的应用[J]. *中国农业气象*, 2014, 35(6): 690—699.  
Zhang Wei, Zheng Haibo, Zhang Jianbo. Application of nonlinear Kriging method on estimation of daily precipitation distribution[J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2014, 35(6): 690—699. (in Chinese with English abstract)
- [37] 陈敏鹏, 林而达. 代表性浓度路径情景下的全球温室气体减排和对中国的挑战[J]. *气候变化研究进展*, 2010, 6(6): 436—442.  
Chen Minpeng, Lin Erda. Global greenhouse gas emission mitigation under representative concentration pathways scenarios and challenges to China[J]. *Advances in Climate Change Research*, 2010, 6(6): 436—442. (in Chinese with English abstract)
- [38] 张爱芝, 高志强, 卫丽萍, 等. 北移冬小麦生长发育与气象条件关系的研究[J]. *中国农业气象*, 2004, 25(1): 25—27.  
Zhang Aizhi, Gao Zhiqiang, Wei Liping, et al. Studies on relationship between growth and development of northward winter wheat and meteorological conditions[J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2004, 25(1): 25—27.



## Spatial-temporal distribution and change trend of northern limit of winter wheat planting in Huang-Huai-Hai Plain

Tang Xiaopei<sup>1,2</sup>, Song Ni<sup>1</sup>, Chen Zhifang<sup>1</sup>, Wang Jinglei<sup>1\*</sup>

(1. Key Laboratory of Crop Water Use and Regulation, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Farmland Irrigation Research Institute, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Xinxiang 453002, China; 2. Beijing Key Laboratory of Urban Hydrological Cycle and Sponge City Technology, College of Water Sciences, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

**Abstract:** Studying the northern limit of winter wheat in the past, present and future in Huang-Huai-Hai Plain may provide theoretical basis and technical support to mitigate climate change on winter wheat cultivation in the sensitive zone in the North China. Daily meteorological data during 1961-2017 at 94 climatic stations in Huang-Huai-Hai Plain and the projected temperature during 2011-2100 generated by the Statistical Downscaling Model (SDSM4.2) and the second generation of Canadian Earth System Model (CanESM2) in representative concentration paths RCP4.5 and RCP8.5 scenarios were used in this study. Five climatic indicators, the coldest monthly mean temperature ( $\geq -8$  °C), the extreme minimum temperature ( $\geq -24$  °C), the accumulated temperature before overwintering ( $\geq 400$  °C), the negative accumulated temperature during overwintering ( $\geq -450$  °C), and the accumulated temperature during the whole growth period of winter wheat ( $\geq 1700$  °C), were used to evaluate the probabilities of winter wheat planting in different decades and the change of northern limit of winter wheat at 80% guarantee level in Huang-Huai-Hai Plain from 1961 to 2100. Main results were listed as following: during 1961-1970, the northern limit of winter wheat in Huang-Huai-Hai Plain was mainly distributed in the area of Tianjin-Bazhou-Baoding-Shijiazhuang-Xingtai-Linfen; during 1971-1980, it moved northwards by 65 km in Hebei province and 40 km in Shanxi province, respectively. Compared with 1971-1980, northern limit during 1981-1990 changed a little, it moved slightly southwards near Tangshan in Hebei province and northwards near Yuncheng in Shanxi province. Compared with 1981-1990, the northern limit during 1991-2000 showed a significant change, especially in Shanxi province, it gradually became a smooth parabola from a sine curve. After that, it just moved northward slightly during 2001-2010, then compared with 2001-2010, it showed a trend of moving southward during 2011-2017. Under RCP4.5 scenario, the spatial distribution of probabilities of winter wheat planting during 2011-2040, 2041-2070, 2071-2100 in Huang-Huai-Hai Plain and its surrounding areas were very similar, which decreased gradually from southeast to northwest, and the boundaries of interdecadal probabilities moved to northwest as time went on. The northern limit of winter wheat at 80% guarantee level mainly distributed in the area of Laoting-Tangshan-Beijing-Baoding-Shijiazhuang-Xingtai-Yushe-Linfen during 2011-2040. However, during 2041-2070, it moved to the area of Qinhuangdao in Hebei province and Jiexiu in Shanxi province. Besides, a non-planting zone about 13,600 km<sup>2</sup> appeared near Yushe in Shanxi province. Compared with 2041-2070, northern limit during 2071-2100 tended to be stable in Hebei province and moved to the north of Taiyuan in Shanxi province. Under RCP8.5 scenario, the spatial distribution of probabilities of winter wheat planting in the next three periods were quite different, which mainly reflected in the boundaries of interdecadal probabilities of winter wheat planting, it moved to northwest obviously and became a curve liked "S", while the northern limit of winter wheat at 80% guarantee level changed obviously. During 2011-2040, the northern limit of winter wheat was mainly distributed in the area of Qinhuangdao-Tangshan-Beijing- Baoding-Shijiazhuang-Linfen, then it moved northward to the area of Zunhua, Qinglong in Hebei province and Xingxian, Taiyuan in Shanxi province during 2041-2070, and the non-planting zone also appeared near Yushe in Shanxi province, however, the area reduced to 4 800 km<sup>2</sup>. During 2071-2100, the northern limit eventually arrived at the area of Chengde-Fengning-Zhangjiakou-Huailai-Baoding- Yuanping-Wuzhai-Hequ. In addition, compared with RCP8.5, the change trend of northern limit under RCP 4.5 scenario was smaller. It is an important measure to adjust the agricultural planting structure according to the influence of climate change. The study of the response of northern limit of winter wheat to climate change in Huang-Huai-Hai Plain and predicting its trend in the future can not only make rational use of potential resources and effectively avoid nature disasters in this region, but also has an important scientific significance and practical value for China's food security.

**Keywords:** climate change; temperature; crops; winter wheat; northern limit; Huang-Huai-Hai Plain