



# 基于 APSIM 模型的内蒙古四大生态区不同降水年型下主要作物适应性评价

刘霞霞, 李扬, 王靖<sup>✉</sup>, 黄明霞, 白蕤, 宋扬, 胡琦, 张佳莹, 陈仁伟

中国农业大学资源与环境学院, 北京 100193

**摘要:**【目的】探究内蒙古四大生态区(黄土高原、阴山北麓、燕山丘陵和大兴安岭)不同降水年型下主要作物(玉米、马铃薯、苜蓿、油菜、油葵和食葵)的适应性, 为优化内蒙古主要作物布局提供重要科学参考。【方法】本研究选取 4 个生态区的典型站点, 应用验证后的 APSIM 模型定量 6 种作物的潜在产量、雨养产量和产量差, 以此计算不同降水年型下作物减产率, 评估其适应性并基于作物水分生产函数解析作物对水分的敏感性。【结果】(1) 6 种作物营养生长期、生殖生长期和产量模拟值与实测值的 *RMSE* 分别为 10.1 d、8.9 d 和 1 322.4 kg·hm<sup>-2</sup>, *NRMSE* 分别为 14.6%、19.2%和 22.6%, 表明模型能够较好地模拟不同区域各作物的生长发育和产量形成。(2) 玉米、马铃薯、苜蓿、油菜、油葵与食葵的潜在干重产量分别为 12 024 ± 4 874、7 315 ± 806、6 611 ± 906、2 424 ± 326、2 721 ± 205、4 905 ± 428 kg·hm<sup>-2</sup>, 苜蓿与食葵的最大潜在产量在阴山北麓, 其他 4 种作物的最大潜在产量在黄土高原。玉米、马铃薯、苜蓿、油菜、油葵与食葵的雨养干重产量分别为 3 056 ± 2 902、3 337 ± 1 608、2 974 ± 1 677、912 ± 511、869 ± 618、1 508 ± 984 kg·hm<sup>-2</sup>, 6 种作物的雨养产量自西向东递增, 在大兴安岭达到最大值。玉米、马铃薯、苜蓿、油菜、油葵与食葵的产量差分别为 8 968 ± 5 844、3 978 ± 2 358、3 637 ± 2 122、1 512 ± 832、1 852 ± 749、3 397 ± 1 328 kg·hm<sup>-2</sup>, 除玉米与苜蓿外的 4 种作物产量差自西向东递减, 在大兴安岭达到最低值。(3) 以雨养产量相对于潜在产量的减产率为干旱指标, 并参考雨养产量的变异系数, 则在雨养条件下, 黄土高原区各作物均不适宜种植; 阴山北麓区枯水年各作物均不适宜种植, 平水年适宜种植马铃薯, 丰水年则适宜种植马铃薯、苜蓿; 燕山丘陵区枯水年各作物均不适宜种植, 平水年适宜种植马铃薯与苜蓿, 丰水年 6 种作物均适宜种植; 大兴安岭区枯水年适宜种植马铃薯、苜蓿、油菜与食葵, 平水年与丰水年 6 种作物均适宜种植。(4) 6 种作物的相对蒸散与相对产量的线性相关均达到了极显著水平 ( $P < 0.01$ ),  $R^2$  在 0.84—0.99。作物对水分亏缺的敏感度为: 油葵 > 食葵 > 玉米 > 苜蓿 > 油菜 > 马铃薯。【结论】本研究揭示了内蒙古四大生态区不同降水年型下作物的适应性, 6 种作物对水分的敏感性差异较大, 雨养条件下, 马铃薯在阴山北麓与燕山丘陵的平水年与丰水年型以及大兴安岭的所有年型下均适宜种植, 苜蓿在阴山北麓的丰水年型、燕山丘陵的平水和丰水年型以及大兴安岭的所有年型下均适宜种植, 油菜与食葵在燕山丘陵的丰水年, 大兴安岭的所有年型下均适宜种植, 而玉米与油葵仅在燕山丘陵的丰水年, 大兴安岭的平水年与丰水年型下适宜种植。

**关键词:** 雨养农业; 降水保证率; 降水年型; 减产率; 适应性

## Adaptability Evaluation of Staple Crops Under Different Precipitation Year Types in Four Ecological Regions of Inner Mongolia Based on APSIM

LIU XiaXia, LI Yang, WANG Jing<sup>✉</sup>, HUANG MingXia, BAI Rui, SONG Yang, HU Qi, ZHANG JiaYing, CHEN RenWei

收稿日期: 2021-08-15; 接受日期: 2021-12-01

基金项目: 内蒙古自治区科技计划项目(2019GG016)、内蒙古自治区科技重大专项(2020ZD0005)

联系方式: 刘霞霞, E-mail: lxx13613463078@163.com. 通信作者王靖, E-mail: wangj@cau.edu.cn

College of Resources and Environmental Sciences, China Agricultural University, Beijing 100193

**Abstract:** 【Objective】 In order to provide the important scientific reference for optimizing the layout of staple crops in Inner Mongolia, the adaptability of staple crops (maize, potato, oats, canola, oil and edible sunflower) was evaluated in four ecological regions of Inner Mongolia under different precipitation year types. 【Method】 Four typical sites in four ecological regions were selected. The validated APSIM model was used to quantify the potential yields, rainfed yields and yield gaps of six crops. Yield reduction rates of rainfed yields relative to potential yields under different precipitation year types were calculated to evaluate the adaptability of staple crops. Crop water production functions were conducted to analyze crop water sensitivity. 【Result】 *RMSE* between simulated and observed vegetative growth period, reproductive growth period, dry yield was 10.1 d, 8.9 d, and  $1\,322.4\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ , respectively. *NRMSE* between observed and simulated vegetative growth period, reproductive growth period, and dry yield was 14.6%, 19.2%, and 22.6%, respectively. The validation results showed that APSIM could effectively simulate the growth, development, and yield of each crop in different regions. The potential dry yields of maize, potato, oats, canola, oil sunflower, and edible sunflower were  $12\,024\pm 4\,874$ ,  $7\,315\pm 806$ ,  $6\,611\pm 906$ ,  $2\,424\pm 326$ ,  $2\,721\pm 205$ , and  $4\,905\pm 428\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ , respectively. The potential yields of oats and edible sunflower reached the maximum values in the north foot of Yinshan Mountains while potential yields of other four crops reached the maximum values in the Loess Plateau. The rainfed dry yields of maize, potato, oats, canola, oil sunflower, and edible sunflower were  $3\,056\pm 2\,902$ ,  $3\,337\pm 1\,608$ ,  $2\,974\pm 1\,677$ ,  $912\pm 511$ ,  $869\pm 618$ , and  $1\,508\pm 984\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ , respectively. Average rainfed yields of the six crops increased from west to east and reached the maximum values in Da Hinggan Mountains. Yield gaps of maize, potato, oats, canola, oil sunflower, and edible sunflower were  $8\,968\pm 5\,844$ ,  $3\,978\pm 2\,358$ ,  $3\,637\pm 2\,122$ ,  $1\,512\pm 832$ ,  $1\,852\pm 749$ , and  $3\,397\pm 1\,328\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ , respectively. Except maize and oats, the yield gaps of four crops decreased from west to east and reached the minimum values in Da Hinggan Mountains. Taking the yield reduction rate from potential to rainfed conditions as the drought index under the rainfed condition and considering the variation coefficients of rainfed yields, it was not suitable to plant crops in any years in the Loess Plateau. In the north foot of Yinshan Mountains, crops were not suitable for planting in dry years. Potato was suitable for planting in normal years, while potato and oats were suitable for planting in wet years. At the foothills of Yanshan hilly area, crops were not suitable for planting in dry years. Potato and oats were suitable for planting in normal years while six crops were all suitable for planting in wet years. In Da Hinggan Mountains, potato, oats, canola, and edible sunflower were suitable for planting in dry years, while six crops were all suitable for planting in normal and wet years. The linear correlations between the relative evapotranspiration and the relative yield of the six crops were all significant ( $P<0.01$ ) with  $R^2$  ranging from 0.84 to 0.99. The sensitivity of crop to water stress was in the order of oil sunflower, edible sunflower, maize, oats, canola, and potato. 【Conclusion】 This study revealed the adaptability of staple crops under different precipitation year types in the four ecological regions of Inner Mongolia. There was a large difference in water sensitivity of six crops. Under rainfed condition, potato were suitable for planting in normal and wet years in the north foot of Yinshan Mountains and the foothills of Yanshan hilly area, and in all year types in Da Hinggan Mountains. Oats were suitable for planting in wet years in the north foot of Yinshan Mountains, in normal and wet years in the foothills of Yanshan hilly area and in all year types in Da Hinggan Mountains. Canola and edible sunflower were suitable for planting only in wet years in the foothills of Yanshan hilly area and in all year types in Da Hinggan Mountains. Maize and oil sunflower were suitable for planting only in wet years in the foothills of Yanshan hilly area and in normal and wet years in Da Hinggan Mountains.

**Key words:** rainfed agriculture; guaranteed rate of precipitation; precipitation year type; yield reduction rate; adaptability

## 0 引言

【研究意义】全球现有干旱和半干旱耕地超过  $6\times 10^8\text{ hm}^2$ , 约占世界总耕地面积的 42.9%, 主要分布在 60 多个国家和地区<sup>[1]</sup>。旱作农业在我国南北方均有分布, 干旱、半干旱耕地面积和无灌溉条件的旱作耕地面积均超过全国耕地面积的 50%<sup>[2]</sup>。旱作农业的发展不仅是国家粮食安全和水安全的重要保障, 也是维

持生态安全的屏障, 旱作农业的可持续发展对保证粮食安全具有重要的理论和实践意义<sup>[3-4]</sup>。内蒙古年总降水量变化在 50—450 mm, 降水变率为 15%—30%, 蒸发量大, 几乎每年都有不同程度的干旱发生<sup>[5]</sup>。由于水资源限制, 旱作农业是内蒙古农业生产的主要方式, 作物大多数依靠天然降水维持生长, 导致当地作物生产能力低而不稳, 生态环境极为脆弱<sup>[6]</sup>。近几十年来, 气候变暖导致作物生育期缩短, 生长季降水变异增大,

加剧了内蒙古旱作农业生产的不稳定性, 对农业生产的布局 and 结构等产生了重要影响<sup>[7]</sup>。如何维持内蒙古旱作农业稳产增产, 实现农业可持续发展是当前研究的热点问题<sup>[6]</sup>。【前人研究进展】前人针对作物应对干旱胁迫和提升抗旱性等方面做了大量研究。减缓干旱胁迫的途径主要包括选育优良品种<sup>[8]</sup>, 探究作物最佳灌溉量、灌溉时间<sup>[9-11]</sup>、施肥量<sup>[12]</sup>和最适播种时期<sup>[13-14]</sup>等, 或研究两种及以上管理措施<sup>[15-16]</sup>对降低水分亏缺的作用。另外, 也有研究探究通过田间微集雨系统、薄膜覆盖和秸秆覆盖等措施提高降水利用效率<sup>[17]</sup>。但由于不同作物的水热需求特性不同, 作物和环境的匹配度和适宜程度存在较大的差异。马凯等<sup>[18]</sup>根据研究区气候因子的空间分布特征, 确定了内蒙古东部马铃薯与玉米的种植适宜性及区划。段玉等<sup>[19]</sup>分析了向日葵、马铃薯、玉米、油菜等 12 种作物的生物产量、生物热能值及耗水量, 并从不同角度对适宜种植的作物提出建议。王芳<sup>[20]</sup>根据内蒙古 96 个旗县玉米、小麦、马铃薯、大豆的单产水平与播种面积和扩种情况划分了 4 种作物的种植区域与需要扩种的区域。王美莲<sup>[21]</sup>利用隶属函数分析了内蒙古自治区 19 个旗(县)主栽粮食作物的生态适应性, 提出了内蒙古不同地区粮食作物布局的调整方案, 确定了作物适宜种植区。【本研究切入点】目前关于内蒙古作物适应性研究多为基于田间试验的单个地区单作物或多作物研究以及基于统计方法的多地区单作物或多作物研究。然而, 田间试验需要耗费大量的时间和财力且仅限于有限站点, 研究结果难以外推<sup>[2]</sup>, 而统计方法得到的适应性评价结果缺乏坚实的生理生态基础。由于作物模型能够反映作物、环境和管理交互作用, 已广泛用于探究干旱胁迫对作物生长发育与产量的影响<sup>[22-24]</sup>, 但尚未用来探究内蒙古不同生态区主要作物的适应性。【拟解决的关键问题】本研究利用已在内蒙古广泛验证和应用的 APSIM 模型定量内蒙古四大生态区 6 种主要作物的潜在产量、雨养产量及产量差, 包括粮食作物玉米(*Zea mays* L.)、马铃薯(*Solanum tuberosum* L.)、莜麦(*Avena sativa* L.), 油料作物油菜(*Brassica napus* L.)、油葵(*Helianthus annuus* L.) 和经济作物食葵(*Helianthus annuus* L.)。以雨养产量相对于潜在产量的减产率为干旱指标, 分析不同降水年型下(枯水年、平水年、丰水年)四大生态区适宜雨养种植的作物, 利用作物水分生产函数解析不同作物对水分胁迫的敏感程度, 为优化主要作物在内蒙古不同生态区的布局提供科学参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

内蒙古自治区地处我国北部边疆, 呈狭长形, 由东北向西南斜伸<sup>[25-26]</sup>, 东部为温带大陆性季风气候, 西部为温带大陆性气候, 水热资源呈明显梯度变化<sup>[27]</sup>。受气候、地形地势、土壤及生物地带性因素的影响, 作物分布存在明显的分异性规律<sup>[21]</sup>。本研究选取具有生态代表性的黄土高原区(代表站点鄂托克旗)、阴山北麓区(代表站点武川)、燕山丘陵区(代表站点赤峰)和大兴安岭区(代表站点扎兰屯)为研究对象<sup>[27]</sup>, 图 1 为 4 个生态区的地理位置及选取的代表性站点。

### 1.2 数据来源

1.2.1 气象和土壤数据 1981—2015 年代表站点的逐日气象资料来自中国气象局国家气象信息中心地面气象资料观测数据集, 包括日照时数(h)、日最高气温(℃)、日最低气温(℃)和降水量(mm)。模型中需要作为输入驱动变量的是逐日太阳总辐射值, 根据 Angstrom-Prescott 公式由日照时数计算<sup>[28]</sup>:

$$R_s = (a + b \frac{n}{N}) R_a \quad (1)$$

$$R_a = \frac{24(60)}{\pi} G_{sc} d_r (\omega_s \sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \sin \omega_s) \quad (2)$$

$$d_r = 1 + 0.033 \cos(\frac{2\pi}{365} J) \quad (3)$$

$$\delta = 0.409 \sin(\frac{2\pi}{365} J - 1.39) \quad (4)$$

$$\omega_s = \cos^{-1}(-\tan \varphi \tan \delta) \quad (5)$$

$$N = \frac{24}{\pi} \omega_s \quad (6)$$

式中,  $R_s$  为日总辐射( $\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ ),  $n$  为日照时数(h),  $N$  为可照时数(h),  $R_a$  为地球外辐射( $\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ ),  $a$ 、 $b$  为系数, 分别取 0.25 和 0.5,  $G_{sc}$  为太阳常数( $0.082 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{min}^{-1}$ ),  $d_r$  为日地相对距离的倒数,  $\omega_s$  为日落时角(rad),  $\varphi$  为纬度(rad),  $\delta$  为太阳倾角(rad),  $J$  为日序。

图 2 为 4 个代表站点在 1981—2015 年作物生长季(4—9 月)总辐射、平均温度和降水量。其中生长季总辐射武川最高, 扎兰屯最低; 生长季平均温度赤峰最高, 武川最低; 生长季降水量扎兰屯最高, 鄂托克旗最低。典型代表站点的土壤参数主要包括容重(BD)、

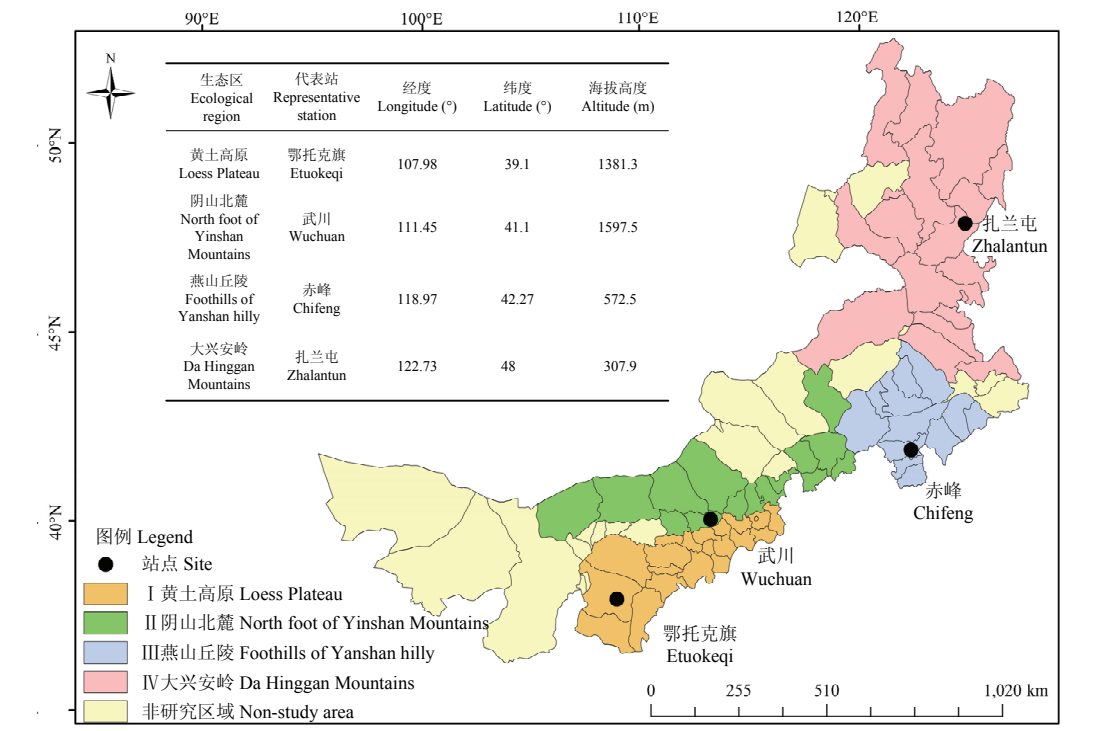


图 1 内蒙古自治区生态区划分和典型站点  
Fig. 1 Ecotope division and the typical sites across Inner Mongolia

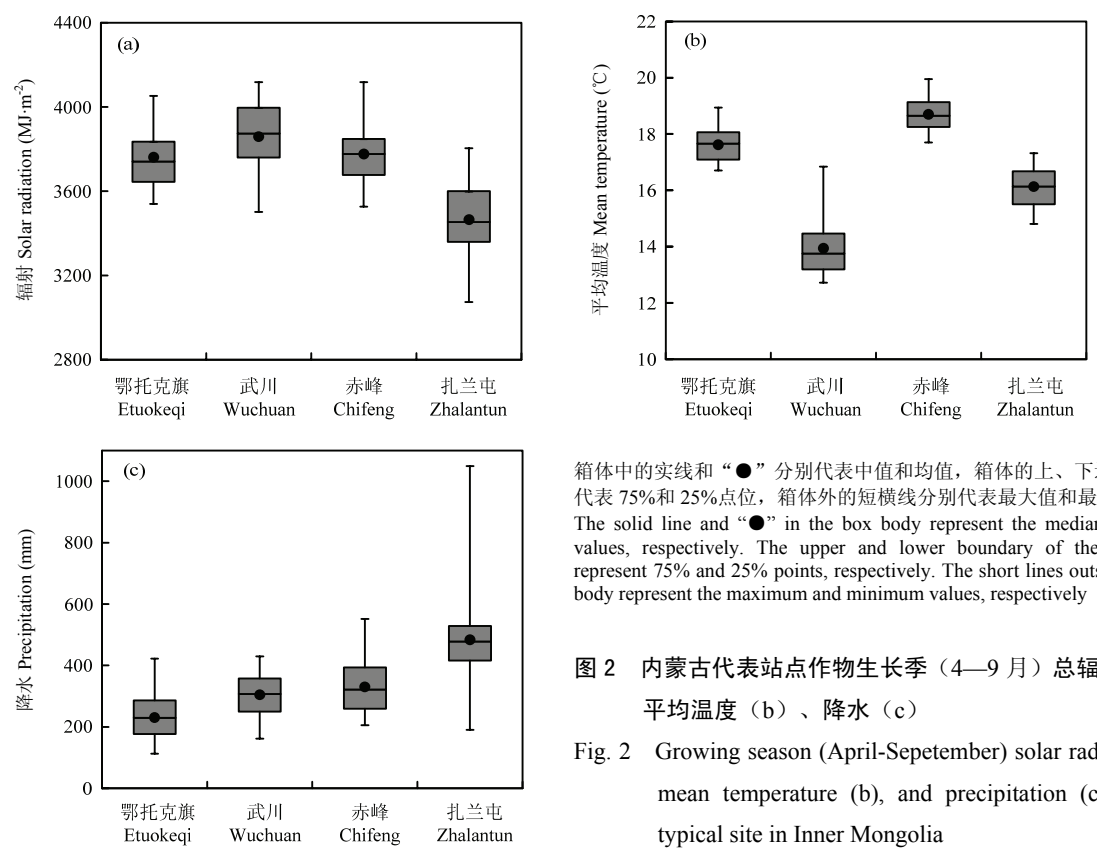


图 2 内蒙古代表站点作物生长季（4—9 月）总辐射（a）、平均温度（b）、降水（c）  
Fig. 2 Growing season (April-September) solar radiation (a), mean temperature (b), and precipitation (c) at each typical site in Inner Mongolia

土壤凋萎含水量 (LL15)、田间持水量 (DUL) 和饱和含水量 (SAT), 来自中国土壤数据库 (<http://www.soil.csdb.cn/>) (表 1)。

**1.2.2 APSIM 模型及其验证** APSIM (version 7.7) 模型主要包括作物模块、土壤模块与管理模块。作物模块主要模拟作物的生长发育和产量形成过程及与土壤的相互作用, 土壤模块模拟土壤水分和养分的运移, 管理模块包括设定作物的播种与收获、施肥与灌溉、调因子模块等<sup>[29]</sup>。APSIM 以日尺度模拟作物生长发育和产量形成对太阳辐射、温度、光周期、土壤水分和氮的响应<sup>[30]</sup>。玉米、马铃薯、苋麦、油菜、油葵和食葵的物候均由积温和光周期敏感性共同决定。玉米和苋麦籽粒产量由籽粒数、日灌浆速率和同化物转运决定<sup>[14,31-32]</sup>。马铃薯的薯块产量与油菜、油葵和食葵的籽粒产量由生物量和收获指数决定<sup>[15,33-34]</sup>。模型模拟的产量均为作物干重产量。6 种作物日生物量积累 ( $\Delta DM$ ) 由辐射截获和辐射利用效率共同决定, 且水分和氮胁迫会降低生物量<sup>[15]</sup>:

$$\Delta DM = R_s \times I \times RUE \times f_w \times f_t \quad (7)$$

式中,  $R_s$  为日总辐射 ( $\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ );  $I$  为作物辐射截获系数; RUE 为辐射利用效率;  $f_w$  为水分胁迫因子;  $f_t$  为温度胁迫因子。随着土壤湿度下降, 作物实际蒸腾减少,  $f_w$  从 1 开始降低, 当土壤完全变干时下降至 0:

$$f_w = \frac{W_u}{W_d} \quad (8)$$

式中,  $W_u$  为作物实际蒸腾,  $W_d$  为作物潜在蒸腾。

选定的作物为内蒙古地区主要作物, 包括粮食作物玉米 (*Zea mays* L.)、马铃薯 (*Solanum tuberosum* L.)、苋麦 (*Avena sativa* L.)、油料作物油菜 (*Brassica napus* L.)、油葵 (*Helianthus annuus* L.) 和经济作物食葵 (*Helianthus annuus* L.)。各区品种选用内蒙古地区常规种植的作物品种 (表 2)。

各作物的品种参数参考前人研究 (表 3), 本文

进一步收集了研究区及其周边 6 种作物同类品种的试验数据 (表 2), 对 APSIM 模型进行验证。采用以下指标评价 APSIM 模型的适用性, 即模拟值与实测值之间的均方根误差 ( $RMSE$ )、归一化均方根误差 ( $NRMSE$ ) 和决定系数 ( $R^2$ )<sup>[16]</sup>:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Y_i - X_i)^2} \quad (9)$$

$$NRMSE = \frac{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Y_i - X_i)^2}}{\bar{X}} \times 100\% \quad (10)$$

$$R^2 = \left( \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})(X_i - \bar{X})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2 \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}} \right)^2 \quad (11)$$

式中,  $X_i$  为实测值,  $Y_i$  为模拟值,  $\bar{X}$  和  $\bar{Y}$  分别为实测值和模拟值的平均值;  $n$  为样本数。 $RMSE$  和  $NRMSE$  反映模拟值与实测值的相对误差与绝对误差, 其值越小, 说明模拟值与实测值的偏差越小, 表明模拟效果越好;  $R^2$  越接近 1, 表明模拟效果越好。

### 1.3 长期模拟情景设定

为探究四大生态区潜在和雨养条件下不同作物的产量差异, 选择 1981—2015 年时段, 参照前人试验中各作物农田管理情况设置模型管理参数, 包括播期、播种深度、密度和行距 (表 4)。模拟设置在土壤 50 cm 深度内自动施氮, 以避免作物受氮素胁迫<sup>[32]</sup>。初始含水量设置为田间持水量的 35%。因春播作物会在成熟阶段受到初霜冻的影响, 因此设置当日最低气温低于 0℃时在模型中强制收获。模型采用连续模拟的方式即每年土壤水氮不进行重新设置。

### 1.4 潜在产量、雨养产量及产量差

作物的潜在产量 ( $Y_p$ ) 是指使用研究区域适宜作物品种, 在最适播期下且不受水分、氮肥和病虫害等胁迫所获得的最高产量。雨养产量 ( $Y_r$ ) 是指在其他条件与潜在产量相同下仅依赖自然降水而不进行灌溉

表 1 各站点土壤物理参数

Table 1 Physical parameters of soil profiles at each site

站点 Site	土层 Soil layer (cm)	容重 Bulk density ( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )	饱和含水量 Saturated water content ( $\text{mm} \cdot \text{mm}^{-1}$ )	田间持水量 Field capacity ( $\text{mm} \cdot \text{mm}^{-1}$ )	凋萎含水量 Wilting water content ( $\text{mm} \cdot \text{mm}^{-1}$ )
鄂托克旗 Etuokeqi	0—100	1.45±0.05	0.47±0.008	0.43±0.03	0.27±0.05
武川 Wuchuan	0—100	1.42±0.04	0.44±0.04	0.26±0.03	0.11±0.01
赤峰 Chifeng	0—100	1.37±0.06	0.48±0.02	0.37±0.02	0.22±0.22
扎兰屯 Zhalantun	0—100	1.43±0.10	0.46±0.04	0.27±0.03	0.12±0.02

表 2 APSIM 模型中作物品种参数来源和验证信息

Table 2 Resource for crop genetic parameters in the APSIM model and its validation information

作物 Crop	参数来源 Parameter resource				验证数据 Validation data			
	品种 Cultivar	站点 Site	年份 Year	参考文献 Reference	品种 Cultivar	站点 Site	年份 Year	参考文献 Reference
玉米 Maize	郑单 958	林甸县吉祥村	2012—	[32]	郑单 958	中国农业大学北京上庄试验站	2008—	[35]
	Zhengdan958	Jixiang Village, Lindian County	2014		Zhengdan958	Beijing Shangzhuang Experimental Station of China Agricultural University	2009	
					郑单 958	呼和浩特市内蒙古农业大学科技园	2013	[36]
					Zhengdan958	区试验基地 Inner Mongolia Agricultural University Science Park Experimental Base in Hohhot		
					金凯 3 号	榆中县石头沟旱地农业推广基地	2015—	[37]
马铃薯 Potato	克新一号	武川农业环境科学观测试验站	2017—	[39]	克新一号	武川农业环境科学观测试验站	2010	[2]
	Kexin_1	The Scientific and Observational Experimental Station of Agro-environment in Wuchuan	2018		Kexin_1	The Scientific and Observational Experimental Station of Agro-environment in Wuchuan		
					克新一号	武川农业环境科学观测试验站	2015—	[40]
					Kexin_1	The Scientific and Observational Experimental Station of Agro-environment in Wuchuan	2017	
					克新一号	武川农业环境科学观测试验站	2019—	本研究
苜蓿 Oats	草蓿一号	武川农业环境科学观测试验站	2009—	[14]	草蓿一号	武川农业环境科学观测试验站	2009—	[2]
	Caoyou 1	The Scientific and Observational Experimental Station of Agro-environment in Wuchuan	2013		Caoyou 1	The Scientific and Observational Experimental Station of Agro-environment in Wuchuan	2010	
					大黄	武川农业环境科学观测试验站	2010	[2]
	Bigyellow	The Scientific and Observational Experimental Station of Agro-environment in Wuchuan	2009—	[33]	Bigyellow	The Scientific and Observational Experimental Station of Agro-environment in Wuchuan		
			2012		青杂 5 号	海东市平安区沙沟乡	2019	[41]
油菜 Canola					Qingza 5	Shagou Village, Ping'an District, Haidong City		
					圣光 402	民乐县永固镇西村	2019	[41]
					Shengguang 402	West Village, Yonggu Town, Minle County		
	内葵杂 3 号	武川农业环境科学观测试验站	2014—	[34]	内葵杂强	武川农业环境科学观测试验站	2010	[2]
	Neikuiza_3	The Scientific and Observational Experimental Station of Agro-environment in Wuchuan	2015		Neikuizaqiang	The Scientific and Observational Experimental Station of Agro-environment in Wuchuan		
食葵 Edible sunflower	SF3368	武川农业环境科学观测试验站	2014—	[34]	SH361	武川农业环境科学观测试验站	2013—	[42]
		The Scientific and Observational Experimental Station of Agro-environment in Wuchuan	2015			The Scientific and Observational Experimental Station of Agro-environment in Wuchuan	2014	



表 3 APSIM 模型中 6 种作物品种的主要发育期参数

Table 3 Main phenological parameters of six crop cultivars in the APSIM model

作物 Crop	参数和定义 Parameter and definition	参数值 Parameter value
玉米 Maize	tt_emerg_to_endjuv (°C·d) 出苗—幼年期结束所需有效积温 Thermal time required from emergence to end of juvenile	200
	tt_flower_to_maturity (°C·d) 开花—成熟所需有效积温 Thermal time required from flower to maturity	700
马铃薯 Potato	y_tt_emergence (°C·d) 出苗—现蕾所需有效积温 Degree days from emergence to earlytuber	335
	tt_earlytuber (°C·d) 现蕾—开花所需有效积温 Degree days from earlytuber to senescing	210
	tt_senescing (°C·d) 开花—成熟所需有效积温 Degree days from senescing to maturity	660
莜麦 Oats	tt_end_of_juvenile (°C·d) 幼苗阶段所需有效积温 Thermal time required from end of juvenile stage to floral initiation	425
	tt_floral_initiation (°C·d) 花芽分化阶段所需有效积温 Thermal time required from floral initiation stage to flowering	420
	tt_flowering (°C·d) 开花期所需有效积温 Thermal time required from flowering to start of grain flling	150
油菜 Canola	CTT <sub>Juv_max</sub> (°C·d) 完成幼年期所需有效积温 Maximum thermal time required to complete the juvenile phase when not vernalized	231
	CTT <sub>Fl_max</sub> (°C·d) 完成光周期敏感阶段所需有效积温 Maximum thermal time required to complete the photoperiod sensitive stage for photoperiod less than 10.8 h	370
	CTT <sub>Gr</sub> (°C·d) 完成灌浆阶段所需有效积温 Thermal time for the grain filling period	640
油葵 Oil sunflower	tt_endjuv_to_init (°C·d) 幼年期结束—花芽分化所需有效积温 Thermal time required from end of juvenile to floral initiation	410
	tt_fi_to_flag (°C·d) 花芽分化—旗叶所需有效积温 Thermal time required from floral initiation to flag leaf	400
	tt_flower_to_maturity (°C·d) 开花—成熟所需有效积温 Thermal time required from flower to maturity	700
食葵 Edible sunflower	tt_endjuv_to_init (°C·d) 幼年期结束—花芽分化所需有效积温 Thermal time required from end of juvenile to floral initiation	220
	tt_fi_to_flag (°C·d) 花芽分化—旗叶所需有效积温 Thermal time required from floral initiation to flag leaf	280
	tt_flower_to_maturity (°C·d) 开花—成熟所需有效积温 Thermal time required from flower to maturity	910

表 4 长期模拟情景设定

Table 4 Setting up for long-term simulation scenarios

作物 Crop	播期 Planting date (M-D)	密度 Planting density (plants/m <sup>2</sup> )	深度 Planting depth (mm)	行距 Row spacing (mm)	参考文献 Reference
玉米 Maize	05-10	6.15	50	650	[32], [43]
马铃薯 Potato	05-15	5	80	500	[39], [44]
莜麦 Oats	05-20	128	50	250	[14]
油菜 Canola	05-02	15	40	250	[2], [33], [45]
油葵 Oil sunflower	05-15	5	95	500	[34]
食葵 Edible sunflower	05-05	4	95	500	[34]

获得的产量<sup>[46]</sup>。利用 APSIM-Maize、APSIM-Potato、APSIM-Oats、APSIM-Canola 和 APSIM-Sunflower 模型模拟分析 1981—2015 年玉米、马铃薯、莜麦、油菜、油葵和食葵的潜在产量、雨养产量及潜在产量和雨养产量的产量差 ( $Y_g$ )：

$$Y_g = Y_p - Y_r$$

(12)

1.5 减产率、雨养产量变异系数及作物适应性评价指标

本研究中作物减产率为雨养产量相对于潜在产量

减少的百分比<sup>[47]</sup>：

$$R = (Y_p - Y_r) / Y_p \times 100\%$$

(13)

式中， $R$  为减产率，%； $Y_p$  为潜在产量， $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ； $Y_r$  为雨养产量， $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。

雨养产量的变异系数可以反映雨养产量的稳定性，值越大表明产量的年际波动越大，产量稳定性越差；反之，值越小，表明产量越稳定<sup>[46]</sup>。雨养产量变异系数（CV）的计算公式为：

$$CV = \frac{\sigma}{\bar{x}}$$

(14)

式中， $\sigma$  为雨养产量的标准差； $\bar{x}$  为平均雨养产量。

本研究的作物适应性评估指标主要采用雨养产量相对于潜在产量的减产率，当减产率大于 60% 则认为该作物不适宜种植<sup>[48-49]</sup>。同时，参考雨养产量的变异系数，当变异系数过高时，种植该作物的稳定性差。

1.6 降水保证率

为研究内蒙古四大生态区降水对农作物产量的影响，根据 4 个代表站点的生长季降水资料，采用常用的降水保证率分类标准<sup>[50-51]</sup>，对 4 个地区的降水年型进行划分。将生长季降水量小于等于保证率 25% 所对应的降水年份定义为丰水年；将生长季降水保证率为 26%—75% 对应的降水年份定义为平水年，将生长季降水超过保证率 75% 对应的降水年份定义为枯水年（表 5）。

表 5 各站点降水年型划分  
Table 5 Division of precipitation year type at each site

站点 Site	降水年型 Precipitation year type	降水保证率 Guaranteed rate of precipitation (%)	生长季降雨量（平均值） Growing season precipitation (average) (mm)	生长季降水变异系数 Coefficient of variation of growing season precipitation (%)
鄂托克旗 Etuokeqi	丰水年 Wet year	≤25	285-423 (332)	13
	平水年 Normal year	26-75	175-284 (221)	16
	枯水年 Dry year	>75	112-174 (136)	14
武川 Wuchuan	丰水年 Wet year	≤25	357-430 (398)	7
	平水年 Normal year	26-75	249-357 (300)	9
	枯水年 Dry year	>75	141-248 (210)	11
赤峰 Chifeng	丰水年 Wet year	≤25	393-552 (445)	13
	平水年 Normal year	26-75	259-392 (316)	11
	枯水年 Dry year	>75	205-258 (232)	8
扎兰屯 Zhalantun	丰水年 Wet year	≤25	528-1050 (676)	24
	平水年 Normal year	26-75	416-527 (471)	7
	枯水年 Dry year	>75	190-415 (297)	22

1.7 作物水分生产函数

作物水分生产函数是指农业生产水平基本一致的情况下，作物耗水与其产量之间的关系<sup>[52]</sup>。本研究采用以全生育期蒸散量为自变量的作物水分生产函数模型：

Stewart 模型：
$$1 - \frac{Y_r}{Y_p} = k \left( 1 - \frac{ET}{ET_m} \right)$$

(15)

式中， $Y_r$  和  $Y_p$  分别为作物的雨养产量和潜在产量， $ET$  和  $ET_m$  分别为作物全生育期的耗水量和需水量，均由 APSIM 模型计算输出，耗水量为土壤蒸发和作物蒸腾之和<sup>[34]</sup>，需水量由潜在蒸散、作物类型与叶面积指数决定，潜在蒸散由 Priestly-Taylor 公式计算<sup>[53]</sup>； $k$  为产量响应系数，反映产量对水分亏缺的敏感程度。

2 结果

2.1 APSIM 模型验证

6 种作物营养生长期、生殖生长期和产量模拟值与

测值的  $RMSE$  分别为 10.1 d、8.9 d 和 1 322.4 kg·hm<sup>-2</sup>， $NRMSE$  分别为 14.6%、19.2% 和 22.6%， $R^2$  分别为 0.37、0.38 和 0.93，线性相关均达到了显著水平（ $P < 0.05$ ）（图 3），表明 APSIM 模型在模拟不同地区各作物品种的生长发育和产量形成有较好的适用性。

2.2 四大生态区 6 种作物潜在产量、雨养产量与产量差

图 4 比较了内蒙古四大生态区 6 种作物的潜在产量、雨养产量及产量差。玉米、马铃薯、莜麦、油菜、油葵和食葵的潜在产量分别为 12 024±4 874、7 315±806、6 611±906、2 424±326、2 721±205 和 4 905±428 kg·hm<sup>-2</sup>。玉米、马铃薯、油菜和油葵在黄土高原区达到潜在产量最大值，莜麦和食葵在阴山北麓区达到最大值。玉米、马铃薯、莜麦、油菜、油葵和食葵的雨养产量分别是 3 056±2 902、3 337±1 608、2 974±1 677、912±511、869±618 和 1 508±984 kg·hm<sup>-2</sup>。6 种



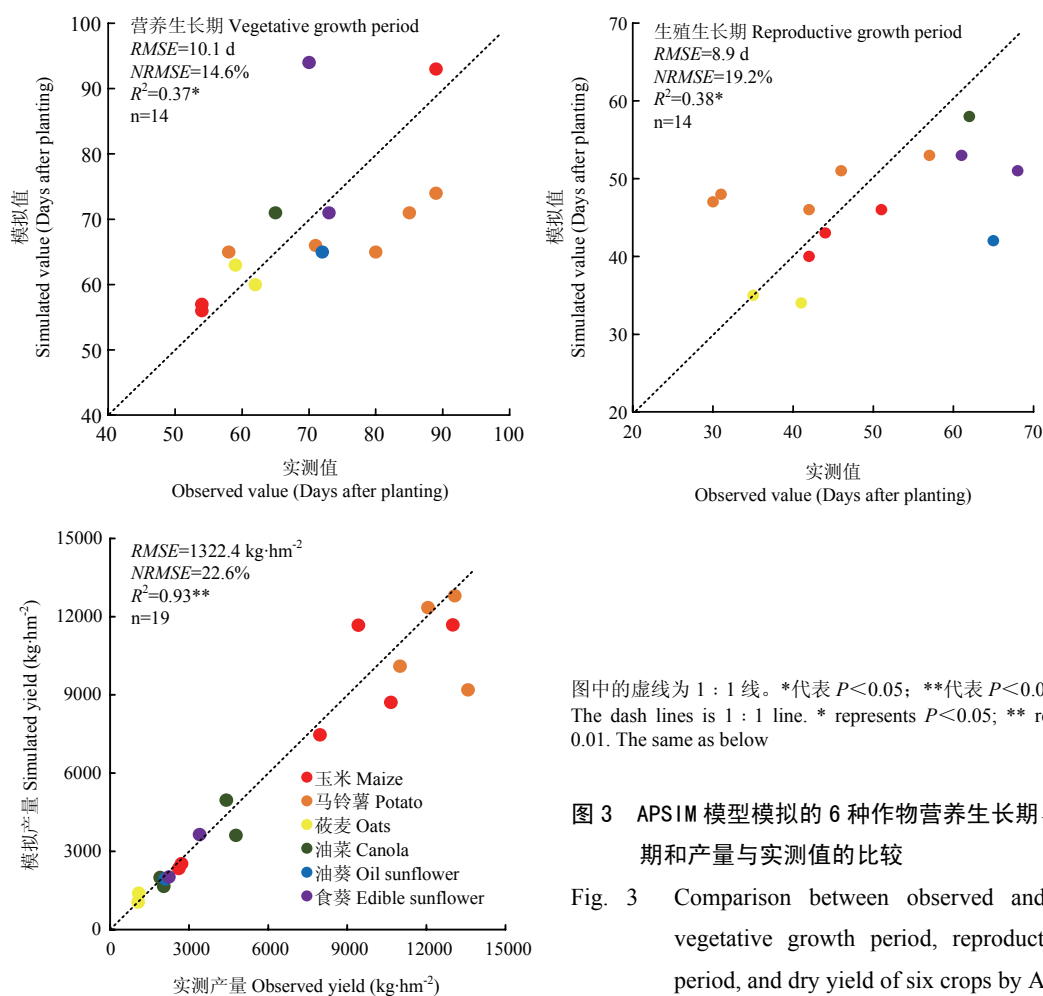


图 3 APSIM 模型模拟的 6 种作物营养生长期、生殖生长期和产量与实测值的比较

Fig. 3 Comparison between observed and simulated vegetative growth period, reproductive growth period, and dry yield of six crops by APSIM

作物的雨养产量自西向东递增，在大兴安岭区达到最大值。玉米、马铃薯、莜麦、油菜、油葵和食葵的产量差分别为  $8\,968 \pm 5\,844$ 、 $3\,978 \pm 2\,358$ 、 $3\,637 \pm 2\,122$ 、 $1\,512 \pm 832$ 、 $1\,852 \pm 749$  和  $3\,397 \pm 1\,328 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。除玉米与莜麦外的 4 种作物产量差自西向东递减，在大兴安岭区达到最低值。

由表 6 可知，APSIM 模拟的玉米潜在产量在黄土高原与生育期总辐射呈极显著正相关，在燕山丘陵与生育期平均温度呈极显著负相关，在阴山北麓和大兴安岭与生育期平均温度呈极显著正相关；马铃薯和莜麦的潜在产量在四大生态区与生育期总辐射呈极显著正相关；油菜潜在产量在黄土高原与生育期平均温度呈显著负相关，在阴山北麓和大兴安岭与生育期总辐射呈极显著正相关；油葵在黄土高原与生育期总辐射呈极显著正相关，在阴山北麓与生育期平均温度呈显著正相关，在燕山丘陵和大兴安岭与生育期平均温度呈显著负相关；食葵在燕山丘陵与生育期平均温度呈极显著负相关，在其他 3 个地区与生育期总辐射呈极显著正相关。

在阴山北麓，玉米雨养产量与生育期平均温度呈显著正相关，在其他 3 个地区与生育期降水呈显著正相关；马铃薯雨养产量在黄土高原、阴山北麓和燕山丘陵与生育期降水呈显著正相关；莜麦雨养产量在黄土高原和阴山北麓与生育期降水呈显著正相关，在燕山丘陵和大兴安岭与生育期平均温度呈极显著负相关。油菜、油葵、食葵的雨养产量在 4 个地区均与生育期降水呈显著正相关。

### 2.3 四大生态区 6 种作物不同降水年型下减产率

以 60% 的减产率为标准，枯水年型下，6 种作物在黄土高原、阴山北麓、燕山丘陵均不适宜雨养种植，在大兴安岭区适宜雨养种植马铃薯、莜麦、油菜、食葵。平水年型下，黄土高原无作物适宜雨养种植；阴山北麓区适宜雨养种植玉米与马铃薯；燕山丘陵区适宜雨养种植马铃薯与莜麦；大兴安岭区 6 种作物均适宜雨养种植。丰水年型下，黄土高原区无作物适宜雨养种植；阴山北麓区适宜雨养种植玉米、马铃薯、莜麦；燕山丘陵区与大兴安岭区 6 种作物均适宜雨养种植（图 5）。

表 6 内蒙古四大生态区 6 种作物潜在和雨养产量与生育期总辐射、平均温度和降水的关系

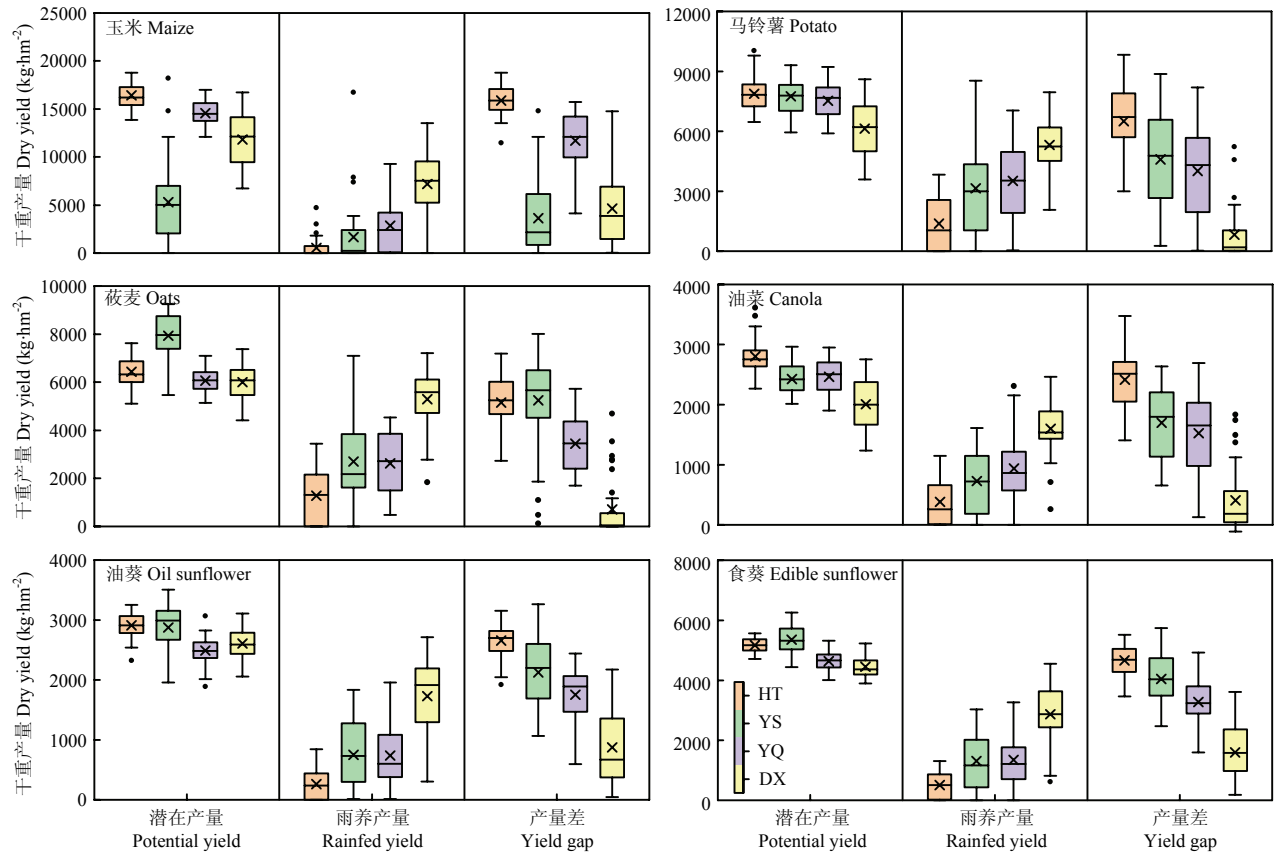
Table 6 Relationships between the potential ( $Y_p$ ) and rainfed ( $Y_r$ ) yields of six crops with growth period solar radiation, mean temperature and precipitation in four ecological regions in Inner Mongolia

作物 Crop	产量 Yield	地区 Region	辐射 Solar radiation		温度 Temperature		降水 Precipitation	
			斜率 Slope	$R^2$	斜率 Slope	$R^2$	斜率 Slope	$R^2$
玉米 Maize	$Y_p$	I	6.17	0.61**	-781.81	0.37**	2.47	0.03
		II	3.28	0.13*	2715.41	0.60**	-1.73	0.01
		III	6.74	0.57**	-1140.15	0.63**	4.27	0.08
		IV	9.14	0.35**	2122.88	0.44**	-4.96	0.10
	$Y_r$	I	0.23	0.04	46.36	0.00	3.52	0.14*
		II	1.19	0.02	1002.57	0.12*	9.63	0.06
		III	-4.86	0.16*	-18.81	0.01	32.45	0.71**
		IV	-5.42	0.07	-250.19	0.01	9.69	0.21**
马铃薯 Potato	$Y_p$	I	4.73	0.49**	-20.95	0.01	-1.88	0.02
		II	4.53	0.74**	-284.72	0.12*	0.00	0.01
		III	4.57	0.59**	456.41	0.08	-5.98	0.24**
		IV	5.19	0.67**	812.46	0.20**	-4.49	0.27**
	$Y_r$	I	1.02	0.27**	378.79	0.06	8.74	0.39**
		II	2.02	0.06	-363.83	0.03	11.65	0.17*
		III	-4.36	0.22**	-1019.36	0.11*	15.91	0.40**
		IV	0.90	0.03	-187.10	0.01	-0.58	0.01
莜麦 Oats	$Y_p$	I	5.84	0.66**	-437.11	0.27**	2.03	0.04
		II	4.09	0.81**	-570.02	0.60**	4.42	0.12*
		III	3.05	0.29**	-256.22	0.17*	-0.91	0.02
		IV	3.49	0.49**	-101.09	0.01	-0.67	0.02
	$Y_r$	I	0.93	0.24**	466.75	0.11*	6.03	0.26**
		II	1.68	0.09	-190.91	0.02	8.65	0.16*
		III	-0.61	0.01	-1079.51	0.28**	9.38	0.18*
		IV	0.38	0.01	-791.34	0.31**	2.71	0.12*
油菜 Canola	$Y_p$	I	0.81	0.12*	-177.88	0.13*	0.66	0.03
		II	1.29	0.59**	-25.49	0.01	-0.55	0.02
		III	0.59	0.11	29.46	0.003	-1.23	0.11
		IV	0.01	0.70**	4.58	0.67**	-0.01	0.33**
	$Y_r$	I	0.22	0.23**	1114.12	0.19**	2.22	0.38**
		II	0.39	0.17*	63.78	0.03	3.00	0.30**
		III	0.12	0.01	-39.64	0.01	4.66	0.65**
		IV	-0.50	0.10	-140.96	0.06	1.12	0.17*
油葵 Oil sunflower	$Y_p$	I	1.41	0.46**	-171.05	0.29**	1.22	0.13*
		II	-0.06	0.01	114.13	0.12*	-0.03	0.03
		III	0.53	0.05	-178.14	0.36**	0.52	0.04
		IV	0.35	0.04	-118.42	0.15*	0.19	0.02

续表 6 Continued table 6

作物 Crop	产量 Yield	地区 Region	辐射 Solar radiation		温度 Temperature		降水 Precipitation	
			斜率 Slope	R <sup>2</sup>	斜率 Slope	R <sup>2</sup>	斜率 Slope	R <sup>2</sup>
食葵 Edible sunflower	Y <sub>r</sub>	I	0.26	0.44**	42.21	0.03	2.00	0.58**
		II	0.17	0.01	-104.02	0.05	4.11	0.29**
		III	-0.66	0.05	-302.79	0.22**	4.98	0.61**
		IV	-1.97	0.31**	-341.15	0.21**	2.26	0.32**
	Y <sub>p</sub>	I	1.57	0.46**	-161.12	0.19*	0.79	0.06
		II	0.94	0.23**	-105.79	0.08	2.34	0.16*
		III	1.04	0.10	-237.36	0.31**	0.38	0.01
		IV	1.28	0.29**	-153.92	0.10	-0.26	0.01
	Y <sub>r</sub>	I	0.42	0.33**	143.43	0.20**	3.01	0.33**
		II	0.65	0.13*	11.04	0.03	5.47	0.32**
		III	0.50	0.02	-331.11	0.09	7.27	0.52**
		IV	-1.72	0.16*	-640.63	0.31**	3.57	0.38**

Y<sub>p</sub>、Y<sub>r</sub> 分别代表作物潜在与雨养产量，I、II、III、IV 分别代表黄土高原区、阴山北麓区、燕山丘陵区和大兴安岭区。\*代表  $P<0.05$ ；\*\*代表  $P<0.01$   
Y<sub>p</sub> and Y<sub>r</sub> represent potential yield and rainfed yield of each crop, respectively. I, II, III, and IV represent Loess Plateau, North foot of Yinshan Mountains, Foothills of Yanshan hilly, and Da Hinggan Mountains, respectively. \* represents  $P<0.05$ ; \*\* represents  $P<0.01$



HT、YS、YQ、DX 分别代表黄土高原、阴山北麓、燕山丘陵与大兴安岭地区。箱体中的实线和“×”分别代表中值和均值，箱体的上、下边界线分别代表 75% 和 25% 点位，箱体外的短横线分别代表最大值和最小值，箱体外的“•”为异常值。下同  
HT, YS, YQ, and DX represent Loess Plateau, North foot of Yinshan Mountains, Foothills of Yanshan hilly, and Da Hinggan Mountains, respectively. The solid line and “×” in the box body represent the median and mean values, respectively. The upper and lower boundaries of the box body represent 75% and 25% points, respectively. The short lines outside the box body represent the maximum and minimum values, respectively. “•” outside the box body represents the outlier value. The same as below

图 4 内蒙古四大生态区 6 种主要作物潜在产量、雨养产量及产量差  
Fig. 4 Potential yields, rainfed yields and yield gaps of six crops in four ecological regions in Inner Mongolia

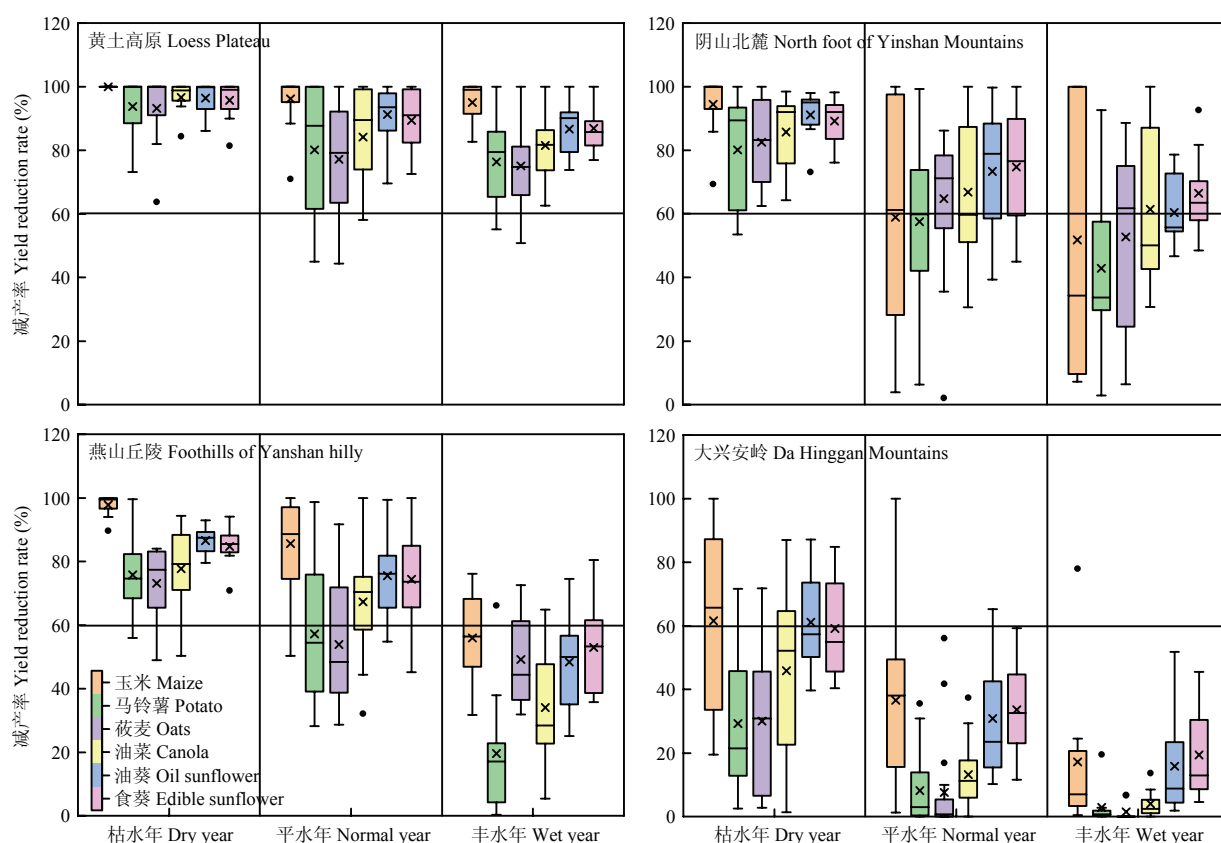


图5 内蒙古四大生态区不同降水年型下6种主要作物减产率

Fig. 5 Yield reduction rates of six staple crops under different precipitation year types in four ecological regions in Inner Mongolia

## 2.4 作物水分生产函数及水分敏感性

由图6可知,6种作物的相对蒸散与相对产量的线性相关均达到了极显著水平( $P<0.01$ ), $R^2$ 的范围为0.84—0.99。但不同作物对水分亏缺的敏感程度不同,作物产量对水分亏缺的敏感度为:油菜>食葵>玉米>莜麦>油菜>马铃薯。

## 3 讨论

### 3.1 6种作物潜在产量与雨养产量

参考表7雨养与灌溉条件下的试验结果可知,本研究模拟的6种作物的潜在与雨养产量均在合理范围内。作物潜在产量由生育期辐射和温度决定,一般来说生育期辐射高,作物同化产物积累多,潜在产量高。阴山北麓和黄土高原的辐射高于燕山丘陵与大兴安岭,因此除了玉米,作物的潜在产量普遍在阴山北麓和黄土高原更高。而玉米是喜温作物,完成整个生育期需要一定的温度保障。因此,在温度偏高的黄土高原与燕山丘陵模拟的玉米潜在产量要高于阴山北麓与

大兴安岭。而温度对潜在产量的影响较为复杂,一方面温度影响发育期,在最适温度之前,生育期长度随平均温度增加而缩短,从而降低潜在产量,但温度升高对干物质生长率有促进作用<sup>[54]</sup>;而超过最适温度,生育期长度随平均温度增加而延长,有利于积累同化产物,但高温特别是花期高温影响作物产量形成<sup>[55]</sup>。如玉米在 $\geq 32^{\circ}\text{C}$ 高温环境下光合作用降低,呼吸消耗增加,导致开花授粉和结实受阻,灌浆期缩短,产量降低<sup>[56]</sup>;马铃薯块茎生长最适宜温度是 $17\text{—}19^{\circ}\text{C}$ ,温度过高会影响块茎形成,容易造成二次生长,产生小薯,降低产量<sup>[57]</sup>;莜麦喜冷凉气候,生育期短,要求的热量条件低,各生育阶段适宜的平均温度为 $11\text{—}21^{\circ}\text{C}$ ,温度过高会引起徒长并出现“花梢”,不孕小穗和小花大量发生<sup>[58-59]</sup>;油菜最适宜的生长温度为 $22^{\circ}\text{C}$ ,高的昼夜温度会导致油菜的叶片数减少,生物量降低<sup>[60]</sup>;向日葵的最适生长温度为 $29^{\circ}\text{C}$ <sup>[61]</sup>,花期遭遇高温会导致配子畸形发育,对开花授粉及产量影响尤为严重<sup>[62]</sup>。

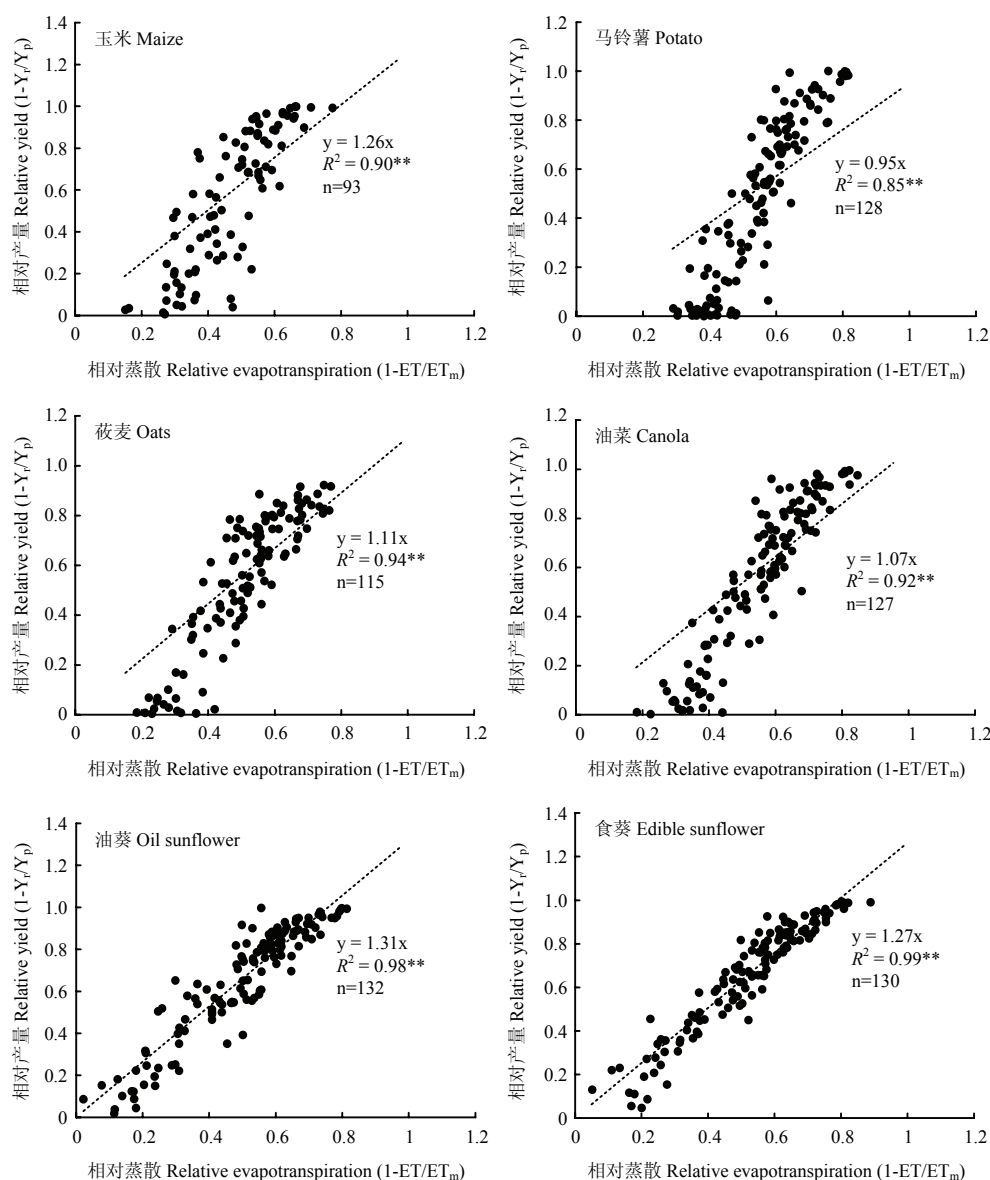


图6 6种作物的水分生产函数

Fig. 6 Crop water production functions for six crops

雨养产量主要由生育期降水量决定，同时也受温度影响。内蒙古四大生态区自西向东降水逐渐增加，因此，6种作物的雨养产量也自西向东递增。而模拟的玉米雨养产量在阴山北麓与生育期平均温度显著正相关，这是由于雨养条件下阴山北麓的低温限制了玉米生长，导致部分年份不能正常成熟。

### 3.2 四大生态区不同降水年型下作物适宜性分析

本研究收集和整理了统计年鉴和发表文献中主要作物的实际产量数据<sup>[63-66]</sup>，分析了不同地区不同降水

年型下主要作物的气象产量，结果表明作物气象产量主要受生育期降水量决定（图7）。因此，本研究基于模型对多种作物在各区域不同降水年型下的种植适宜性进行了进一步精细化分析，以期对各区域进行作物布局提供参考。

参考前人的研究结果，作物减产率高于60%时，属于极端干旱<sup>[48-49]</sup>。因此本研究以雨养产量低于潜在产量的40%作为作物在该地区不适宜雨养种植的标准。根据模型模拟结果，四大生态区不同降水年型下适宜雨养种植作物不同。黄土高原降水量整体从东南

表 7 六种作物灌溉与雨养产量

Table 7 Irrigated and rainfed yields of six crops

	灌溉产量 Irrigated yield (kg·hm <sup>-2</sup> )	雨养产量 Rainfed yield (kg·hm <sup>-2</sup> )	参考文献 Reference
玉米 Maize	10 600—16 000	2 250	[67], [68]
马铃薯 Potato	8 182	2 098	[15], [69]
莜麦 Oats	6 075	3 080	[45], [70]
油菜 Canola	2 274	802	[71]
油葵 Oil sunflower	3 430	985	[34], [72]
食葵 Edible sunflower	3 991	1 501	[34], [73]

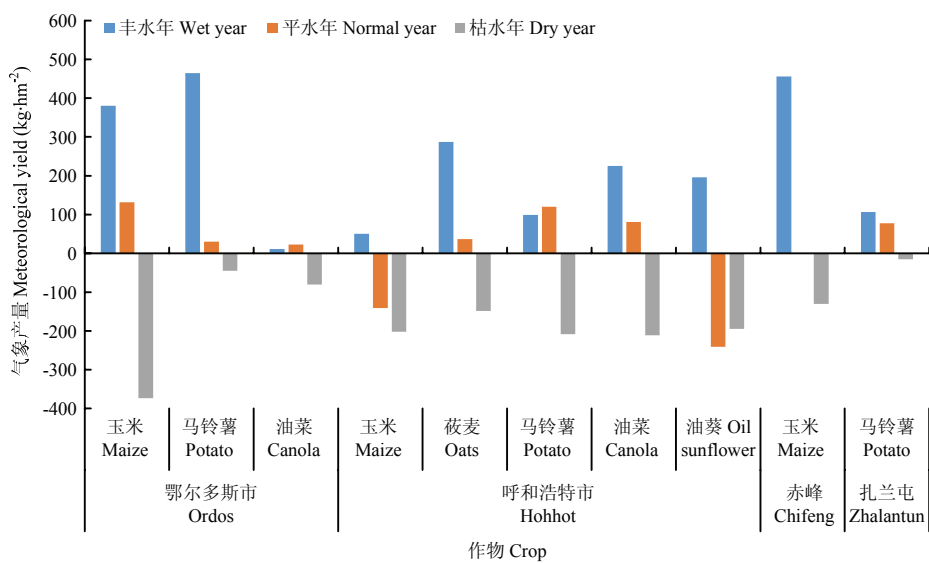


图 7 四大生态区不同降水年型下代表站点作物气象产量

Fig. 7 Meteorological yields of staple crops under different precipitation year types at typical sites in four ecological regions

向西北逐渐减少,本研究区域的内蒙古黄土高原区位于黄土高原的西北部,年降水量较低,而年潜在蒸散量较高<sup>[74]</sup>。农业生产常因受旱造成大面积减产或绝收,雨养产量较低,发展集雨补灌节水农业具有普遍性。如采用坐水播种或在玉米生长前期进行滴灌,玉米产量可显著增加<sup>[68]</sup>。玉米在阴山北麓平水年与丰水年下减产率均低于 60%,但由本文结果可知(图 8),阴山北麓玉米雨养产量的变异系数远高于燕山丘陵与大兴安岭,稳定性较差,故不推荐种植。边丽梅等<sup>[75]</sup>的研究指出燕山北部丘陵区是我国优质玉米种植带,是内蒙古自治区的玉米主产区之一。罗瑞林等<sup>[5]</sup>的研究指出,随着气候变暖,温度升高,作物生长季延长,呼伦贝尔市、兴安盟等大兴安岭沿麓采用晚熟高产玉米品种可以提高产量。玉米籽粒是牲畜精饲料主要来

源,饲用价值高于大多数其他作物。在热量条件较好的地区,旱地地膜覆盖和坐水播种等先进技术的推广可为玉米生长发育提供保证,降低玉米种植的气候风险<sup>[76]</sup>。

从高产稳产的角度出发,马铃薯是最适宜种植的作物,莜麦与油菜次于马铃薯。杨宁等<sup>[45]</sup>通过分期播种试验,确定了内蒙古农牧交错带春小麦、莜麦、油菜、向日葵、马铃薯的弹性播种区间,并指出莜麦与马铃薯的稳定性较高。段玉等<sup>[19]</sup>在阴山北麓的武川地区进行的试验结果也证实了马铃薯的经济效益、饲用价值和水分利用效率都较高。而莜麦因其耐旱性和高营养价值,是雨养寒区的重要谷物作物<sup>[45]</sup>,其中,内蒙古莜麦总产量占中国的 30%左右<sup>[77-78]</sup>。水分是限制北方春油菜产量的重要因子,通过选育优良抗旱品种,



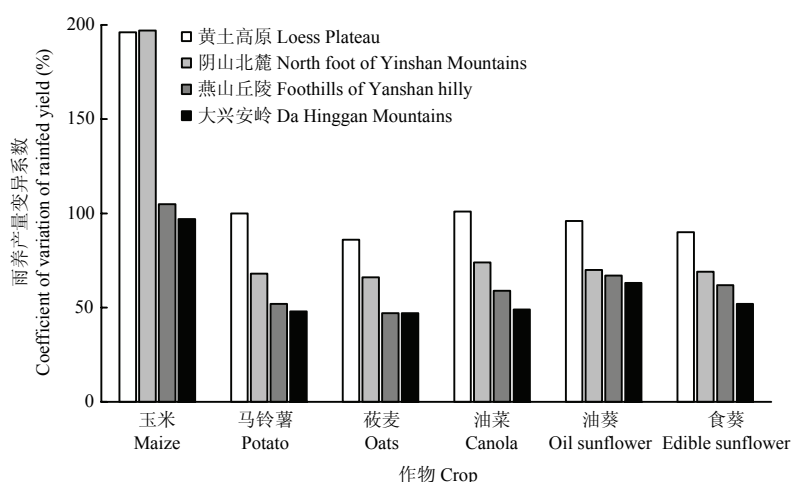


图 8 内蒙古四大生态区 6 种作物雨养产量的变异系数

Fig. 8 Coefficients of variation of rainfed yields of six crops in four ecological regions in Inner Mongolia

节水优化灌溉, 优化播期均可以降低产量波动<sup>[33]</sup>。本研究中, 食葵与油葵的减产率在 6 种作物中最高, 同时水分敏感系数也高于其他 4 种作物, 耐旱性最差。水分胁迫会导致向日葵幼苗发育不良, 继而影响后期的营养生长和生殖生长, 最终造成含油率和产量的降低。品种选育、播期和种植密度优化可提高油葵产量<sup>[79-80]</sup>。在不适宜雨养种植作物的年份, 可结合休耕或草田轮作来恢复地力和土壤水分。草田轮作可以在一定程度上改善土壤结构、增加土壤持水能力、促进土壤肥力的恢复并减少连作带来的病虫害, 并可为畜牧业提供优质饲料<sup>[81-83]</sup>。

### 3.3 作物水分敏感性解析

在一定的气候和土壤条件下, 作物蒸腾量大, 光合作用强的条件下产量高<sup>[84]</sup>。本研究结果中相对蒸散量与相对产量具有很强的线性关系。李陆泗<sup>[85]</sup>和 OSWAL<sup>[86]</sup>认为相对形式的全生育期水分生产函数因无量纲, 具有较强的适应性, 故  $k$  值可以在大田试验中使用。 $k$  值的大小直接代表了作物对水分的敏感程度。 $k$  值越大, 代表该作物对水分需求越高。尽管全生育期的水分生产函数具有一定的局限性, 不能反映作物某一生育阶段的水分亏缺对最终产量的影响。但冯绍元等<sup>[87]</sup>研究结果表明, 不同年份冬小麦的水分敏感指数变化规律虽有差异, 但冬小麦水分亏缺最敏感的生育阶段相同。因此, 作物全生育期水分敏感指数具有一定的科学性和指导性。未来可进一步构建各生育阶段作物水分生产函数, 探究各作物需水关键期, 确定其水分敏感度。

## 4 结论

内蒙古雨养农业区降水量少且变异大, 定量评价主栽作物在不同降水年型下的适宜性对该区作物布局优化和保证粮食稳产高产有重要意义。本研究表明不同作物的潜在产量和雨养产量在内蒙古存在较大的空间差异, 6 种作物平均雨养产量为马铃薯 > 玉米 > 莜麦 > 食葵 > 油菜 > 油葵, 平均潜在产量和产量差为玉米 > 马铃薯 > 莜麦 > 食葵 > 油葵 > 油菜, 水分敏感性为油葵 > 食葵 > 玉米 > 莜麦 > 油菜 > 马铃薯。以雨养产量达到潜在产量的 40% 为指标, 各作物在四大生态区不同降水年型下的适应性存在差异。马铃薯适宜在阴山北麓与燕山丘陵的平水年与丰水年型以及大兴安岭的所有年型下雨养种植, 莜麦适宜在阴山北麓的丰水年型、燕山丘陵的平水和丰水年型以及大兴安岭的所有年型下雨养种植, 油菜与食葵适宜在燕山丘陵的丰水年, 大兴安岭的所有年型下雨养种植, 而玉米与油葵仅适宜在燕山丘陵的丰水年, 大兴安岭的平水年与丰水年年型下雨养种植。

## 参考文献 References

- [1] 高宇, 张晓霞, 李彬, 任永峰, 赵沛义, 贾有余, 李焕春, 逯栓柱. 国内外旱作农业研究进展. 北方农业学报, 2016, 44(1): 102-108.  
GAO Y, ZHANG X X, LI B, REN Y F, ZHAO P Y, JIA Y Y, LI H C, LU S Z. Rainfed agriculture research progress at domestic and overseas. Journal of Northern Agriculture, 2016, 44(1): 102-108. (in Chinese)

- [2] 沈姣姣. 农牧交错带主要农作物适宜播期及气候适应性研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2011.
- SHEN J J. Study on optimalization of sowing date and climate suitability of main crops in Agro-pastoral ecotone[D]. Beijing: China Agricultural University, 2011. (in Chinese)
- [3] 龚道枝, 郝卫平, 王庆锁, 严昌荣, 张燕卿, 梅旭荣. 中国旱作节水农业科技进展与未来研发重点. 农业展望, 2015, 11(5): 52-56.
- GONG D Z, HAO W P, WANG Q S, YAN C R, ZHANG Y Q, MEI X R. Advances of dryland agriculture research in China and its outlook. Agricultural Outlook, 2015, 11(5): 52-56. (in Chinese)
- [4] 卜鉴琳. 内蒙古地区旱作农业发展研究. 福建农业, 2014(Z1): 118-119.
- PU J L. The research of development of rainfed agriculture in Inner Mongolia. Fujian Agriculture, 2014(Z1): 118-119. (in Chinese)
- [5] 罗瑞林. 气候变化对内蒙古春玉米产量影响的研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2013.
- LUO R L. Impacts of climate change on spring maize production in Inner Mongolia[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2013. (in Chinese)
- [6] 康文钦, 杜磊, 于利峰, 侯智慧, 许洪滔, 赵俊利, 侯安宏. 阴山北麓地区降水特性和作物需水耦合关系分析——以武川县为例. 北方农业学报, 2020, 48(5): 83-89.
- KANG W Q, DU L, YU L F, HOU Z H, XU H T, ZHAO J L, HOU A H. Analysis of the coupling relationship between precipitation characteristics and crop water demand in the northern area of Yinshan Mountain—Taking Wuchuan County as an example. Journal of Northern Agriculture, 2020, 48(5): 83-89. (in Chinese)
- [7] 侯琼, 郭瑞清, 杨丽桃. 内蒙古气候变化及其对主要农作物的影响. 中国农业气象, 2009, 30(4): 560-564.
- HOU Q, GUO R Q, YANG L T. Climate change and its impact on main crops in Inner Mongolia. Chinese Journal of Agrometeorology, 2009, 30(4): 560-564. (in Chinese)
- [8] 孙继颖, 高聚林, 薛春雷, 李曼, 翟丽健. 不同品种大豆抗旱性能比较研究. 华北农学报, 2007(6): 91-97.
- SUN J Y, GAO J L, XUE C L, LI M, ZHAI L J. Comparative experiment on drought resistant characters of different soybean varieties. Acta Agriculturae Boreali-Sinica, 2007(6): 91-97. (in Chinese)
- [9] 刘星岑. 阴山北麓不同灌水量对马铃薯生长发育及产量的影响. 北方农业学报, 2019, 47(2): 79-82.
- LIU X C. Effect on irrigation amount on potato growth and yield in the Yinshan Mountain arid area. Journal of Northern Agriculture, 2019, 47(2): 79-82. (in Chinese)
- [10] 韩占江, 于振文, 王东, 张永丽. 测墒补灌对冬小麦干物质积累与分配及水分利用效率的影响. 作物学报, 2010, 36(3): 457-465.
- HAN Z J, YU Z W, WANG D, ZHANG Y L. Effects of supplemental irrigation based on testing soil moisture on dry matter accumulation and distribution and water use efficiency in winter wheat. Acta Agronomica Sinica, 2010, 36(3): 457-465. (in Chinese)
- [11] 杜建民, 王峰, 左忠, 郭永忠, 刘华, 李海洋. 旱地马铃薯根际补灌栽培最佳补灌时期及适宜补灌量研究. 干旱地区农业研究, 2009, 27(2): 129-132.
- DU J M, WANG F, ZUO Z, GUO Y Z, LIU H, LI H Y. Study on period and appropriate amount of rhizosphere complementary irrigation for potato in arid area. Agricultural Research in the Arid Areas, 2009, 27(2): 129-132. (in Chinese)
- [12] 李瑞, 樊明寿, 郑海春, 郇翻身, 高娃, 王伟妮, 赵晓梅. 基于产量水平的内蒙古阴山地区马铃薯施肥评价. 中国土壤与肥料, 2020(6): 181-188.
- LI R, FAN M S, ZHENG H C, GAO F S, GAO W, WANG W N, ZHAO X M. Evaluation of potato fertilization based on yield level in Yinshan region of Inner Mongolia. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2020(6): 181-188. (in Chinese)
- [13] TANG J Z, WANG J, FANG Q X, WANG E L, YIN H, PAN X B. Optimizing planting date and supplemental irrigation for potato across the agro-pastoral ecotone in North China. European Journal of Agronomy, 2018, 98: 82-94.
- [14] ZHANG Y, ZHANG L Z, YANG N, HUTH N, WANG E L, VAN DER WERF W, EVERS J B, WANG Q, ZHANG D S, WANG R N, GAO H, ANTEN N P. Optimized sowing time windows mitigate climate risks for oats production under cool semi-arid growing conditions. Agricultural and Forest Meteorology, 2019, 266-267: 184-197.
- [15] 李扬, 王靖, 唐建昭, 黄明霞, 白慧卿, 王娜, 贺付伟. 播期和品种变化对马铃薯产量的耦合效应. 中国生态农业学报, 2019, 27(2): 296-304.
- LI Y, WANG J, TANG J Z, HUANG M X, BAI H Q, WANG N, HE F W. Coupling impacts of planting date and cultivar on potato yield. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2019, 27(2): 296-304. (in Chinese)
- [16] 黄明霞, 王靖, 唐建昭, 房全孝, 张建平, 白慧卿, 王娜, 李扬, 吴冰洁, 郑隽卿, 潘学标. 基于 APSIM 模型分析播期和水氮耦合对油菜产量的影响. 农业工程学报, 2018, 34(13): 134-143.
- HUANG M X, WANG J, TANG J Z, FANG Q X, ZHANG J P, BAI H Q, WANG N, LI Y, WU B J, ZHEN J Q, PAN X B. Analysis of interaction of sowing date, irrigation and nitrogen application on yield

- of oil sunflower based on APSIM model. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2018, 34(13): 134-143. (in Chinese)
- [17] 潘学标, 龙步菊, 魏玉荣. 内蒙古黄土高原区降水规律与集雨利用潜力分析. 干旱区资源与环境, 2007, 21(4): 65-71.
- PAN X B, LONG B J, WEI Y R. Analysis on the rainfall regular and potential of collecting and utilizing rain in Loess Plateau of Inner Mongolia. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2007, 21(4): 65-71. (in Chinese)
- [18] 马凯, 徐玉霞, 何文鑫, 马佳俊, 陈倩. 内蒙古东部地区主要粮食作物种植适宜性评价及区划. 宝鸡文理学院学报(自然科学版), 2020, 40(1): 72-77+84.
- MA K, XU Y X, HE W X, MA J J, CHEN Q. Suitability evaluation and regionalization of main food crops in eastern Inner Mongolia, China. Journal of Baoji University of Arts and Sciences (Natural Science Edition), 2020, 40(1): 72-77+84. (in Chinese)
- [19] 段玉, 妥德宝, 赵沛义, 李焕春, 张君. 阴山北麓旱作区主要作物热能值及结构调整研究. 干旱区资源与环境, 2013, 27(8): 153-157.
- DUAN Y, TUO D B, ZHAO P Y, LI H C, ZHANG J. Crops caloric value and adjustment of planting structure in rainfed farmland of north Yinshan Mountain area, Inner Mongolia. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2013, 27(8): 153-157. (in Chinese)
- [20] 王芳. 内蒙古主要粮食作物的区域布局研究. 内蒙古统计, 2015(6): 17-18.
- WANG F. Study on the regional layout of main grain crops in Inner Mongolia. Inner Mongolia Statistics, 2015(6): 17-18. (in Chinese)
- [21] 王美莲. 内蒙古自治区主要粮食作物生态经济适应性的研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2003.
- WANG M L. Study on the ecology-economic adaptability of main crops in Inner Mongolia[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2003. (in Chinese)
- [22] 李艳, 薛昌颖, 杨晓光, 王靖, 刘园, WANG E L. 基于 APSIM 模型的灌溉降低冬小麦产量风险研究. 农业工程学报, 2009, 25(10): 35-44.
- LI Y, XUE C Y, YANG X G, WANG J, LIU Y, WANG E L. Reduction of yield risk of winter wheat by appropriate irrigation based on APSIM model. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2009, 25(10): 35-44. (in Chinese)
- [23] 冯仰强, 聂志刚, 王钧, 罗荣鑫. 基于 APSIM 模型研究不同降水年型下降水变化对旱地小麦产量的影响. 作物研究, 2021, 35(2): 108-111, 140.
- FENG Y Q, NIE Z G, WANG J, LUO R X. Based on APSIM model to study the influence of different precipitation years on the yield of dryland wheat. Crop Research, 2021, 35(2): 108-111, 140. (in Chinese)
- [24] 赵彦茜, 肖登攀, 齐永青, 柏会子. 华北平原不同降水年型和作物种植模式下的产量和耗水模拟. 农业工程学报, 2018, 34(20): 108-116.
- ZHAO Y Q, XIAO D P, QI Y Q, BAI H Z. Crop yield and water consumption of different cropping patterns under different precipitation years in North China Plain. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2018, 34(20): 108-116. (in Chinese)
- [25] 侯智慧, 梅连杰, 侯安宏, 高晓霞. 内蒙古农业资源配置效率分析. 中国农业资源与区划, 2014, 35(3): 71-77.
- HOU Z H, MEI L J, HOU A H, GAO X X. Analysis of allocation efficiency of agriculture resources in Inner Mongolia. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2014, 35(3): 71-77. (in Chinese)
- [26] 白美兰, 郝润全, 高建峰, 刘宏伟. 内蒙古地区极端气候事件分布特征及对农业影响评估. 干旱地区农业研究, 2009, 27(2): 21-27.
- BAI M L, HAO R Q, GAO J F, LIU H W. Distribution character of extreme climatic events and evaluation of its influence on agriculture in Inner Mongolia. Agricultural Research in the Arid Areas, 2009, 27(2): 21-27. (in Chinese)
- [27] 王迎男, 高娃, 邵翻身, 朴明姬, 樊明寿, 贾立国, 柳昱, 郑海春. 内蒙古马铃薯主产区基础地力及增产潜力研究. 植物营养与肥料学报, 2019, 25(8): 1345-1353.
- WANG Y N, GAO W, GAO F S, PU M J, FAN M S, JIA L G, LIU Y, ZHEN H C. Inherent soil productivity and yield-increasing potential of potato in main production areas in Inner Mongolia. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2019, 25(8): 1345-1353. (in Chinese)
- [28] WANG J, WANG E L, YIN H, FENG L P, ZHAO Y X. Differences between observed and calculated solar radiations and their impact on simulated crop yields. Field Crops Research, 2015, 176: 1-10.
- [29] KEATING B A, CARBERRY P S, HAMMER G L, PROBERT M E, ROBERTSON M J, HOLZWORTH D, HUTH N I, HARGREAVES J N G, MEINKE H, HOCHMAN Z, MCLEAN G, VERBURG K, SNOW V, DIMES J P, SILBURN M, WANG E, BROWN S, BRISTOW K L, ASSENG S, CHAPMAN S, MCCOWN R L, FREEBAIRN D M, SMITH C J. An overview of APSIM, a model designed for farming systems simulation. European Journal of Agronomy, 2003, 18(3): 267-288.
- [30] ROBERTSON M J, LILLEY J M. Simulation of growth, development and yield of canola (*Brassica napus*) in APSIM. Crop Pasture Science, 2016, 67(3): 332-344.
- [31] WANG N, WANG J, WANG E L, YU Q, SHI Y, HE D. Increased

- uncertainty in simulated maize phenology with more frequent supra-optimal temperature under climate warming. *European Journal of Agronomy*, 2015, 71: 19-33.
- [32] HUANG M X, WANG J, WANG B, LIU D L, YU Q, HE D, WANG N, PAN X B. Optimizing sowing window and cultivar choice can boost China's maize yield under 1.5°C and 2°C global warming. *Environmental Research Letters*, 2020, 15(2): 1-8.
- [33] HE D, WANG E L, WANG J, LILLEY J M. Genotype x environment x management interactions of canola across China: A simulation study. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2017, 247: 424-433.
- [34] 黄明霞. 基于 APSIM 模型的北方农牧交错带向日葵增产空间及途径研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2017.
- HUANG M X. A study on the yield increasing space and approaches of sunflower in the agro-pastoral ecotone in North China based on APSIM model[D]. Beijing: China Agricultural University, 2017. (in Chinese)
- [35] 薛庆禹, 王靖, 曹秀萍, 马薇, 冯利平. 不同播期对华北平原夏玉米生长发育的影响. *中国农业大学学报*, 2012, 17(5): 30-38.
- XUE Q Y, WANG J, CAO X P, MA W, FENG L P. Effect of sowing date and variety on growth and population characteristics of summer maize in North China Plain. *Journal of China Agricultural University*, 2012, 17(5): 30-38. (in Chinese)
- [36] 胡树平, 青格尔, 高聚林, 侯昆仑. 播期对不同品种春玉米生长发育和产量形成的影响. *内蒙古农业科技*, 2015, 43(1): 1-5, 31.
- HU S P, QING G E, GAO J L, HOU K L. The effects of sowing on the growth and yield of different hybrids of spring maize. *Inner Mongolia Agricultural Science and Technology*, 2015, 43(1): 1-5, 31. (in Chinese)
- [37] 邓浩亮. 黄土高原不同生态区垄沟覆盖对春玉米生产力和土壤质量的影响及其机理[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2019.
- DENG H L. Effects of ridge and furrow mulching on spring maize (*Zea mays* L.) productivity and soil quality and its mechanism in different ecological regions of the Loess Plateau[D]. Lanzhou: Gansu Agricultural University, 2019. (in Chinese)
- [38] 于胜男, 高聚林, 明博, 王振, 于晓芳, 孙继颖, 梁红伟, 王志刚. 北方春玉米粒收品种阶段生长发育与温度因子的关系. *北方农业学报*, 2021, 49(4): 35-44.
- YU S N, GAO J L, MING B, WANG Z, YU X F, SUN J Y, LIANG H W, WANG Z G. The relationship between growth, development and temperature factors of mechanical grain harvesting spring maize in northern China. *Journal of Northern Agriculture*, 2021, 49(4): 35-44. (in Chinese)
- [39] LI Y, WANG J, TANG J Z, WANG E L, PAN Z H, PAN X B, HU Q. Optimum planting date and cultivar maturity to optimize potato yield and yield stability in North China. *Field Crops Research*, 2021, 269: 108179.
- [40] 张君. 阴山北麓马铃薯水氮耦合效应及合理利用机制研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2018.
- ZHANG J. The coupling effects of water and fertilizer and its rational utilization mechanism on potato in the Northern Foot of Yinshan Mountain[D]. Beijing: China Agricultural University, 2018. (in Chinese)
- [41] 付蓉. 春油菜区绿肥替代氮肥的效应及潜力研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2020.
- FU R. Effects and potential of nitrogen fertilizer replacement by green manure in spring rapeseed area[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2020. (in Chinese)
- [42] 潘宇鹰. 北方农牧交错带向日葵田间集雨模式效应研究——以武川县为例[D]. 北京: 中国农业大学, 2015.
- PAN Y Y. Study on effects of rainwater collection models in sunflower field in agricultural and pastoral ecotone in north China—A case study in Wuchuan County[D]. Beijing: China Agricultural University, 2015. (in Chinese)
- [43] 韩毅强, 高亚梅, 郑殿峰, 杜吉到. 利用播期研究气候条件对黑龙江春玉米产量性状的影响. *干旱地区农业研究*, 2016, 34(3): 132-138.
- HAN Y Q, GAO Y M, ZHEN D F, DU J D. Effects of meteorological factors on yield traits of maize (*Zea mays* L.) in Heilongjiang during various sowing seasons. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2016, 34(3): 132-138. (in Chinese)
- [44] 房磊. 不同垄距与播种深度对马铃薯质量的影响[D]. 北京: 中国农业科学院, 2013.
- FANG L. Effects of different row spacing and planting depth on potato quality[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2013. (in Chinese)
- [45] 杨宁. 内蒙古农牧交错带主要作物对气候的敏感性与适应弹性研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2014.
- YANG N. Climate sensitivity and adaptation flexibility for five dominant crops in Agro-pastoral ecotone in Inner Mongolia[D]. Beijing: China Agricultural University, 2014. (in Chinese)
- [46] 董朝阳, 刘志娟, 杨晓光. 北方地区不同等级干旱对春玉米产量影响. *农业工程学报*, 2015, 31(11): 157-164.
- DONG C Y, LIU Z J, YANG X G. Effects of different grade drought on grain yield of spring maize in Northern China. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015, 31(11): 157-164. (in Chinese)

- [47] 邓国卫, 卿清涛, 徐金霞, 孙俊. 四川省水稻综合气象灾害风险区划. 中国生态农业学报, 2020, 28(5): 621-630.
- DE G W, QING Q T, XU J X, SUN J. Integrated meteorological disaster risk regionalization of rice in Sichuan Province. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2020, 28(5): 621-630. (in Chinese)
- [48] 孙爽, 杨晓光, 张镇涛, 赵锦, 刘志娟. 华北平原不同等级干旱对冬小麦产量的影响. 农业工程学报, 2021, 37(14): 69-78.
- SUN S, YANG X G, ZHANG Z T, ZHAO J, LIU Z J. Impacts of different grades of drought on winter wheat yield in North China Plain. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2021, 37(14): 69-78. (in Chinese)
- [49] 杨霏云, 郑秋红, 李文科, 王琦, 罗蒋梅, 樊栋樑. 基于 WOFOST 模型的辽宁省春玉米干旱灾损风险评估. 干旱地区农业研究, 2020, 38(6): 218-225.
- YANG F Y, ZHENG Q H, LI W K, WANG Q, LUO J M, FAN D L. Risk assessment of drought damage of spring maize in Liaoning Province based on WOFOST model. Agricultural Research in the Arid Areas, 2020, 38(6): 218-225. (in Chinese)
- [50] 雷娟娟. 旱地小麦产量形成对降水响应的模拟分析[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2015.
- LEI J J. The simulation analysis of wheat yield forming to response of precipitation[D]. Lanzhou: Gansu Agricultural University, 2015. (in Chinese)
- [51] 唐建昭. 北方农牧交错带马铃薯基于缩差和增效的种植管理模式研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2018.
- TANG J Z. A study on planting pattern of potato to narrow yield gap and increase precipitation use efficiency in the agro-pastoral ecotone in North China[D]. Beijing: China Agricultural University, 2018. (in Chinese)
- [52] 张恒嘉. 几种大田作物水分-产量模型及其应用. 中国生态农业学报, 2009, 17(5): 997-1001.
- ZHANG H J. Field crop water-yield models and their applications. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2009, 17(5): 997-1001. (in Chinese)
- [53] PRIESTLEY C H B, TAYLOR R J. On the assessment of surface heat flux and evaporation using large-scale parameters. Monthly Weather Review, 1972, 100: 81-92.
- [54] WANG J, WANG E L, LUO Q Y, KIRBY M. Modelling the sensitivity of wheat growth and water balance to climate change in Southeast Australia. Climatic Change, 2009, 96(1): 79-96.
- [55] WANG N, WANG E L, WANG J, ZHANG J P, ZHENG B Y, HUANG Y. Modelling maize phenology, biomass growth and yield under contrasting temperature conditions. Agricultural and Forest Meteorology, 2018, 250/251: 319-329.
- [56] 王海梅. 高温胁迫对河套灌区玉米生理指标及产量构成要素的影响. 干旱气象, 2015, 33(1): 59-62.
- WANG H M. Influence of high temperature stress on physiological indexes and yield components of maize in Hetao Irrigation District. Arid Meteorology, 2015, 33(1): 59-62. (in Chinese)
- [57] 巴特尔, 徐桂梅, 付志强, 张凤英, 田小龙. 察右中旗马铃薯种植的气候条件分析与区划. 内蒙古气象, 2009(4): 30-32.
- BA T E, XU G M, FU Z Q, ZHANG F Y, TIAN X L. Climatic condition analysis and division of potato planting in Chayouzhong County. Meteorology Journal of Inner Mongolia, 2009(4): 30-32. (in Chinese)
- [58] 潘学标, 苟诗薇, 魏玉蓉, 龙步菊. 气候变异对内蒙古武川县麦类作物产量的影响. 中国农学通报, 2007, 23(8): 526-531.
- PAN X B, GOU S W, WEI Y R, LONG B J. Impact of climate variation on the yield of crop in Wuchuan County of Inner Mongolia Agro-Pastoral. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2007, 23(8): 526-531. (in Chinese)
- [59] 董关水, 朱家昌. 旱作莜麦的气象条件及适宜种植区. 中国农业气象, 1994, 15(4): 5-8.
- DONG G S, ZHU J C. Meteorological conditions and suitable planting area of dry oats. Chinese Journal of Agrometeorology, 1994, 15(4): 5-8. (in Chinese)
- [60] 王莎. 气候变化和管理措施对澳大利亚和中国油菜生产的影响[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2014.
- WANG S. Effects of climate change and management practices on rapeseed production in Australia and China[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2014. (in Chinese)
- [61] TANG J Z, WANG J, HE D, HUANG M X, PAN Z H, PAN X B. Comparison of the impacts of climate change on potential productivity of different staple crops in the agro-pastoral ecotone of North China. Journal of Meteorological Research, 2016, 30(6): 983-997.
- [62] 孙向伟, 高飞翔. 内蒙古河套灌区油用向日葵高温胁迫的关键温度. 中国农学通报, 2017, 33(25): 110-115.
- SUN X W, GAO F X. Critical temperature of oil sunflower under high temperature stress in Hetao Irrigation District, Inner Mongolia. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2017, 33(25): 110-115. (in Chinese)
- [63] 鄂尔多斯市统计局. 鄂尔多斯统计年鉴 1987-2015. 北京: 中国统计出版社, 1987-2015.
- Erdos Bureau of Statistics. Ordos Statistical Yearbook 1987-2015. Beijing: China Statistic Press, 1987-2015. (in Chinese)
- [64] 呼和浩特市统计局. 呼和浩特统计年鉴 1999-2015. 北京: 中国统

- 计出版社, 1999-2015.
- Hohhot Bureau of Statistics. Hohhot Statistical Yearbook 1999-2015. Beijing: China Statistic Press, 1999-2015. (in Chinese)
- [65] 何文鑫, 徐玉霞, 马凯. 赤峰市近 60 多年气候变化特征分析及对粮食产量的影响. 河南科学, 2019, 37(12): 2002-2009.
- HE W X, XU Y X, MA K. Climate change characteristics and its impact on grain yield in Chifeng city in recent 60 years. Henan Science, 2019, 37(12): 2002-2009. (in Chinese)
- [66] 薛思嘉, 魏瑞江, 王朋朋, 刘园园, 杨梅. 基于关键气象因子的河北省马铃薯产量预报. 干旱气象, 2021, 39(1): 138-143.
- XUE S J, WEI R J, WANG P P, LIU Y Y, YANG M. Potato yield forecast in Hebei province based on meteorological key factors. Arid Meteorology, 2021, 39(1): 138-143. (in Chinese)
- [67] 邹宇锋. 河套灌区不同覆膜灌溉方式对农田土壤水盐调控及春玉米产量的影响[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2020.
- ZOU Y F. The regulation on water and salt of farmland soil and the effect of spring maize yield under different irrigation methods with mulching in Hetao Irrigation District[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2020. (in Chinese)
- [68] 李勇, 程满金, 史宽治. 重视半干旱地区集雨补灌节水增产机理的研究. 内蒙古水利, 2010(1): 7-8.
- LI Y, CHENG M J, SHI K Z. Emphasis is placed on the study of the mechanism of rainwater collection and supplementary irrigation for water-saving and yield increase in semi-arid areas. Inner Mongolia Water Resources, 2010(1): 7-8. (in Chinese)
- [69] 秦军红, 陈有君, 周长艳, 庞保平, 蒙美莲. 膜下滴灌灌溉频率对马铃薯生长、产量及水分利用率的影响. 中国生态农业学报, 2013, 21(7): 824-830.
- QIN J H, CHEN Y J, ZHOU C Y, PANG B P, MENG M L. Effects of drip irrigation frequency under mulch on potato growth, yield and water use efficiency. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2013, 21(7): 824-830. (in Chinese)
- [70] 王利霞. 内蒙古地理条件与莜麦种植探析. 中国农业信息, 2016(9): 102-103.
- WANG L X. Inner Mongolia geographical conditions and oats cultivation analysis. China Agricultural Information, 2016(9): 102-103. (in Chinese)
- [71] MOHTASHAMI R, DEHNAVI M M, BALOUCHI H, FARAJI H. Improving yield, oil content and water productivity of dryland canola by supplementary irrigation and selenium spraying. Agricultural Water Management, 2020, 232: 1-10.
- [72] 樊秀荣, 翟永胜, 张艳, 米志恒, 孙祥春, 苏化洲, 孙秀云, 高海燕. 内蒙古河套灌区食用向日葵肥料对比试验. 安徽农业科学, 2017, 45(6): 24-25.
- FAN X R, ZHAI Y S, ZHANG Y, MI Z H, SUN X C, SU H Z, SUN X Y, GAO H Y. Fertilizer comparison test on edible sunflower in Hetao Irrigation District. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2017, 45(6): 24-25. (in Chinese)
- [73] 段玉, 妥德宝, 张君, 李焕春, 赵沛义, 安昊, 姚俊卿. 氮磷钾平衡施用对油用向日葵产量及肥料效率的影响. 植物营养与肥料学报, 2013, 19(3): 767-771.
- DUAN Y, TUO D B, ZHANG J, LI H C, ZHAO P Y, AN H, YAO J Q. Effects of N, P and K fertilizers on yield and fertilizer efficiency of oil sunflower. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2013, 19(3): 767-771. (in Chinese)
- [74] 孔令颖. 基于传统干湿指数的黄土高原气象干旱变化特征及其对旱作粮食产量的影响[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2020.
- KONG L Y. Spatial temporal variation of meteorological drought and its impacts on grain yield in Loess Plateau based on the traditional arid-wet index[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2020. (in Chinese)
- [75] 边丽梅, 孙峰成, 董喆, 郑伟, 张丽妍, 张昊, 郝春雷, 慈艳华, 杜江洪, 孟繁盛. 燕山北部丘陵区春玉米品种耐密性评价及鉴定指标筛选. 作物研究, 2021, 35(1): 72-79.
- BIAN L M, SUN F C, DONG Z, ZHENG W, ZHANG L Y, ZHANG H, HAO C L, CI Y H, DU J H, MENG F S. Evaluation of density-tolerance and selection of identification indexes of spring maize varieties in hilly areas of northern Yanshan. Crop Research, 2021, 35(1): 72-79. (in Chinese)
- [76] 郭佳, 张宝林, 高聚林, 王志刚, 宋佳欣. 内蒙古东部农业热量资源的空间分异及玉米资源利用率. 西北农业学报, 2020, 29(3): 476-486.
- GUO J, ZHANG B L, GAO J L, WANG Z G, SONG J X. Spatial heterogeneity of agricultural thermal resources and use efficiency of maize in eastern Inner Mongolia. Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica, 2020, 29(3): 476-486. (in Chinese)
- [77] AKCURA M, CERS S. Evaluation of drought tolerance indices for selection of Turkish oat (*Avena sativa* L.) landraces under various environmental conditions. Zemdirbyste-Agriculture, 2011, 98 (2): 157-166.
- [78] ZHANG Y, DUAN Y, NIE J Y, YANG J, REN J H, VAN DER WERF W, EVERS J B, ZHANG J, SU Z C, ZHANG L Z. A lack of complementarity for water acquisition limits yield advantage of oats/vetch intercropping in a semi-arid condition. Agricultural Water Management, 2019, 225: 1-9.
- [79] 毕经纬. 向日葵芽苗期抗旱性研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大



- 学, 2010.
- BI J W. Studies on drought resistance in sunflower buds and seedling stage[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2010. (in Chinese)
- [80] 赵轩微, 赵雅杰, 田振东, 胡树平, 赵榕, 任亚宁, 包海柱, 高聚林. 向日葵干物质转运及产量对播种期和栽培密度的响应. 作物杂志, 2021(3): 185-189.
- ZHAO X W, ZHAO Y J, TIAN Z D, HU S P, ZHAO R, REN Y N, BAO H Z, GAO J L. Response of dry matter transportation and yield to sowing date and planting density on sunflower. Crops, 2021(3): 185-189. (in Chinese)
- [81] 白春利, 赵和平, 师永明, 丁海君, 刘思博. 荒漠草原区“草田轮作”模式及牧草高效种植技术. 畜牧与饲料科学, 2019, 40(8): 47-49.
- BAI C L, ZHAO H P, SHI Y M, DING H J, LIU S B. A rotation mode of crop and grass in desert grassland area and high-efficient cultivation technique of herbage. Animal Husbandry and Feed Science, 2019, 40(8): 47-49. (in Chinese)
- [82] 宋丽萍. 黄土高原草田轮作系统田间水分蒸散特性及土壤水分恢复效应研究[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2016.
- SONG L P. The characteristics of evapotranspiration and soil water recharging in lucerne-crop rotation on the Loess Plateau[D]. Lanzhou: Gansu Agricultural University, 2016. (in Chinese)
- [83] TANG J Z, WANG J, FANG Q X, DAYANANDA B, YU Q, ZHAO P Y, YIN H, PAN X B. Identifying agronomic options for better potato production and conserving water resources in the agro-pastoral ecotone in North China. Agricultural and Forest Meteorology, 2019, 272/273: 91-101.
- [84] 彭永生, 苏里坦. 全生育期作物水分生产函数的建立——以水稻为例. 干旱区资源与环境, 2003, 17(4): 122-124.
- PENG Y S, SU L T. The establishment of water-production function during crops' full-bearing period. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2003, 17(4): 122-124. (in Chinese)
- [85] 李陆泗. 作物的水分生产函数. 灌溉排水, 1989(3): 43-45.
- LI L S. Water production function of crops. Journal of Irrigation and Drainage, 1989(3): 43-45. (in Chinese)
- [86] OSWALÂ M C. Water production functions of dryland crops on aridisols. Journal of the Indian Society of Soil Science, 1995, 43(3): 320-322.
- [87] 冯绍元, 罗遵兰, 左海萍. 河北省冬小麦水分生产函数模型初步分析. 灌溉排水学报, 2005, 24(4): 58-61.
- FENG S Y, LUO Z L, ZUO H P. The study of water product function of winter wheat in Hebei province. Journal of Irrigation and Drainage, 2005, 24(4): 58-61. (in Chinese)

(责任编辑 杨鑫浩)