

吴熠婷, 江 琪, 孟 远, 等. 气候变化条件下陕西省不同气候区灌溉对冬小麦减产风险影响评估[J]. 江苏农业科学, 2021, 49(10): 213–222.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2021.10.040

气候变化条件下陕西省不同气候区灌溉 对冬小麦减产风险影响评估

吴熠婷, 江 琪, 孟 远, 陈新峰, 甫尧锴, 林文建, 周 宁, 徐顺标, 刘建超

(浙江农林大学暨阳学院, 浙江诸暨 311800)

摘要:研究未来气候变化条件下灌溉对陕西省不同气候区冬小麦生长情况、减产风险及其对气候变化的响应机制, 以期决策者制定应对气候变化长期粮食战略, 提供必要的参考依据。联合运用作物模型 DSSAT4.6 和天气发生器 LarsWG5.5, 模拟气候变化条件下陕西省不同气候区域、时期灌溉对冬小麦生长的影响。同时计算本研究提出的新概念——冬小麦减产风险, 横向和纵向综合评估气候变化对冬小麦产量的影响。选取陕西省干旱半干旱地区、半湿润地区、湿润地区作为研究对象, 选择典型站点并获取土壤数据, 统一设定灌溉制度, 运用天气发生器 LarsWG5.5 模拟预测未来气象数据, 并输入已校准验证的作物模型, 模拟气候变化条件下不同地区在雨养、灌溉时的冬小麦产量并评估减产风险。结果表明, 未来 50 年, 陕西省大部分地区冬小麦生育期内降水先减少后增多, 年平均温度不断增加。不同区域产量、减产风险变化情况不尽相同, 气候变化对冬小麦产量的影响程度自北向南逐渐降低, 总体上气候变化对陕西地区冬小麦产量的稳定具有积极作用。3 区(陕西省北部黄土高原干旱半干旱地区)受气候变化的影响较大, 2 区(关中平原半湿润易旱区)次之, 1 区(陕西南部湿润地区)受气候变化的影响较弱, 但各地区增产总量差距不大。1 区减产风险逐年增加, 2 区、3 区减产风险逐年减少。灌溉能够减缓并利用气候变化对冬小麦生长的不利影响, 大幅提高产量、水分利用率, 降低减产风险。灌溉条件下, 1 区减产风险逐年上升, 但仍远低于雨养下的减产风险; 2 区、3 区减产风险则逐年下降至零。综合各区域灌溉对减产风险的影响, 建议 1 区、2 区增加灌溉设施, 3 区不推荐但有充足灌溉资源的地区仍可以增加灌溉。

关键词:气候变化; 灌溉; 雨养; 作物模型; 减产风险; 参考决策

中图分类号: S275; S512.1⁺10.7 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2021)10-0213-10

联合国政府间气候变化专门委员会(IPCC)第 5 次评估报告指出, 到 21 世纪末气温可能增加 1.5 ~ 4.0 °C, 不同地区的降水变化情况则不尽相同, 但极端降水事件增多, 预计冬小麦每 10 年减产 1.9%^[1]。气候变化对粮食产量具有重大的影响, 有研究认为, 未来产量变化的 32% ~ 39% 是由气候变化所引起的^[2-3]。农业是受气候变化影响最大的行业之一, 特别是农业主体中的作物生产和粮食安全^[4]。未来气候变化条件下极端气候如高温、干旱

等发生概率不断增加, 对作物生产造成重大影响^[5-7], 灌溉是作物获得高产稳产的必要条件^[8]。因此, 探求不同地区未来气候变化条件下的灌溉能否增产、效益是否增加、是否符合当地的资源要求就显得尤为必要。研究气候变化条件下不同气候区作物对灌溉的不同响应, 有利于加深认识气候变化对农业生产与灌溉水资源的影响, 为国家未来农业发展提供决策支持^[9]。

当前评估气候变化、灌溉等外部环境对作物产量的影响多是基于历史多年气象资料和产量数据经验性地估算^[10-13], 缺乏一定的机理性和准确性。同时与未来气候完全相同的气候环境下小麦的生长动态难以实现, 田间试验主要研究单一气象因素的改变对小麦产量的影响^[14-15]。单一年份产量具有较大的波动性, 不能够很好地反映未来的变化趋势, 对于未来产量的不确定性, 大容量概率性的预测具有更好的指导意义^[16-17]。随着作物生长模型逐渐成熟, 许多学者将其应用于灾害风险评

收稿日期: 2020-08-18

基金项目: 浙江农林大学暨阳学院人才启动项目(编号: RQ1905A01); 浙江农林大学暨阳学院院级大学生科技创新活动计划项目(编号: JYKC1908, JYKC1910); 浙江省大学生科技创新活动计划暨新苗人才计划资助项目(编号: 2020R412036)。

作者简介: 吴熠婷(1999—), 女, 浙江嘉兴人, 主要从事人文地理研究。E-mail: 2569313081@qq.com。

通信作者: 刘建超, 博士, 讲师, 主要从事农业系统模拟研究。E-mail: 20198001@zafu.edu.cn。

估^[18-19],作物模型与气候模型的结合应用于评估作物的生长、发育、产量对气候变化的响应^[20-22],但利用作物模型针对未来气候变化条件下不同气候区灌溉对冬小麦减产风险的研究较少。使用作物模型模拟冬小麦灌溉在未来气候变化条件下的生长规律和响应机制,进而针对不同气候区的各站点采取相应的应对措施以缓解甚至利用气候变化对作物的影响。通过作物模型与气候模型相结合预测未来气候变化条件下粮食产量,归一化处理得到减产风险以便于对比不同地区和时期灌溉对冬小麦生长情况的影响,部分解释灌溉对气象灾害、不同水平年冬小麦生长胁迫的缓解程度。能够较为准确地反映气候变化在不同气候区的波动程度,以及冬小麦在不同气候区域、不同时期的适应能力。气候变化的影响是不可避免的,人类的应对措施只能减缓或者适应气候变化的影响,减缓气候变化的措施在短期内并不能够产生显著效果,人类应该更积极地适应气候变化^[23-24]。了解小麦在未来气候变化下的生长状况有利于人们提前做好应对措施,使小麦能够更好地适应气候变化的影响^[25],从而通过设计合理的管理制度、种植制度和培育新品种等手段适应气候变化的影响。

陕西省位于我国内陆,整体属于大陆性季风气候,由北向南依次为陕北温带干旱半干旱气候、关中原暖温带半湿润气候、陕南亚热带湿润气候,涵盖了我国绝大部分的气候类型,具有典型的研究意义。本研究通过气候模型和作物模型的联合运用,模拟预测陕西省 3 个气候区域 12 个站点的冬小麦生长情况和产量,绘制冬小麦对气候变化响应的概率图,评估气候变化对冬小麦在不同区域、时间尺度下的减产风险,为制定粮食长期战略决策提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

相关田间试验于 2014—2016 年在西北农林科技大学中国旱区节水研究院农业水土工程教育部重点实验室试水分转化试验场(34.24°N,108.05°E,海拔 506 m)进行,该地年平均降水量 580 mm 左右,年平均气温 13 ℃,日照时数 2 196 h,降水年内分布不均,关中灌溉类型耕地属于半湿润易旱区。土壤质地为中壤土,土层厚 3 m,无地下水补给。播前土壤基础物理化学性质:0~20 cm 土层有机质含量 16.01 g/kg,全氮含量 1.01 g/kg,速效磷含量

17.66 mg/kg,速效钾含量 273.33 mg/kg;0~100 cm 土层平均饱和含水量为 31.8 g/g,平均 pH 值为 8.07,平均土壤容重为 1.48 g/cm³,平均饱和导水率为 279.99 cm/d。

1.2 作物模型的校准和验证

小麦品种选自西北冬麦区和华北冬麦区大面积推广的小偃 22。使用 DSSAT 自带的 GLUE 调参工具进行调参,校准冬小麦的品种参数。试验用 2014—2015 年度的足水足肥处理进行校准,用 2015—2016 年度的 12 个水平水肥处理(试验设置 36 个小区,每小区长 6 m,宽 2.5 m。采用裂区试验,3 个灌溉水处理为主区,4 个施肥水平为副区,重复 3 次。氮肥处理为 N₀、N₁₀₅、N₂₁₀、N₃₁₅,分别表示施氮量为 0、105、210、315 kg/hm²。灌水处理为 I₀(雨养)、I₁(冬灌 60 mm)、I₂(冬灌 60 mm,拔节 40 mm)、I₃(冬灌 60 mm,拔节 40 mm,灌浆 60 mm)。校准所需的气象数据、土壤数据以及管理数据等均由田间试验直接测量,使用 DSSAT 模型自带的调参工具 GLUE^[26-27]进行调参。首先利用 2014—2015 年度试验的足水足肥处理^[28](冬灌 60 mm、拔节 40 mm,播前施氮肥 210 kg/hm²)校准模型参数。

由于本研究主要考虑未来的产量变化,所以将产量作为主要的校准参数。本研究采用国际校验模型较为常用的均方根误差方法(nRMSE)来衡量不同水肥条件下产量模拟值与实测值相对的差异程度,以校验 DSSAT 模型对作物产量的模拟精度:

$$nRMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (p_i - o_i)^2}{n}} \times \frac{100\%}{\bar{o}} \quad (1)$$

式中: p_i 为模拟值; o_i 为实测值; n 为样本数量; \bar{o} 为实测值的平均值。 $nRMSE$ 是衡量模拟值同实测值之间的偏差,认为 $RMSE$ 越小,则模拟值与实测值的差异也越小,模型模拟结果更准确。当 $nRMSE < 0.1$ 时为极好,当 $0.1 \leq nRMSE \leq 0.2$ 时为好,当 $0.2 < nRMSE \leq 0.3$ 时为中等,当 $nRMSE > 0.3$ 时为差^[29]。

$$d = \frac{p_i - o_i}{o_i} \times 100\% \quad (2)$$

式中: d 表示偏差率,值越低则模拟结果越优秀。

1.3 天气发生器 LarsWG5.5 简介

全球气候模型(GCMs)是当前最先进的用来预测地球气候系统变化的工具,然而直接使用 GCMs 对当地的气候预测评估气候变化的影响,则会因为粗糙的空间分辨率导致重大的误差和不确定性^[30]。LarsWG 天气发生器是由英国洛桑实验室为了满足

作物生长模型和水文模型研发的随机气候发生器,包括 15 种基于 IPCC4 的 GCMs 气候场景^[31-32]。LarsWG 被广泛应用于作物产量的预测、水文循环及土壤侵蚀的预报、地球生态系统和极端环境事件发生概率的评估等^[33]。LarsWG 可利用单个站点的历史气象资料和地理资料根据 GCMs 生成未来某一阶段的降水量、太阳辐射量、最高气温和最低气温等气象资料的日序列,这些气象资料也是作物模型模拟所需的气象资料基本值。王幼奇等评估了 LarsWG 天气发生器在黄土高原和关中平原的适应性研究,模拟结果较好,可用来模拟该地区未来气候变化的日序列值^[34]。

1.4 模拟情境设定

由于陕西省不同地域的种植制度不同,为了使结果有更好的说明性和统一性,模型的管理参数中,灌溉统一设定为冬灌 45 mm,拔节期灌水 45 mm,灌水方式为畦灌;播种期设定为每年的 10

月 1—15 日,日平均温度达到 20 ℃ 且有小于 2 mm 的降水时模型自动播种;施肥期设定为同一天,施肥量设定为陕西地区常用的施纯氮 210 kg/hm²,地表撒播;耕作方式为机器旋耕;收获期设定为冬小麦成熟时收获。模型所需的气象数据由 2 个部分组成:1965—2014 年的气象数据由中国气象科学数据共享服务网下载查阅得到^[35];2000—2065 年间的预测数据则由天气发生器(the Long Ashton Research Station Weather Generator, LARSWG5.5)根据未来 CO₂ 浓度的不同将未来 50 年内分为 2 个阶段(2015—2030 年、2046—2065 年),输入 1965—2014 年的气象数据分别得出 3 个阶段各 50 年的气象数据模拟值。土壤数据则由中国土壤数据库查阅得到^[36]。

DSSAT 模型在输入土壤数据、管理数据、品种数据、气象数据后,分别运行 12 个站点 1965—2014 年、2015—2030 年、2046—2065 年各 50 年的气象数据,输出冬小麦生长数据并分析(表 1)。

表 1 陕西省 12 个站点的地理位置信息及气候概况

| 区域 | 站点 | 北纬 (°) | 东经 (°) | 海拔 (m) | 有机质含量 (%) | 平均温度 (℃) | 生育期降水 (mm) | 气候类型 |
|-----|----|-----------|-----------|-----------|--------------|-------------|---------------|-------------|
| 1 区 | 安康 | 32.7 | 109.0 | 895 | 1.56 | 11.6 | 316 | 亚热带湿润季风气候气候 |
| | 汉中 | 33.1 | 107.1 | 895 | 1.56 | 10.3 | 352.5 | 亚热带湿润季风气候气候 |
| | 佛坪 | 33.6 | 108.0 | 1 840 | 1.75 | 8.8 | 310.2 | 亚热带湿润季风气候气候 |
| | 商洛 | 33.9 | 110.0 | 1 100 | 1.31 | 8.9 | 273.8 | 亚热带湿润季风气候气候 |
| 2 区 | 武功 | 34.3 | 108.2 | 426 | 1.14 | 8.7 | 228.1 | 温带半湿润季风气候 |
| | 凤翔 | 34.5 | 107.4 | 690 | 1.23 | 8.0 | 184.9 | 温带半湿润季风气候 |
| | 铜川 | 35.1 | 109.1 | 1 040 | 1.36 | 6.3 | 206.7 | 温带半湿润季风气候 |
| | 延安 | 36.6 | 109.5 | 1 146 | 0.92 | 5.5 | 152.0 | 温带半湿润季风气候 |
| 3 区 | 吴旗 | 36.9 | 108.2 | 1 060 | 0.87 | 3.2 | 150.8 | 温带干旱半干旱季风气候 |
| | 绥德 | 37.5 | 110.2 | 1 052 | 0.48 | 4.6 | 121.8 | 温带干旱半干旱季风气候 |
| | 定边 | 37.6 | 107.6 | 1 500 | 0.54 | 3.9 | 95.7 | 温带干旱半干旱季风气候 |
| | 榆林 | 38.3 | 109.8 | 1 400 | 0.84 | 2.9 | 102.9 | 温带干旱半干旱季风气候 |

1.5 减产风险

为了评估粮食产量概率,将 DSSAT 模型在过去 50 年(1965—2014 年)运行模拟出的产量平均值作为阈值与未来不同时期产量的模拟值相对比,以计算未来的粮食减产风险。因此,将未来气候变化对冬小麦产量减产风险定义为预测产量模拟值低于阈值的频率。

$$M_i = \begin{cases} 1, Y_i \leq \bar{Y} \\ 0, Y_i > \bar{Y} \end{cases}, R = \frac{\sum_{i=1}^n M_i}{n}.$$

式中: M_i 为粮食产量概率; R 为减产风险,即模拟产量 \leq 历史平均产量的年份占总年份的比值,反映气

候变化对冬小麦的影响程度; Y_i 为模型模拟预测不同年份的产量, \bar{Y} 为历史平均产量; n 为预测年数,这里取 50。

2 结果与分析

2.1 CERES - Wheat 模型的校准

校准模型使用 2014—2015 年度的大田试验数据,足水足肥处理(I₃N₃₁₅)的生育期、产量、收获期籽粒氮产量(GNAM)、蒸发散(ET)平均模拟值与观测值的偏差率均小于 10% (表 2),模拟结果较优,说明校准的基因型参数能够较好地反映冬小麦品种的相关特性(表 3)。CERES - Wheat 能够准确地

表 2 2014—2015 年度足水足肥处理 (I₃N₃₁₅) 的校准结果

| 开花期 | | | 成熟期 | | | 产量 | | | GNAM | | | ET | | |
|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------------------------|------------------------------|------------|------------------------------|------------------------------|------------|-------------|-------------|------------|
| sim (d) | obs (d) | 偏差率 (%) | sim (d) | obs (d) | 偏差率 (%) | sim (kg/hm ²) | obs (kg/hm ²) | 偏差率 (%) | sim (kg/hm ²) | obs (kg/hm ²) | 偏差率 (%) | sim (mm) | obs (mm) | 偏差率 (%) |
| 199 | 199 | 0 | 232 | 233 | -0.43 | 7 395 | 7958 | -7.07 | 218 | 223 | -7.07 | 398 | 436 | -8.7 |

注:sim 表示模拟值;obs 表示观测值。开花期指播种到开花的天数,成熟期指播种到成熟的天数。

表 3 小偃 22 基因型参数校准结果

| 冬小麦品种参数 | 描述 | 校准值 |
|---------|----------------|-------|
| P1V | 春化敏感系数 | 41.78 |
| P1D | 光周期敏感系数 | 46.49 |
| P5 | 灌浆特征参数 | 405.2 |
| G1 | 花期籽粒数特征参数 | 16.05 |
| G2 | 潜在灌浆速率参数 | 38.66 |
| G3 | 分蘖死亡系数 (g) | 1.365 |
| PHINT | 出叶间隔特征参数 (℃·d) | 67.25 |

模拟物候期、作物生长、水分和养分的运移。

2.2 CERES - Wheat 模型的验证

对比 2015—2016 年度不同水肥条件下产量的模拟值与实测值(图 1),同时验证模拟精度,模型产量、蛋白质的模拟值与实测值的 $RRMSE = 0.035 < 0.1$,能很好地满足精度要求。模拟值与实测值吻合度极高,说明模型能够很好地模拟不同环境作物对产量的影响,可以在此基础上拓展和模拟不同环境下冬小麦的生长动态。

由于验证试验共有 16 个处理,本研究仅列出

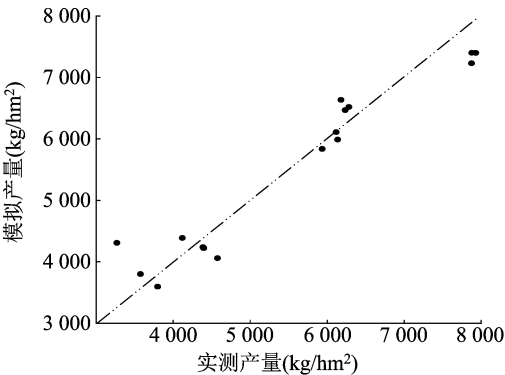


图 1 2015—2016 年度不同水肥条件下产量模拟值与实测值对比
2015—2016 年度雨养(I₀N₂)和灌溉(I₂N₂)条件下冬小麦不同土层平均土壤含水率的验证情况(表 4)。雨养条件下,各土层平均土壤含水率($nRMSE$)均小于 0.1,说明模拟结果极好,其中 0~60 cm 土层模拟含水率偏小,60~200 mm 土层模拟含水率偏大。而灌溉条件下模拟结果与雨养相比较差,但除 40~60 cm 土层 $nRMSE$ 略大于 0.1,模拟结果为好外,其余土层土壤含水率模拟结果均为极好。所以模型能够模拟各种管理措施下的土壤水分运移情况。

表 4 2015—2016 年度雨养和灌溉条件下不同土层平均土壤含水率模拟值与实测值对比

| 土层 (cm) | 雨养(I ₀ N ₂) | | | 灌溉(I ₂ M ₂) | | |
|------------|--|--|---------|--|--|---------|
| | 观测值(cm ³ /cm ³) | 模拟值(cm ³ /cm ³) | $nRMSE$ | 观测值(cm ³ /cm ³) | 模拟值(cm ³ /cm ³) | $nRMSE$ |
| 0~20 | 0.196 5 | 0.193 4 | 0.018 | 0.197 3 | 0.175 3 | 0.078 |
| 20~40 | 0.195 3 | 0.184 2 | 0.029 | 0.189 5 | 0.184 6 | 0.059 |
| 40~60 | 0.194 1 | 0.183 1 | 0.031 | 0.185 0 | 0.177 2 | 0.124 |
| 60~80 | 0.190 4 | 0.211 6 | 0.045 | 0.200 2 | 0.211 2 | 0.086 |
| 80~100 | 0.201 6 | 0.223 6 | 0.079 | 0.210 1 | 0.210 2 | 0.041 |
| 100~200 | 0.238 2 | 0.244 2 | 0.041 | 0.242 2 | 0.243 1 | 0.057 |

2.3 陕西省历史和未来气候分析

陕西省面积狭长纬度跨越较大,年平均温度为 2.8~11.6℃,陕西省南部温度较高,并向北逐渐降低(图 2-a)。2015—2030 年间,陕西省中部、北部增温较快,平均增温 0.92℃。其中 2 区的铜川站增温达 2.3℃,增温最小的是位于 2 区的凤翔站,仅增温 0.22℃(图 2-b)。2046—2065 年全省的增温速度则趋于一致,与 2015—2030 年平均温度相比,普遍升温 0.85~0.98℃,全省平均升温 0.91℃。

与 21 世纪初相比,则累计增温 1.35~3.34℃,其中延安站、吴旗站、铜川站增温最快,分别为 1.80、2.05、3.34℃。1 区和 3 区较为一致,平均增温 1.70℃左右(图 2-c)。

陕西省属于季风气候,生育期内降水自南向北逐渐减少(图 3-a)。小麦生育期内降水情况基本与全年相似,但自南向北生育期内降水量占全年降水量的百分比却在不断减少,越往北降水越集中在非冬小麦生育期内。因此,3 区小麦生育期内可利

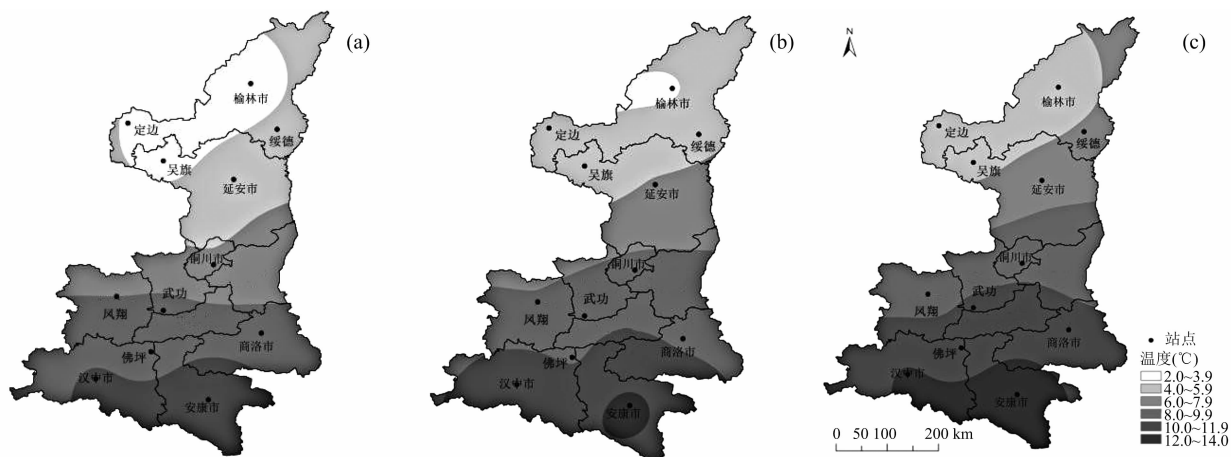


图2 冬小麦历史(1965—2014 年)平均温度的空间分布(a)以及 2015—2030 年(b)和 2046—2065 年(c)的预测温度分布

用的降水就更加匮乏。2015—2030 年陕西省除了 2 区外,其他地区的全年降水量均出现了不同程度的降低,而不同站点生育期降水量的变幅与全年相比却不尽相同(图 3 - b)。总体而言,生育期内降水量占全年降水量的百分比均出现了 4% 左右的增加。

陕西省东部和北部生育期内降水量增幅较大,南部和西部增幅较小,甚至定边站、汉中站的生育期降水量还有较大幅度减少。2046—2065 年情况基本类似,全省生育期内降水平均增长在 13% 左右(图 3 - c)。

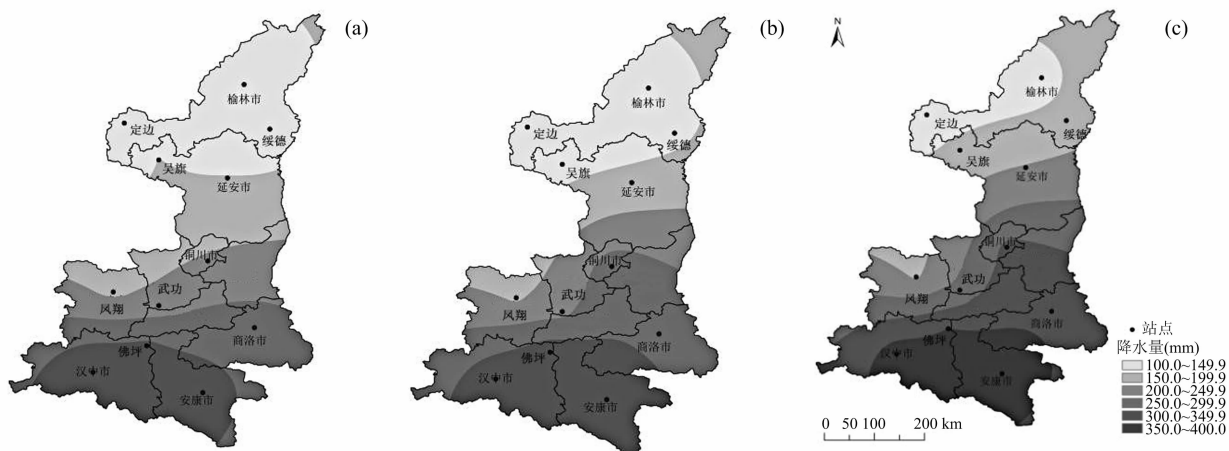


图3 冬小麦生育期历史(1965—2014 年)降水量的空间分布(a)以及 2015—2030 年(b)和 2046—2065 年(c)的预测降水量的空间分布

2.4 冬小麦产量

由图 4 可知,陕西省 12 个站点不同气候区域各时期雨养条件下的历史多年小麦平均产量为 $1\,193 \sim 7\,218 \text{ kg/hm}^2$,差异巨大。最高产量出现在秦岭附近的商洛站和佛坪站,平均产量分别达到了 $5\,677, 7\,218 \text{ kg/hm}^2$ 。最低产量出现在陕西西北部的吴旗站和定边站,平均产量分别为 $1\,193, 2\,579 \text{ kg/hm}^2$ 。冬小麦产量随纬度升高呈现先增高后降低的趋势。未来 20 年,1 区产量降低 $0.2\% \sim 14.1\%$,西部降幅明显高于东部;2 区南部的武功站、凤翔站减产 $0.4\% \sim 1.0\%$,但北部的铜川站、延安站分别增产 $52.7\%、16.1\%$;3 区小幅增产 $7.5\% \sim$

10.3% 。未来 50 年,1 区产量则呈现不同程度的增加,但增幅不明显,其中佛坪产量仍低于历史平均产量;2 区南部小幅增产,北部则继续保持高增长态势;3 区增产 $11.2\% \sim 26.8\%$ 。

与雨养条件相比,灌溉能显著改变气候变化对产量变化趋势的影响,不同气候区对其有不同的响应。其中 1 区产量逐渐下降;2 区南部呈波动状态,但总产量基本保持不变,北部产量则明显增加;3 区情况与 1 区相反,产量逐年增加且增幅大于雨养条件。

2.5 冬小麦生长情况、土壤水分、减产风险

由表 5 可知,气温升高造成作物成熟期提前,各

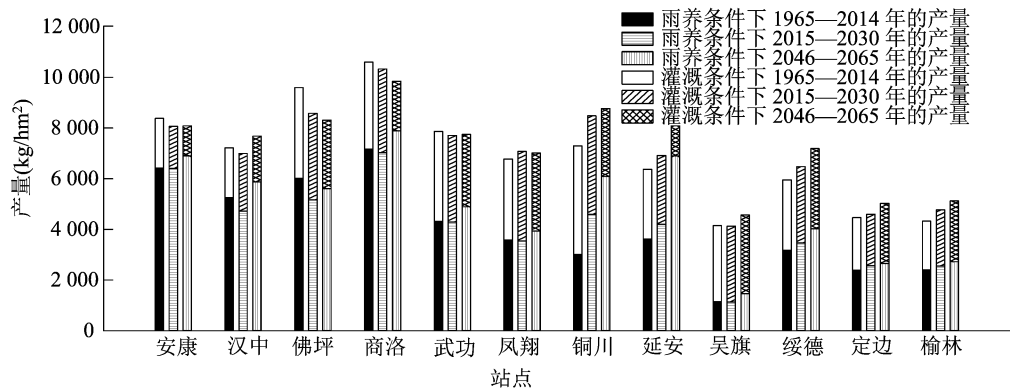


图4 1965—2014 年、2015—2030 年、2046—2065 年冬小麦在雨养和灌溉条件下的产量

表 5 1965—2014 年、2015—2030 年、2046—2065 年冬小麦在雨养和灌溉条件下成熟期、产量构成、土壤水分和减产风险的对比

| 区域 | 管理 | 时期 (年) | 成熟期 (d) | 粒质量 (g/粒) | 粒数 (粒/m ²) | 分蘖数 (个/m ²) | 蒸散发量 (mm) | 蒸腾量 (mm) | 水分利用 效率(kg/mm) | 水分胁迫 指数(%) |
|-----|----|-----------|------------|--------------|---------------------------|----------------------------|--------------|-------------|-------------------|---------------|
| 1 区 | 灌溉 | 1965—2014 | 225 | 0.039 0 | 22 782.0 | 798.9 | 427.9 | 243.3 | 20.9 | 114.9 |
| | | 2015—2030 | 214 | 0.038 4 | 22 156.0 | 783.0 | 402.0 | 224.8 | 21.1 | 116.4 |
| | | 2046—2065 | 205 | 0.038 4 | 22 201.8 | 787.3 | 391.6 | 222.4 | 22.2 | 108.4 |
| | 雨养 | 1965—2014 | 225 | 0.038 6 | 16 354.5 | 701.1 | 371.5 | 167.6 | 16.8 | 132.1 |
| | | 2015—2030 | 214 | 0.037 4 | 15 714.3 | 689.5 | 347.3 | 152.1 | 16.9 | 136.5 |
| | | 2046—2065 | 205 | 0.038 1 | 17 455.4 | 726.6 | 342.5 | 167.5 | 19.3 | 129.4 |
| 2 区 | 灌溉 | 1965—2014 | 246 | 0.036 2 | 19 488.8 | 699.5 | 422.9 | 191.3 | 16.8 | 132.8 |
| | | 2015—2030 | 235 | 0.038 5 | 20 078.8 | 721.7 | 417.1 | 206.8 | 18.1 | 131.6 |
| | | 2046—2065 | 214 | 0.040 5 | 19 811.4 | 720.3 | 373.5 | 192.3 | 21.3 | 111.9 |
| | 雨养 | 1965—2014 | 246 | 0.038 1 | 9 517.8 | 548.3 | 344.9 | 102.2 | 10.6 | 150.8 |
| | | 2015—2030 | 235 | 0.038 4 | 11 201.0 | 541.8 | 343.9 | 118.2 | 12.1 | 151.4 |
| | | 2046—2065 | 214 | 0.039 1 | 13 688.0 | 610.1 | 336.0 | 144.3 | 15.8 | 138.3 |
| 3 区 | 灌溉 | 1965—2014 | 266 | 0.035 4 | 13 676.4 | 526.9 | 307.4 | 93.5 | 16.2 | 119.8 |
| | | 2015—2030 | 260 | 0.033 1 | 15 412.5 | 608.7 | 339.5 | 114.2 | 15.3 | 136.1 |
| | | 2046—2065 | 253 | 0.034 0 | 16 374.1 | 606.0 | 357.3 | 129.8 | 15.9 | 131.6 |
| | 雨养 | 1965—2014 | 266 | 0.037 7 | 6 179.5 | 366.4 | 248.0 | 53.9 | 9.8 | 150.0 |
| | | 2015—2030 | 260 | 0.037 4 | 6 796.7 | 425.7 | 253.8 | 56.5 | 10.1 | 159.6 |
| | | 2046—2065 | 253 | 0.038 3 | 7 382.5 | 433.8 | 271.8 | 65.0 | 10.6 | 150.3 |

站点成熟期均随时间的增加而缩短。由于模型中物候期是由积温确定的,并没有考虑胁迫的影响,因此雨养和灌溉条件下在同一时期的成熟期是一致的,与实际情况不符但差距不大^[28]。未来气候变化条件下,1 区籽粒粒质量整体出现小幅下降,关中和陕北地区则保持不变或小幅上升。分蘖数、粒数则只有 1 区出现较小幅度的波动,其余地区则大幅增加。虽然气候变化最显著的特征是温度升高,但全省除 3 区外,大部分地区的蒸散发量反而出现轻微减少的现象,水分利用效率也因此提高。其中,2 区主要以蒸散发量的减少为主,1 区则蒸散发量和蒸腾量同时减少。铜川站以南减产风险逐年增加,铜川站及其以北地区减产风险呈现逐年下降的趋势(图 5)。

灌溉缓解了各地区不同时期的水分胁迫,但降低了水分利用效率。灌溉使武功站及其以南的高产区粒质量小幅上升,以北的低产区则下降。全省粒数、分蘖数则大幅度增加,自南向北增幅逐渐变大,但随时间的增加增幅效果变弱。1 区收获指数小幅增加,其余地区则出现下降的趋势。全省蒸散发量、蒸腾量均大幅增加,但 1 区的蒸散发量同时明显下降。铜川站以南减产风险大幅下降,铜川站及其以北地区减产风险则基本为零(图 6)。

3 讨论

本研究利用当前最常用的作物模型 DSSAT4.6 和天气发生器 LARSWG5.5,模拟陕西省未来气候变暖条件下灌溉、雨养的冬小麦生长情况和水分变

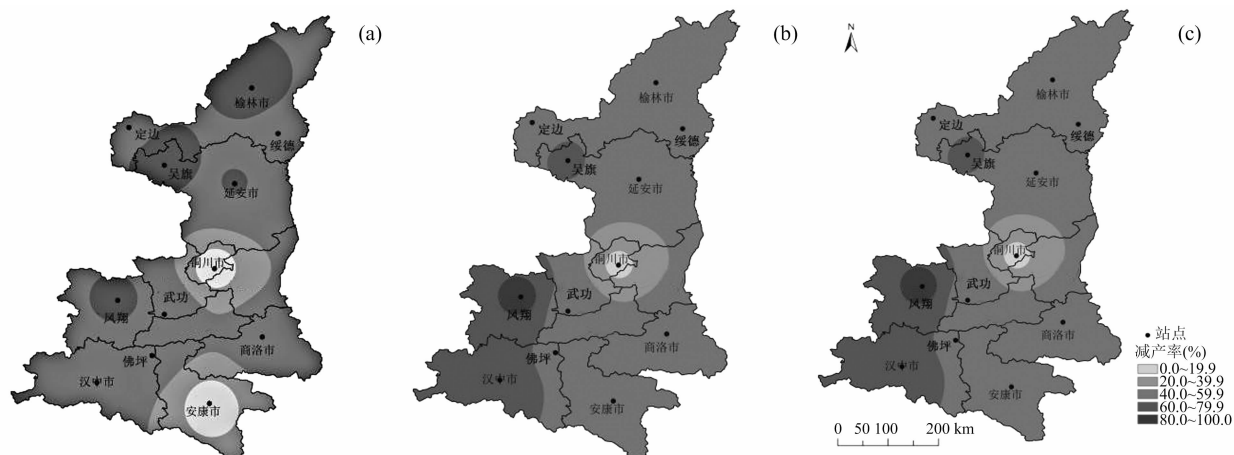


图5 冬小麦 1965—2014 年(a)、2015—2030 年(b)和 2046—2065 年(c)雨养条件下减产风险的空间概率分布

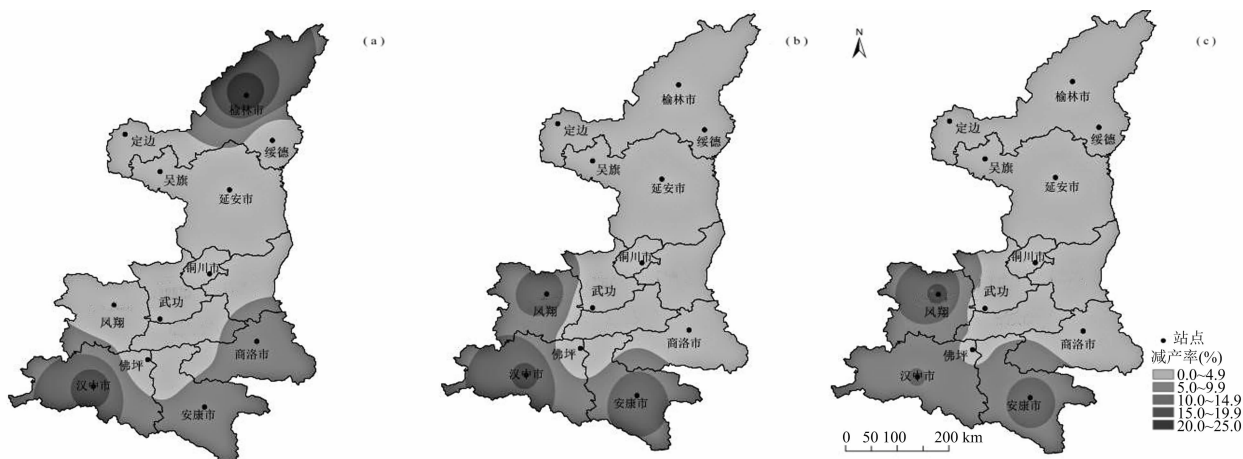


图6 冬小麦 1965—2014 年(a)、2015—2030 年(b)和 2046—2065 年(c)灌溉条件下减产风险的空间概率分布

化。在进行区域评估时,站点的数量和选择会对区域风险评估带来很大的影响,因此站点或者采样点要能够代表附近区域的特征。当建立区域减产风险评估机制时,须要考虑的不再是单因素对概率的影响,而是气温、降水、地面有效辐射、土壤理化性质、站点地理位置、管理制度等多因素交互作用对冬小麦产量的长期影响,使之能够较为客观地评估、计算未来减产风险的概率分布。Xiao 等的研究表明,在 B2 情境下未来陕西地区降水和大于 0°C 积温总体呈增加趋势,有利于作物的生长发育和产量的提高^[24]。王红丽等的研究表明,西北干旱半干旱地区蒸散发量与降水量之差在逐渐减小,减少了土壤无效蒸发,肯定了气候变化对该地区的积极作用^[25]。本研究表明,气候对不同气候区、不同时期的影响不尽相同,而灌溉能够弥补甚至利用气候变化对冬小麦生长的不利影响。

3.1 气候变化对不同气候区的影响

各区域在不同时期均存在不同程度的水分胁迫,且对产量的总量和稳定性都带来了不利的影响。温度升高有利于植物的生长和产量的增加,根据品种的不同变化差异较大^[37]。降水、平均温度与产量都极显著正相关,温度升高、降水增加都将有利于冬小麦产量;降水和平均温度与减产风险则为负相关,虽然没有显著性的关系,但也能从一定程度上说明气候变化不利于冬小麦产量的稳定。

1 区属于亚热带湿润区,当地种植制度以稻麦轮作为主。气候变化条件下未来 20 年该区冬小麦生育期降水减少、温度升高造成的分蘖数、粒数、粒质量显著降低是 1 区减产的主要原因,同时减产风险大幅上升。粒质量是产量构成的主要因素之一,随着单产的提高,粒质量所占的作用也越来越大,高产条件下粒质量更是决定产量高低的决定因

素^[38]。因此,优良品种的选育和合理的灌溉、施肥制度则是保证该地区产量稳定和增长的主要方式。未来 50 年,1 区在降水、温度进一步增加的情况下蒸散发量反而下降。其中土壤蒸发下降,植株蒸腾增加,水分利用率进一步提高,产量增加 7.8% ~ 21.0%。减产风险并没有因为产量的增加而降低,部分站点的减产风险反而进一步升高,原因可能是气候变化造成 1 区降水年内、年际间分布不均,产量差异扩大,不利于产量的稳定。与王卫光等的研究结果^[39]类似,未来气候变化条件下参考作物蒸发蒸腾量和作物需水量均显著下降。1 区作为粮食主产区其产量的波动对粮食安全的保证具有重大影响,虽然总体上气候变化有利于该区冬小麦的生长,但是较大的气象年际差异导致减产风险增加。适时适量灌溉将有效解决降水分布不均、周期不规律的水分胁迫问题,减少需水关键期水分亏缺对产量的影响。

2 区为温带半湿润季风气候,玉米轮作一年两熟,为传统粮食主产区。2 区生育期降水量远大于 3 区,但水分胁迫指数却与 3 区相近。蒸散发量达到了 344.9 mm,植株蒸腾量却仅有 102.2 mm,大量的土壤水分被蒸发,无法被作物充分利用。与张俊香等的研究结果^[40]类似,气候变化条件下 2 区温度升高、降水减少,产量增加。虽然降水呈下降趋势,但由于温度适当升高促进了植株的生长。蒸腾量与温度、粒质量、粒数和分蘖数等均呈显著正相关关系,蒸腾量显著增加,水分利用率、产量也较大幅度的增长,减产风险降低近 35.9%。减产风险极为明显的降低,一方面是由于产量基数的扩大,另一方面是由于气候在该时期较为平稳的变化,波动较小。气候变化在该地区表现出积极的作用,但降水资源较热量资源仍然偏少。景毅刚等的研究表明,气候变化条件下,关中地区光热适宜度最高且呈逐年增加趋势,降水适宜度减小成为限制小麦增产的最主要因素^[41]。

3 区为温带干旱半干旱季风气候,该区域作物增产的主要限制因子是温度过低、水分不足。种植制度一年一收,冬小麦或春玉米的休耕期长,浪费了大量的光、热、水资源。未来 20 年,3 区降水小幅降低,但年平均温度增加较多。但由于该时期作物生长状况较差,叶面积指数降低,并没有出现 1 区、2 区类似的情况,反而土壤蒸发量变多、植株蒸腾量减弱、蒸散发量变少,水分胁迫增加。但总体而言,

该时期气候仍对小麦生长有利,产量小幅增加。未来 50 年降水增多、温度进一步升高,蒸散发量、植株蒸腾量都有一定程度的增加,水分利用效率也因此进一步提高。粒质量、分蘖数、粒数普遍出现较大幅度的增长,产量因此增长 11.2% ~ 27.8%。但相较于 1 区、2 区,产量增幅、总量仍有一定程度的差距。减产风险虽有所降低,但绝对值仍然偏大。邓振镛等的研究表明,陕北本身的气候条件、耕作条件等均不利于冬小麦的生长,而未来气候变暖条件下冬小麦适宜的种植区域向高海拔、高纬度区域延伸,冬小麦生育期缩短 9 ~ 15 d,使得陕北的种植制度也需要随之改变,来适应气候的变化^[28]。肖风劲等的研究表明,多熟制是粮食增产增收的重要因素^[29]。而未来种植制度改变为冬小麦夏玉米轮作,则可以极大地提高土地、光热资源的利用效率。另一方面,由气候变化对冬小麦的影响和温度、水分与产量的相关关系可知,温度升高、降水增加有利于冬小麦产量的提升,甚至在温度升高、降水有所降低的情况下 3 区冬小麦产量仍然增加。因此,温度也成为限制 3 区冬小麦增产的最主要因素。通过薄膜、秸秆覆盖和灌溉等措施起到增温保墒的作用,能够极大地提高冬小麦产量,降低减产风险。

3.2 灌溉在不同时期对不同气候区的影响

气候资源及其分配为农业生产提供必要的能量和物质,直接影响作物的生长过程^[42];气候变化直接改变农业气候资源总量及其组成成分的配比,为了获得高产、稳产就需要通过一定措施合理地改变气候资源^[43]。气候变化条件下水热资源不匹配,造成冬小麦在不同时期对不同气候区的水分胁迫指数均较高,严重影响了冬小麦的正常生长^[44],因此在结合上面的分析提出灌溉的方式来解决气候变化带来的不利影响。未来气候变化条件下特别是未来 20 年,降水呈现普遍减少的趋势,而温度大幅升高,土壤无效蒸发显著增加,大量的光、热、水资源没有被合理利用,甚至对植物生长带来不利影响,为实现气候资源的充分利用,合理灌溉就成为适应气候变化的重要措施。

灌溉一方面减少了作物水分胁迫程度,在需水关键期保证水分的供给;另一方面可以增加作物生物量和叶面积指数,增加植株蒸腾量,减少土壤蒸散发量,提高水分利用率^[45]。未来气候变化条件下,同一地区、同一时期,灌溉能促进粒数、分蘖数的提高,减少作物水分胁迫系数,增幅由南向北逐渐增

加。蒸散量由南向北增幅由 8.9% 增加至 26.8%, 而铜川站及其以南的地区在此基础上土壤蒸发减少 1.6% ~ 15.3%, 原因可能是灌溉使南部叶面积指数增加、地表裸露较少, 水分主要以植株蒸腾的形式消耗, 极大提高了水分利用效率。因此, 虽然南部在较高水分利用率、产量的基础上, 绝对数值仍然分别有 1.5% ~ 5.7%、1 186 ~ 4 289 kg/hm² 的高增长, 但增幅略小于北部。但是粒质量普遍小幅下降, 不利于小麦的品质和价格。

灌溉条件下减产风险大幅下降 25.6% ~ 58.9%, 极大地保证了粮食生产的稳定。但灌溉并没有出现很好的一致性规律, 不同地区减产风险对灌溉的响应不同。1 区灌溉条件下产量逐年下降, 可能是该区的降水较多不利于植物根系呼吸造成的洪涝胁迫, 也有可能是降水时间过长、光热资源不足引起产量的逐年下降。与此同时, 未来 20 ~ 50 年减产风险上升, 则可能是气候变化剧烈波动引起的, 该时期水分亏缺不再是主要的胁迫因素, 频发的高温等气象灾害可能是造成减产风险增加的主要原因。虽然整体上灌溉促进了产量的大幅增加和减产风险的大幅下降, 但气候变化仍对灌溉条件下的减产风险起到了负面作用。2 区、3 区的灌溉与气候变化的耦合效应促进了冬小麦的生长, 不仅产量大幅上升, 且减产风险下降至零。灌溉带来的充足水资源使冬小麦能够充分利用气候变化所带来的更多的光热资源, 提高作物的光合效率, 降低了水分胁迫, 从而保证了冬小麦产量稳定增长。

在全球气候变化背景下, 灌溉农业的发展严重受制于灌溉水资源, 在水资源稀缺的地区尤为明显^[46]。2 区为传统的灌溉农业, 灌溉设施及灌溉水资源充足; 1 区虽然为传统旱作农业区, 但潜在灌溉水资源丰富, 未来气候变化条件下可以适当地灌溉以提高冬小麦产量, 减少减产风险; 3 区虽然灌溉产量增幅巨大, 但产量增加绝对值基本与 1 区、2 区相同, 同时 3 区灌溉水资源严重不足、地势起伏波动较大不利于灌溉设施的建设, 灌溉投入加大但效益增加不显著。综上, 在未来气候变化条件下, 1 区可以建设灌溉设施, 同时巩固 2 区灌溉设施的投入, 3 区则应以秸秆薄膜覆盖、增施土壤扩蓄增容肥等管理措施蓄水保墒。

总体而言, 灌溉远大于气候变化对冬小麦生长产生的影响, 且灌溉能够充分利用气候变化增加的光热资源。本研究主要分析温度和降水及其变化

对减产风险的影响, 对地面有效辐射、土壤理化性质、站点地理位置等较为稳定的数据没有过多分析, 其他因素如灌溉时间、灌溉量等则作为常量输入模型, 需要进一步研究。

4 结论

本研究提出了一种较为新颖的方法来评估灌溉对气候变化条件下农业的影响, 使用减产风险的概念便于不同区域和时期作物产量的横向、纵向对比, 可以在区域尺度做出中长期的合理规划。

气候变化对陕西省不同区域的影响程度不同。3 区受气候变化的影响较大, 2 区次之, 1 区受气候变化的影响较弱, 但各地区增产总量差距不大。1 区减产风险逐年增加, 2 区、3 区减产风险逐年减少。不同时期气候变化对冬小麦生长的影响不同。未来 20 年气候变化总体上不利于冬小麦产量的增长和稳定, 未来 50 年则反之。灌溉能够减缓并利用气候变化对冬小麦生长的不利影响, 大幅减少冬小麦减产风险。灌溉条件下 1 区减产风险逐年上升, 但仍远低于雨养条件; 2 区、3 区减产风险则逐年下降至零。

参考文献:

- [1] IPCC Working Group. Climate change 2013 The physical science basis Contribution[R]. IPCC, 2013.
- [2] Ray D K, Gerber J S, Macdonald G K, et al. Climate variation explains a third of global crop yield variability [J]. Nature Communications, 2015(1): 1-9.
- [3] Sharon M, David L. The influence of climate change on global crop productivity[J]. Plant Physiology, 2012, 160(4): 1686-1697.
- [4] Richard M A. Global climate change and agriculture an economic perspective[J]. American Journal of Agricultural Economics, 1989, 71(5): 905-910.
- [5] Elizabeth A A, Stephen P L. What have we learned from 15 years of free-air CO₂ enrichment (FACE)? A meta-analytic review of the responses of photosynthesis, canopy properties and plant production to rising CO₂[J]. US National Library of Medicine National Institute, 2005, 165(2): 351-371.
- [6] Barnett D N, Simon J B, Murphy J M, et al. Quantifying uncertainty in changes in extreme event frequency in response to doubled CO₂ using a large ensemble of GCM simulations[J]. Climate Dynamics, 2006(26): 489-511.
- [7] Ferrise R, Moriondo M, Bindi M. Probabilistic assessments of climate change impacts on durumwheat in the Mediterranean region [J]. Natural Hazards & Earth System Sciences, 2015, 11(5): 1293-1302.
- [8] 李全起, 沈加印, 赵丹丹. 灌溉频率对冬小麦产量及叶片水分利

- 用效率的影响[J]. 农业工程学报, 2011, 27(3): 33–36.
- [9] 黄志刚, 王小立, 肖 烨, 等. 气候变化对松嫩平原水稻灌溉需水量的影响[J]. 应用生态学报, 2015, 26(1): 250–268.
- [10] 张雪芬, 余卫东, 王春乙. 基于作物模型灾损识别的黄淮区域冬小麦晚霜冻风险预估[J]. 高原气象, 2012, 31(1): 277–284.
- [11] Kang Y, Khan S, Ma X. Climate change impacts on crop yield, crop water productivity and food security – A review[J]. Progress in Natural Science, 2009, 19(12): 1665–1674.
- [12] 王 柳, 熊 伟, 温小乐, 等. 温度降水等气候因子变化对中国玉米产量的影响[J]. 农业工程学报, 2014, 30(21): 138–145.
- [13] David Z, Lydia S, Davide C. Using historical climate observations to understand future climate change crop yield impacts in the Southeastern US[J]. Climatic Change, 2016, 13(4): 311–326.
- [14] David G, Xavier L B, Matthieu B, et al. Evaluating agronomic adaptation options to increasing heat stress under climate change during wheat grain filling in France[J]. European Journal of Agronomy, 2012, 39: 62–70.
- [15] O'leary G J, Christy B, Nuttall J, et al. Response of wheat growth, grain yield and water use to elevated CO₂ under a Free – Air CO₂ Enrichment (FACE) experiment and modelling in a semi – arid environment[J]. Global Change Biology, 2015, 21(7): 2670–2686.
- [16] Jones J W, Hoogenboom G, Porter C, et al. The DSSAT cropping system model[J]. EUR J Agron, 2003, 18(2): 235–265.
- [17] Ryosuke S, Satya P. National spatial crop yield simulation using GIS – based crop production model[J]. Ecological Modelling, 2001, 35(1): 113–129.
- [18] 张雪芬, 余卫东, 王春乙, 等. WOFOST 模型在冬小麦晚霜冻害评估中的应用[J]. 自然灾害学报, 2009, 25(10): 35–44.
- [19] 孙 宁, 冯利平. 利用冬小麦作物生长模型对产量气候风险的评估[J]. 农业工程学报, 2005, 21(2): 106–110.
- [20] 张 宇. 气候变化对我国小麦发育及产量可能影响的模拟研究[J]. 应用气象学报, 2000, 11(3): 264–270.
- [21] 居 辉, 熊 伟, 许吟隆, 等. 气候变化对我国小麦产量的影响[J]. 作物学报, 2005, 31(10): 1340–1343.
- [22] 刘玉洁, 陶福祿. 气候变化对小麦生物量影响的概率预测和不确定性分析[J]. 地理学报, 2012, 67(3): 337–345.
- [23] Zhang Z, Wang P, Chen Y, et al. Spatial pattern and decadal change of AMD in the main wheat production area of China during 1991—2009[J]. Journal of Geographical Sciences, 2014, 24(3): 387–396.
- [24] Xiao W, Olesen J E, Bernd W. Traits in spring wheat cultivars associated with yield loss caused by a heat stress episode after anthesis[J]. Journal of Agronomy and Crop Science, 2015, 201(2): 32–48.
- [25] 王红丽, 张绪成, 魏胜文. 气候变化对西北半干旱区旱作农业的影响及解决途径[J]. 农业资源与环境学报, 2015, 32(6): 517–524.
- [26] He J, Dukes M D, Jones J W, et al. Applying glue for estimating CERES – Maize genetic and soil parameters for sweet corn production[J]. Transactions of the Asabe, 2009, 52(6): 1907–1921.
- [27] He J, James W J, Graham W D, et al. Influence of likelihood function choice for estimating crop model parameters using the generalized likelihood uncertainty estimation method[J]. Agricultural Systems, 2010, 103(5): 256–264.
- [28] 邓振镛, 徐金芳, 黄蕾诺, 等. 我国北方小麦干热风危害特征研究[J]. 安徽农业科学, 2009, 37(20): 9575–9577.
- [29] 肖风劲, 张海东, 王春乙, 等. 气候变化对我国农业的可能影响及适应性对策[J]. 自然灾害学报, 2006(增刊1): 327–331.
- [30] Meehl G A, Covey C, Taylor K E, et al. The wcrp cmip3 multimodel dataset_ a new era in climate change research[J]. Bull Am Meteorol Soc, 2007, 88(9): 1383–1394.
- [31] Semenov M, Brooks R J, Barrow E M, et al. Comparison of the WGEN and LARS – WG stochastic weather generators for diverse climates[J]. Climate Research, 1998, 10(2): 95–107.
- [32] Semenov M, Pilkington – Bennett S, Calanca P. Changes in precipitation and temperature in Xiangjiang River Basin, China[J]. Climate Research, 2013, 57(1): 1–17.
- [33] Semenov M, Barrow E. Use of a stochastic weather generator in the development of climate change scenarios[J]. Climatic Change, 1997, 35(4): 397–414, 18.
- [34] 王幼奇, 樊 军, 邵明安. LARS – WG 天气发生器在黄土高原的适应性研究[J]. 中国水土保持科学, 2007, 5(3): 24–27.
- [35] 中国气象科学数据共享服务网. 中国地面气候资料日值数据集 (V3.0)[DB/OL]. (2016–12–31)[2018–12–31]. <http://data.cma.cn/>.
- [36] 中国科学院南京土壤研究所. 中国土种数据库[DB/OL]. (2016–12–31)[2018–12–31]. <http://vdb3.soil.csdb.cn/>.
- [37] Panozzo J, Partington D L, Seneweera S, et al. Elevated carbon dioxide changes grain protein concentration and composition and compromises baking quality. A FACE study[J]. Journal of Cereal Science, 2014, 60(3): 461–470.
- [38] 田纪春. 谷物品质测试理论与方法[M]. 北京: 科学出版社, 2006.
- [39] 王卫光, 彭世彰, 孙凤朝, 等. 气候变化下长江中下游水稻灌溉需水量时空变化特征[J]. 水科学进展, 2012, 23(5): 656–664.
- [40] 张俊香, 延军平. 关中平原小麦产量对气候变化区域响应的评价模型研究[J]. 干旱区资源与环境, 2003, 17(1): 85–90.
- [41] 景毅刚, 高茂盛, 范建忠, 等. 陕西关中冬小麦气候适宜度分析[J]. 西北农业学报, 2013, 22(8): 27–32.
- [42] 李 建, 江晓东, 杨沈斌, 等. 长江中下游地区水稻生长季节内农业气候资源变化[J]. 江苏农业学报, 2020, 36(1): 99–107.
- [43] 郭建平. 气候变化对中国农业生产的影响研究进展[J]. 应用气象学报, 2015, 26(1): 1–11.
- [44] 胡 玮, 严昌荣, 李迎春, 等. 气候变化对华北冬小麦生育期和灌溉需水量的影响[J]. 生态学报, 2014, 34(9): 2367–2377.
- [45] 李全起, 沈加印, 赵丹丹. 灌溉频率对冬小麦产量及叶片水分利用效率的影响[J]. 农业工程学报, 2011, 27(3): 33–36.
- [46] 胡亚南, 许吟隆, 刘颖杰. 气候变化情景下阿拉善盟灌溉玉米对水资源的适应性研究[J]. 中国农学通报, 2013, 29(6): 63–68.