

# 黄土高原冬小麦产量潜力时空分布 特征及其影响因素

张玲玲<sup>1,2</sup>, 冯浩<sup>1,3</sup>, 董勤各<sup>1,3</sup>

(1.中国科学院水利部水土保持研究所 陕西 杨凌 712100; 2.中国科学院大学 北京 100049;  
3.西北农林科技大学中国旱区节水农业研究院 陕西 杨凌 712100)

**摘要:**研究潜在产量的时空分布特征及其影响因素,有助于定量估计区域内作物产量的可提升空间,揭示限制产量提高的因素,明确未来提高作物产量的重点区域和可行措施。利用中国科学院长武黄土高原农业生态试验站 2004–2008 年的冬小麦数据资料,验证了 APSIM–Wheat 模型在黄土高原的适用性。结合黄土高原 1974–2016 年逐日气候资料和农业气象站的作物观测资料,分析该区冬小麦潜在产量和雨养产量的时空变化特征,明确冬小麦不同等级产量潜力的影响因子及影响程度。研究表明:42 a 来在品种、管理措施不变条件下,黄土高原冬小麦潜在产量和雨养产量的平均值分别是  $6\,554.19\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$  和  $3\,584\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ,变化速率分别为每 10 a 下降  $146.59\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$  和  $65.11\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。气候变化背景下,对黄土高原冬小麦潜在产量影响最大的为生长季内的最高温度和太阳辐射,分别呈负相关关系( $P<0.05$ )和正相关关系( $P<0.05$ )。相关系数分别为 0.36 和 0.35;而水分是决定雨养产量的关键因素,呈显著的正向效应( $P<0.05$ )。充分灌溉条件下,甘肃东南部和山西中部属于冬小麦低产且不稳产区。雨养条件下,山西中部和东北部为冬小麦低产且不稳产区。因此,建议通过栽培技术变革或者选择新品种来提升低产不稳产地区的冬小麦产量。

**关键词:**冬小麦; APSIM–Wheat 模型; 潜在产量; 雨养产量; 黄土高原  
中图分类号: S512.1; S162.5 文献标志码: A

## Spatial-temporal distribution characteristics of winter wheat potential yields and its influencing factors in the Loess Plateau

ZHANG Ling-ling<sup>1,2</sup>, FENG Hao<sup>1,3</sup>, DONG Qin-ge<sup>1,3</sup>

(1. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China;  
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;  
3. Institute of Water-saving Agriculture in Arid Areas of China, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

**Abstract:** A study on the spatial and temporal distribution characteristics of potential yield and its influencing factors could help to quantitatively estimate the potential of crop yield in the region, reveal the factors that limit crop yield, and then identify key areas and possible measures to increase crop yields in the future. The Agricultural Production Systems Simulator (APSIM)–Wheat model was validated using the winter wheat data from Changwu Agro-ecological Experiment Station of the Chinese Academy of Sciences on Loess Plateau from 2004 to 2008, it performed well in simulating leaf area index, yield, and above-ground biomass of winter wheat. Hence, this model has good applicability in Loess Plateau. Combining meteorological data and agro-meteorological observations during 1974–2016 in winter wheat planting areas of Loess Plateau. The spatial-temporal distribution characteristics were analyzed in potential and water-limited yield of winter wheat, and then explored the impacts of climatic factors on

收稿日期:2018-11-25

修回日期:2019-05-07

基金项目:国家高技术研究发展计划(863计划)项目(2013AA102904);国家自然科学基金项目(51879224);国家自然科学基金项目(51609237)

作者简介:张玲玲(1989–),女,河南周口人,博士研究生,主要从事气候变化对农业的影响及适应研究。E-mail: zhanglingling@ms.iswc.ac.cn

通信作者:冯浩(1970–),男,研究员,博士生导师,主要从事水土资源高效利用研究。E-mail: nerewsi@vip.sina.com

potential and water-limited yield. The results showed that under the unchanged condition of variety and management measures from 1974 to 2016, the average potential yield and water-limited yield of winter wheat on the Loess Plateau were  $6554.19 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$  and  $3584 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ . In the past 42 years, the potential yield and water limited yield decreased by  $146.59 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$  and  $65.11 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot (10\text{a})^{-1}$ , respectively. The increase in temperature caused the potential yield of winter wheat to decrease ( $P < 0.05$ ), and the increase in radiation increased the potential yield ( $P < 0.05$ ). The correlation coefficients were 0.36 and 0.35, respectively. Due to the absence of additional irrigation water supply during the winter wheat growing season, precipitation has the greatest impact on the water limited yield on the Loess Plateau, showing a significant positive effect ( $P < 0.05$ ) with a correlation coefficient of 0.47. Under the condition of sufficient irrigation, southeastern Gansu and central Shanxi were areas with low and unstable yields. Under the rain-feed condition, central and northeastern Shanxi were areas with low and unstable production. Therefore, we proposed to improve winter wheat yield in low and unstable yield areas through cultivation technology changes or selection of new varieties.

**Keywords:** winter wheat; APSIM-Wheat model; potential yield; water-limited yield; Loess Plateau

潜在产量指作物在生长过程中不受水分、养分限制以及病虫害和杂草的限制,并采用最优的管理水平和适宜的品种时所能达到的最高产量<sup>[1-2]</sup>,可分为灌溉条件下的潜在产量和雨养条件下的潜在产量<sup>[3]</sup>。在实际生产中,由于受降水、温度等不可控的气候因素以及品种、田间管理措施等可控因素的影响,作物的实际产量和潜在产量存在一定的差距<sup>[4]</sup>。随着人口的持续增长,未来中国对粮食的需求将显著增加,因此增加粮食产量对保障国家粮食安全和社会稳定具有重要意义<sup>[5]</sup>。研究潜在产量的时间演变趋势和空间分布特征及其影响因素,有助于定量估计区域内作物产量的可提升空间,揭示产量提高的主要限制因素,从而采取相应的技术措施来提高作物产量,缩小产量差距。

作物模型是考虑作物生长、大气、土壤、人为管理等因子的相互交互作用的机理过程模型,可以动态模拟作物、环境和管理的交互作用<sup>[6]</sup>。随着作物生理动态机理研究的深入和计算机技术等不断发展,基于过程的作物模型已经成为研究作物生产潜力的重要工具。目前国内外众多学者已运用作物模型从不同方法和角度对作物产量潜力进行了研究,并取得一定的成果。如 Pasuquina J M 等<sup>[7]</sup>利用 DSSAT 模型估算菲律宾、越南和印度尼西亚地区玉米的潜在产量和雨养产量,量化了目前的产量差距,分析生长过程中施肥管理对提高产量的效应并评估了这种管理增加农民收益的能力。Guilpart N 等<sup>[8]</sup>计算了孟加拉国的水稻-玉米生产系统的产量潜力和相关的产量差距,明确了需要多少水和氮肥才能达到这个生产系统的预期产量潜力。李克南等<sup>[9]</sup>基于 1961-2007 年的气象资料分析了华北地区冬小麦潜在产量、雨养产量和水氮限制产量的时

空分布特征并揭示其影响因素。刘志娟等<sup>[10]</sup>运用 APSIM-Maize 模型模拟东北三省春玉米不同水平的产量潜力,分析其时空分布特征并解析气候波动对产量潜力的影响。黄土高原是中国重要的冬小麦产地,在国家粮食安全中具有重要的作用。然而,目前对该区域冬小麦产量潜力的研究较少,并且大多使用气候生产潜力估算模式(Thornthwaite Memorial 和 Miami 模型等)估算黄土高原的气候生产潜力<sup>[11-13]</sup>。这些模型未能考虑作物生育期内光合与呼吸作用等生理过程,也未考虑品种信息和管理措施与作物生长发育过程的交互作用,具有一定的局限性。同时,其他关于冬小麦产量潜力的量化研究对不同水平的产量潜力时空分布特征和产量提升空间分析的关注较少<sup>[14-15]</sup>。

APSIM 模型是由隶属澳大利亚联邦科工组织(CSIRO)和昆士兰州政府的农业生产系统研究组(APSRU)联合开发研制的农业生产系统机理模型。该模型模拟逐日的作物生长发育以及土壤水氮动态,适用于评价农作系统生产潜力及耕作措施的经济效益受气候波动和环境变化的影响<sup>[16-17]</sup>。本研究基于黄土高原冬小麦种植区内气象观测数据和农气观测数据,利用验证后的 APSIM-Wheat 模型计算黄土高原冬小麦潜在产量和雨养产量并分析其时空分布特征。并结合冬小麦生长季内的气候资源的变化特征,揭示在现今生产管理条件下,限制黄土高原不同地区冬小麦产量提高的主要因素,为该区冬小麦生产的科学管理提供理论依据和技术支撑。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区域及数据来源

黄土高原位于  $32^{\circ} \sim 42^{\circ} \text{N}$ ,  $101^{\circ} \sim 114^{\circ} \text{E}$  之间,

地势为西北高东南低。属温带大陆性季风气候,夏季炎热且多暴雨,冬季寒冷干燥多风沙,是中国半湿润半干旱的过渡地带。全区年降水量为 300~600 mm,由东南向西北递减,且降水年际波动大,季节分配不均。年均温为 3.6~14.3℃,日平均气温 ≥ 10℃ 以上活动积温为 2 000~3 000℃。年日照时数达 1 900~3 200 h,辐射资源丰富。区域主要种植作物有小麦、玉米和谷子等,但种植制度差异较大,东南部为一年两熟或两年三熟,西北部是一年一熟<sup>[13]</sup>。受水分条件的限制,区域内灌溉和雨养两种农业管理措施并存。

降水量、日最高和最低气温、日平均气温、日照时数、风速和相对湿度等气象数据来源于中国气象局国家气象信息中心,包括 1974-2016 年黄土高原冬小麦种植区域内 32 个气象站点逐日气象数据(图 1)。土壤质地等物理属性和饱和含水量、田间持水量、凋萎系数等土壤水力特征属性等来源于试验站点实测数据和中国土壤数据库数据。作物数据来源于中国气象局农业气象站(图 1),包含冬小麦播种、出苗、开花和成熟等物候资料(36 个农气站)。冬小麦种植区域信息来源于甘肃省、宁夏省、陕西省、山西省和河南省统计年鉴和农村统计年鉴,以 2005-2016 年连续 10 a 均种植冬小麦为标准划定冬小麦种植区域,共收集到 160 个县的冬小麦统计数据。

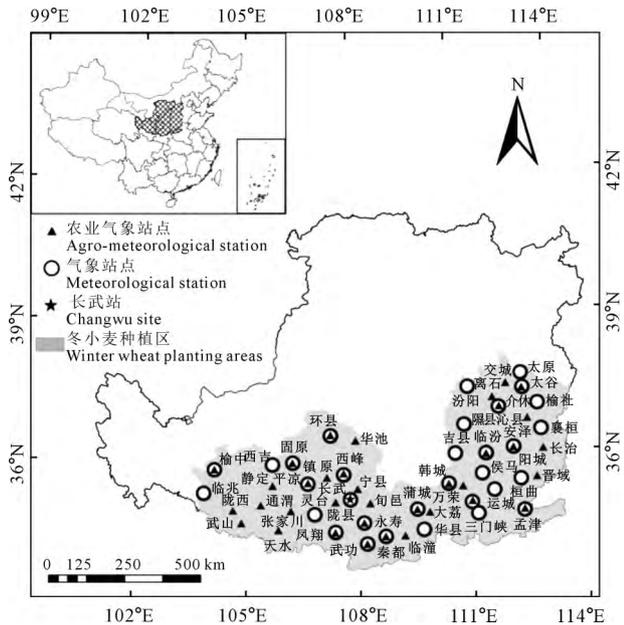


图 1 黄土高原冬小麦种植区气象站点和农业气象站点的分布

Fig.1 Distribution of meteorological and agro-meteorological stations in the winter wheat planting areas of Loess Plateau

### 1.2 APSIM-Wheat 模型验证评价参数

已有研究结果表明, APSIM-Wheat 模型对黄土高原冬小麦的生长发育过程具有很好的适用性<sup>[18]</sup>。因此,本文根据标定好的冬小麦品种参数(表 1)模拟黄土高原不同水平的潜在产量。为验证品种参数的准确性,本研究使用中国科学院长武黄土高原农业生态试验站 2004-2008 年的田间试验数据对模型模拟结果验证评价(图 2)。

验证 APSIM-Wheat 模型时,采用均方根误差 (root mean square error, RMSE)、决定系数 ( $R^2$ ) 和一致性指标 (index of agreement,  $D$ )<sup>[19-20]</sup> 评价模型的拟合优度。RMSE 值越小,  $R^2$  和  $D$  指标越接近 1,说明模拟效果越好。

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (S_i - O_i)^2} \quad (1)$$

$$D = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (S_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|S_i - \bar{O}| + |O_i - \bar{O}|)^2} \quad (2)$$

式中,  $S_i$  为模拟值,  $O_i$  为实测值,  $\bar{O}$  为实测值的平均值,  $n$  为样本数。

### 1.3 不同水平产量潜力的计算

采用 APSIM-Wheat 模型模拟黄土高原 1974-2016 年的冬小麦潜在产量和雨养产量。其中,潜在产量为冬小麦生长过程中水分和养分都不受限制时获得的产量,即在冬小麦生长季内,灌溉设置为当各层的土壤水分总亏缺量大于 20 mm 时,则补充灌溉,灌溉量为土壤水分亏缺量。施肥量设置为在冬小麦播种前施氮肥 125 kg · hm<sup>-2</sup>,在拔节期追施氮肥 125 kg · hm<sup>-2</sup>。雨养产量为无灌溉条件下并且养分不受限制时获得的产量,即在冬小麦生长发育

表 1 冬小麦品种“长武 89134”的品种参数信息

Table 1 Cultivar parameters information of winter wheat variety ‘Changwu 89134’

参数名称 Name of parameter	定义 Definition of parameter	单位 Unit	取值 Value
vern_sens	春化指数 Sensitivity tovernalization	-	2.0
photop_sens	光周期指数 Sensitivity to photoperiod	-	3.0
tt_start_grain_fill	灌浆期的积温 Effective accumulated temperature of grain-filling	℃ · d	545
grain_per_gram_stem	每茎的谷粒重 Grain number per stem mass	g	25
potential_grain_filling_rate	潜在灌浆速率 Potential rate of grain filling	g · grain <sup>-1</sup> · d <sup>-1</sup>	0.0025

期间,作物需水由自然降水供给,无额外的灌溉水,施肥量设置为冬小麦播前施氮肥  $125 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ,拔节期追施氮肥  $125 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。在模拟期间设定品种不变,播期依据农业气象站点和农业试验站的播种期来设置“播种窗口”,其范围为多年播种期的上下限。播种深度为  $50 \text{ mm}$ ,播种密度设置为  $350 \text{ 株} \cdot \text{m}^{-2}$ 。

#### 1.4 气候倾向率

气候倾向率是表示气候要素多年变化趋势的指标,采用最小二乘法计算气候要素和时间的线性回归系数  $a^{[10]}$ 。

$$\hat{X}_t = at + b \quad t = 1, 2, \dots, n \quad (3)$$

式中,  $\hat{X}_t$  是气候要素  $t$  为时间,以  $10 \text{ a}$  的变化值作为气候倾向率。气候倾向率小于  $0$ ,说明气候变量随时间变化减少,气候倾向率大于  $0$ ,说明气候变量随时间增加。

#### 1.5 变异系数

变异系数  $CV$  (coefficient of variance) 为均方差与均值的比值,反映不同观测序列的离散程度<sup>[21]</sup>。变异系数的计算公式如下:

$$CV = \frac{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}}{\bar{x}} \quad (4)$$

式中  $x_i$  为第  $i$  年的要素值,  $\bar{x}$  为要素多年的平均值。

## 2 结果与分析

### 2.1 APSIM-Wheat 模型验证

冬小麦品种“长武 89134”的叶面积指数 (LAI)、地面生物量、产量的模拟值和观测值如图 2 所示。从图中可知, LAI、地面生物量与产量的  $1:1$  图的  $R^2$  分别为  $0.68$ 、 $0.84$  和  $0.91$ ,模拟值与观测值的相关关系较好。从均方根误差 ( $RMSE$ ) 可知,模拟 LAI、地面生物量值与观测 LAI、地面生物量值的绝对误差分别为  $1.66 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$  和  $2100 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ,

产量的绝对误差则为  $670 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。上述结果表明 APSIM-Wheat 模型可以充分模拟冬小麦 LAI、地面生物量和产量的变化。同时,拟合后的  $D$  值均大于  $0.8$ ,相对误差较小。因此,冬小麦生育期 LAI、地面生物量和产量的模拟值与观测值吻合较好,说明 APSIM-Wheat 模型在黄土高原有良好的适用性,适合该区作物生长及产量潜力的模拟。

### 2.2 黄土高原冬小麦生长季内气候要素时空分布特征

黄土高原小麦生长季内多年热量资源的空间分布特征如图 3 所示。由图 3 可知,受纬度和季风的影响,冬小麦生长季内最高温度空间分布呈现东南高西北低的分布趋势,范围为  $12 \sim 19.2^\circ\text{C}$ ,高值区主要分布在山西省西南部和河南省北部。最低温度和平均温度的空间分布特征是由北向南逐渐升高,并且呈现研究区东南部高于东北部和西北部的现象。这一方面是受纬度的影响,另一方面也与地形地貌有关,东北部和西北部多山地丘陵,海拔高,造成该地区获得地面的热量较少,因此温度较低。研究区  $42 \text{ a}$  间冬小麦生长季内最低温度的分布范围是  $-2.09 \sim 4.49^\circ\text{C}$ ,平均温度在  $4.8 \sim 13.23^\circ\text{C}$  之间,低值区均位于甘肃中西部和宁夏西部(图 3(a)、(b)、(c))。1974–2016 年冬小麦生长季内降水量呈现由北向南递减的趋势(图 3(d))。由于研究区处于半湿润半干旱气候的过渡带,各地区冬小麦生长季内的总降水量空间差异比较大,降水量在  $296.91 \sim 511.02 \text{ mm}$  之间。冬小麦生育期内总日照时数和总辐射的空间分布特征与温度、降水量相反,呈现北高南低的空间分布趋势(图 3(e)、(f))。总日照时数和总辐射分别由区域西北、东北部的  $2350 \text{ h}$  和  $5230 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}$  左右,递减至东南、西南部的不足  $1630 \text{ h}$  和  $4493 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}$ 。具体表现为陕西和山西南部最低,而宁夏、甘肃西部和山西中部最高。

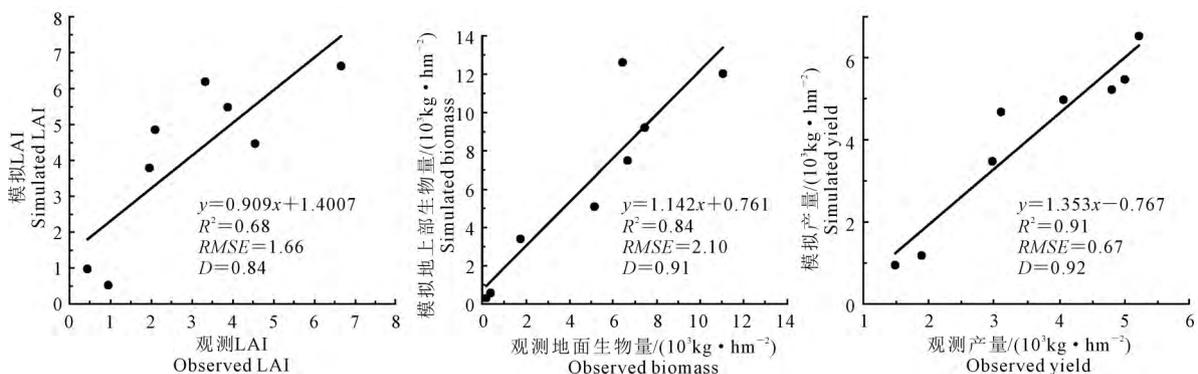
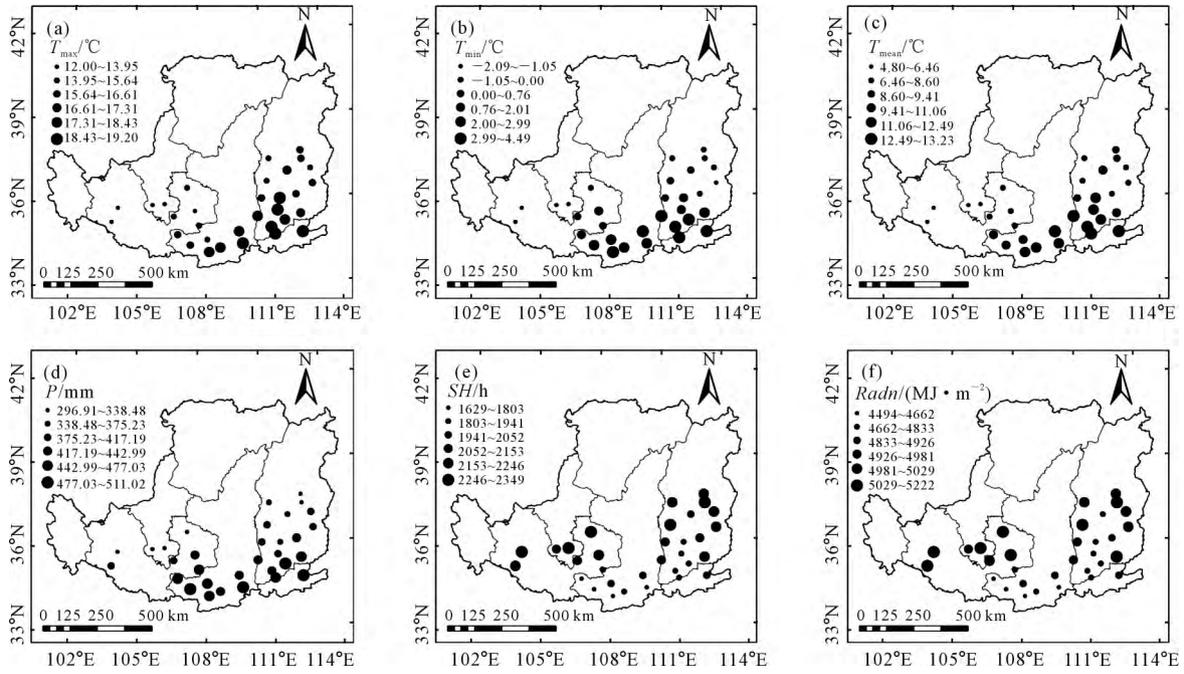


图 2 长武站冬小麦模型验证结果评价

Fig. 2 Validation results of winter wheat in Changwu site



注:  $T_{max}$  最高温度(°C);  $T_{min}$  最低温度(°C);  $T_{mean}$  平均温度(°C);  $P$  降水量(mm);  $SH$  日照时数(h);  $Radn$  太阳辐射( $MJ \cdot m^{-2}$ )

Note:  $T_{max}$ , maximum temperature(°C);  $T_{min}$ , minimum temperature(°C);  $T_{mean}$ , mean temperature(°C);  $P$ , precipitation (mm);  $SH$ , sunshine hours(h);  $Radn$ , solar radiation ( $MJ \cdot m^{-2}$ )

图 3 黄土高原冬小麦生长季内气候要素空间分布特征

Fig.3 Spatial distribution of climatic elements in the growth period of winter wheat in Loess Plateau

图 4 为黄土高原冬小麦种植区气候要素的时间变化趋势。42 a 间,全区总日照时数和总辐射呈下降趋势,而最高温度、最低温度、平均温度和总降水量均呈上升趋势。其中,总辐射每 10 a 下降  $27.62 MJ \cdot m^{-2}$  而最高温度和总降水量每 10 a 分别升高  $0.42^{\circ}C$  和  $1.46 mm$ 。从图 4(a)、(b) 和 (c) 中可知,除极少数气象站点的最低温度呈现降低趋势外,绝大部分气象站点上的最高温度、最低温度和平均温度呈升高趋势。32 个气象站点的最高温度均显著增加 ( $P < 0.05$ ), 变化速率的范围是  $0.19 \sim 0.68^{\circ}C \cdot (10a)^{-1}$ 。其中,以山西西部和甘肃东部的增加趋势最明显。研究区域内 96.88% 的站点最低温度多年变化呈升高趋势,平均升高速率是  $0.39^{\circ}C \cdot (10a)^{-1}$  并且 87.5% 的气象站点升高趋势通过显著性检验 ( $P < 0.05$ ); 冬小麦生育期内平均温度的升高速率范围是  $0.12 \sim 0.66^{\circ}C \cdot (10a)^{-1}$  增加幅度的高值区位于山西西部和甘肃东部。

冬小麦种植区内,43.75% 的气象站点冬小麦生育期内总降水量呈下降趋势(图 4(d))。然而,该下降趋势在所有站点均未达到显著性检验水平。由图 4(e) 和 4(f) 可知,总日照时数和总辐射有增有减。全区 71.88% 的气象站点总日照时数呈减少趋势,其中 50% 的站点显著减少 ( $P < 0.05$ ), 全区平均降低趋势是  $26.9 MJ \cdot m^{-2} \cdot (10a)^{-1}$ ; 62.5% 的站

点总辐射呈降低趋势,其中 55% 的站点通过显著性检验 ( $P < 0.05$ )。具体表现为山西南部和中部分地区下降幅度最大,而甘肃东部地区则呈上升趋势。

### 2.3 黄土高原冬小麦潜在产量和雨养产量时空分布特征

黄土高原 32 个气象站点冬小麦潜在和雨养产量多年均值、变化趋势和变异系数如图 5 所示。从图中可以看出,冬小麦潜在产量变化范围为  $4775 \sim 8994 kg \cdot hm^{-2}$ , 全区平均值为  $6554.19 kg \cdot hm^{-2}$ 。42 年来潜在产量以每 10 a 下降  $146.59 kg \cdot hm^{-2}$  的速率变化; 空间上呈西部的宁夏、甘肃地区高,东北部的山西地区低的分布势态(图 5(a))。75% 的站点潜在产量呈下降趋势,其中 22% 的站点显著降低 ( $P < 0.05$ )。甘肃西部、陕西关中地区和山西西南部减产最明显(图 5(c))。由图 5(e) 可以看出,黄土高原冬小麦潜在产量变异系数的变化范围为  $0.05 \sim 0.17$ 。其中,变异系数的高值区集中在陕西西南和东南部以及山西东北部,变异系数高于 0.13; 变异系数的低值区位于陕西关中和甘肃东部的部分地区,一般低于 0.1 表示该地区潜在产量稳定性高。雨养产量大致呈由西南向东北递减的趋势,其中陕西西部和甘肃东部是高值区,均值大于  $4800 kg \cdot hm^{-2}$ ; 山西东北部是低值区,均值不足  $2500 kg \cdot hm^{-2}$ (图

5(b))。全区雨养产量的平均值为  $3\ 584\ \text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ，下降速率为  $65.11\ \text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot (10\text{a})^{-1}$ 。因此相比于潜在产量，冬小麦雨养产量的下降幅度稍小。1974–2016 年，68.75% 的站点雨养产量呈下降趋势，其中显著减产的站点仅占 25% ( $P < 0.05$ )，具体表现为甘肃西部、陕西中部以及山西西南部减

产幅度最大(图 5(d))。与潜在产量相比，黄土高原冬小麦雨养产量的变异系数较大(0.14~0.61)，这表明雨养产量的稳定性低。产量稳定性较差的区域为甘肃北部和陕西南部的部分地区，变异系数高于 0.4；稳定性较高的区域分布在河南的西北部以及陕西关中地区，变异系数低于 0.25。

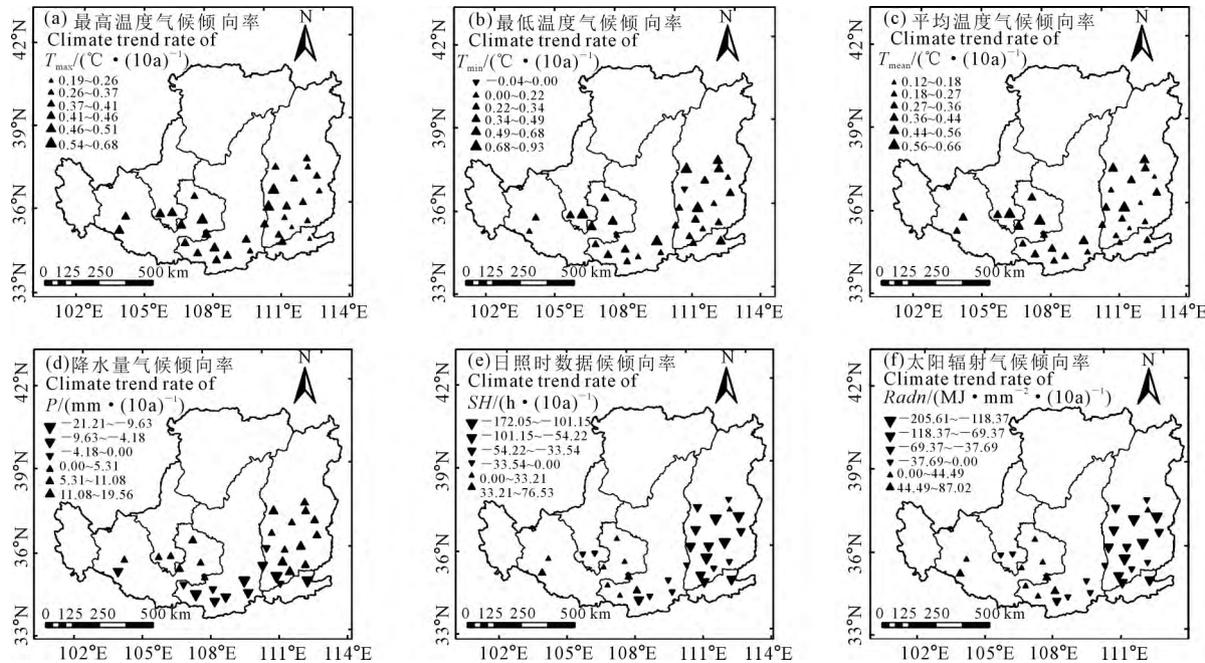
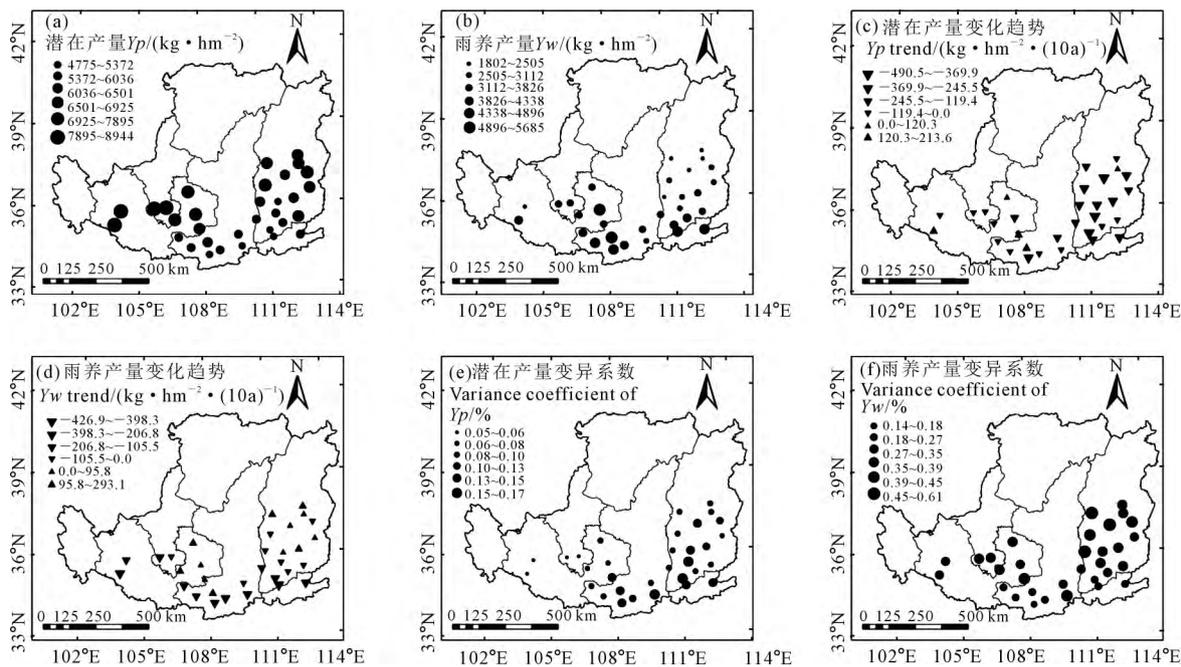


图 4 黄土高原冬小麦生长季内各气候要素倾向率

Fig.4 Climate trend rates of climatic elements in the growth period of winter wheat in Loess Plateau



注:  $Y_p$ : 潜在产量;  $Y_w$ : 雨养产量。 Note:  $Y_p$ : Potential yield;  $Y_w$ : Water limited yield.

图 5 黄土高原冬小麦潜在产量和雨养产量平均值、变化趋势和变异系数

Fig.5 Spatial distribution of mean values, change trend and variance coefficient of simulated potential yield and water-limited yield in Loess Plateau

## 2.4 气候因素对黄土高原冬小麦产量潜力的影响

为明确 42 a 来气候变化对黄土高原冬小麦潜在产量和雨养产量的影响以及影响程度,本研究利用相关性和逐步回归分析,提取影响潜在产量和雨养产量的主要气候因素,然后用多元线性回归的方法建立产量和各气候要素的统计模型(表 2)。结果显示,在气候变化背景下,对黄土高原全区冬小麦潜在产量影响最大的为生长季内的最高温度和太阳辐射,这与潜在产量主要受温度和辐射等决定因子影响的定义相符合。其中,最高温度对潜在产量

的影响呈显著的负效应( $P < 0.05$ ),而太阳辐射对潜在产量的影响呈显著的正效应( $P < 0.05$ )。相关系数分别为 0.35 和 0.36。潜在产量与最低温度、平均温度、总降水量和日照时数相关关系不显著。逐步回归方程显示,最高温度和太阳辐射对冬小麦潜在产量时间变化的解释方差为 0.45。冬小麦生长季内总降水量是雨养产量的主要影响因素,并且呈显著的正向影响( $P < 0.05$ )。由于在冬小麦生长季内无额外的灌溉水补给,造成降水量对雨养产量的影响最大,并且可以解释雨养产量的 32%。

表 2 气候要素对黄土高原冬小麦潜在产量和雨养产量的影响

Table 2 Influence of climate factors on potential yield and water-limited yield of winter wheat in Loess Plateau

项目 Item	相关系数 Correlation coefficient						拟合公式 Fitting formula	决定系数 $R^2$
	$T_{\max}$	$T_{\min}$	$T_{\text{mean}}$	$P$	$SH$	$Radn$		
潜在产量 Potential yield	-0.36*	0.08	0.20	0.11	0.24	0.35*	$Y = 2491.51 + 2.15Radn - 398.12T_{\max}$	0.45
雨养产量 Water-limited yield	0.09	0.23	0.11	0.47*	0.14	0.03	$Y = 19214 - 3.17P$	0.32

注: \* 表示在 0.05 水平显著。 Note: \* means significant at 0.05 level.

## 3 讨论

验证结果表明 APSIM-Wheat 模型对黄土高原冬小麦的生长发育状况和生物量的模拟效果较好(图 2)。模拟的黄土高原冬小麦潜在产量的变化范围为 4 775 ~ 8 944  $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ,雨养产量为 1 802 ~ 5 685  $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。该模拟结果与李军等<sup>[15]</sup>的研究结果相似,但是本研究各站点潜在产量和雨养产量的波动范围大于李军等的结果,这种差异可能与品种和管理措施等因素的不同有关。一方面,本研究所用的冬小麦品种“长武 89134”是 2000 年以后育成和推广的<sup>[22]</sup>,而李军等<sup>[15]</sup>选用的品种于 90 年代育成,大量的研究证明品种改良对作物产量因子具有良好的改进<sup>[18, 23]</sup>,因此这是造成结果差异的一部分原因。另外,随着气候的变化,作物的播期以及施肥管理措施均发生改变,这同样可能导致不同研究模拟结果具有差异。

黄土高原冬小麦潜在产量空间变化主要受最高温度和总辐射的影响(表 2)。最高温度受纬度的影响由南向北逐渐减少;总辐射受海拔、云量、大气透明度等影响,由高海拔的西北内陆向降水量相对丰富的南部逐渐降低(图 3(a)、3(f))。辐射减少使作物净光合速率下降,造成同化物积累降低,并且较低的温度导致作物分蘖少。因此造成潜在产量由西向东、从南到北均逐渐减少。温度升高缩短了作物生长季的长度,辐射减少使作物干物质积累和

转移速度下降,导致产量减少。山西省西南部属于温度升高幅度大,同时也是总辐射降低较大的区域,决定了该地区是黄土高原减产最明显区域(图 4(a)、4(f),图 5(c))。

降水量是黄土高原冬小麦雨养产量空间分布的主要影响因素(表 2)。雨养产量由南向北递减,这与冬小麦生育期内降水总量的空间分布趋势一致(图 3(d),图 5(b))。降水减少造成一定的水分胁迫从而使作物产量降低,然而适度的水分胁迫并不会造成减产<sup>[24]</sup>。因此,陕西关中地区和山西西南部虽然均属于降水减少趋势明显的地区,但两个地区雨养产量的多年下降幅度相差较大。具体表现为相对于陕西关中地区,山西西南部雨养产量的下降幅度更大,这可能与当地的土壤类型以及采用的耕作措施等有关。

过去 42 a 中,在没有采用适应措施的前提下,气候变化对黄土高原冬小麦潜在产量和雨养产量的影响为负效应,这与前人研究结论相同<sup>[9, 25]</sup>。为减轻气候变化的负面影响,特别是辐射减少同时温度升高的状况,在冬小麦生长过程中可以考虑采取改变种植密度<sup>[26]</sup>,合理调整水肥投入<sup>[27]</sup>等管理方法以及选择更适宜的品种<sup>[28]</sup>,从而提高产量。

## 4 结论

本研究表明,在品种和管理措施不变的情况下,黄土高原冬小麦潜在产量呈减低趋势,每 10 a

下降  $146.59 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$  ,降低趋势显著。冬小麦潜在产量空间上呈西部高、东北部低的分布特征,2 a 来不同地区的产量变化有增有减,变异系数范围为  $0.05 \sim 0.17$ 。在充分灌溉的条件下,陕西关中平原为高产稳产区,而甘肃东南部和山西中部属于低产且不稳产区,该空间变异性主要受冬小麦生育期内最高温度和总辐射的影响。与潜在产量相同,雨养产量也呈下降趋势,下降速率为  $65.11 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot (10\text{a})^{-1}$  ,减产幅度较潜在产量的稍小。区域内雨养产量的变化范围为  $1\ 802 \sim 5\ 685 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$  ,由南向北逐渐减少。在水分限制条件下,高产稳产区域为陕西西部和甘肃东北部,低产且不稳产地区为山西中部和东北部,并且区域内雨养产量的稳定性比潜在产量低。水分条件的空间差异对冬小麦雨养产量的空间差异影响程度最大。因此,可以通过灌溉、改进栽培技术或者采用抗旱品种来提升甘肃和山西省大部分地区的冬小麦产量。

致谢:感谢中国科学院长武黄土高原农业生态试验站提供的 2004–2008 年冬小麦数据资料。

#### 参考文献:

- [1] Evans L T, Fischer A. Yield Potential: Its definition, measurement, and significance[J]. *Crop Science*, 1999, 39(6): 1544–1551.
- [2] Lobell D B, Cassman K G, Field C B. Crop yield gaps: Their importance, magnitudes, and causes[J]. *Annual Review of Environment and Resources*, 2009, 34(1): 179–204.
- [3] Van ittersum M K, Cassman K G, Grassini P, et al. Yield gap analysis with local to global relevance: A review[J]. *Field Crops Research*, 2013, 143(1): 4–17.
- [4] Lobell D B, Ortizmonasterio J I, Addams C L, et al. Soil, climate, and management impacts on regional wheat productivity in Mexico from remote sensing[J]. *Agricultural & Forest Meteorology*, 2002, 114(1–2): 31–43.
- [5] Zhang J. China's success in increasing per capita food production[J]. *Journal of Experimental Botany*, 2011, 62(11): 3707–3711.
- [6] 高亮之. 农业模型研究与 21 世纪的农业科学[J]. *山东农业科学*, 2001(1): 43–46.
- [7] Pasuquin J M, Pampolino M F, Witt C, et al. Closing yield gaps in maize production in Southeast Asia through site specific nutrient management[J]. *Field Crops Research*, 2014, 156(2): 219–230.
- [8] Guilpart N, Grassini P, Sadras V O, et al. Estimating yield gaps at the cropping system level[J]. *Field Crops Research*, 2017, 206: 21–32.
- [9] 李克南, 杨晓光, 刘园 等. 华北地区冬小麦产量潜力分布特征及其影响因素[J]. *作物学报*, 2012, 38(8): 1483–1493.
- [10] 刘志娟, 杨晓光, 吕硕 等. 气候变化背景下东北三省春玉米产量潜力时空特征[J]. *应用生态学报*, 2018, 29(1): 103–112.
- [11] 姚玉璧, 李耀辉, 王毅荣 等. 黄土高原气候与气候生产力对全球气候变化的响应[J]. *干旱地区农业研究*, 2005, 23(2): 202–208.
- [12] 逯亚杰. 黄土高原地区气候生产潜力估算及其对气候变化的响应[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2016.
- [13] 赵艳霞, 王馥棠, 刘文泉. 黄土高原的气候生态环境、气候变化与农业气候生产潜力[J]. *干旱地区农业研究*, 2003, 21(4): 142–146.
- [14] 王宗明, 梁银丽. 应用 EPIC 模型计算黄土塬区作物生产潜力的初步尝试[J]. *自然资源学报*, 2002, 17(4): 481–487.
- [15] 李军, 王立祥, 邵明安 等. 黄土高原地区小麦生产潜力模拟研究[J]. *自然资源学报*, 2001, 16(2): 161–165.
- [16] Wang E, Robertson M J, Hammer G L, et al. Development of a generic crop model template in the cropping system model APSIM[J]. *European Journal of Agronomy*, 2002, 18(1): 121–140.
- [17] Keating B A, Carberry P S, Hammer G L, et al. An overview of APSIM, a model designed for farming systems simulation[J]. *European Journal of Agronomy*, 2003, 18(3): 267–288.
- [18] He L, Asseng S, Zhao G, et al. Impacts of recent climate warming, cultivar changes, and crop management on winter wheat phenology across the Loess Plateau of China[J]. *Agricultural & Forest Meteorology*, 2015, 200(4): 135–143.
- [19] Wallach D, Goffinet B. Mean squared error of prediction in models for studying ecological and agronomic systems[J]. *Biometrics*, 1987, 43(3): 561–573.
- [20] Willmott C J. Some comments on the evaluation of model performance[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1982, 63(11): 1309–1369.
- [21] 王静, 杨晓光, 吕硕 等. 黑龙江省春玉米产量潜力及产量差的时空分布特征[J]. *中国农业科学*, 2012, 45(10): 1914–1925.
- [22] 张园, 郝明德, 庞玉辉 等. 黄土旱作区长武县小麦的品种性状和品质特性演变规律[J]. *西北农业学报*, 2009, 18(1): 65–70.
- [23] Liu L, Zhu Y, Tang L, et al. Impacts of climate changes, soil nutrients, variety types and management practices on rice yield in East China: A case study in the Taihu region[J]. *Field Crops Research*, 2013, 149(2): 40–48.
- [24] 郑珍. 关中地区冬小麦水分产量效应及气候变化条件下产量响应模拟研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2016.
- [25] 范兰, 吕昌河, 于伯华 等. 华北平原小麦–玉米两作生产潜力与产量差[J]. *中国农学通报*, 2016, 32(9): 33–40.
- [26] Wang J. Increased yield potential of wheat-maize cropping system in the North China Plain by climate change adaptation[J]. *Climatic Change*, 2012, 113(3–4): 825–840.
- [27] Qin W, Hu C, Oenema O. Soil mulching significantly enhances yields and water and nitrogen use efficiencies of maize and wheat: a meta-analysis[J]. *Scientific Reports*, 2015, 5: 1–13.
- [28] Xiao D, Tao F. Contributions of cultivars, management and climate change to winter wheat yield in the North China Plain in the past three decades[J]. *European Journal of Agronomy*, 2014, 52: 112–122.