

分类号: _____

单位代码: _____ 10300

密 级: _____

学 号: _____ 20191234003

南京信息工程大学

硕士专业学位论文



论文题目: 灌浆期增温、干旱复合胁迫对江苏省
冬小麦影响的模拟研究

申请人姓名: 沙慧敏

指导教师: 李琪 副教授

吴东丽 研究员

类别名称: 农业

领域名称: _____

培养学院: 应用气象学院

提交时间: 2021年6月20日

二〇二一年六月

独创性声明

本人声明所呈交的论文是我个人在导师指导下进行的研究工作及取得的研究成果。本论文尽我所知，除了文中特别加以标注和致谢的内容外，不包含其他人或其他机构已经发表或撰写过的研究成果，也不包含为获得南京信息工程大学或其他教育机构的学位或证书而使用过的材料。与我一同工作同志对本研究所做的贡献均已在论文中作了声明并表示谢意。

本人学位论文及涉及相关资料若有不实，愿意承担一切相关的法律责任。

学位论文作者签名：沈慧取

签字日期：2021.6.16

关于论文使用授权的说明

本人授权南京信息工程大学可以保留并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和电子文档；允许论文被查阅和借阅；可以将学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索；可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存、汇编本学位论文。本文电子文档的内容和纸质论文的内容相一致。论文的公布（包括刊登）授权南京信息工程大学研究生院办理。

非国家秘密类涉密学位论文在解密后适用本授权书。

☐公开 ☐保密（____年____月）（保密的学位论文在解密后应遵守此协议）

学位论文作者签名：沈慧取

签字日期：2021.6.16

指导教师签名：李健

签字日期：2021.6.16

目 录

摘 要.....	I
Abstract.....	III
第一章 引 言.....	1
1.1 研究的目的及意义.....	1
1.2 国内外研究进展.....	2
1.2.1 作物模型的相关研究.....	2
1.2.2 增温和干旱的相关研究.....	4
1.3 研究内容.....	6
1.4 技术路线.....	7
第二章 研究方法及数据.....	8
2.1 研究区域概况.....	8
2.2 研究数据.....	9
2.3 研究方法.....	9
2.3.1 胁迫处理设置.....	10
2.3.2 胁迫模拟方法.....	10
2.3.3 模型气象数据的计算方法.....	11
第三章 WOFOST 参数本地化及验证.....	12
3.1 模型参数本地化以及验证.....	12
3.1.1 敏感性分析.....	12
3.1.2 参数调整方案.....	13
3.1.3 模型模拟及验证.....	16
3.2 基准年的确定.....	18
3.3 本章小结.....	19
第四章 灌浆期增温、干旱单一胁迫对冬小麦产量形成的影响.....	21
4.1 不同增温胁迫对冬小麦的影响.....	21
4.1.1 增温对冬小麦产量的影响.....	21
4.1.2 增温对冬小麦干物质分配的影响.....	23
4.2 不同干旱胁迫对冬小麦的影响.....	23

4.2.1 干旱对冬小麦产量的影响	24
4.2.2 干旱对冬小麦干物质分配的影响	25
4.3 本章小结.....	26
第五章 灌浆期增温、干旱复合胁迫对冬小麦产量形成的影响	27
5.1 增温、干旱复合胁迫对冬小麦产量的影响	27
5.2 增温、干旱复合胁迫对冬小麦干物质分配的影响	30
5.3 本章小结.....	32
第六章 结论与展望.....	34
6.1 主要结论.....	34
6.2 特色与创新.....	35
6.3 存在问题与展望	35
参考文献.....	37
致谢.....	44
作者简介.....	45

摘 要

受全球气候变化的影响,水资源短缺、气候变暖是我国正在面临的严峻问题,研究证实,气候变化背景下的环境胁迫不断地增加我国农业的不稳定性。冬小麦种植时间长,生育期内的气候环境差异较大,尤其是灌浆期温度、水分等环境条件对冬小麦的籽粒形成有较大影响。由于冬小麦在我国的生产种植范围广泛,因此,对于开展其生育后期的气候变化研究显得极为重要。WOFOST 模型机理性和实用性较强,被广泛应用于不同区域冬小麦生长发育的研究和应用之中,在产量评估和农业措施决策参考上具有重要的意义。

本研究以江苏省为研究区域,选择典型气象站:徐州、淮安和常州,以 3 个站点 2008-2017 年的历史气象资料、土壤资料和冬小麦生育期资料为基础,利用 WOFOST 作物生长模型,模拟分析增温和干旱对江苏省冬小麦产量、地上部分干物质重以及干物质分配的影响,具体如下:

(1) 应用 WOFOST 模型进行江苏省的实际研究前,先进行参数的敏感性分析,通过调参确定各个站点的作物与土壤参数,实现模型本地化。本研究采用初始变量扰动法进行参数的敏感性分析,根据参数的敏感性大小和取值范围,结合江苏省冬小麦的实际情况,进行参数的调整及验证。最终 3 站冬小麦产量模拟的相对均方根误差都控制在 10% 以内,达到了模拟精度要求,模型可进行后续的模拟。

(2) 为进行干旱和增温胁迫的模拟研究,通过计算 3 站点 10 年(2008-2017) 内的降水和气温距平指数,结合 10 年内冬小麦产量的相对偏差,选择气温正常、非干旱年份确定为基准年:徐州为 2014 年,淮安为 2010 年,常州为 2009 年。

(3) 选择江苏省研究站点基准年的实际气象条件驱动 WOFOST 模型,得到基准年的产量指标;从灌浆期开始进行连续 30 天的每日增温(1°C 、 2°C 、 3°C)、干旱(轻度、中度、重度)和二者的复合胁迫处理,模拟得到总地上部分干重(Total Above Ground Production, TAGP)和总储存器官干物重(Total dry Weight of Stored Organs, TWSO)两指标,通过分析各处理胁迫下相对标准产量的减产率、干物质的分配情况(TWSO 和 TAGP 的比值),探讨冬小麦产量形成受增温和干旱的影响。

(4) 模拟结果发现,不论是单一胁迫还是复合胁迫均会对江苏省冬小麦造成一定程度的减产,各类胁迫均会抑制籽粒的干物质分配,降低冬小麦地上部分干物质的积累

量,总体上复合胁迫下各项指标受影响程度大于单一胁迫。增温对江苏南部减产程度影响最大,同时江苏南部地上部分的干物质受阻最为严重,对地上部分干物质积累的影响程度由北至南递增;江苏中部冬小麦产量受干旱影响最为严重,地上部分干物重和籽粒的干物质分配影响程度由南到北递减。复合胁迫下各站点的冬小麦减产率随着总体胁迫程度的增加而增加,地上部分干物重随着胁迫程度的增加而减小。增温干旱复合胁迫下,总体上江苏中部冬小麦的减产率偏高,其他复合胁迫处理下减产率江苏南部至北部逐渐递减,同时总地上部分干物重由南至北逐渐增加,籽粒干物质分配则是江苏南部低于北部低于中部。

关键词: 增温, 干旱, WOFOST 模型, 冬小麦, 江苏省

Abstract

Under the influence of global climate change, the shortage of water resources and climate warming are serious problems that China is facing. Studies have confirmed that the environmental stress under the background of climate change is increasing the instability of China's agriculture. The growing time of winter wheat is long, and the climate and environment are different during the growing period, especially the temperature and water during the filling period. Because of the wide range of winter wheat production and planting in China, it is very important to carry out the research on climate change in its later growth period. WOFOST model has strong mechanism and practicability, and is widely used in the research and application of winter wheat growth and development in different regions. It is of great significance in yield evaluation and decision-making of agricultural measures.

Based on the historical meteorological data, soil data and winter wheat growth period data of three typical meteorological stations: Xuzhou, Huai'an and Changzhou, the WOFOST crop growth model was used to simulate and analyze the effects of warming and drought on winter wheat yield, aboveground dry matter weight and dry matter distribution in Jiangsu Province, The details are as follows:

(1) Before applying WOFOST model to the actual research in Jiangsu Province, the sensitivity analysis of parameters was carried out, and the crop and soil parameters of each site were determined by adjusting parameters, so as to realize the localized use of the model. In this study, the initial variable perturbation method was used to analyze the sensitivity of the parameters, and the parameters were adjusted and verified according to the sensitivity and range of the parameters, combined with the actual situation of Winter Wheat in Jiangsu Province. Finally, the relative root mean square error of winter wheat yield simulation of the three stations is controlled within 10%, which meets the simulation accuracy requirements, and the model can be used for subsequent simulation.

(2) In order to simulate drought and warming stress, the precipitation and temperature anomaly index of three stations in 10 years (2008-2017) were calculated, and the relative deviation of winter wheat yield in 10 years was combined. The normal and non drought years were selected as the base year: Xuzhou in 2014, Huai'an in 2010, Changzhou in 2009.

(3) The WOFOST model was driven by the actual meteorological conditions of the base year in Jiangsu Province, and the yield index of the base year was obtained; From the beginning of grain filling period, the treatments of daily warming (1 °C, 2 °C, 3 °C), drought (mild, moderate, severe) and their combined stress were carried out for 30 days, and the total above ground production (TAGP) and total dry weight of stored organizations (TWSO) were simulated, By analyzing the yield reduction rate and dry matter distribution (the ratio of TWSO and TAGP) of relative standard yield under different treatments, the effect of increasing temperature and drought on yield formation of winter wheat was discussed.

(4) The simulation results showed that both single stress and combined stress could reduce the yield of Winter Wheat in Jiangsu Province to a certain extent, and all kinds of stress could inhibit the distribution of dry matter in grains and reduce the accumulation of dry matter in aboveground parts of winter wheat. On the whole, the indexes under combined stress were more affected than those under single stress. The increase of temperature had the greatest impact on the yield reduction in southern Jiangsu, and the dry matter accumulation in the aerial part of Southern Jiangsu was most seriously hindered, and the impact on the dry matter accumulation in the aerial part increased from north to south; The yield of Winter Wheat in the middle part of Jiangsu Province was most seriously affected by drought, and the influence degree of dry matter weight of aboveground part and dry matter distribution of grain decreased from south to north. Under the combined stress, the yield reduction rate of winter wheat increased with the increase of the total stress degree, and the aboveground dry matter weight decreased with the increase of the stress degree. Under the combined stress of warming and drought, the yield reduction rate of Winter Wheat in the middle of Jiangsu Province was on the high side. Under other combined stresses, the yield reduction rate gradually decreased from the south to the north of Jiangsu Province. Meanwhile, the total aboveground dry matter weight gradually increased from the south to the North, and the grain dry matter distribution was lower in the South than in the north than in the middle of Jiangsu Province.

Key words: warming; drought; WOFOST model; winter wheat; Jiangsu Province

第一章 引言

1.1 研究的目的及意义

农业是国民经济的基础，许多国家在农产品质量、安全和产量问题上十分重视，随着农业生产管理技术的不断提高，农业机械化、科学施肥以及合理灌溉等技术大范围推广，粮食生产力持续增强。提高农业资源利用效率、保障粮食生产质量在我国经济发展人口增加以及耕地面积减少的背景下，成为粮食安全和农业可持续发展的重大需求，也始终是农业科学研究中普遍关注的热点问题。

随着人口剧增、大气污染、水体污染等问题的出现，全球气候变化导致增温干旱等极端天气引发更多地区粮食产量不稳定状况频繁发生，致使粮食产量下降，以至于对区域及全球的粮食安全构成威胁，在世界大面积粮食单产陷入停滞状态的大背景下，我国小麦种植区内处于产量停滞状态的县域达到总种植面积的 42%^[1]。如此严峻的形势下，研究分析胁迫环境下农作物产量对于提升农业生产力，准确地掌握各地区农业生产状况，加强农业生产管理具有理论和实践意义，特别是区域气候评估分析和作物模型模拟预测的研究。

自 20 世纪 60 年代起，为了实现农业利润最大化，促进农业资源的合理使用，作物生长模拟技术研究有了进一步发展^[2]，作物生长模拟能够协调作物生产与农业气象之间的关系，在未来几十年来的农业科学研究和应用中发挥了极为重要的作用。近年来，我国农业现代化发展进程加快，作物的种植生产和栽培管理不仅要依靠传统的栽培方式，更应该结合农业现代化手段进行作物监测和产量模拟。作物生长模型使用作物生长的能量守恒定律，以气候环境和土壤条件驱动变量实现对作物逐日干物质积累等生理过程的动态模拟。辅助农业监测模拟研究作物生长，目前已经成为农业气候资源评估研究中较为成熟的工具之一，作物生长模型又被称为作物模型，通过模型一系列模型机理从数学度量的角度实现作物生长发育和环境之间的变量关系。作物模型可为农业资源的合理发展利用、农田栽培管理和农业最大收益的获得等提供决策基础和科学指导^[3]。

迄今为止，作物模型被广泛应用于气候变化、田间管理、对作物生长发育监测和产量预测等方面，国外的主要作物模型种类繁多，有美国开发的 DSSAT 系列模型、CENTURY 模型、ALMANAC 模型、AquaCrop 模型和 EPIC 模型，荷兰 Wageningen 农

业大学和世界粮食研究中心开发的 ORYZA 水稻模型、LINTUL 模型、INTERCOM 模型以及 WOFOST 模型等^[4]。

小麦是我国的种植范围广，种植面积达到我国耕地面积的 18%，其中 80% 为冬小麦，冬小麦幼苗能够越冬，具有较强的抗寒力，是我国主要的粮食作物，因此，冬小麦产量的高低决定着我国小麦的总产^[5]。冬小麦产量的形成主要依靠干物质的积累，干物质主要来源于光合作用，是光合作用的产物，其积累量大小以及分配和转运到籽粒中的多少与气候条件密切相关^[6]。灌浆期是冬小麦形成碳水化合物，籽粒充实的重要时期。相关研究表明，灌浆期长期高温环境对冬小麦生长不利，例如，调控籽粒的淀粉合成酶基因的表达受高温的影响，将直接影响小麦的品质，不利于冬小麦生产稳产高产^[7]。因此，灌浆期进行环境的调控以及增温、干旱等灾害胁迫下冬小麦的产量预估的研究对指导实践生产具有重要意义。

针对冬小麦生长模拟的模型包括 CERES-Wheat、DSSAT 等模型，其中 WOFOST 作物生长模拟模型是一个动态的、解释性模型，可以描述作物基本生理过程，如光合、呼吸和蒸腾等作用，并描述这些过程如何受环境的影响。作物生长发育、气候环境乃至整个作物生态系统都极其复杂多样，因此，作物模型实现作物生长的这一过程可能存在模拟结果的误差。模型被人们广泛使用的过程中不断被人们简化利用，开展模型本地化及适应性的研究成为热点，且被广泛地应用于水稻、玉米等其他作物的土壤条件和天气变化等农业气象的研究。

在全球变暖的背景下，突发极端天气和自然灾害引起的作物产量意外下降是难以预防的，气候变化导致极端气候事件频频发生，包括干热风、高温胁迫以及阴雨寡照等^[8]，严重影响全球农业效益，因此，了解区域生产的气候变化趋势对于作物生长发育、产量形成的影响是必要的^[9]。江苏省冬小麦的种植面积超过全国的 9%，鉴于此，本研究选择江苏省为研究区域，以省内不同代表产区冬小麦作为研究对象，利用作物模型根据实际气象、土壤资料明确研究区域气象和土壤条件，模拟不同强度增温、干旱对冬小麦生育期的生长。探究不同程度缺水以及增温复合胁迫条件下冬小麦产量的响应，进一步评价不同胁迫条件下冬小麦的资源利用效率，为提升江苏省冬小麦产量、提高资源利用效率、合理制定防灾减灾措施提供科学参考和理论依据。

1.2 国内外研究进展

1.2.1 作物模型的相关研究

作物生长模拟模型（Crop Growth Simulation Model）又叫做作物模型，能够通过动态地模拟作物生长发育，以计算机模拟程序实现作物生长发育全过程的实时监管，为针对极端天气时保证持续的作物发育提供农业生产的决策依据^[10]。随着农业现代化进程的发展，作物模型研究的发展也逐渐经历了从经验性走向机理性的过程，在作物产量评估的应用十分广泛^[11]。一个完整的作物生长模型在结构上一般分为三个板块，即作物生长板块、大气系统板块和土壤板块，包括一些作物生长发育的主要过程，如光合作用过程、蒸腾作用过程、同化产物分配和形态发育和衰老的主要过程^[12]。

近几十年来，作物生长模型的研究在理论上实现了应用，经历了由理简单到复杂，由局部到整体的一系列过程。在此期间，DEWITU 开发出了玉米光合生产的数字模型^[13]；Thornley 等对作物呼吸作用进行了模拟研究^[14]；Ritchie 对作物蒸发进行研究探索^[15]。1965 年联合国的组织的生物学计划项目下，美国的 Duncan 和荷兰的 De Wit 开拓性地将计算机与作物模型相结合，为其研究发展奠定了理论基础。据统计，1965 年到 2005 年，农业生态系统模型注册库中已收录 200 多个模型^[16]。我国对作物模型的研究较晚但发展迅速，1989 年，张宇等通过建立动态解释模型，通过冬小麦的模拟研究探讨了冬小麦生长发育阶段与环境因子之间的关系，建立了冬小麦生物量的动态模型^[17]。高亮之等是国内最先研究模型应用的人^[18]，张星粟等为了评估不同时期供水对作物产量的影响，利用作物生长模型，对老挝湄公河流域的水稻产量进行模拟，得出水稻潜在产量大于供水模式的产量的结论^[19]。

作物生长模型能够通过土壤水分的转化、计算生物量和叶面积指数（LAI）对单产参数实现精准模拟，准确的模拟作物生长发育、土壤水分，通过计算叶面积指数和生物量实现对单产参数进行较为准确的模拟^[20]。其中，WOFOST（World Food Studies）模型采用 Penman 公式计算蒸散量计算模拟一年生作物生长，众多学者在使用时对模型进行的代码源进行修正和修改，在不同领域衍生出许多应用^[21]。例如，利用大气系统使气候与作物生长模型相连接评估气候及预测农作物产量。陶苏林等通过方差信息与气候要素均值要素传递函数结合用来修订作物生长模型，以逐日气候模拟数据的方法提高了模型的可信度^[22]；

除了作物模型可信度的研究，随着信息技术的发展作物模型与其他现代技术耦合的研究逐渐趋于成熟。利用卫星遥感区分气候和其他因素对区域作物生产的影响，在土地规划管理领域已得到成熟的应用^[23]。有研究采用遥感数据同化生成时间序列同

WOFOST 模型相结合,能够解决观测与作物生长模型模拟的状态变量之间的尺度不匹配问题,增加作物产量估算的可靠性^[24]。Ma 等将 WOFOST 模型中的叶面积指数与 SAIL-PROSPECT 模型耦合模拟了土壤等作物生长环境,实现华北平原冬小麦的区域化标定,并通过计算初始化参数环境下的出苗时间,对比最小化模拟与合成的 SAVI 之间的差异,发现此方法在模型区域尺度模拟研究方面具有应用潜力^[25]。黎世民等通过将遥感观测数据与 WOFOST 模型模拟的变量之间进行对比,改善了区域冬小麦的产量评估^[26]。马青荣等通过对 WOFOST 模型的研究,发现作物模型区域应用中最重要基础是区域尺度的动态模拟^[27]。

此外,纪甫江等通过将 WOFOST 作物模型与遥感技术相结合,基于 CASA-WOFOST 耦合估产模式,实现光能利用与大豆生长过程的监测,提高作物估产的稳定性和可靠性,为区域田块尺度作物估产提供理论支持^[28];马玉平等借助叶面积指数(LAI)嵌套模型模拟作物冠层,对区域尺度上利用遥感数据优化作物模型研究具有更深的探讨性意义^[29]。国外学者 Vazifedoust 和 EnKF 等的研究利用 MODIS 反演的叶面积指数,与相对蒸散发两个变量通过 EnKF 滤波算法实现了遥感数据与 SWAP 模型的同化,提前 30 天对小麦产量预测,结果接近 10%,多目标优化算法实现了遥感与模型的多参量同化,取得了比单变量同化更高的估算精度^[30]。WOFOST 模型引入我国后经过本地化处理,各地区开展了深入研究,取得了巨大的进展,但在模型上仍然停留在研究和试用阶段,尚未全面应用到农业气象服务和农业生产指导中。

1.2.2 增温和干旱的相关研究

自 20 世纪以来,人类的各种活动不断地向大气中排放温室气体,使大气中的温室气体浓度不断增加,气温、降水、相对湿度等气候要素变化是全球气候变化的重要表现形式,这些要素变化对作物生长发育和产量形成以及农田生态系统都会造成严重影响。

世界气象组织(World Meteorological Organization, WMO)在 2019 年发布的《全球气候状况报告》中指出:过去五年及十年气温的上升趋势创历史新高,证实了 2019 年是有记录以来三个最热的年份之一的预测。在全球变暖和许多国际社会的影响下,农业是受害最严重的部门之一此外,温度的增高势必会增加水分的蒸发,降低空气湿度及土壤墒情,引起干旱^[32],全球变暖伴随着极端天气的大概率发生,对粮食安全和农业的可持续发展造成了巨大的影响^[33]。唐国利等通过中国近百年温度曲线的对比分析得出中国在 1906 至 2005 年年平均温度每年增加 $(0.78 \pm 0.27) ^\circ\text{C}$ ^[34]。此外,相关研究初步发

现,持续的增温导致的极端气温致使春夏季频繁发生天气灾害^[35]。环境变化造成作物欠收或绝收,因此,未来变暖的气候下世界许多地区的干旱持续时间和强度可能会增加^[36], Angeline G 等在现有观测结果的基础上研究水文循环和干旱的物理过程,提出持续干旱对气候变化过程会造成严重的影响^[37]。旱灾领域的研究在未来气候变暖的背景下研究逐步深入,应对干旱及时采取农业风险管理以及对农作物长势监测及估产具有重要意义。

增温、干旱及二者复合胁迫的相关试验研究十分广泛,主要包括:干热胁迫对植物抗氧化能力的影响,对粮食作物干物质累计的影响以及温度上升对作物各发育期的影响。郑艳玲等在实验中,以干旱和干热复合胁迫研究苏铁的抗氧化胁迫能力,发现胁迫会抑制控制苏铁生长发育的相应的酶活升高,得出干热复合胁迫会对苏铁的影响最大^[38]。屈琦琦通过不同程度高温和高温干旱复合胁迫交替处理,探讨了萱草对高温及高温干旱复合胁迫的适应性。发现高温干旱胁迫均对萱草的生长具有抑制作用,复合胁迫下萱草的胁迫伤害程度更深^[39]。谭凯炎等指出,增温导致的花后高温不利于麦穗的发育和籽粒灌浆,显著降低了小麦产量^[40],胡阳阳等采用盆栽实验结合模拟人工气候室模拟制造灌浆期高温、干旱及二者复合的胁迫环境,对小麦籽粒淀粉合成研究,结果发现,高温对淀粉分支酶、焦磷酸化酶和蔗糖合酶等关键淀粉酶的活性与合成、累计造成影响,且其影响程度高温大于干旱,复合大于单一^[41]。

江苏地区近年来不断发生季节性干旱和增温,很大程度上影响了作物的生长发育,制约着农作物的产量的增长^[42]。对于江苏省冬小麦适应性的研究中,顾嘉熠通过冬小麦各生育期与全生育期的适宜度进行了计算和时空变化分析,最后根据冬小麦生育期间所受冻害、干旱和连阴雨的灾害指标计算所受灾害的情况,并结合江苏省气候适宜度进行比较分析与评价冬小麦的生长发育时期中出苗-分蘖期土壤湿润指数较低,严重影响冬小麦的生长进而引起冬小麦受旱减产^[43]。尤新媛等利用作物水分亏缺指数分析近 30 年江苏省冬小麦生长季干旱的时空变化规律,发现苏北各市是干旱频率的高值区,江苏省冬小麦生长中后期干旱灾害发生的可能性较大^[44]。此外,苏海报等人使用田间增温系统模拟了气候变化,探讨夜间增温对冬小麦生长发育和产量的影响机制,研究结果发现,夜间增温会使冬小麦物候期提前,生育期缩短,不利于冬小麦穗粒形成造成减产^[45]。

信息化、数字化是我国农业发展的主要方向,精准农业、数字农业依靠的就是作物生长机理与数学物理理论的科学结合实现的。21 世纪作物模型被不同国家,不同地区本地化和精准化使用,Lian 等基于澳大利亚小麦产区试验数据,对 APSIM-Wheat 模型

进行了全面的灵敏度分析, 结合不同的气候和土壤条件进行参数调整研究^[46]。随着计算机信息技术的逐渐成熟, 作物模型与现代技术的耦合研究已经普遍。Wu 等利用模型与遥感数据同化实现参数的时空连续^[47], 使作物模型与“3S”技术的结合越来越广泛, 还有相关研究通过对比不同模型之间的差异进行参数区域研究定义, 实现将模拟应用到区域作物生长、产量预估等方面中^[48]。很多学者发现模型的精度增加结合人工气候模拟研究, 更便于研究环境胁迫对作物生长影响, 对于 WOFOST 模型这一简便模型的研究中, 区域尺度动态模拟是作物模型研究的重要组成部分^[49]。

冬小麦 (*Triticum aestivum* Linn) 是江苏省的主要粮食作物之一, 相关冬小麦的产量研究中, 有关气候条件对生育期的影响多从各生育期时段延长或缩短的方式进行分析, 生育期的变异与环境的关系是研究的主要内容^[50]。一直以来, 针对长三角地区温度、降水变化对冬小麦、水稻等主产作物的研究较少, 此类模型模拟方面对实践的指导以及该领域的应用更加有限。江苏省冬小麦种植农业生产能力不稳定, 开放式的农业经营模式导致作物生产潜力有待提高, 因此需要开展对冬小麦的现代化模拟技术和生产潜力的预测模拟的应用研究。

1.3 研究内容

本研究基于 WOFOST 作物模型, 结合江苏省的历史气象资料、土壤资料、冬小麦产量资料等进行模型参数的敏感性分析和本地化处理, 验证其基本符合江苏省冬小麦生长情况后, 通过对冬小麦灌浆期进行增温、干旱处理, 模拟分析不同胁迫条件对江苏省冬小麦产量形成和干物质分配的影响。具体研究内容包括以下方面:

(1) 模型参数敏感性分析

结合模型作物、土壤和气候数据库进行模型的校准和本地化率定, 为敏感性较大的参数确定一个合适的值, 从而为该模型的本地化应用提供参考。作物模型的本地化处理, 结合江苏省的历史气象资料、土壤资料、冬小麦历史产量资料等, 并参考相关文献, 对模型相关参数进行调试, 使其符合江苏省冬小麦生长发育规律。

(2) 模型本地化及验证

将调整的参数输入, 运行模型, 输出冬小麦产量等指标。将模拟值与实测值进行对比分析, 运用不同的冬小麦产量指标分析 WOFOST 模型的模拟精度, 讨论模型在研究区域的适用性。

(3) 增温、干旱复合胁迫模拟

以江苏省有代表性的 3 个站点为研究对象,分析研究年限的气温和降水距平结合冬小麦的实际产量,确定基准年,对各站点基准年冬小麦灌浆期进行不同程度的增温、干旱,以及增温干旱复合胁迫处理。

1.4 技术路线

本研究利用研究区域气象站的观测气象数据与实际土壤条件,结合当地的统计年鉴数据,先进行模型初始参数的敏感性分析,根据参数敏感性和实际情况对 WOFOST 模型进行参数调整,并结合各站点独立的土壤、作物数据,计算实际与模拟产量数据误差进行验证,最终分别得出 3 套适用于徐州、淮安、常州 3 站点的模型参数,以实现 WOFOST 模型参数的本地化。

利用参数修订后的本地化模型对研究区域典型非干旱、温度和实际产量无异常年份(基准年)进行冬小麦灌浆期模拟,探讨灌浆期不同程度的干旱、增温以及复合胁迫对冬小麦产量形成的影响,从而探索江苏省冬小麦干热胁迫的模拟试验方法。技术路线图如图 1-1。

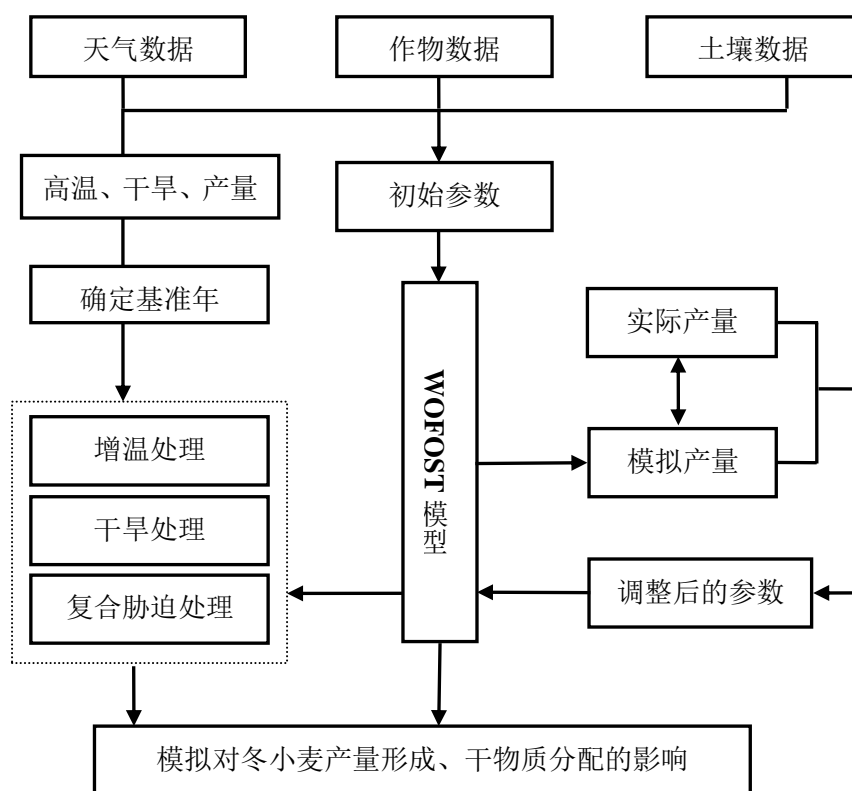


图 1-1 技术路线图

Figure 1-1 Technology Roadmap

第二章 研究方法及数据

2.1 研究区域概况

江苏省位于亚洲大陆东岸中纬度地带,属东亚季风气候区,处在亚热带和暖温带的气候过渡地带。全省年平均气温在 $13.6\sim 16.1^{\circ}\text{C}$ 之间,全省年降水量为 $704\sim 1250\text{ mm}$,降水量季节分布特征明显。本研究选择全省 3 个农业气象观测站徐州、淮安和常州,分别地处江苏北部、中部和南部。

受季风气候的影响,江苏省冬夏偏长而春秋较短,且南北的温差较为明显,江苏南北部的季节起止时间也有差异,苏南与淮北地区相差约一周,总得起始时间与持续时间如下:春季平均起始时间为三月底或四月初,持续约 68 天;夏季长度约 104 天,平均起始时间为 6 月 7 日;秋季起始时间约为 9 月 19 日,持续天数 60 天左右;冬季大约从 11 月 19 日起持续 134 天。由于南北存在差异,作物生育期时间和农业产业结构也存在一定差异。

江苏省处于富饶的长江三角洲地区,地形以平原为主,其地形平坦,河湖众多,为中国的重要农业区。其中山东西部黄河以南、江苏淮河以北的黄淮平原,地形平坦,仅徐州地区略见小丘,从徐州到淮阴的黄河故道多沙丘、沙地,平原上河渠纵横。江苏由西南向东北温度逐渐增高,北部地区属温带季风气候,春季升温西部快于东部,温度由沿海向内陆逐渐增加,年日照总时数约 2284 小时至 2495 小时。冬、春季天气多变,稻麦两熟,如何提高作物单产产出效率,同时保护农田生态,维持当地农业的可持续发展尤为重要^[51]。

江苏南部地处中国东南沿海长江三角洲的中心,常州为中心城市之一,受季风影响较苏北更为显著,四季分明,雨热同步,降雨充沛,年际变化小,年降雨量约为 1091.6 mm ,与我国其他同纬度的其他市比较,光照更为充足,全年日照总时数约为 1940.2 小时,因此在气候正常时适宜作物生长。江苏省北部与南部总体气候差异不大,温差约 $3\sim 5^{\circ}\text{C}$,随季节变化出现气象灾害发生的非正常年份,多表现为气候变暖,春季气温上升,降水过多或过少,以及夏季气温高、梅雨等,全省盛夏多伏对农作物生长造成严重影响。

江苏省为我国主要商品粮基地,南方主要种植冬麦区之一。气候变化是影响作物单产的主要因素,以目前江苏省农业生产水平 3% 的光能利用效率计算,江苏省冬小麦年

单产下降约 8.84 kg hm^{-2} ^[52]。气候变化的重要途径包括气温和降水等气候要素的变化，江苏省冬小麦抽穗-灌浆期为 5 月上旬至 5 月下旬，灌浆-乳熟期为 6 月上旬至 6 月中旬，此时期为一年中苏北、苏中、苏南差异最大，温度快速增加至高温，降雨多变的时期，不同区域的气候变化对冬小麦的生长发育和产量形成会造成不同影响。虽然随着气温的升高江苏省各地区冬小麦生育期不断提前，但乳熟期随拔节期、孕穗期、开花期的提前而缩短，总生育期的天数受影响导致籽粒成熟时间的缩短，实际并不利于作物的增产^[53]。此外，降水因子对多种农作物来说影响大于温度，因此降水与增温带来的作物产量问题将更加严重。

2.2 研究数据

本研究根据地区分布、气候特点、农业生产结构选取研究区域徐州、淮安和常州 3 个站点，收集所选区域的研究资料，包括作物资料、气候资料及土壤资料。作物资料包括冬小麦作物品种特性参数、产量等；气候资料包括气温、太阳辐射、风速、日照时数、降雨量等；土壤资料包括土壤的理化性质等。所需气象资料包括江苏省 3 个站点 2008-2017 年的逐日最高气温、最低气温、空气相对湿度、风速、日照时数、降水量等。作物生育资料为各站点 2008-2017 年冬小麦产量数据，来自各市统计年鉴。

(1) 气象资料：WOFOST 模型运行所需的气象资料包括逐日最低、最高气温、太阳辐射、水汽压、风速、降雨量，其中太阳辐射量没有直接观测数据，需要利用逐日观测的日照时数值采用 Angstrom^[54]方程计算得到。

(2) 作物资料：作物产量等数据来源于江苏省历年的统计年鉴以及中国气象数据网农业资料 (<http://data.cma.cn/data/cdcindex/cid/4ee1c7fce9cd6a5f.html>)。

(3) 土壤资料：WOFOST 模型运行输入的土壤资料包括土壤类型、土壤理化性质、土壤容重、田间持水量和饱和孔隙度、含水率等理化性质，土壤资料主要来自中国土壤数据库 (<http://vdb3.soil.csdb.cn/>)。参照前人研究成果并结合江苏省土壤性质，对土壤参数加以调整^[55]。

2.3 研究方法

本研究基于 WOFOST 模型，结合江苏省的历史气象资料、土壤资料、冬小麦产量资料等进行模型参数的敏感性分析和本地化处理，通过对冬小麦灌浆期进行增温、干旱

处理，分析不同处理对江苏省冬小麦产量和干物质分配的影响。对徐州、淮安、常州 3 站点 2008-2017 年的年平均气温、降水数据及产量情况进行分析，选择气温正常、非干旱且产量稳定的年份作为基准年。参照各站点冬小麦实际生育期天数确定灌浆期开始日期，进行高温干旱及复合胁迫处理，并与基准年的结果进行对比分析。

2.3.1 胁迫处理设置

冬小麦灌浆期增温和干旱胁迫各设置 3 个梯度：增温分别在基准温度上增加 1℃、2℃、3℃；干旱则依据《中国气象灾害大典（江苏卷）》的冬小麦干旱等级标准并结合土壤相对湿度进行分级（轻度、中度和重度，见表 2-1）；复合胁迫则对上述增温和干旱的处理进行两两组合，形成 9 种不同程度的复合胁迫。选用 WOFOST 模型输出的 TWSO（贮藏器官总干质量）和 TAGP（地上总生物量）作为研究指标^[56]。

以基准年在正常条件下的输出指标为对照，其中干旱胁迫条件下的输出以模型内水分限制条件下输出数据为准，计算各胁迫条件下的冬小麦的相对基准产量的减产率和干物质分配情况。

表 2-1 冬小麦灌浆期干旱等级划分表

Table 2-1 Drought classification of winter wheat at grain filling stage

等级	土壤相对湿度
轻旱	65%
中旱	55%
重旱	45%

2.3.2 胁迫模拟方法

本研究运用试错法、经验法和实际计算法等进行 WOFOST 模型参数调整。首先采用局部敏感性分析法^[57]，以模型自带的冬小麦品种的原始作物参数为基础，在不改变其他参数值的情况下将待调参数上下调整 10%，根据不同参数对应的输出模拟结果确定敏感参数。运用试错法对敏感参数进行调整，并将模拟结果与实际产量值进行对比，初步确定参数取值后再根据实际情况适当调整，使模拟结果最大限度接近实际值。

2.4.3 模型验证方法

利用 WOFOST 模型进行冬小麦生长的模拟研究。对模型进行适应性调整及验证后，

结合前人所做的研究,对冬小麦关键生育期合理地设置不同强度的增温、干旱处理,分析增温、干旱及增温干旱复合胁迫,对比分析不同程度和条件胁迫下冬小麦产量。为评价各项模拟值与实测值之间的差距和模拟效果,选择以下统计量进行评价:平均绝对误差(MAE)、平均相对误差(MRE)、均方根误差(RMSE)、相对均方根误差(RRMSE)、。计算公式见第三章。

2.3.3 模型气象数据的计算方法

由于常规气象观测资料中只有日照时数,因此需要根据 FAO 提出的 Angstrom^[58]公式计算得到 WOFOST 模型中使用的计算出地面总辐射(也称太阳辐射)。具体公式为:

$$R_s = (a_s + b_s \frac{n}{N}) \times R_a \quad (2-1)$$

式中, R_a 为大气上界入射辐射($\text{MJ m}^{-2}\text{d}^{-1}$), a_s 和 b_s 为经验常数, 分别取 0.25 和 0.5, n 为观测得到的日照时数, N 为可能日照时数。

$$R_a = 37.6d_r [\omega_s \sin(\alpha) \sin(\beta) + \cos(\alpha) \cos(\beta) \sin(\omega_s)] \quad (2-2)$$

$$N = (\frac{24}{\pi}) \omega_s \quad (2-3)$$

式中 α 为纬度, β 为太阳赤纬, ω_s 为太阳时角, d_r 为日地相对距离, 公式为:

$$d_r = 1 + 0.033 \cos(0.0172J) \quad (2-4)$$

$$\omega_s = \arccos(-\tan \alpha \tan \beta) \quad (2-5)$$

$$\beta = 0.409 \sin(0.0172J - 1.39) \quad (2-6)$$

式中 J 为所计算日期的儒略日。

第三章 WOFOST 参数本地化及验证

WOFOST 模型是荷兰的 Wageningen 大学研发的主要作物模型^[58]。采用作物生长监测系统 (CGMS)^[60]的核心组成部分运行,用于定量分析模拟日常大部分作物的生理和生态过程 (图 3-1),它已被用于研究气候变化的影响、区域产量预测以及不同灌溉和土壤条件的比较,具有很好的研究效果^[61]。WOFOST 模型可以通过模拟同化呼吸、叶片生长和干物质形成来预测每日的干物质质量,通过两种不同的方式实施:潜在条件和水分限制条件,其中潜在条件下作物的生长仅由辐射、温度和植物特性决定;而水分限制条件增加了农作物生长对水分的影响机理^[62-64]。为解决模拟问题,大量研究表明可以通过同化数据解决模拟精度问题。模型模拟机理通过潜在条件下模拟 LAI 与水分限制下的 LAI 相比,通过消除各种因素对模型内作物生长的影响,提高干物质质量、LAI、茎重、总重等输出指标的准确性^[65]。

目前,WOFOST 作物模型在我国产量预测的研究十分广泛,在区域农田灌溉的生产潜力评估方面的应用颇有成效,适用性评价较好^[66]。但在使用 WOFOST 模型用于区域模拟研究之前,必须先校准其主要参数。通常需对参数敏感度划分不同程度后再进行校正,采用田间数据或者统计年鉴数据用于校准作物和土壤水分参数。

3.1 模型参数本地化以及验证

3.1.1 敏感性分析

本地化验证前进行参数敏感性分析是模型使用的必要前提,校正模型参数最理想的方法是参数的初始变量扰动法^[67,68],为增加模型的使用精度,需要校正的对象包括作物参数与土壤参数,其方法是在潜在生长条件下不改变模拟环境和其他参数值,将待确定参数值上调下调 10%后,运行 WOFOST 模型进行模拟并观察模拟结果^[69]。

本文选取模型输出结果的总重 (TAGP)、穗重 (TWSO)、茎重 (TWST) 以及叶重 (TWLV) 作为比较项,计算每个指标的变化百分率,即所选参数的敏感度 (表 3-1),公式如下:

$$S = \frac{Y_i - Y_0}{Y_0} \quad (3-1)$$

其中 Y_0 是模型初始参数值的模拟结果, Y_i 是第 i 个参数变化后的模型模拟结果。

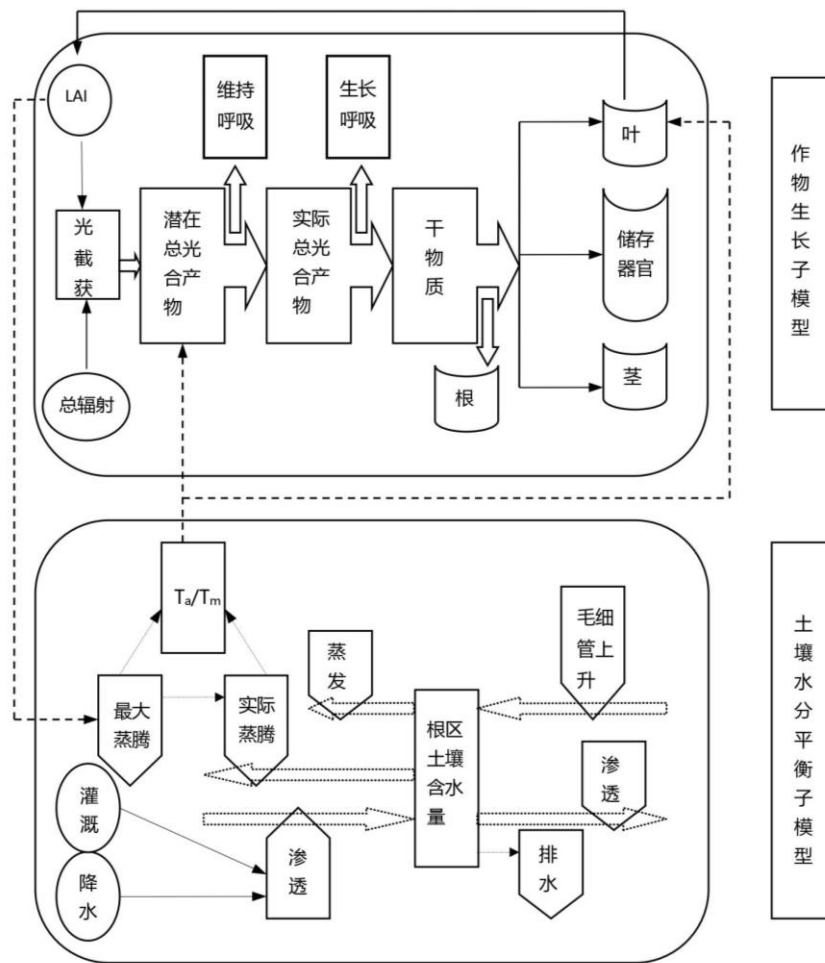


图 3-1 WOFOST 模型示意图

Figure 3-1 Schematic diagram of WOFOST model

3.1.2 参数调整方案

本研究根据以上参数敏感性的分析结果（图 3-2），结合作物参数的取值范围和参数定义，确定了以下调整方案：

（1）对所有参数的敏感度进行排序，敏感度为 0 以及敏感度较低的（小于 2%），如开花到成熟时的积温（TSUM2）、出苗时的最高有效温度（TEFFMX）、茎、叶、根的维持呼吸作用（RML、EMS、RMR）等，通过参考前人的研究或 WOFOST 模型中存在的参数默认值^[69]确定。

表 3-1 WOFOST 模型部分作物参数敏感性分析结果

Table 3-1 Sensitivity analysis results of some crop parameters in WOFOST model

参数	TWLV 叶重 (%)	TWST 茎重 (%)	TWSO 穗重 (%)	TAGP 总重 (%)	绝对平均值 (%)
TSUM1	24.75	11.82	-7.54	6.02	13.89
	-23.85	-20.04	7.69	-9.37	
TSUM2	0.00	0.00	1.63	0.66	0.64
	0.00	0.00	-2.02	-0.82	
TDWI	4.39	2.25	0.81	2.01	2.53
	-4.81	-2.60	-1.04	-2.33	
SLATB1	14.86	9.90	6.92	9.48	12.02
	-16.55	-13.50	-11.71	-13.26	
SPAN	0.00	0.00	4.21	1.71	1.70
	0.00	-0.08	-5.40	-2.23	
AMAXTB1	10.31	8.61	7.36	8.37	9.32
	-11.26	-9.96	-8.96	-9.76	
AMAXTB2	0.00	0.00	1.71	0.69	0.73
	0.00	0.00	-2.46	-1.01	
TMPFTB1	-5.76	-3.23	-1.54	-2.95	3.01
	4.76	2.50	1.04	2.27	
TMPFTB2	4.34	2.29	0.96	2.08	2.54
	-4.60	-2.56	-1.19	-2.34	
TMNFTB1	-5.55	-3.01	-1.42	-2.77	3.24
	6.03	3.07	1.25	2.81	
TMNFTB2	21.68	18.92	17.34	18.72	19.35
	-20.47	-19.35	-18.95	-19.37	
CVL	6.93	4.40	1.46	3.60	4.46
	-7.67	-5.19	-2.13	-4.33	
CVO	0.00	0.18	8.80	3.64	3.19
	0.00	-0.20	-8.96	-3.72	
CVR	3.49	2.13	0.79	1.80	2.24
	-4.02	-2.52	-1.04	-2.16	
CVS	7.67	9.26	0.85	5.59	6.20
	-8.36	-9.88	-1.69	-6.31	
Q10	2.64	2.25	2.08	2.25	2.57
	-3.38	-2.76	-2.44	-2.73	
RML	-1.22	-1.25	-1.73	-1.44	1.42
	1.22	1.25	1.77	1.47	
RMS	-0.53	-0.80	-2.31	-1.37	1.26
	0.48	0.80	2.40	1.40	
RFSETB1	-0.53	-0.78	-3.27	-1.75	1.21
	1.22	0.86	-1.19	0.08	

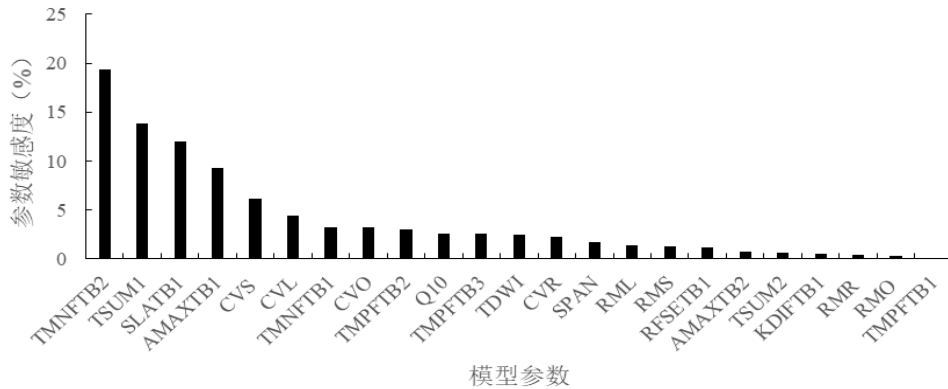


图 3-2 参数敏感性分析结果

Figure 3-2 Results of parameter sensitivity analysis

(2) 筛选出模型中敏感度较高，取范围相对较小的参数，如呼吸维持作用因子（RFSE）和吸温度系数（Q10）等参数。参考前人研究结果或选用 WOFOST 模型的默认值^[68]。

(3) 筛选出模型中敏感度较高且取值范围较大的参数，如初始干物质重（TDWI）、出苗时叶面积指数（LAIEM）等，利用试错法来确定。待调整参数为：初始干物质重（TDWI）、积温（TSUM1、TSUM2）比叶面积（SLATB1 和 SLATB2）、生物量转化速率（CVL、Q10、CVR、CVS、CVO）等。由于研究区域江苏省所选取的 3 个站点冬小麦土壤条件不同和品种差异，本文在徐州、淮安和常州站点的不同模型参数的调整结果不同，作物参数调整结果如表 3-2 所示。

表 3-2 WOFOST 模型的主要作物参数取值

Table 3-2 Main crop parameters of WOFOST model

参数	定义	站点		
		徐州	淮安	常州
TDWI	初始干物质重 (kg hm^{-2})	197	202	197
TSUM1	出苗到开花时的积温 ($^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$)	945	976	954
TSUM2	开花到成熟时的积温 ($^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$)	1000	1000	1000
SLATB1	比叶面积 ($\text{hm}^2 \text{kg}^{-1}$)	0.00212	0.00212	0.00212
LAIEM	出苗时叶面积指数 ($\text{cm}^2 \text{cm}^2$)	0.1300	0.1355	0.1300
SPAN	叶片在 35°C 的生命期 (d)	31.2	31.9	31.3
CVL	同化物转化成叶片干物质重效率	0.695	0.675	0.665
CVR	同化物转化成根干物质重效率	0.694	0.694	0.709
CVS	同化物转化成茎干物质重效率	0.662	0.662	0.694
Q10	同化物转化成茎干物质重效率	1.8	1.9	1.8
CVO	同化物转化成贮存器官效率	0.773	0.756	0.667

模型的土壤类型对模拟效果有直接影响,根据大量气象实验站与土壤数据库资料统计表明江苏省以草甸土质地、沙壤土为主,与模型中 WOFOST-EC3 土壤类型特征一致。根据实际土壤数据对 WOFOST-EC3 中影响较大土壤参数需要进行调节,包括田间持水量 (SMFCF)、土壤渗透率等;可以通过气象站点数据测量值进行计算得到的参数包括田间持水量 (SMFCF)、凋萎点湿度 (SMW) 等。其他与土壤系统等相关的参数使用 WOFOST 模型自带的数值^[66]。最终确定以下数值为研究区域的土壤参数如表 3-3。

表 3-3 WOFOST 模型主要土壤参数取值

Table 3-3 Main soil parameters of WOFOST model

参数	含义	单位	取值
SMW	凋萎点湿度	$\text{cm}^3\text{cm}^{-3}$	0.110
SMFCF	田间持水量	$\text{cm}^3\text{cm}^{-3}$	0.300
SMO	饱和土壤含水量	$\text{cm}^3\text{cm}^{-3}$	0.350

3.1.3 模型模拟及验证

3.1.3.1 检验模型有效性的指标

为检验模型的模拟效果,通常采用以下有效性指标指标对模拟值和实测值的差异进行评价:平均绝对误差 (MAE)、平均相对误差 (MRE)、均方根误差 (RMSE) 和相对均方根误差 (RRMSE)。计算公式如下:

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |B_i - G_i| \quad (3-2)$$

$$MRE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{B_i - G_i}{B_i} \right| \quad (3-3)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (B_i - G_i)^2}{n}} \quad (3-4)$$

$$RRMSE = \frac{RMSE}{\overline{B_i}} \times 100\% \quad (3-5)$$

式中, B_i 和 G_i 依次代表观测值和模拟值, $\overline{B_i}$ 为观测值的平均值, n 为比较数据个数, MAE 、 MRE 代表模拟值和观测值符合程度,数值愈小愈好, $RMSE$ 、 $RRMSE$ 代表模拟值和观测值拟合精度,数值越小越好。

3.1.3.2 模拟结果与验证

用徐州、淮安、常州 3 站点 10 年（2008-2017 年）的实际产量数据对调整后的 WOFOST 模型进行验证。图 3-3 所示，3 站点的实际产量变化曲线较平缓，模型输出结果与实际产量值总体一致，且基本上能够反映冬小麦实际年产量的变化情况。由于模型无法考虑个别年份产量受到气象和非气象灾害的共同影响，因此少数年份的模拟结果与实际产量仍存在一定差异，如共同年份 2015 年。

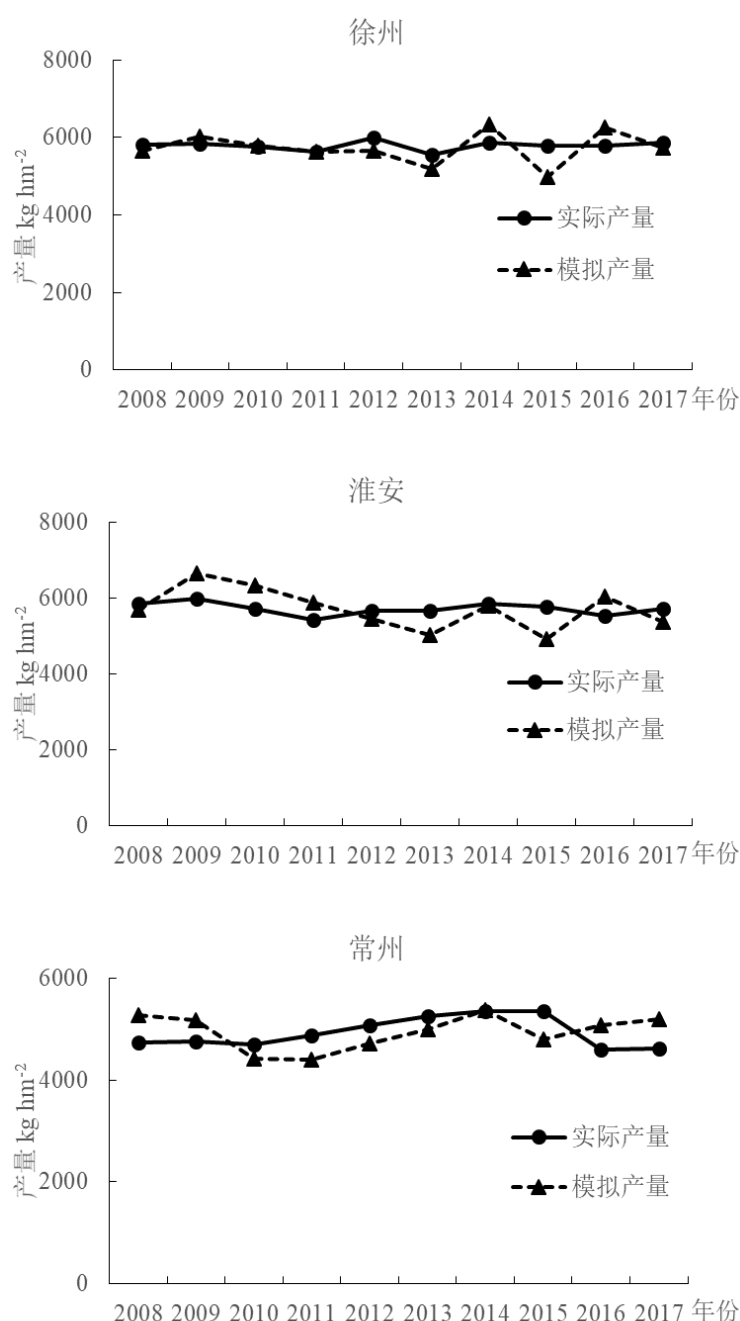


图 3-3 徐州、淮安、常州 2008-2017 年冬小麦产量实测值与模拟值对比

Figure 3-3 Comparison of measured and simulated winter wheat yields in Xuzhou, Huai'an and Changzhou during 2008-2017

综上所述,选择模拟值和实际值的平均绝对误差(MAE)、平均相对误差(MRE)、均方根误差(RMSE)、相对均方根误差(RRMSE)为验证指标,计算结果如表 3-4。其中,徐州、淮安、常州三站的产量的相对均方根误差(RRMSE)分别为 6.5%、9.0% 和 8.6%,都在 10%以内,因此可以认为模型的三套参数符合冬小麦的实际产量形成情况,调参后的模型能够用于进一步的分析应用。

表 3-4 产量的模拟值与观测值对比分析

Table 3-4 Comparative analysis of simulated and observed yield

	徐州	淮安	常州
实测平均值 (kg hm ⁻²)	5789.7	5722.4	4931.9
模拟平均值 (kg hm ⁻²)	5727.5	5714.9	4942.4
MAE (kg hm ⁻²)	294.0	455.1	392.3
MRE (%)	0.051	0.080	0.081
RMSE (kg hm ⁻²)	374.6	515.4	425.4
RRMSE (%)	6.5	9.0	8.6

3.2 基准年的确定

为进行干旱和增温的胁迫研究,本节针对徐州、淮安、常州的正常年份,即当年未出现较明显干旱且生育期温度接近 10 年的平均温度,通过计算研究区域所选研究年限(2008-2017)的气温与降水距平指数,确定每个站点的基准年,如图 3-4。为了检验基准年的准确性,通过计算当年的冬小麦产量相对偏差进行验证,结果见表 3-5。

图 3-4 中,徐州 2014 年的降水距平指数和气温距平指数分别为 0.024 和 0.019,相对于其他年份,两个指标同时更加接近 0,且产量的相对偏差为 8.29%,小于 10%,因此确定 2014 年为徐州的基准年。通过此方法,确定淮安和常州的基准年分别为 2010 年和 2009 年,其中淮安 2010 年的产量相对偏差为 10.89%,虽大于 10%,但综合考虑降水和温度,2010 年为最佳基准年份。最终确定基准年为徐州 2014 年,淮安 2010 年,常州 2009 年,使用 WOFOST 模型对 3 个地区基准年份的冬小麦灌浆期进行气象数据调整,并分析不同胁迫条件对冬小麦产量和干物质分配的影响。

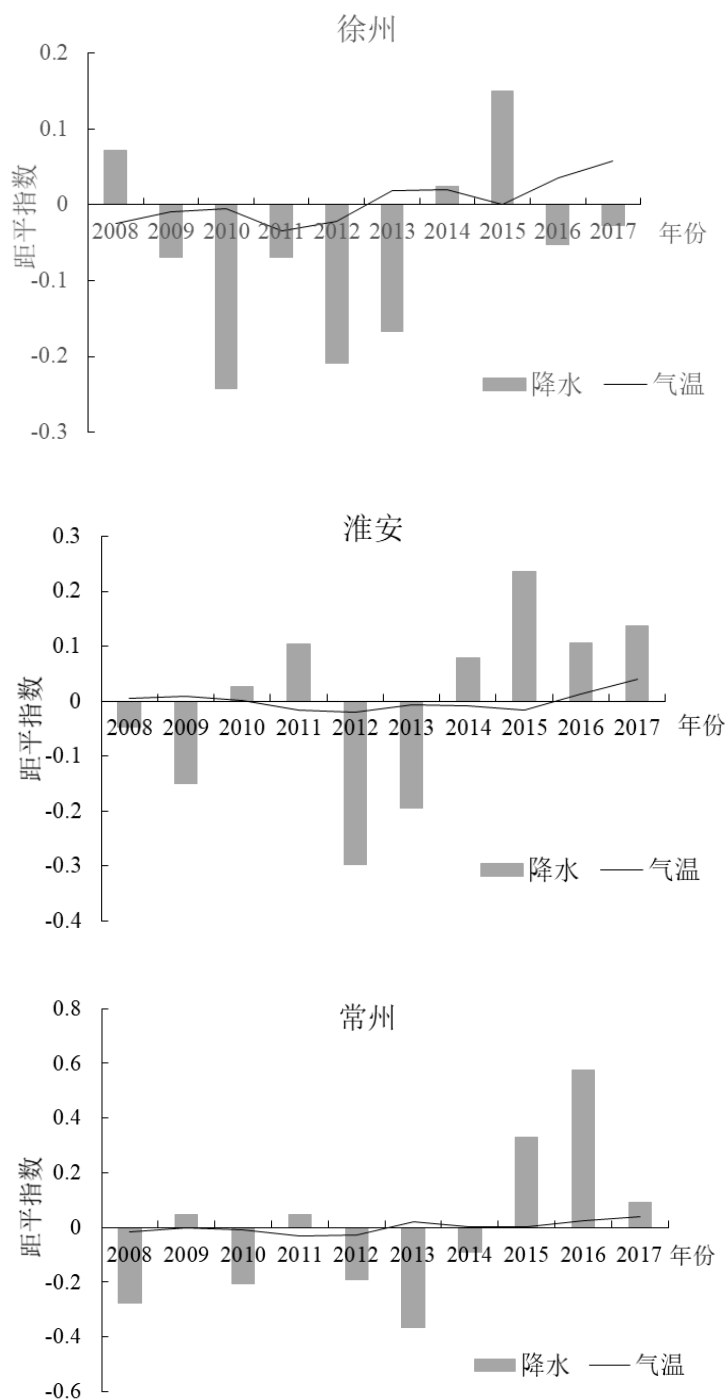


图 3-4 徐州、淮安、常州 2008-2017 年降水距平与气温距平分析

Figure 3-4 Analysis of precipitation anomaly and temperature anomaly in Xuzhou, Huai'an and Changzhou from 2008 to 2017

3.3 本章小结

本章介绍了 WOFOST 作物模型的定量分析模拟原理和简要的应用范围，说明了模

型校对适用性分析的方法。进行本地化使用需进行参数的敏感性分析，指采用初始变量扰动法进行参数的敏感性分析，分析发现模型中多数参数需要或多或少的调整。其中，需要主要调整的参数是对作物干物质、积温的初始设置相关参数，包括初始干物质重（TDWI）、比叶面积（SLATB1、SLATB2）和积温（TSUM1、TSUM2）等。

表 3-5 徐州、淮安、常州的基准年确定及产量验证

Table 3-5 Base year determination and yield verification of Xuzhou, Huai'an and Changzhou

站点	年份	产量相对偏差（%）
徐州	2014 年	8.29
淮安	2010 年	10.89
常州	2009 年	8.68

根据敏感性分析结果调整的参数需要进行本地化验证，作物参数验证方法即采用徐州、淮安、常州 3 个站点 10 年（2008-2017）的实测数据，与 WOFOST 模型在潜在条件下的以原始气象数据的输出结果计算一系列符合系数，分析发现 3 站的产量的相对均方根误差都在 10% 以内，能够用于进一步的模拟。其次土壤参数结合江苏省各地区的土壤类型特征调整，并参照前人的经验进行调整，结合本文研究内容进行确定。

为方便模型使用提高模拟精度，确定修订后的作物与土壤参数是模型潜在条件下的指标，进行后续模拟仅限于特定的典型非干旱与高温年份的应用，因此需要确定基准年，即计算研究区域所选研究年限（2008-2017）的气温与降水距平指数，确定每个站点的基准年，并采用当年的产量相对偏差进行相应的验证。最终确定基准年为徐州 2014 年，淮安 2010 年，常州 2009 年。

第四章 灌浆期增温、干旱单一胁迫对冬小麦产量形成的影响

4.1 不同增温胁迫对冬小麦的影响

灌浆是冬小麦产量形成的关键阶段，冬小麦籽粒成熟前夕为灌浆期，江苏一般在每年 5 月冬小麦进入此阶段，灌浆期内冬小麦通过光合作用和同化作用产生淀粉，同转化的蛋白质贮存在冬小麦种子内最终成熟形成籽粒。灌浆期温、光、水等气象条件是影响冬小麦的灌浆时间和灌浆速度的直接因素，冬小麦灌浆期每日千粒重积累的最适温度为 18-22℃，上限温度为 26-28℃^[70]。有关研究表明，春季回暖快会导致冬小麦灌浆后期的温度过高，或形成干热风。因此灌浆期间的温度与小麦千粒重、灌浆速率和灌浆时间有直接关系，小麦在此时期遭遇温度胁迫将难以长大穗，造成减产^[71]。近几年，土壤失墒情况随着气温的升高逐渐加快，造成冬小麦的生育期缩短，尤其是灌浆后期籽粒形成的影响严重。

选择江苏省 3 个站点：徐州、淮安、常州基准年实际气象条件驱动 WOFOST 模型进行模拟，将模拟结果作为计算减产率的标准，然后以灌浆期开始之日持续 30 天，分别增加每日最低与最高温度 1℃、2℃、3℃，模拟得到冬小麦在灌浆期遭遇温度胁迫时的各项指标，选取总地上部分干物重和总储存器官干物重两个指标进行分析，分别计算各设定增温条件下的冬小麦相对标准产量的减产率和干物质分配情况（TWSO 和 TAGP 的比值）。

4.1.1 增温对冬小麦产量的影响

温度是冬小麦灌浆期产量形成的关键因素，温度的增加会提高冬小麦的光合速率和呼吸蒸腾速率，造成一定程度的减产。本研究对冬小麦灌浆期生长环境进行增温模拟，输出产量后计算的减产率结果如图 4-1 所示。增温 1℃、2℃、3℃均对江苏省 3 个地区的冬小麦造成不同程度的减产，3 个站点冬小麦的减产率随着增温幅度的增加而增加，增温 3℃对冬小麦产量的影响最大。由于增温每日平均温度较高，最高增温 3℃时常州灌浆期最后 3 天温度达到 35℃以上，远超过灌浆期温度上限，对冬小麦灌浆期籽粒干物质积累过程非常不利，导致千粒重与产量的降低明显。

对比不同站点的减产率差异，发现在增温 1℃和 2℃的情况下，减产率由高到低的站点依次为常州、徐州、淮安；增温 3℃时减产率由高到低的站点依次为常州、淮安、

徐州，常州减产率最高时达到 25.5%，远高于其他两地。

对比正常条件下的地上部分干物重（图 4-2），发现增温降低了 3 站点冬小麦的地上部分干物重，即便是增温 1℃对冬小麦地上部分干物质形成都有明显的影响，其中受增温影响最严重的为常州，同减产率计算结果相同，其中淮安在正常条件下的地上部分干物重最高，在增温 1℃时接近徐州，随着温度的增加逐渐低于徐州，仅次于常州，说明江苏中部冬小麦地上部分干物积累对温度的响应程度低于北部。结合对减产率的影响，总体来看，增温对江苏省南部地区冬小麦产量的影响最大，中部次之，对北部地区的影响相对较小。

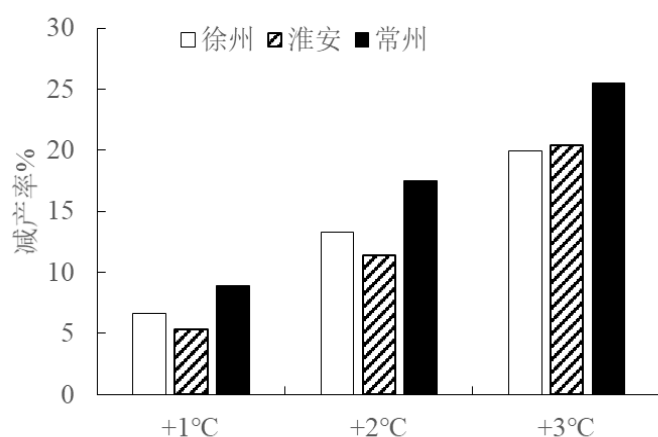


图 4-1 徐州、淮安、常州灌浆期不同增温情景下的冬小麦减产率

Figure 4-1 Yield reduction rate of Winter Wheat under different warming scenarios in Xuzhou, Huai'an and Changzhou during Grain Filling Period

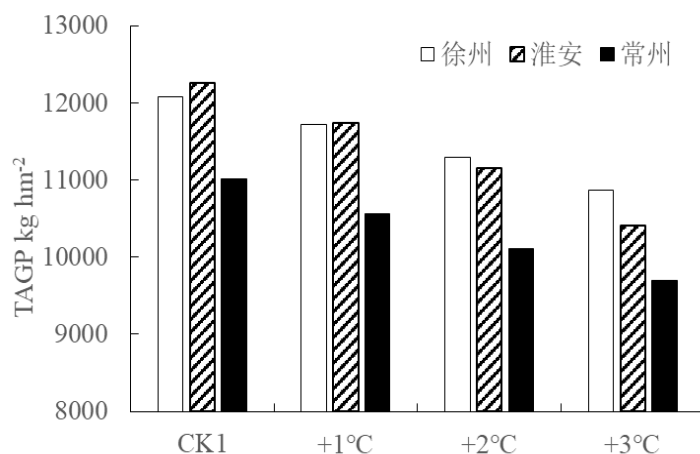


图 4-2 徐州、淮安、常州灌浆期不同增温情景下的冬小麦地上部分干物重

Figure 4-2 Dry weight of aboveground part of Winter Wheat under different warming scenarios at grain filling stage in Xuzhou, Huai'an and Changzhou

4.1.2 增温对冬小麦干物质分配的影响

冬小麦灌浆期干物质的形成取决于籽粒的淀粉含量、蛋白质品质等指标，此过程极易受环境影响，本节通过模型模拟江苏省不同区域冬小麦生物量指标，以探究冬小麦干物质分配情况。

图 4-3 为不同增温条件下冬小麦的干物质分配情况（TWSO 和 TAGP 的比值），即增温对冬小麦灌浆期籽粒干物质积累的影响。从图中可以看出，增温 1℃、2℃、3℃分别降低了 3 个站点的籽粒干物质分配比例，同一站点，增温度数越高籽粒干物质分配比例越低，最低为增温 3℃的常州仅占 40%，说明灌浆期间增温严重影响了冬小麦的籽粒的干物质积累和冬小麦的品质。同一增温条件下，受影响由大到小的站点依次为常州、徐州、淮安；可见灌浆期增温对江苏省南部冬小麦籽粒干物质积累影响最大，对中部和北部影响相对较小，说明增温抑制了冬小麦生物量的累积，生产中针对不同区域实施相应的农业措施，对减缓温度对冬小麦籽粒干物质积累的影响具有重要意义。

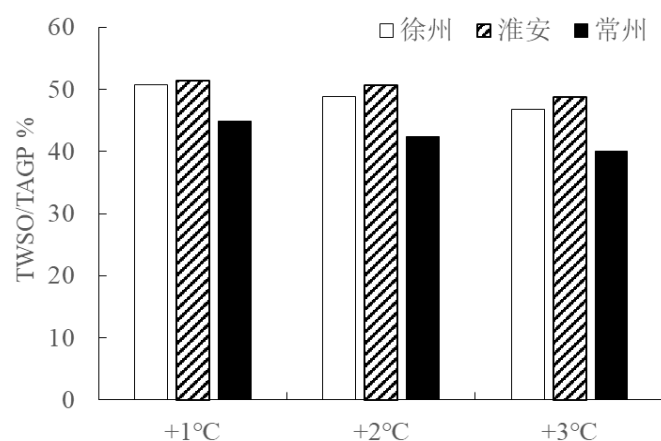


图 4-3 徐州、淮安、常州灌浆期不同增温下冬小麦的干物质分配情况

Figure 4-3 Dry matter distribution of Winter Wheat under different warming conditions in Xuzhou, Huai'an and Changzhou during Grain Filling Stage

4.2 不同干旱胁迫对冬小麦的影响

干旱是普遍存在的一种胁迫条件之一^[72]。植株体内同化物代谢的过程使小麦产量形成，即同化物在源-库-流代谢的过程^[73]，土壤干旱时小麦同化物合成能力较低，转运不良，会使得籽粒的灌浆速率减缓，导致籽粒灌浆不良，产量降低。因此，使用 WOFOST 模型模拟小麦灌浆期不同干旱胁迫下的产量，探讨其变化规律，可以明确不同干旱程度的胁迫条件对冬小麦同化物生成和积累量，以产量形成的影响程度实现预估，以期达到

节水增产的农业可持续生产效益^[74]。

在过去几十年时间里,有关模型的水分亏缺模拟的研究应用领域十分广泛,研究主要涉及干旱胁迫下作物的潜在生产力水平、干旱损失评估分析、对作物生育期的影响和复水等的相关研究^[75]。迄今为止,有关干旱胁迫对作物产量形成的研究证实,干旱胁迫下作物吸水不足会抑制植物生长,田间持水量在 65% 细胞会受到损伤,进而导致作物产量降低^[78,79]。

4.2.1 干旱对冬小麦产量的影响

冬小麦灌浆期不仅受增温影响,更易受干旱胁迫的影响,改变研究区域的干旱水平进行冬小麦灌浆期生长的胁迫模拟,并计算减产率,结果如图 4-4 所示。轻度、中度、重度干旱均对江苏省冬小麦造成了不同程度的减产,且干旱程度越大造成的减产越严重,结合表 2-1 可以看出,土壤相对湿度每减少 10%,造成的减产率大约增加 5%。同一干旱程度下,3 站点的减产程度为淮安最大,徐州次之,常州最小,徐州与常州的减产程度相近。

图 4-5 为徐州、淮安、常州灌浆期不同干旱条件下的冬小麦地上部分干物重,在不进行干旱处理的正常条件下,3 站点的冬小麦地上部分干物重由高到低依次为淮安、徐州、常州,出现干旱胁迫后 3 站点地上部干物重均有明显的降低,淮安低于徐州。通过不同干旱条件下的冬小麦地上部分干物重与干旱对各站点减产率的结果对比发现,江苏中部冬小麦灌浆期产量形成对干旱的敏感性较大。

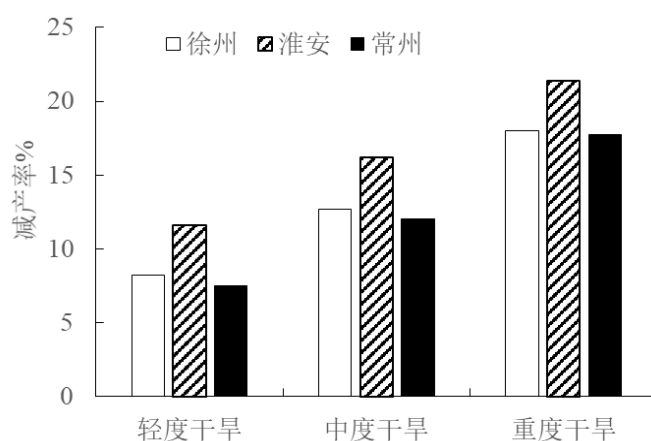


图 4-4 徐州、淮安、常州灌浆期不同干旱条件下的冬小麦减产率

Figure 4-4 Yield reduction rate of Winter Wheat under different drought conditions in Xuzhou, Huai'an and Changzhou during Grain Filling Period

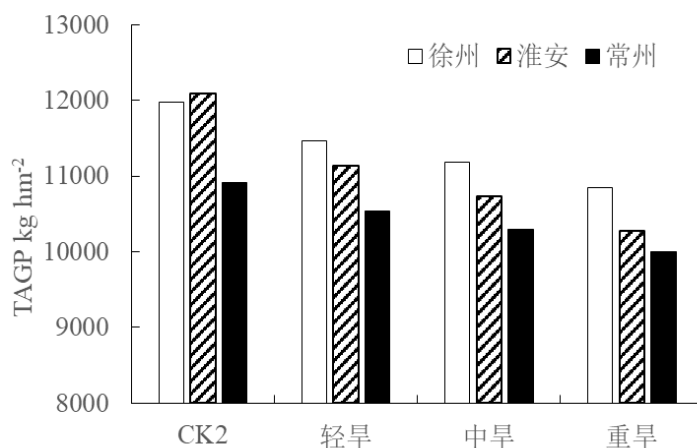


图 4-5 徐州、淮安、常州灌浆期不同干旱条件下的冬小麦地上部分干物重

Figure 4-5 Dry weight of aboveground part of Winter Wheat under different drought conditions in Xuzhou, Huai'an and Changzhou during Grain Filling Period

4.2.2 干旱对冬小麦干物质分配的影响

水分和干旱作为冬小麦灌浆期籽粒干物质积累，淀粉合成积累等一系列过程的决定因素^[80]。图 4-6 为水分限制条件下冬小麦的籽粒干物质分配情况，3 站点除常州站中度干旱略高于轻度干旱下的比值，整体上干旱程度越高籽粒的干物质占比越低，其中轻度干旱与中度干旱的差异不大，而重度干旱下 3 站的冬小麦籽粒干物质分配值较前两种程度出现明显的降低，不同条件之间的差异大于增温的影响。在同一种胁迫下，江苏 3 站点的籽粒干物质比从北到南依次降低，其中最低的为常州仅 42.4%。说明干旱程度达到重度干旱时对干物质积累造成了极大的破坏，对冬小麦籽粒的形成等造成的影响严重。

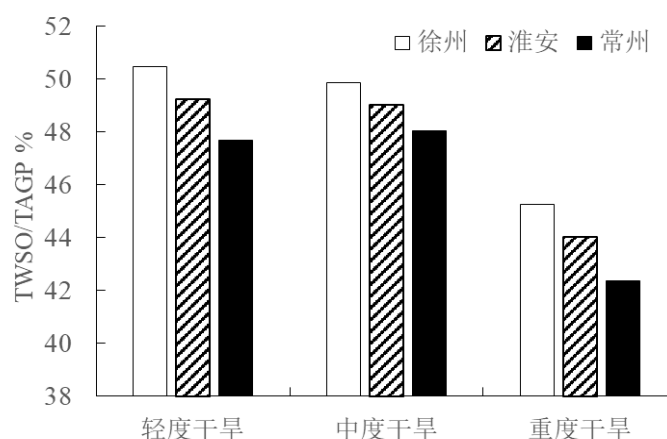


图 4-6 徐州、淮安、常州灌浆期不同干旱条件下的冬小麦的干物质分配情况

Figure 4-6 Dry matter distribution of Winter Wheat under different drought conditions in Xuzhou, Huai'an and Changzhou during Grain Filling Period

4.3 本章小结

本章节对冬小麦灌浆期增温和干旱胁迫各设置 3 个梯度：增温分别在基准温度上增加 1℃、2℃、3℃；干旱依据江苏冬小麦干旱等级标准结合土壤相对湿度进行干旱等级分级，相应改变对应日照时数等气象条件进行模拟。选用 WOFOST 模型输出的 TWSO（贮藏器官总干质量）和 TAGP（地上部分干物重）作为输出指标，计算各胁迫条件下的冬小麦的相对基准产量的减产率和干物质分配情况。结果表明：

各种增温条件均对江苏省 3 个地区的冬小麦造成不同程度的减产，减产率随着增温幅度的增加而增加，同时冬小麦地上部分干物重降低。增温 1℃和 2℃时减产率由高到低的站点依次为常州、徐州、淮安，增温 3℃时减产率由高到低的站点依次为常州、淮安、徐州，对应地上部分干物重的影响相差不大。因此，增温对江苏省南部地区冬小麦产量的影响最大，而对中部地区和北部影响次之；降低减产率的同时增温也降低了 3 个站点冬小麦的籽粒干物质分配比，同减产率相同，增温度数越高籽粒干物质分配比越低，同一增温条件下影响程度由大到小依次为常州、徐州、淮安。说明灌浆期增温严重影响了冬小麦籽粒的干物质积累，极易对冬小麦的品质造成的影响。江苏省南部的影响大于中部、北部。有关江苏省气候分析研究发现江苏省连续性高温出现在每年 5 月和 9 月两月，其中 5 月当地冬小麦开始或已经处于灌浆期，江苏省高温分布的地域性研究发现温度高值区位于江苏省西南部地区，因此，温度过高造成冬小麦减产是常见的气象灾害类型，这与本研究的结果一致^[81]。

干旱程度达到重度干旱时对干物质积累造成了极大的破坏，对冬小麦籽粒的形成等造成的影响严重。分析单一干旱胁迫对江苏省冬小麦的影响发现：轻度、中度、重度干旱，干旱等级增加，胁迫程度加深降低了各站冬小麦的地上部分干物重，对比之下造成了江苏省冬小麦的减产越来越严重，减产程度为淮安最大，徐州次之，常州最小；分析冬小麦灌浆期干旱胁迫对 3 站点干物质分配情况发现，3 站整体上干旱程度越高籽粒的干物质占比越低，且干旱对干物质分配的影响大于增温。同一种胁迫下，3 站点的籽粒干物质比从北到南依次降低，最低仅 42.4%，此外，经对比发现同增温一样，干旱与增温造成的减产和干物质积累情况呈正相关，随着胁迫强度增加对冬小麦的影响也越大。

本章节对于江苏省 3 个典型站点冬小麦灌浆期进行单一增温与干旱胁迫分别处理，模拟结果为后期复合胁迫条件的模拟提供了一定的理论前提。通过对比得出江苏省冬小麦在单一增温和干旱胁迫下的减产情况，为第五章的研究奠定了基础。

第五章 灌浆期增温、干旱复合胁迫对冬小麦产量形成的影响

高温与干旱在作物生产的过程中普遍同时发生,同时存在^[82]。单一的高温和干旱胁迫均会造成作物减产,高温胁迫会使作物蒸腾速率增加,导致土壤水分丧失速度加快,从而加剧干旱胁迫程度,因此,干旱与增温复合胁迫对作物生长发育、干物质积累和产量形成造成更加严重的影响^[83]。

冬小麦在灌浆期增温常常造成极端高温(35℃以上),但两种胁迫不能通过简单的累加进行推论,在同时改变对应日照时数同干旱胁迫复合,导致灌浆期缩短更为严重,造成冬小麦籽粒淀粉和蛋白质积累含量下降,导致产量降低^[85]。

5.1 增温、干旱复合胁迫对冬小麦产量的影响

研究表明增温和干旱单一胁迫分别对冬小麦灌浆期造成不同程度的影响,另一方面,增温造成水汽压增加加速植物蒸腾常造成干旱发生^[86]。本节探讨增温和干旱复合胁迫下冬小麦的减产率,见图 5-1。图中复合胁迫 1 设定增温 1℃时,随着叠加不同程度的干旱胁迫,各站点的减产率显著增加。复合胁迫 1 的 3 站中减产最高为淮安,减产率 25.7%,其次常州、徐州,与单一增温 1℃下减产率最低的淮安相比,叠加干旱后减产率较其他两地有明显增高,说明干旱对江苏中部的冬小麦产量影响最大,对比发现其与单一干旱胁迫下 3 站点减产率的次序近似。

复合胁迫 2 在增温 2℃时,冬小麦的减产率整体随着干旱程度的增加而增加,表现为重旱+2℃ > 中旱 +2℃ > 轻旱 +2℃,增温 2℃单一胁迫减产率最低是淮安,增温 2℃复合胁迫的 3 站点中最低的是徐州。增温至 3℃时,复合干旱胁迫 3 减产率为常州>淮安>徐州,其中,随着干旱等级的增加,淮安的减产率逐渐接近常州。所有复合胁迫下,冬小麦的减产率随着胁迫强度的增加而增加,增温 1℃复合干旱对江苏省中部的冬小麦产量影响最大,增温 2℃和 3℃时导致减产程度由北到南逐渐递增。

对比单一干旱胁迫下的冬小麦地上部分干物重发现这一指标受增温影响严重(图 5-2),复合干旱程度越大,冬小麦的地上部分干物重越低,总体表现为徐州>淮安>常州,其中复合重旱在增温 3℃时淮安的地上部分干物重最低,结合单一干旱此部分探讨可以做合理解释。

如图 5-3 所示,冬小麦灌浆期设定轻度、中度和重度 3 种干旱胁迫分别进行增温 1℃、

2℃、3℃复合胁迫，得出复合胁迫 4-6，各站点的冬小麦减产率随着总体胁迫程度的增加而增加。在 3 种单一干旱胁迫和增温 1℃复合胁迫下，3 站中减产最高的为淮安站，其他增温和干旱的复合胁迫均表现为从北到南依次降低：常州减产程度最高，淮安次之，徐州最低。

分析地上部分干物重受增温干旱的影响，见 5-4，从图中可以看出，各站点增加温度和干旱胁迫，不同程度都会降低地上部分的干物质积累，江苏由北至南递减，结合各个站点的减产率得知，在高度复合增温和干旱胁迫下江苏省的冬小麦减产由北到南逐渐增加，说明越往南部冬小麦对干旱和增温的协同逆境环境响应越大，因此苏南和苏中地区在冬小麦的实际生产中应更加关注气候条件的影响。

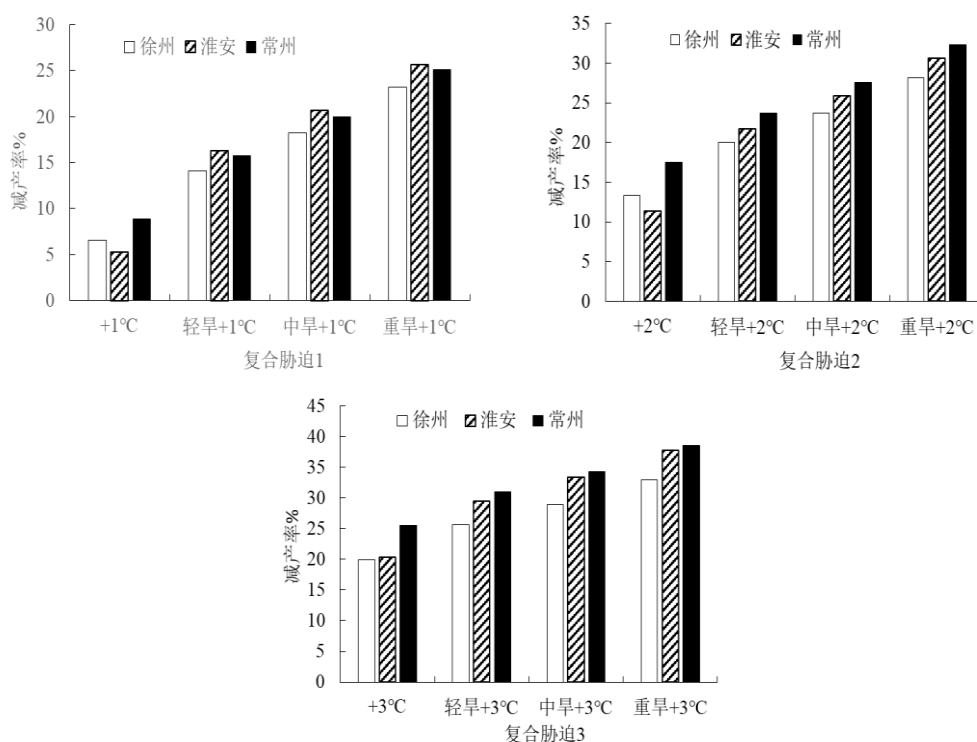


图 5-1 徐州、淮安、常州灌浆期增温 1℃、2℃、3℃条件下不同干旱对冬小麦减产率的影响

Fig. 5-1 Effects of different droughts on yield reduction rate of Winter Wheat in Xuzhou, Huai'an and Changzhou under 1 °C, 2 °C and 3 °C warming during Grain Filling Period

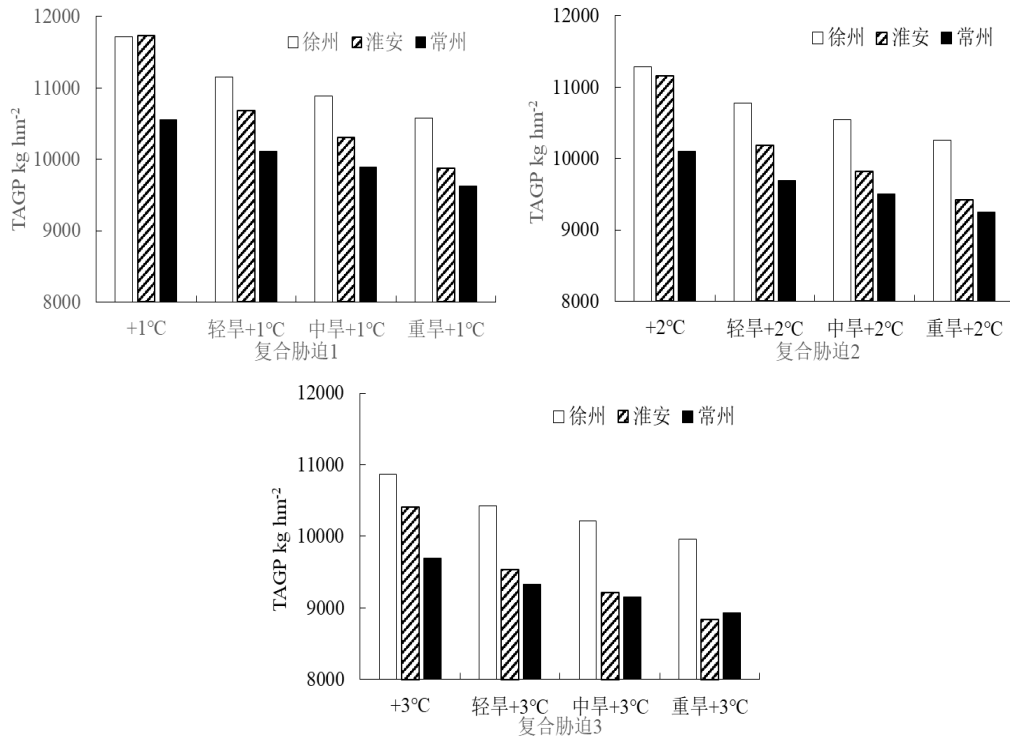


图 5-2 徐州、淮安、常州灌浆期增温 1℃、2℃、3℃不同干旱对冬小麦地上部分干物重的影响

Fig. 5-2 Effects of different droughts on aboveground dry matter weight of Winter Wheat in Xuzhou,

Huai'an and Changzhou at 1 °C, 2 °C and 3 °C during Grain Filling Stage

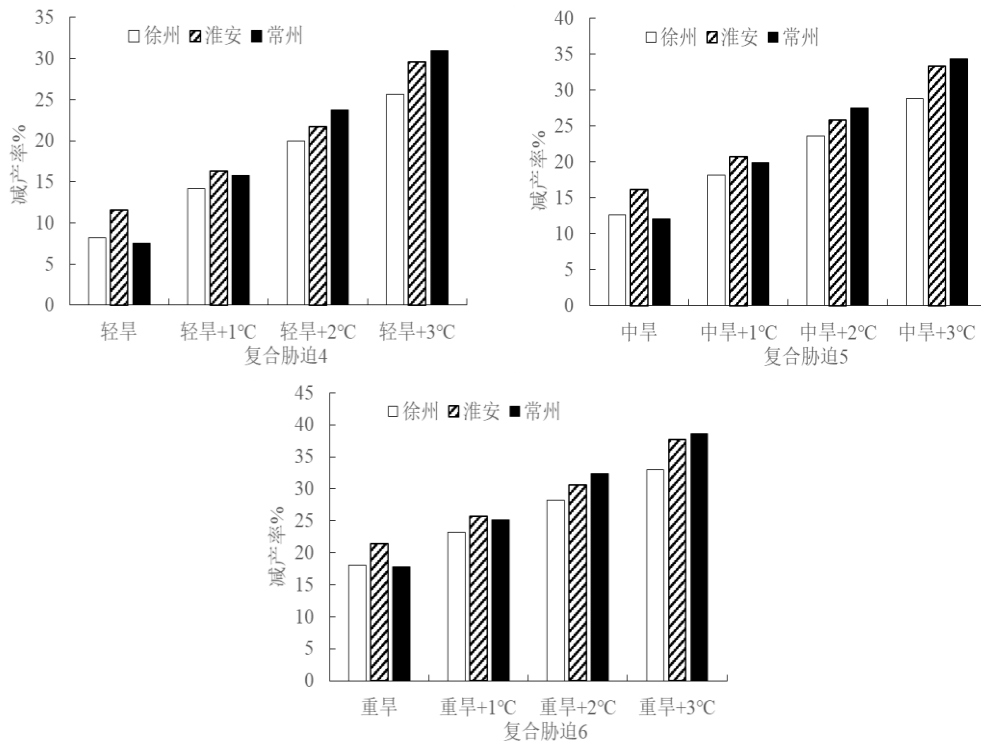


图 5-3 徐州、淮安、常州灌浆期轻旱、中旱、重旱情况下不同增温对冬小麦减产率的影响

Fig. 5-3 Effect of increasing temperature on yield reduction rate of Winter Wheat under mild, moderate and severe drought conditions in Xuzhou, Huai'an and Changzhou during Grain Filling Period

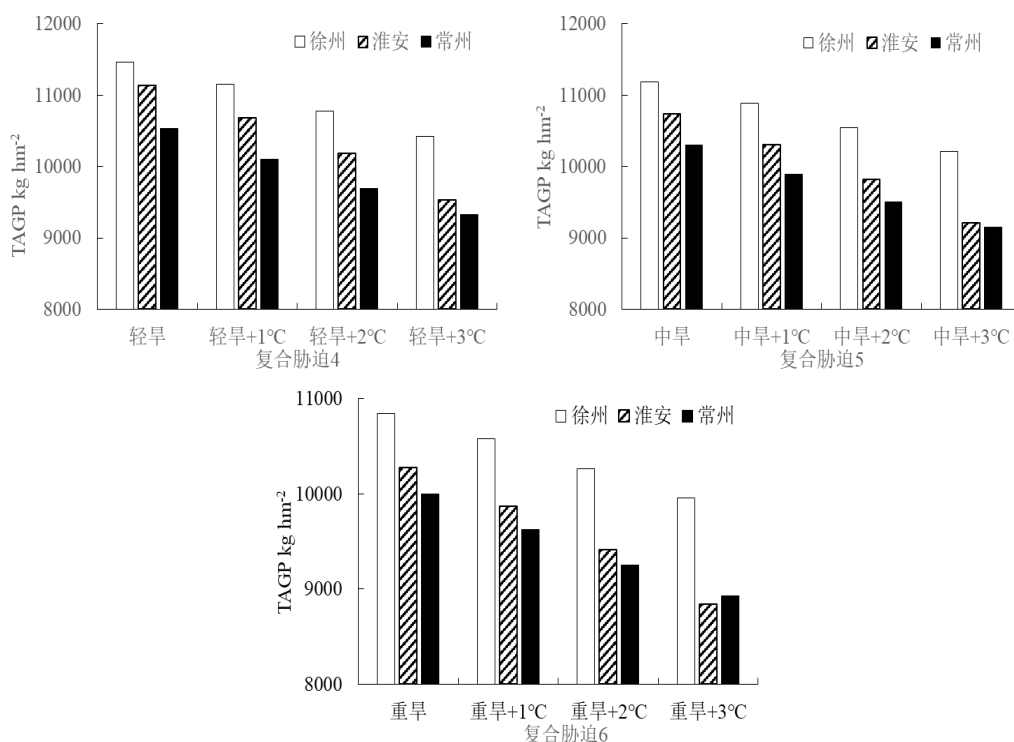


图 5-4 徐州、淮安、常州灌浆期轻旱、中旱、重旱情况下不同增温对冬小麦地上部分干物重的影响

Figure 5-4 Effects of warming on aboveground dry matter weight of Winter Wheat under mild, moderate and severe drought conditions in Xuzhou, Huai'an and Changzhou during Grain Filling Period

5.2 增温、干旱复合胁迫对冬小麦干物质分配的影响

冬小麦灌浆期的干物质积累量是反应小麦全生育期光合作用强度及同化物转化效率的有效指标，WOFOST 模型模拟过程中呼吸作用分为维持呼吸和生长呼吸，灌浆期是生长呼吸分配干物质到各个器官的关键时期，干物质分配以逐日逐小时的 CO₂ 同化速率计算同化物形成量，受生育期日气候条件的直接影响。受气候变化影响，降水和气温变化近 5、6 年来年有明显的变化趋势，且初夏和深秋的趋势最为显著^[87]。冬小麦灌浆期是籽粒干物质形成的关键时期，此阶段若环境条件恶劣将造成冬小麦花期萎焉，光合营养产物大部分贮存在茎秆，延迟花期吐丝，运输和分配受阻，造成整个结实和籽粒一系列冬小麦发育后期的影响^[88]。

从图 5-5 和图 5-6 可以看出冬小麦籽粒的干物质分配比值总体随着胁迫程度的加剧而减小，最低值出现在重旱+3°C；在同一胁迫情景下，不同站点的冬小麦籽粒干物质分配比从高到低依次为淮安、徐州、常州。由此可见无论是从增温复合干旱胁迫，还是干旱复合增温，对冬小麦籽粒干物质分配比的影响随着胁迫程度的加剧而减小，且对江苏南部的冬小麦籽粒干物质分配影响最大，中部和北部影响较小。

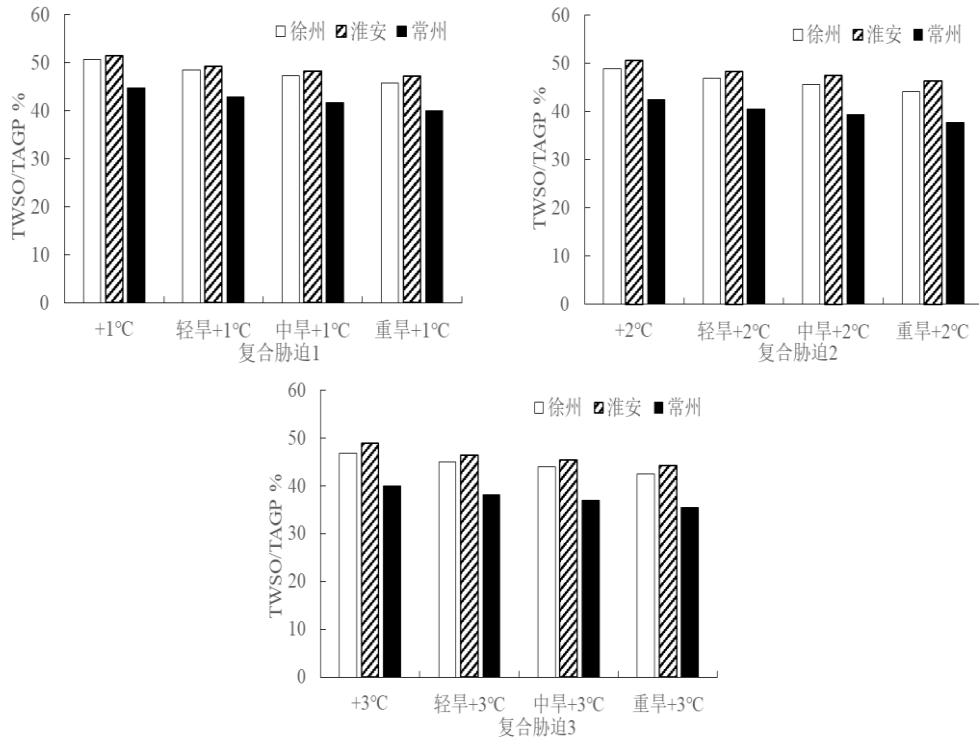


图 5-5 徐州、淮安、常州灌浆期不同增温条件下干旱对冬小麦干物质分配的影响

Fig. 5-5 Effects of drought on dry matter distribution of Winter Wheat under different warming conditions at grain filling stage in Xuzhou, Huai'an and Changzhou

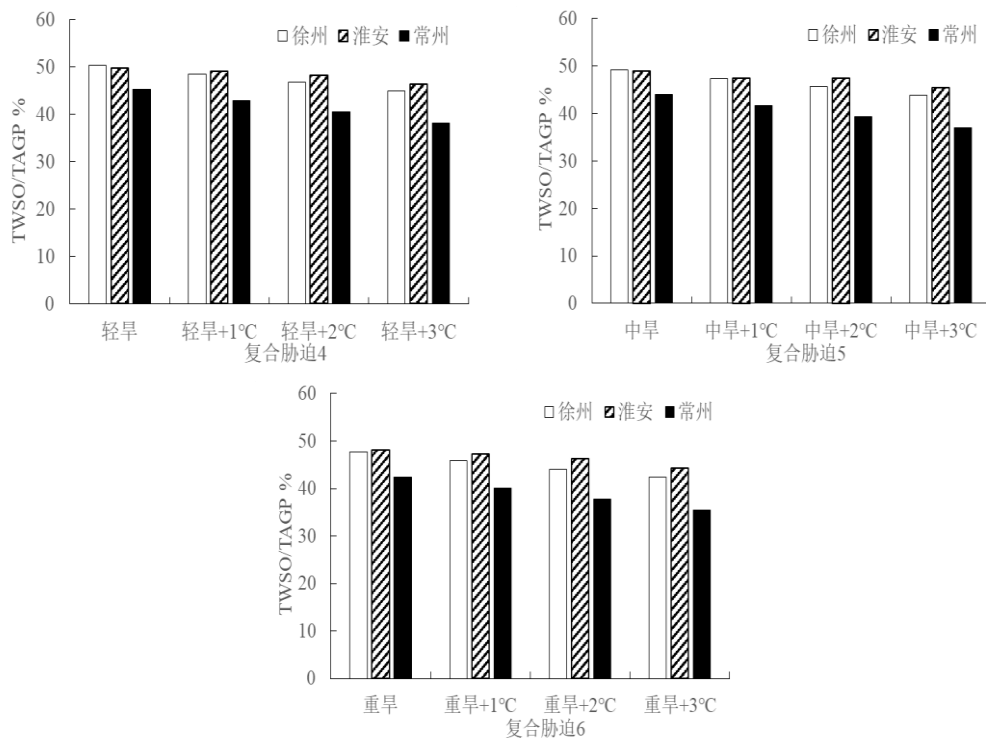


图 5-6 徐州、淮安、常州灌浆期不同干旱条件下增温对冬小麦干物质分配的影响

Figure 5-6 Effects of warming on dry matter distribution of Winter Wheat under different drought conditions in Xuzhou, Huai'an and Changzhou during Grain Filling Period

5.3 本章小结

大量研究表明干旱和增温等逆境胁迫会导致冬小麦生育期缩短,降低小麦的光合速率,影响冬小麦千粒重、穗长及有效穗率等指标,并对干物质的积累造成影响,导致减产。本研究利用 WOFOST 模型模拟得到的结果也表明干旱和增温胁迫对江苏省冬小麦的产量与籽粒干物质分配有明显的影响。本章利用修订后的 WOFST 模型,在复合胁迫条件下进行模拟研究,复合胁迫是对第四章增温和干旱的单一胁迫处理进行两两组合,形成 9 种不同程度的复合胁迫。

复合胁迫 1-3 设定增温 1°C、2°C、3°C 时叠加不同程度的干旱胁迫的地上部分干物质积累、减产率与干物质分配情况,不同增温和干旱复合处理下的干物质分配比,不同区域间的差异不大,说明模拟具有一定的准确性,随着叠加的干旱程度的增加各站点的减产率显著增加。具体讨论如下:增温 1°C 时叠加干旱,3 站中减产最高为淮安,其次常州、徐州,叠加干旱后的淮安减产率大于其他两地,说明干旱对江苏中部的冬小麦产量影响最大,与单一干旱胁迫下结果近似;增温 2°C 时,冬小麦的减产率整体随着干旱程度的增加而增加,3 站点中最低的是徐州。增温 3°C 时,复合干旱胁迫下减产率表现为苏南大于苏中大于苏北,随着干旱等级的增加,中部与南部减产率差异不大。所有复合胁迫下,冬小麦的减产率随着胁迫强度的增加而增加。增温 1°C 复合干旱对江苏省中部的冬小麦产量影响最大,增温 2°C 和 3°C 时减产程度由北到南逐渐递增。

冬小麦灌浆期设定轻度、中度和重度 3 种干旱胁迫分别进行增温 1°C、2°C、3°C 复合胁迫模拟(复合胁迫 5-6),讨论如下:各站点的冬小麦减产率随着总体胁迫程度的增加而增加,地上部分干物重随着胁迫程度的增加而减小。在 3 种单一干旱胁迫和增温 1°C 复合胁迫下,3 站中减产最高的为淮安站,增温 2°C、3°C 和干旱复合胁迫均表现为从北到南依次降低。结合各站点 TAGP 的变化规律发现,高度复合增温和干旱胁迫下江苏省的冬小麦产量由北到南逐渐增加,说明苏南地区在冬小麦灌浆期的生产过程中应更加关注气候带来的问题。

灌浆期是籽粒干物质形成的关键时期,对上述复合胁迫下的干物质分配情况(TWSO 和 TAGP 的比值)进行分析,发现总体随着胁迫程度的加剧而减小,最低值出现在重旱+3°C;在同一胁迫情景下,不同站点的冬小麦籽粒干物质分配比从高到低依次为淮安、徐州、常州。由此可见无论是从增温复合干旱胁迫,还是干旱复合增温,对冬小麦籽粒干物质分配比的影响随着胁迫程度的加剧而减小,且对江苏南部的冬小麦籽粒

干物质分配影响最大，中部和北部影响较小。江苏省各个区域由于气候条件、栽培措施和冬小麦品种不同受干旱增温双重胁迫影响程度不同，在进行冬小麦的产量和品质预估时针对不同区域应采取不同的策略。

此外，复合胁迫与单一胁迫对冬小麦产量等指标的模拟结果吻合，减产幅度最大为复合胁迫，说明增温干旱之间具有互作叠加作用^[41]。干物质分配决定了灌浆期小麦籽粒干物质转运率与转运量，影响着冬小麦的产量和品质。模拟结果说明复合胁迫程度越大对冬小麦籽粒形成造成的影响越大，模拟结果较为规律，可以用于进一步的模型适用性研究，提高区域冬小麦预估精度，以期为冬小麦实际生产与防灾减灾提供理论依据。

第六章 结论与展望

本研究基于 WOFOST 作物模型, 结合江苏省的历史气象资料、土壤资料、冬小麦历史产量资料等进行模型的本地化, 模拟分析了不同程度干旱、增温胁迫及复合胁迫对江苏省冬小麦产量形成和干物质分配情况的影响。本章节将总结, 且对于存在的不足及以后研究中可进一步探讨的问题进行了分析与展望。

6.1 主要结论

本研究对 WOFOST 模型进行敏感度分析, 使用徐州、淮安、常州 3 站点的实际天气、土壤和作物资料进行参数调整, 实现模型本地化, 使用修订后的 WOFOST 模型模拟输出的模拟值与实际值进行验证, 通过计算产量的符合度指数和误差, 经分析发现调整的 3 个研究区域模拟产量和实际产量的相对均方根误差(RRMES)分别为 6.5%、9.0% 和 8.6%, 均小于 10%, 因此, 3 套参数符合预期范围, 适用于江苏省各区域冬小麦生长的模拟。

WOFOST 模型经校正后满足模拟条件, 可以有效地进行江苏省冬小麦种植代表站点徐州、淮安、常州的模拟研究。通过计算研究区域降水和气温的距平指数, 结合产量相对误差进行基准年的确定, 得出徐州、淮安、常州 3 站点的基准年, 即正常非干旱且降水正常、产量相对误差较小的年份确定: 分别是徐州 2014 年、淮安 2010 年、常州 2009 年, 模拟区域对应年份的在潜在条件下的冬小麦发育过程和最终的产量形成结果。

本研究通过改变灌浆期开始之日持续 30 天的日最高、最低气温值以及降雨量与其对应的日照时数, 研究了增温和干旱胁迫对江苏省冬小麦产量和干物质分配的影响, 研究表明:

单一增温、干旱胁迫与复合干旱与增温胁迫均对江苏省冬小麦造成一定程度的减产, 且复合胁迫影响程度大于单一胁迫; 通过增温、干旱以及复合胁迫对江苏 3 站冬小麦籽粒的干物质分配比值的分析发现, 不同程度的胁迫均会降低冬小麦干物质积累的分配, 影响程度同减产情况, 复合胁迫程度大于单一胁迫。

增温和干旱对各站点的冬小麦的影响存在差异, 其中增温对江苏南部冬小麦减产程度最大, 同时籽粒干物质积累受阻最为严重; 江苏中部冬小麦产量受干旱影响最为严重, 籽粒干物质分配程度由南到北递减; 复合胁迫下, 除增温 1℃复合各干旱程度胁迫下, 减产率表现为江苏中部最高, 其余不同的复合程度胁迫下对冬小麦的减产率均由南至北

递增；干物质分配情况则是江苏南部低于北部低于中部，与单一的增温干旱造成的影响具有相关性。综上所述，改变 WOFOST 作物模型中的实际天气、作物、土壤等参数进行模拟，能够实现江苏省各地区冬小麦产量和干物质积累情况的预估。

本研究对江苏省经典站冬小麦灌浆期增温、干旱及复合胁迫进行模拟研究，结果可以为提升江苏省冬小麦产量、提高资源利用效率、合理制定防灾减灾措施提供科学参考和理论依据。生物量以及质量高产目的是近年来冬小麦生产的主要研究方向，在气候变化的大背景下，后续应增进通过模型模拟研究为作物估产提供依据。努力培育出灌浆期抗旱、耐高温的冬小麦品种，对解决生产中的环境问题有着重要意义。

6.2 特色与创新

(1) 利用修订的 WOFOST 模型，结合全球气候变化的大背景以及江苏省冬小麦的实际情况，在冬小麦灌浆期进行了增温和干旱的胁迫模拟，研究了江苏省冬小麦在气候变化背景下的农业气象灾害损失，尝试了 WOFOST 模型对复合胁迫的模拟能力。

(2) 基于 WOFOST 作物模型，从地上部分的干物重以及干物质分配两个角度探讨增温和干旱以及二者的复合胁迫对冬小麦产量形成的影响。

6.3 存在问题与展望

本研究利用 WOFOST 作物模型对江苏省的历史气象、土壤资料同冬小麦产量资料结合，实现本地化的适用性，在江苏省的实际气象条件的基础上设置了冬小麦较为敏感时段（灌浆期）增温与干旱胁迫，并复合干旱与增温的复合胁迫，使气象数据导入模型运行模拟，分析不同处理对江苏不同区域的冬小麦产量和干物质等的影响，为农业生产管理提供定量、精准的决策建议和理论依据，不过本研究仍然存在许多问题需要进一步改善与深入研究，具体如下：

(1) 在江苏省降雨量和温度的基准年的确定中，因为只计算分析研究时限内的气象数据与距平指数，考虑的因素不能全面反应作物的缺水情况，耐受高温的精准范围和具体情况。

(2) 有关模型的缺陷：虽然 WOFOST 模型的使用已经非常普遍与广泛，但研究使用的年鉴数据以及其他生育期数据在人工测量统计时无法避免误差，且模型的参数敏感性存在不确定性，调参过程中考虑整体差异，无法完全对具体年份精准验证，模拟和实

测数据之间存在一定的误差,且由于时间关系本研究没有开展相应的实验研究,缺少大田实验数据进行进一步验证,因此,在本地化验证的过程中仍存在统计误差,虽然待调参数误差达到经验范围,但考虑模拟的精度,仍然缺少说服力。

(3) 在模型的使用过程中由于增温和干旱在改变逐日最低、最高温度和降水的同时,仍需改变相对的日照时数,各气象数据、气象数据与作物参数之间存在一定的相关性,关于此类模拟研究的应用十分有限,相关样本验证的实例更少。模型对粮食总生产潜力预估具有十分重要的价值,在今后关于各项气象条件的研究相关性高度总结和精准验证,结合我国实际种植制度,考虑作物的多熟制和品种差异获取最大的粮食生产潜力,以实现作物模拟模型和其他农业模型的精准化服务和应用。

参考文献

- [1] Wei X, Zhang Z, Shi P, et al. Is yield increase sufficient to achieve food security in china? [J]. Plos One, 2015, 10(2): e0116430. doi:10.1371/journal.pone.0116430.
- [2] 杜华平. 作物生长模拟研究浅析[J]. 上海农业科技, 1999, 3(3): 2-4.
- [3] Roberto C, Marco A, Gianni Bellocchi, et al. Multi-metric evaluation of the models WARM, CropSyst, and WOFOST for rice [J]. Ecological Modeling, 2009(220): 1395-1410.
- [4] Boogaard H L, Van Diepen C A. User's guide for the WOFOST 7.1 crop growth simulation model and WOFOST Control Center 1.5 [M], Technical document 52, DLO Winand Staing Centre, Wageningen, The Netherlands, 1998: 35-38.
- [5] 黄青, 吴文斌, 邓辉, 等. 2009年江苏省冬小麦和水稻种植面积信息遥感提取及长势监测[J]. 江苏农业科学, 2010(6): 508-511.
- [6] Masoni A, Ercoli L, Mariotti M, Arduini I. Post-anthesis accumulation and remobilization of dry matter, nitrogen and phosphorus in durum wheat as affected by soil type [J]. European Journal of Agronomy, 2007(26): 179-186.
- [7] 胡阳阳. 花后高温和干旱胁迫对小麦籽粒淀粉合成的影响[D]. 河南农业大学, 2018.
- [8] Field C B, Barros V, Stocker T F. Managing the risks of extreme events and disasters to advance climate change adaptation. Special report of the intergovernmental panel on climate change (IPCC). Journal of Clinical Endocrinology & Metabolism. 2012, 18(6): 586-599.
- [9] Anderson W, Seager R, Baethgen W, et al. Crop production variability in North and South America forced by life-cycles of the El Nino Southern Oscillation [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2017, 239.
- [10] Bhatia A K. Crop Growth Simulation Modeling [M]. Springer International Publishing: Modelling and Simulation of Diffusive Processes, 2014.
- [11] 张伟欣, 曹宏鑫, 朱艳, 等. 油菜作物模型研究进展[J]. 中国农业科技导报, 2014, 16(1): 82-90.
- [12] 郭定荣, 欧阳竹, 赵晓敏. 作物生长模型 WOFOST 在华北平原的适用性研究[J]. 植

- 物生态学报, 2003, (5): 594-602.
- [13] Wit De C.T. Photosynthesis of leaf canopies [J]. Wageningen University & Research Centre, 1965, 663:1-56
- [14] THORNLEY, J. H M . Respiration, growth and maintenance in plants [J]. Nature, 1970, 227(5255): 304-305.
- [15] Ritchie JT. Model for predicting evaporation from a row crop with incomplete cover [J]. Water Resources Research. 1972, 8(5):1204-1213.
- [16] 王文佳, 冯浩. 国外主要作物模型研究进展与存在问题[J]. 节水灌溉, 2012, (8): 63-68.
- [17] 高亮之, 金之庆, 李林. 中国不同类型水稻生育期的气象生态模式及其应用[J]. 农业气象, 1982, 3(2): 1-8.
- [18] Dong Y, Xing Z, Wang J. Rendering plants with dual-scale automaton model based on GPU [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2011, 27(5): 207-212.
- [19] 张星粟, 贺华翔, 马真臻, 等. 基于作物生长模型的水稻产量与供水关系[J]. 东北水利水电, 2020, 38(5): 58-72.
- [20] 孙扬越, 申双和. 作物生长模型的应用研究进展[J]. 中国农业气象, 2019, 40(7): 444-459.
- [21] 张铁楠, 许为政, 魏湜, 等. WOFOST 模型对东北春麦区春小麦生长和产量的模拟效果[J]. 麦类作物学报, 2015, 35(1): 120-128.
- [22] 陶苏林, 申双和, 李雨鸿, 等. 气候模拟数据订正方法在作物气候生产潜力预估中的应用: 以江苏冬小麦为例[J]. 中国农业气象, 2016, 37(2): 174-187.
- [23] Mechiche-Alami A, Abdi A M. Agricultural productivity in relation to climate and cropland management in West Africa [J]. Scientific Reports, 2020, 10(1): 3393.
- [24] J Huang, F Sedano, Y Huang, et al. Assimilating a synthetic Kalman filter leaf area index series into the WOFOST model to improve regional winter wheat yield estimation [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2016, 216: 188-202.
- [25] 顾嘉熠. 江苏省冬小麦气候适宜度研究及其应用[D]. 南京信息工程大学, 2016.
- [26] 黎世民, 张红利, 王来刚, 等. 基于格网和模糊聚类的河南省冬小麦气象干旱风险区划与分析[J]. 河南农业科学, 2020, 49(11):172-180.

- [27]马青荣, 刘荣花, 胡程达, 等.干旱及灌溉对冬小麦根系和产量的影响研究[J]. 气象, 2020, 46(07): 971-981.
- [28]纪甫江, 蒙继华, 方慧婷. 基于 CASA-WOFOST 耦合模型的大豆单产遥感估算研究[J]. 遥感技术与应用, 2020, 35(2): 406-415.
- [29]马玉平, 王石立, 张黎, 等. 基于遥感信息的作物模型重新初始化/参数化方法研究初探[J]. 植物生态学报, 2005, 29(6): 918-926.
- [30]Vazifedoust M, Van Dam J C, Bastiaanssen W G M, et al. Assimilation of satellite data into agrohydrological models to improve crop yield forecasts [J]. International Journal of Remote Sensing, 2011, 30(10): 2523-2545.
- [31]Mangiarotti S, Mazzega P, Jarlan L, et al. Evolutionary bi-objective optimization of a semi-arid vegetation dynamics model with NDVI and σ_0 satellite data [J]. Remote Sensing of Environment, 2008, 112(4): 1365-1380.
- [32]丁从慧, 申双和, 陶苏林. 江苏省农业气候资源及未来情景预估[J]. 江苏农业学报, 2017, 33(6): 1309-1315.
- [33]刘力, 阮荣平. 气候变暖对粮食安全的影响综述[J]. 江苏农业科学, 2016, 44(11): 6-10.
- [34]唐国利, 丁一汇, 王绍武, 等. 中国近百年温度曲线的对比分析[J]. 气候变化研究进展, 2009, 5(2): 71-78.
- [35]任国玉, 封国林, 严中伟. 中国极端气候变化观测研究回顾与展望[J]. 气候与环境研究, 2010, 15(4): 337-353.
- [36]Murray V, Ebi K L. IPCC Special report on managing the risks of extreme events and disasters to advance climate change adaptation (SREX) [J]. Journal of Epidemiology and Community Health, 2012, 66(9): 759-760.
- [37]Pendergrass A G, Meehl G A, Pulwarty R, et al. Flash droughts present a new challenge for subseasonal-to-seasonal prediction [J]. Nature Climate Change, 2020(10): 191-199.
- [38]郑艳玲, 马焕成. 高温、干旱及其复合胁迫对多歧苏铁生理影响研究[J]. 西南林业大学学报, 2018, 38(5): 1-6.
- [39]屈琦琦. 两个萱草品种对高温和水分胁迫的适应性研究[J]. 北京林业大学, 2018.
- [40]谭凯炎, 邬定荣, 赵花荣. 气候变暖背景下华北平原冬小麦生育期温度条件变化趋

- 势分析[J]. 中国农业气象, 2017, 38(6): 333-341.
- [41] 胡阳阳, 卢红芳, 刘卫星, 等. 灌浆期高温与干旱胁迫对小麦籽粒淀粉合成关键酶活性及淀粉积累的影响[J]. 作物学报, 2018, 44(4): 591-600.
- [42] 顾嘉熠. 江苏省冬小麦气候适宜度研究及其应用[D]. 南京信息工程大学, 2016.
- [43] 陶苏林, 申双和, 李雨鸿, 等. 气候模拟数据订正方法在作物气候生产潜力预估中的应用—以江苏冬小麦为例[J]. 中国农业气象, 2016, 37(2): 174-187.
- [44] 尤新媛, 胡正华, 张雪松, 等. 基于作物水分亏缺指数的江苏省冬小麦生长季干旱时空特征[J]. 江苏农业科学, 2019, 47(2): 243-249.
- [45] 苏海报, 陈昆, 江晓东, 等. 夜间增温对南京地区冬小麦生产的影响[J]. 江苏农业科学, 2019, 47(21): 144-147.
- [46] Binbin, Lian, Tao, et al. Parameter sensitivity analysis of a 5-DoF parallel manipulator [J]. Robotics and Computer Integrated Manufacturing, 2017, (46): 1-14.
- [47] Cheryl H. Porter, J. W. Jones, S. Adiku, et al. Modeling organic carbon and carbon-mediated soil processes in DSSAT v4.5 [J]. Operational Research, 2010, 10(3): 247-278.
- [48] Mechiche-Alami, Abdulhakim M. Agricultural productivity in relation to climate and cropland management in West Africa [J]. Scientific Reports, 2020, 10(1): 3393.
- [49] 黄健熙, 贾世灵, 马鸿元, 等. 基于 WOFOST 模型的中国主产区冬小麦生长过程动态模拟[J]. 农业工程学报, 2017, 33(10): 222-228.
- [50] 卢燕宇, 孙维, 唐为安, 等. 气候变化背景下安徽省冬小麦气候生产潜力和胁迫风险研究[J]. 中国生态农业学报, 2020, 28(1): 17-30.
- [51] 赵强基, 袁从, 郑建初, 等. 江苏麦稻两熟制高产途径及其生态、经济效益研究[J]. 江苏农业学报, 1995(4): 9-15.
- [52] 商兆堂, 张旭晖, 商舜, 等. 江苏省冬小麦生产潜力气候变化趋势评估[J]. 江苏农业科学, 2018, 46(12): 245-249.
- [53] 陈书涛, 王让会, 许遐祯, 等. 气温及降水变化对江苏省典型农业区冬小麦、水稻生育期的影响[J]. 中国农业气象, 2011, 32(2): 235-239.
- [54] 中国气象局. 中华人民共和国气象局行业标准: 北方春玉米干旱等级[S]. 北京: 气象出版社, 2015.
- [55] 朱波, 周彤, 刘涛, 等. 基于 WOFOST 模型的江苏冬小麦生长模拟[J]. 扬州大学学报

- 报(农业与生命科学版), 2020, 41(03): 66-72+80.
- [56]王学梅, 朱雅莉, 董世杰, 等. 运用 WOFOST 模型模拟土壤中水分养分对小麦生物量的影响[J]. 安徽农业大学学报, 2020, 47(02): 267-274.
- [57]张宁, 张庆国, 于海敬, 等. 作物生长模拟模型的参数敏感性分析[J]. 浙江大学学报(农业与生命科学版), 2018, 44(01): 107-115.
- [58]Allen R G. Oxidative stress and superoxide dismutase in development, aging and gene regulation[J]. Journal of the American Aging Association, 1998, 21(21):47-76.
- [59]Cheng Z, J Meng, J Shang, et al. Generating Time-Series LAI Estimates of Maize Using Combined Methods Based on Multispectral UAV Observations and WOFOST Model [J]. Sensors (Basel, Switzerland), 2020, 20: 6006-6024.
- [60]侯英雨, 何亮, 靳宁, 等. 中国作物生长模拟监测系统构建及应用[J]. 农业工程学报, 2018, 34(21): 165-175+312.
- [61]Alexandrov V A, Eitzinger J. The potential effect of climate change and elevated air carbon dioxide on agricultural crop production in central and southeastern Europe [J]. Journal of Crop Improvement, 2015, 13(1-2): 291-331.
- [62]Gilardelli C, Confalonieri R, Cappelli G A, et al. Sensitivity of WOFOST-based modelling solutions to crop parameters under climate change.Ecological Modelling [J]. 2018, 368: 1-14.
- [63]Huang J, Ma H, Su W, et al. Jointly assimilating MODIS LAI and ET products into the SWAP model for winter wheat yield estimation [J]. IEEEJournal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2015a, 8: 4060-4071.
- [64]de Wit A, Duveiller G, Defourny P. Estimating regional winter wheat yield with WOFOST through the assimilation of green area index retrieved from MODIS observations [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2012, 164: 39-52.
- [65]Yannick C, Allard J.W. de Wit, Grégory D, et al. Potential performances of remotely sensed LAI assimilation in WOFOST model based on an OSS Experiment [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2011, 151(12): 1843-1855.
- [66]徐胜男. 基于遥感数据修正 WOFOST 模型的江苏省冬小麦生长模拟研究[D]. 南京信息工程大学, 2016.

- [67]许小路. 基于 WOFOST 模型的高温热害对江苏省水稻生长及产量的影响模拟[D]. 南京信息工程大学, 2015.
- [68]陈夏. 江苏省冬小麦模型模拟优化研究及应用[D]. 南京信息工程大学, 2017.
- [69]张铁楠. WOFOST 模型在东北春麦区生产中的应用研究[D]. 东北农业大学, 2014.
- [70]刘振英, 林玉福, 王寿元. 气象条件对小麦籽粒灌浆影响的研究[J]. 农业气象, 1985(03): 1-5.
- [71]刘万代, 常明娟, 史校艳, 等. 花后高温胁迫对小麦灌浆特性及产量的影响[J]. 麦类作物学报, 2019, 39(5): 581-588.
- [72]白鹏, 冉春艳, 谢小玉. 干旱胁迫对油菜薹墓期生理特性及农艺性状的影响[J]. 中国农业科学, 2014, 47(18): 3566-3576.
- [73]寇丹, 苏德荣, 吴迪, 等. 地下调亏滴灌对紫花苜蓿耗水、产量和品质的影响[J]. 农业工程学报, 2014, 30(2) 116-123.
- [74]刘溢健. 小麦灌浆期不同程度干旱胁迫对同化物转运积累及籽粒灌浆的影响研究[D]. 西北农林科技大学, 2020.
- [75]纪甫江, 蒙继华, 方慧婷. 基于 CASA-WOFOST 耦合模型的大豆单产遥感估算研究[J]. 遥感技术与应用, 2020, 35(2): 406-415.
- [76]李红芳, 王会肖, 杨雅雪, 等. 基于 WOFOST 与 CROPWAT 模型的松嫩平原春玉米灌溉制度研究[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2020, 56(3): 424-435.
- [77]A. Ceglar, R. van der Wijngaart, A. de Wit, et al. Improving WOFOST model to simulate winter wheat phenology in Europe: Evaluation and effects on yield [J]. Agricultural Systems, 2019, 168: 168-180.
- [78]范雪梅, 姜东, 戴廷波, 等. 花后干旱和渍水对不同品质类型小麦籽粒品质形成的影响[J]. 植物生态学报, 2004(5): 680-685.
- [79]刘建新, 王金成, 王瑞娟, 等. 旱盐交叉胁迫对燕麦幼苗叶片生理特性的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2014, 32(3): 24-28+101.
- [80]谷艳芳, 丁圣彦, 高志英, 等. 干旱胁迫下冬小麦光合产物分配格局及其与产量的关系[J]. 生态学报, 2010, 30(5): 1170.
- [81]严文莲, 韩桂荣, 魏建苏, 等. 2010 年江苏省连续性高温特点及成因分析[J]. 气象科学, 2012, 32(3): 293-297.
- [82]Jumrani K, Bhatia VS. Impact of combined stress of high temperature and water deficit

- on growth and seed yield of soybean [J]. *Physiol Mol Biol Plants*.2018, 24(1): 37-50.
- [83]Will R E, Wilson S M, Zou C B, et al. Increased vapor pressure deficit due to higher temperature leads to greater transpiration and faster mortality during drought for tree seedlings common to the forest-grassland ecotone [J]. *New Phytologist* (S1469-8137), 2013, 200(2): 366-374.
- [84]王利彬, 祖伟, 董守坤, 等. 干旱程度及时期对复水后大豆生长和代谢补偿效应的影响[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(11): 150-156.
- [85]朱嘉馨, 吴永波, 刘璇. 高温干旱复合胁迫对杨树幼苗叶经济谱性状的影响[J]. *福建农林大学学报(自然科学版)*, 2018, 47(5): 554-560.
- [86]卢红芳, 石向军, 胡阳阳, 等. 灌浆期高温与干旱对小麦籽粒淀粉合成相关酶基因表达的影响[J]. *麦类作物学报*, 2020, 40(5): 517-525.
- [87]孔莉. 华东地区近 60 年来降水·气温变化分析(英文)[J].*Meteorological and Environmental Research*, 2010, 1(4):72-77.
- [88]Seiji S, Yoichi S. Grain-filling response of winter wheat (*Triticum aestivum* L.) to post-anthesis shading in a humid climate [J]. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 2020, 206: 90-100

致谢

至此，在南京信息工程大学的研究生生活即将落下帷幕。时不待人，回首往昔，比照今天，真是感慨万千。这两年，我通过学习专业课程，参加专业模型模拟培训以及阅读大量本领域相关的文献，开阔了视野，也使我对自己研究方向的内容以及整个学科的结构有了进一步的认识，学会了如何提出问题、思考和解决问题，在学习上有所提升，也明白了很多人生道理。

两年，短暂而漫长，回荡在心间最多的是不尽的感激。首先感谢我的导师李琪副教授，他在我的生活与学业上体贴入微、关怀备至，李老师待人友善、治学严谨，在这两年的硕士学习阶段，他不仅教授了我进行学术研究的方法，而且言传身教教授了我为人之道，让我受益匪浅。在学术研究进行过程中，李老师每过一段时间便会询问课题进展情况，认真负责、不厌其烦地与我进行学术指导与探讨，及时指正研究思路，确保了课题的正常进行。在该研究结束之时，再次向李老师致以最真挚的感谢，道一声：您辛苦了！其次，感谢刘洁辅导员等其他老师对我的关心和引导。

感谢江苏省气象局提供的课题开展的资料及数据，感谢已经毕业的师兄师姐们对作物模型的研究基础，正是由于师兄师姐所留下的相关模型参考学习资料，加上老师的指导，才解决了我一连串的问题和疑惑，一直持续到本文的顺利完成。感谢同门的师弟、师妹对我研究上的热心帮助，尤其是在数据整理、参数调整过程中孙锡鹏、马文慧、王晓玉给予我最大的帮助。感谢 19 级农业专硕的同班同学以及应气研究生党支部的同学，是你们陪伴了我度过这丰富多彩的两年，感谢你们在生活中带给我的帮助、鼓励和快乐，在此致以衷心的感谢！

最后感谢父母对我的栽培，求学之路漫长而充实，在本科四年、研究生两年结交了很多良师益友，感谢你们的支持和鼓励，在今后的工作和生活中我定会不忘初心，砥砺前行！

作者简介

沙慧敏，女，中共党员，出生于 1996 年 9 月，江苏徐州人。2019 年 6 月毕业于淮阴工学院园艺专业，2019 年 9 月至 2021 年 6 月于南京信息工程大学应用气象学院攻读硕士学位。

本阶段学位攻读期间课程学习情况

专业农业，农业气候资源评估与利用方向。学习课程门数 14 门、学位课程学分数 17 分、总学分 29 分。

曾获奖励

- ◆ 大学期间获得国家励志奖学金、一等奖学金、优秀共青团干部、优秀学生干部、三好学生，优秀毕业生的称号。
- ◆ 硕士期间获得二等奖学金，三好研究生的光荣称号。

硕士期间发表的论文

沙慧敏，李琪，何乐，孙锡鹏，曹强，乔云发，胡正华. 1957-2017 年河南省潜在蒸散量的时空分布特征. 江苏农业科学, 2021.