

学号： 2021012174



西北农林科技大学
NORTHWEST A&F UNIVERSITY

2025 届本科生毕业论文

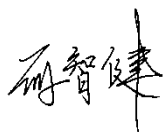
青稞选种、播期与物候模型开发及产量优化研究——以西藏日喀则地区为例

学	院：	<u>水利与建筑工程学院</u>
专	业：	<u>水文与水资源工程</u>
年 级 班 级：		<u>2021级01班</u>
学 生 姓 名：		<u>何智健</u>
指 导 教 师：		<u>何建强</u>
协助指导教师：		<u></u>
完 成 日 期：		<u>2025年05月</u>

本科生毕业论文(设计)的独创性声明

本人声明：所呈交的本科毕业论文(设计)是我个人在导师指导下独立进行的研究工作及取得的研究结果。尽我所知，除了文中特别加以标注和致谢的地方外，论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究结果，也不包含其他人和自己本人已获得西北农林科技大学或其他教育机构的学位或证书而使用过的材料。与我一同工作的同事对本研究所做的任何贡献均已在论文的致谢中作了明确的说明并表示了谢意。如违反此声明，一切后果与法律责任均由本人承担。

本科生签名：



时间： 2025 年 5 月 26 日

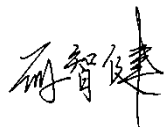
关于本科生毕业论文(设计)知识产权的说明

本毕业论文(设计)的知识产权归属西北农林科技大学。本人同意西北农林科技大学保存或向国家有关部门或机构送交论文的纸质版和电子版，允许论文被查阅和借阅。

本人保证，在毕业离开西北农林科技大学后，发表或者使用本毕业论文(设计)及其相关的工作成果时，将以西北农林科技大学为第一署名单位，否则，愿意按《中华人民共和国著作权法》等有关规定接受处理并承担法律责任。

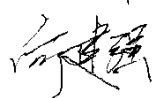
任何收存和保管本论文各种版本的其他单位和个人(包括作者本人)未经本论文作者的导师同意，不得有对本论文进行复制、修改、发行、出租、改编等侵犯著作权的行为，否则，按违背《中华人民共和国著作权法》等有关规定处理并追究法律责任。

本科生签名：



时间： 2025 年 5 月 26 日

指导教师签名：



时间： 2025 年 5 月 26 日

青稞选种、播期与物候模型开发及产量优化研究

——以西藏日喀则地区为例

摘要：青藏高原典型的高寒生态环境对作物种植构成严峻挑战，合理模拟作物生育期并优化播期安排是保障区域粮食安全、提升青稞生产效率的关键途径。青稞作为西藏地区的主要粮食作物，其生育过程受温度与光周期的共同调控，且对播期变化高度敏感。本研究以日喀则市为代表区域，构建了耦合温度与光周期响应机制的青稞生育期模拟模型，并进一步集成出苗期冻害风险识别与成熟性分析，开发出适用于区域尺度的青稞适播期评估模型。为寒冷地区作物栽培模式优化与稳产增效提供了理论支撑和决策工具，具有重要的实践指导意义与推广应用价值。

结合 2024 年田间试验数据与逐日气象观测资料，系统模拟并量化评估了不同播期与品种组合下青稞生育进程、低温暴露风险及产量潜力。模型验证结果表明，模拟生育期的平均绝对误差（MAE）为 6.1 - 6.6 天，均方根误差（RMSE）为 7.7 - 8.7 天，表明模型在高寒区域具备良好的适用性与模拟精度。

适播期分析结果显示，日喀则地区青稞推荐播期为 5 月中旬至 6 月上旬。早播时段可显著延长生育期并提高产量（最高实测亩产可达 172.8 kg），但需警惕苗期冻害的潜在风险。不同品种对播期变化的响应存在显著差异。其中，“喜马拉雅 22”对播期调整高度敏感，而“藏青 2000”和“藏青 3000”则表现出更强的播期适应性。

关键词：青稞；生育期模型；播期优化；冻害风险；高寒农业

Study on Variety Selection, Sowing Date, Phenological Modeling, and Yield Optimization of Highland Barley: A Case Study in Shigatse, Tibet

Abstract: The alpine ecosystem of the Qinghai–Tibet Plateau presents considerable challenges to agricultural productivity. As a staple cereal vital to regional food security, optimizing the phenological development and sowing schedule of the Tibetan barley is crucial for achieving stable yields and enhancing production efficiency. This study focuses on Shigatse Prefecture, Tibet, as a representative high-altitude region, and develops a phenology simulation model for the Tibetan barley that integrates thermal time accumulation and photoperiod sensitivity. Additionally, a complementary sowing window assessment model was constructed, incorporating seedling-stage freezing risk analysis and maturity feasibility evaluation. This research provides a robust modeling framework and decision-support strategy for the Tibetan barley cultivation in cold-climate regions, contributing valuable insights for adaptive crop management and regional food security.

Using field trial data from 2024 and daily meteorological records, we quantitatively assessed the effects of sowing dates on phenological progression, exposure to low-temperature stress, and yield potential across different cultivars. Model validation results indicated that simulated phenological stages achieved a mean absolute error (MAE) of 6.1–6.6 days and a root mean square error (RMSE) of 7.7–8.7 days, demonstrating strong reliability under alpine environmental conditions.

The optimal sowing window for the Tibetan barley in Shigatse was identified as mid-May to early June. Early sowing extended the growing period and resulted in higher yield potential (up to 172.8 kg per mu), albeit with an increased risk of seedling freezing damage. Notable varietal differences in response to sowing date were observed: “Ximala 22” was highly sensitive to sowing time, while “Zangqing 2000” and “Zangqing 3000” exhibited broader phenological adaptability.

Keywords: Tibetan barley; phenology model; sowing date optimization; freezing risk; alpine agriculture

目 录

第 1 章 绪论	- 1 -
1.1 研究背景和意义	- 1 -
1.2 国内外研究进展	- 2 -
1.2.1 青稞生育期特性	- 2 -
1.2.2 生育期模型研究现状	- 3 -
1.2.3 播期研究现状	- 4 -
1.3 研究内容与技术路线	- 5 -
1.3.1 研究内容	- 5 -
1.3.2 技术路线	- 5 -
第 2 章 材料与方法	- 7 -
2.1 研究区概况	- 7 -
2.2 试验设计	- 8 -
2.2.1 试验品种	- 8 -
2.2.2 播期设计	- 9 -
2.3 数据来源	- 9 -
2.3.1 气象与土壤数据	- 9 -
2.3.2 青稞生育期数据	- 9 -
2.3.3 产量数据	- 9 -
2.4 数据处理与分析	- 11 -
2.4.1 气象数据预处理	- 11 -
2.4.2 土壤数据预处理	- 15 -
2.5 模型构建及评估	- 17 -
2.5.1 模型构建方法	- 17 -
2.5.2 模型评估方法	- 18 -
第 3 章 青稞生育期模型构建	- 19 -
3.1 模型构建	- 19 -
3.1.1 数据预处理模块	- 20 -
3.1.2 光温联合响应模块	- 20 -
3.1.3 生育期阈值判断模块	- 21 -
3.2 模型参数优化	- 21 -
3.3 模型验证和评价	- 21 -

3.4 小结	- 28 -
第 4 章 青稞适播期模型构建	- 29 -
4.1 模型构建	- 29 -
4.1.1 数据读取与标准化模块	- 29 -
4.1.2 冻害风险评估模块	- 30 -
4.1.3 成熟性判断模块	- 30 -
4.1.4 播期最优推荐模块	- 30 -
4.2 模型验证和评价	- 31 -
4.3 模型结果分析	- 31 -
4.4 小结	- 33 -
第 5 章 青稞产量优化方案制定	- 35 -
5.1 产量数据分析	- 35 -
5.2 产量优化方案制定	- 36 -
5.3 小结	- 37 -
第 6 章 结论与展望	- 38 -
6.1 主要结论	- 38 -
6.2 不足与展望	- 38 -
参考文献	- 40 -
致 谢	- 42 -

第1章 绪论

1.1 研究背景和意义

青藏高原是全球最典型的高寒生态系统之一，其特殊的地理与气候条件对农业生产构成了多重挑战。高原地区全年气温低、昼夜温差大、辐射强烈，且干旱多风、降水时空分布不均，极端天气频发，对作物正常生长发育产生严重影响。在此背景下，青稞（*Hordeum vulgare* L. var. *nudum*）作为青藏高原最主要的粮食作物，具有生育期短、适应性强、耐寒耐旱以及抗逆性强等特点，是高原农业生态系统中少数能够在海拔 4000 米以上大面积稳定种植的谷物作物，不仅是区域粮食安全的根基，更是维系农牧业可持续发展的核心资源。

日喀则市作为青藏高原青稞主产区，其农业气候资源具有鲜明的区域特征。该地区年均日照时长达 3300 小时，具有一定的光热资源优势，但干旱多风、低温少雨、低温冻害现象十分频繁，严重限制了青稞生产潜力。研究表明，拔节期至开花期若遭遇 -3°C 以下低温，青稞植株将面临不可逆的霜冻损伤，导致产量下降高达 30%(普卓玛等, 2023)。与此同时，气候变化加剧了降水不确定性与极端天气事件，进一步威胁青稞稳产。

在高寒复杂环境中，作物物候发育过程对环境因子响应尤为敏感，播期的科学选择十分重要。青稞作为典型的短生育期作物，其生育过程对温度积累和光周期感应敏感。因此，精准模拟青稞在不同生态条件下的生育过程，选择适宜播种窗口，对青稞在日喀则地区实现稳产增效具有重要意义。

作物生育期模型作为农业决策支持系统的核心工具，通过量化环境因子与作物发育的响应关系，为灾害规避与产量优化提供理论框架。传统的积温模型虽在温带地区广泛应用，但其未考虑光周期、休眠机制等因素，难以有效适配青藏高原高寒区作物的发育特征；后续平行模型与交互模型的提出在一定程度上弥补了传统模型的缺陷，但其模型参数依赖实验室校准，在青藏高原复杂的田间环境中适用性不足。近年来，生理休眠与生态休眠的双阶段理论(付等, 2020)和光周期响应动态模型(Caffarra, A, Donnelly, A, Chuine, I, 等, 2011; Caffarra, A, Donnelly, A, Chuine, I, 2011)等研究成果不断推动生育期模型朝着精细化发展。

基于此背景，本研究以日喀则青稞为对象，首先基于 2024 年 5-10 月的气象站观测数据和播期试验数据，结合温度响应、光周期响应及品种参数，开发适用于西藏生态环境的青稞生育期模型；其次，在生育期模型构建的基础上，进一步开发集成气象风险诊断（如灌浆期能否成熟、出苗期冻害概率）功能的适播期评估模型，分析不同播期条件

下青稞发育与环境匹配性，提出针对性播种策略与品种适应性建议。

本研究可为高寒生态区青稞栽培管理提供理论支撑与模型工具，为保障青藏高原粮食安全、提升农牧民收入等提供可靠理论与方法参考，具有重要的科学价值与实践意义。

1.2 国内外研究进展

1.2.1 青稞生育期特性

青稞是禾本科大麦属的一种禾谷类作物，因其籽粒内外颖与颖果分离，籽粒裸露，故又称裸大麦、元麦、米大麦。青稞分为白青稞、黑青稞、墨绿色青稞等种类。青稞在青藏高原具有悠久的栽培历史，距今已有 3500 年(郝帅等, 2023)。在我国青藏高原地区，具有耐寒、耐旱、耐瘠薄特性的青稞成为这一地区的主要粮食作物，在该地区的农业经济中占据重要地位(洛桑次仁等, 2023)。青藏高原春青稞生育期通常为 100-140 天，其中营养生长阶段（播种至拔节）和生殖生长阶段（孕穗至成熟）的界限以幼穗分化为标志。分蘖期是决定有效穗数的关键阶段，研究表明，当青稞主茎展开 3-4 叶时进入分蘖盛期，此阶段对水分敏感度最高，土壤含水量低于田间持水量 60%时会导致分蘖数减少 30%以上。拔节至抽穗期是株高增长与穗器官发育的核心时期，西藏农牧科学院通过连续观测发现，此阶段日均温需 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ ，积温需求为 $450-550^{\circ}\text{C} \cdot \text{d}$ ，低温延迟幼穗分化并降低小穗育性。灌浆至成熟期则直接决定籽粒产量与品质，拉萨河谷青稞灌浆期持续 35-45 天，籽粒干物质积累速率在花后 15-25 天达到峰值，此阶段光照不足或降水过多易诱发赤霉病和穗发芽。

青稞作为青藏高原特有的耐寒作物，其生育期特性与其对极端环境的适应性密切相关。近年来，国内外学者围绕青稞气候变化对生育期的影响、生育期缩短的驱动因子等方面开展了系统性研究。

气温上升是生育期缩短的直接驱动力。例如，日喀则地区 $\geq 0^{\circ}\text{C}$ 积温初日每 10 年提早 1.8 天，终日推迟 3.4 天，有效积温增加显著加速了青稞的发育进程(巴桑次仁等, 2018)。此外，降水时空分布不均加剧了生育期内的水分胁迫。甘孜州青稞全生育期干旱频率达 83%，抽穗至成熟期干旱强度在 2001 年后发生突变，西南部干旱高发区对产量形成构成显著威胁(史继清等, 2023)。光照条件的变化同样影响生育期长度：分蘖期和孕穗期日照时数与生育期天数呈正相关，而拔节期和开花期则呈负相关，表明光周期响应在不同生育阶段存在差异(石磊, 2016)。

同时青稞生育期对气候变化的响应呈现显著空间异质性。海拔 3500 米以上的高海拔站点（如山南）光温生产潜力高且稳定（可达 $12000 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ），而海拔 3000 米左右的

低海拔站点（如林芝）生产潜力波动较大，对太阳辐射敏感性更高(弓开元等, 2020)。这种差异与热量和辐射的垂直分布密切相关：高海拔地区昼夜温差大、辐射强，有利于光合产物积累；低海拔地区则因高温胁迫和降水集中导致生产潜力受限(郝帅等, 2023; 弓开元等, 2020)。此外，气候变暖使青稞潜在种植界限向高纬度、高海拔扩展，理论上可增加种植面积，但实际生产中需平衡生态脆弱性与资源承载力(弓开元等, 2020)。

1.2.2 生育期模型研究现状

物候学(Phenology)是研究生物有机体周期性生命现象与季节性环境变化相互关系的学科，其研究对象涵盖植物种子萌发、开花结果以及动物迁徙、繁殖等生物学时序事件。这些现象作为生物对环境因子的响应机制，已成为评估局部地区和全球尺度气候变迁对生物圈影响的重要指标。

在农业科学领域，美国联邦农业和林业生物研究中心(BBA)于 1979-1988 年间曾构建多物种发育阶段量表，但其存在不同作物量表对相同生理阶段采用差异化编码的问题，对处于相同生长阶段的不同作物而言，缺少一个共同的编码，即缺乏同源生长阶段的直接可比性。这种编码系统的非统一性严重制约了多物种物候数据的整合分析与模型构建(European cooperation in science and technology 等, 2009)。Bruns、Chmielewski 与 van Vliet (2003) 以及 Meier (2003) 通过实证研究确立了现代农艺实践中植物物候监测的科学范式，并系统论证了 BBCH (Biologische Bundesanstalt, Bundessortenamt and Chemische Industrie) 编码体系在精准农业中的核心价值(Bruns 等, 2003; Meier 等, 2009)。该体系通过标准化发育阶段划分，有效解决了传统物候观测中存在的形态学异质性问题。

随着全球变化研究的不断深入，植物物候研究得到了越来越多地关注。植物物候模型(指过程模型)是基于植物对外部环境因子的响应机制而建立的用以模拟植物生长发育的数学方程(李等, 2005)。Reaumur(1735)首次发现有效积温的积累会影响农作物的物候过程，提出积温模型(spring warming model 或 growing degree days model)(Hänninen, 2016)。积温模型认为植物萌芽前只经历一个休眠阶段，即生态休眠阶段，所以积温模型也称为一阶段模型。在全球气候变化影响下，植物物候发生显著改变，积温模型的基本假设不断受到挑战。随着对植物响应气候变化的研究逐渐深入，将植物休眠期细分为两个阶段，即生理休眠阶段和生态休眠阶段。研究发现植物生长首先需要一定冷激累积以打破生理休眠，从而进入到生态休眠阶段。在生态休眠阶段，植物需要热量或积温以打破生态休眠。因此，两个阶段的环境因子都会影响植物物候，考虑这两个阶段的物候模型也被称之为二阶段模型(two phase model)(付等, 2020)。众多学者提出了考虑生理休眠期与生态

休眠期之间不同相关关系的模型, Richardson 等(1974)认为生理休眠期和生态休眠期是两个完全独立的过程, 在时间上具有连续性, 进而在积温模型的基础上提出了连续模型(sequential model)(Arlo Richardson 等, 1974)。Landsberg(1974)基于苹果树的萌芽特性发现生理休眠和生态休眠是同时进行的, 两个休眠阶段在时间上可以重叠, 提出了平行模型(parallel model)(LANDSBERG 等, 1974)。Kramer(1994)则认为萌芽过程中生理休眠和生态休眠交互出现, 发明了交互模型(Alternating model)(Kramer, 1994)。上述模型仅考虑温度的影响, 近年来的一些研究也将光周期的影响纳入物候模型, 例如, Caffarra 等(2011a, 2011b)基于室内控制实验提出 DORMPHOT 模型, 提高了春季物候模拟精度(Caffarra, A, Donnelly, A, Chuine, I, 等, 2011; Caffarra, A, Donnelly, A, Chuine, I, 2011)。

近年来, 基于生理生态过程的生育阶段动态模型逐渐应用于青稞研究。例如, 积温-光周期耦合模型将青稞生育期细化为 12 个亚阶段, 通过量化温度与光周期对发育速率的协同效应, 可精准预测不同品种在气候变化下的生育期变化(弓开元等, 2020)。在西藏日喀则地区的模型验证中, 研究者结合青稞光温敏感性参数(如开花期积温需求)和光合作用效率曲线, 构建了高海拔青稞生育期预测模块。模型参数化过程中, 利用长期田间观测数据(如叶面积指数、干物质积累)和基因型-表型关联分析结果(如 EAM8 基因调控的开花时间变异)进行校准, 显著提升了模拟精度(Xia 等, 2017)。

1.2.3 播期研究现状

播期是调控青稞生育期与产量的核心栽培因子, 其直接影响青稞生育期进程、产量形成及抗逆能力。

西藏农牧科学院的研究表明, 播期对青稞籽粒产量的影响显著大于施肥和种植密度, 其中早播(如 4 月 10 日)处理的“藏青 2000”品种百粒干重达 5.8 g, 较晚播处理增产 39.5%(孙全平等, 2016)。籽粒灌浆速率与播期呈负相关, 早播条件下青稞灌浆期延长, 平均灌浆速率排序为“藏青 2000” > “藏青 320” > “喜马拉雅 22” > “藏青 13”, 且灌浆高峰期提前, 有效避开后期低温胁迫(史继清等, 2023; 孙全平等, 2016)。此外, 早播通过优化光合产物分配, 提高成穗率与穗粒数, 千粒重显著增加(赵金兰, 2010)。

青藏高原气候变暖背景下, 播期调整成为应对生育期缩短的关键策略。研究显示, 1992-2012 年日喀则地区青稞全生育期以 0.68 天/年速率缩短, 早播(如提前 10-15 天)可延长有效积温利用期, 使灌浆期与 7 月高温期匹配, 避免早霜危害(赵金兰, 2010; 伦珠朗杰等, 2019)。门源县试验表明, 3 月中旬顶凌播种(土壤解冻 5-7 cm)可使蜡熟期提前至早霜前, 黄矮病发生率降低 80%, 杂草生物量减少 60%, 产量提升 48.5%(赵金兰,

2010)。模拟预测表明，至 2050 年青稞全生育期将缩短 8-12 天，早播结合抗逆品种可使光温生产潜力提升 7%-15%(伦珠朗杰等, 2019)。

1.3 研究内容与技术路线

1.3.1 研究内容

(1) 青稞生育期模型开发

基于选定的青稞品种，结合温度响应函数和光周期响应函数，构建生育期模型，再通过当季更精细、更高质量的试验数据进行校准和验证，提高模型的准确性和可靠性。

(2) 青稞适播期模型构建

模型在已有青稞生育期动态模拟模型的基础上，引入冻害风险识别与成熟性判别模块，通过逐日气象数据驱动模拟不同播期条件下的发育进程与关键风险窗，筛选青稞的适宜播期区间。

(3) 青稞产量优化方案制定

基于本研究构建的日喀则青稞生育期模型和播期模型在逐日模拟 2024 年播期范围内各候选日期的青稞生育进程、冻害风险与成熟条件后，筛选出同时具备较长生育期、低冻害风险且可顺利成熟的青稞品种及播种日期。

1.3.2 技术路线

本研究旨在建立青稞的生育期和适播期模型，实现青稞选种和产量优化，技术路线如图 1-1 所示：

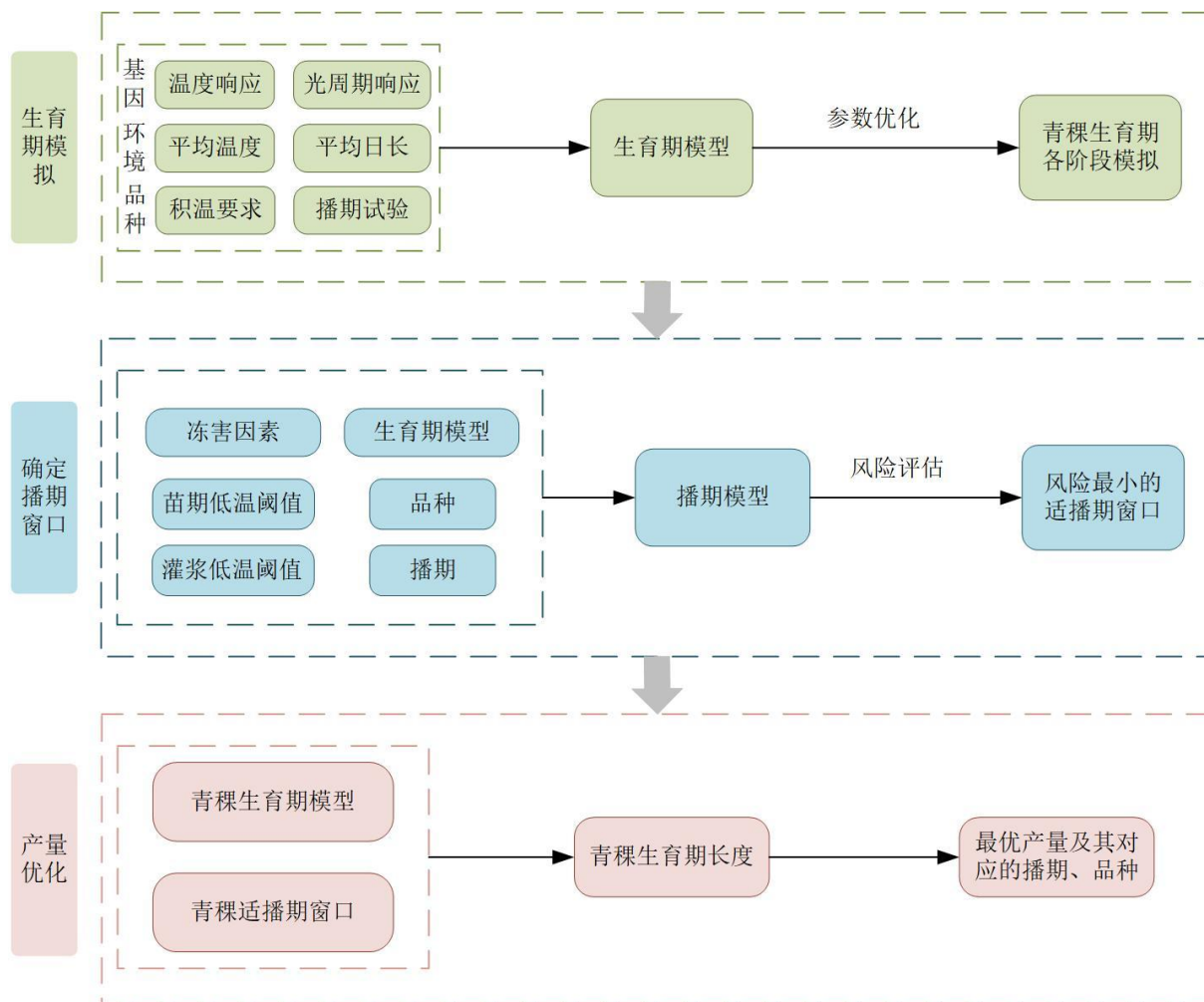


图 1-1 技术路线图

第2章 材料与方法

2.1 研究区概况

研究区位于西藏自治区西南缘的日喀则市桑珠孜区($29^{\circ} 12'-29^{\circ} 19' N$, $88^{\circ} 54'-89^{\circ} 05' E$, 海拔 3760-5820 米), 地处喜马拉雅山脉北麓与雅鲁藏布江中上游河谷交汇带, 地貌类型呈现典型的高原山地立体分异特征, 平均海拔在 4000m 以上, 受印度洋暖湿气流与西风带交互作用影响, 研究区形成独特的高原亚干旱气候: 年均气温 2.8 至 5.6 $^{\circ}C$, 最热月(7 月)均温 12.4 至 14.7 $^{\circ}C$, 最冷月(1 月)均温-6.3 至-4.1 $^{\circ}C$; 空气稀薄, 气压低, 氧气少; 太阳辐射强, 年太阳总辐射量达 7500-8000 MJ/m², 紫外线辐射强度为平原地区的 1.5-2.3 倍, 光合有效辐射(PAR)日均值达 38.7 mol/m²/d; 日照时间长, 年均日照时间达 3300 小时; 干旱多风, 低温少雨雪, 降水时空分布极不均衡, 年降水量为 300mm-450mm 且 70%集中于 6-9 月, 年潜在蒸发量达 1600-2000 mm, 干燥指数(AI)为 1.8-2.5, 属典型水分限制型农业生态系统; 全区无霜期在 120 天以上。5 月至 9 月, 气候温和, 空气湿润, 雨量充沛, 适宜青稞生长。

日喀则是西藏自治区农牧业大市, 青稞种植集中于海拔 3800-4300m 的中高海拔地带, 该范围约占全区耕地面积的 78.6%。区域农业格局呈现显著垂直地带性特征: 3800-3900 m 沿江河谷地带为灌溉农业优势区, 土壤以山地灌丛草原土为主, 有机质含量 1.8-2.4%, 有效积温($\geq 0^{\circ}C$) 1800-2000 $^{\circ}C \cdot d$, 主要种植早熟青稞品种; 4100-4200 m 的拉孜台地属雨养农业区, 分布着典型高山草甸土, pH 值 7.2-7.8, 速效氮含量 64-78 mg/kg, 适种中晚熟耐寒品种; 4300 m 以上高寒边际种植区土壤发育程度低, 砾石含量达 35-45%, 有效生育期仅 90-105 天, 依赖极早熟品种。这种立体农业结构使研究区青稞年产量稳定在 23-26 万吨, 占西藏自治区总产的 47.3-52.8%, 且产量波动系数($C_v=12.7\%$)显著低于周边地区。日喀则地区在高原粮食安全体系中占据核心地位, 被誉为“西藏粮仓”。

值得注意的是, 研究区农业生态系统具有高度脆弱性特征: 近 30 年气候变暖速率达 0.42 $^{\circ}C/10a$, 显著高于全球平均水平, 导致终霜日提前 4.2 天/10a, 始霜日推迟 3.8 天/10a, 有效生育期延长但极端低温事件频次增加。这种气候变化与传统的藏历农时体系产生显著冲突, 特别是藏历闰月引发的播种期滞后已造成苗期冻害发生率上升至 17.3-24.6%。此外, 冰川融水补给减少导致河谷区灌溉保证率下降, 近五年春旱发生频率较上世纪 90 年代增加 38.5%, 这对依赖有限水热资源的青稞生产系统构成严峻挑战。

研究区概况如图 2-1 所示。

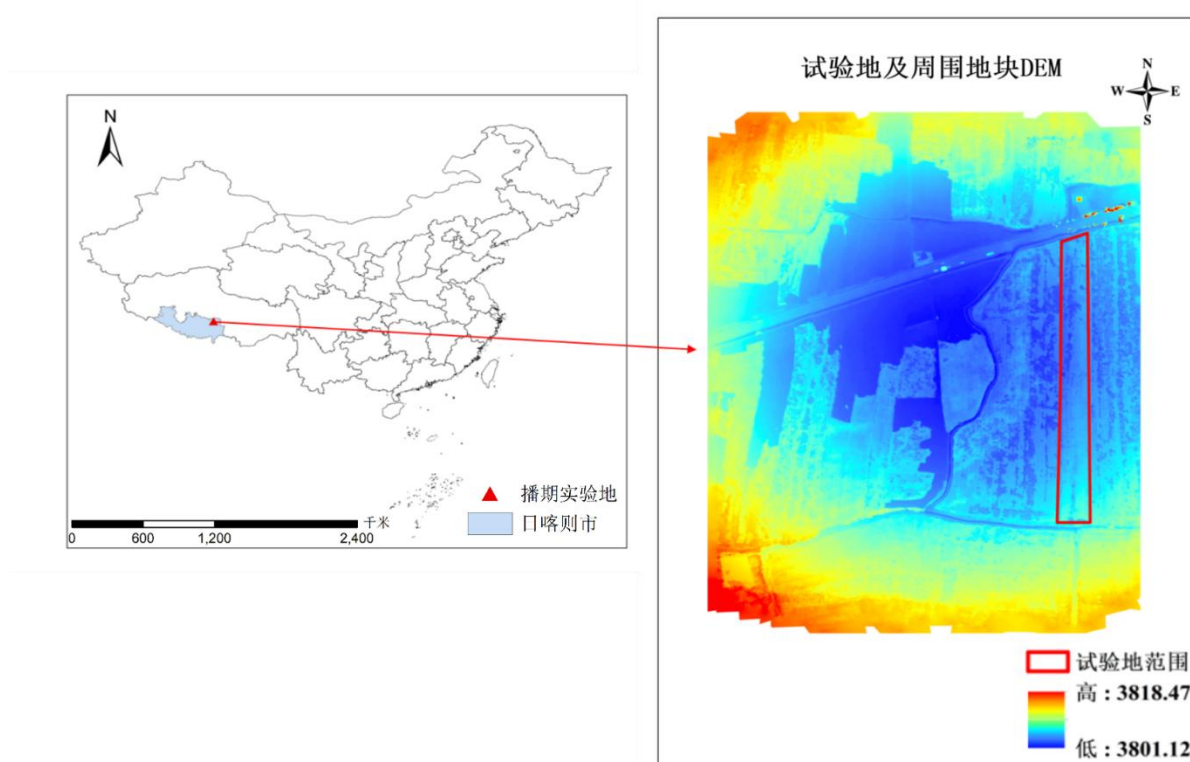


图 2-1 研究区概况图

2.2 试验设计

本研究对日喀则市桑珠孜区甲措雄乡主栽的三个青稞品种进行播期实验，试验分为四个播期开展，设置三个品种、三个重复的双重要素交叉实验，旨在通过多变量交互分析筛选抗逆性强、产量最优的品种与播期组合。

2.2.1 试验品种

试验选择西藏日喀则青稞主产区主栽的 3 个代表性栽培品种，三品种生育期集中于 118-135 天，符合青藏高原无霜期短（150-180 天）的生态约束：

（1）藏青 2000：属中晚熟春性六棱裸大麦种质，全生育期 120-135 天。该品种茎秆机械强度优异，抗倒伏性突出（抗折力 ≥ 450 N）。在病害抗性方面，对散黑穗病表现中度敏感（发病率 12.3-15.8%），但对条纹病保持完全抗性。适应海拔 3600-4100 米生态区种植；

（2）藏青 3000：中晚熟春性六棱裸大麦新品种，全生育期约 118 天。表现出显著的低温适应性，在日均温 3.5℃ 条件下仍能维持正常生理代谢。对蚜虫类害虫抗性显著（虫口减退率 78.6%），抗倒伏指数达 0.87。病害抗性特征与藏青 2000 相似，散黑穗病感染率 10.2 - 13.5%，但对大麦黄矮病毒（BYDV）具有较强耐性。宜高寒农区推广种植；

（3）喜马拉雅 22 号：中熟春性六棱裸大麦代表品种，全生育期稳定在 134 天。具有

双相环境适应性，既能在干旱胁迫下维持 0.65-0.72 的叶片相对含水量，又可在土壤湿度饱和条件下保持根系活力（ADH 活性 \leq 35 U/g FW）。抗倒伏能力显著（茎基节间粗度 \geq 3.8 mm），对条纹病抗性较弱（病情指数 42.6），但散黑穗病发生率控制在 9.8%以下。特别适应藏南河谷温凉湿润生态类型区。

2.2.2 播期设计

针对日喀则地区青稞播种时机的时空分异特征，基于区域农业气候资源分析表明：该地区的最适播种窗口集中于 4 月下旬至 5 月下旬，其中海拔 3900m 高寒地带的最优播种时段为 5 月 5 日至 15 日。鉴于藏历阴阳合历的周期性调节特征，闰月的存在导致全年月序后移，引发的物候相位偏移导致传统农事历法与现代气候周期失去同步，传统农事历法中的播种节点相应延迟 30 \pm 2 天。

因此本试验设置播期为：5 月 12 日、5 月 22 日、5 月 31 日、6 月 9 日。

2.3 数据来源

2.3.1 气象与土壤数据

本研究所需的气象数据由日喀则气象站点提供，指标包括逐日尺度的最高气温（TMAX）、最低气温（TMIN）、累计降雨量（PRCP）、日照时长（DL）及太阳辐射量（SRAD）。土壤数据涵盖 0 - 20 cm 剖面层的有机质、有效磷、硝态氮及电导率，通过定点采样获取。

2.3.2 青稞生育期数据

本试验依据 BBCH 标准（如表 2-1 所示）记录青稞 10 个关键生育阶段（播种、出苗、三叶、分蘖、拔节、孕穗、抽穗、开花、乳熟、成熟），记录标准为小区中超过一半的作物达到某一生育阶段。

表 2-1 青稞 BBCH 标准记录表

生育期	BBCH	发育特征
幼苗期	00	发芽
	09	出苗，胚芽鞘穿透土壤表面(开裂阶段)
	10	胚芽鞘第一叶
	11	展开第一叶
	12	2 叶展开
	1.	3 叶展开-9 叶展开
	19	展开 9 片或更多叶子

接下页

表 2-1 青稞 BBCH 标准记录表（续）

生育期	BBCH	发育特征
分蘖期	20	没有分蘖
	21	第一个分蘖出现
	22	第二个分蘖出现
	2.	分蘖持续出现
	29	分蘖结束，检测最大分蘖数
	30	分蘖结束，开始拔节
拔节期	31	分蘖节上方 1cm 的第一个节
	32	节点 2 在节点 1 上至少 2cm
	33	节点 3 在节点 2 上至少 2cm
	3.	拔节阶段持续
	37	旗叶出现，未伸展
	39	旗叶完全展开
孕穗期	41	孕穗初期，旗叶鞘开始伸长
	43	孕穗中期，旗叶鞘明显伸长
	45	孕穗后期，旗叶翘肿胀
	47	剑叶鞘开口
	49	肉眼可见第一个芒（仅见芒）
	51	花絮开始显现，第一小穗可见
抽穗期	52	20%花絮出现
	53	30%花絮出现
	54	40%花絮出现
	55	花絮出现一半
	56	60%花絮出现
	57	70%花絮出现
	58	80%花絮出现
	59	抽穗，花絮完全出现
	61	第一个花花药可见
	65	50%花药可见
开花期	69	全部花药可见
乳熟期	71	第一粒达到一半大小
	75	颗粒达到最终大小但仍为绿色
成熟期	85	谷物成型但依旧柔软，指甲抠不出来印
	87	谷物成为固体，指甲可以抠出来印
	89	全熟，指甲扣不出来印
	92	完全成熟
衰落期	93	白天颗粒松动
	97	植物死亡或者倒掉
	99	收获

2.3.3 产量数据

成熟期青稞各试验小区内随机划定 3 个 1m² 的样方，使用镰刀沿地表齐茬收割样方

内全部青稞，单一样方内青稞独立装于尼龙网袋中，绑紧袋口，确保样品完整性。网袋外设吊牌标记，标记内容包括青稞播期、品种和样方编号，以免称重和数样时混淆。各样方内挑选 50 个穗放入包装袋，样品包装袋外设吊牌标记，标记内容包括青稞播期、品种、样方编号和倒伏面积占比，如 0512-喜马拉雅 22-01-50%倒伏。

从各样方中随机选取 20 个均匀穗，记录分蘖数、小穗数和穗粒总数。

使用电子天平上测定各样方内全部的青稞植株，同步统计样方内的青稞总穗数并记录于田间调查记录表。将各样方内挑选的 50 穗寄回学校实验室，自然风干后机械脱粒，去杂后取分析样品 1000 粒，65℃烘干至恒重后测定烘干重，即为千粒重。

2.4 数据处理与分析

2.4.1 气象数据

Mann-Kendall 非参数检验（以下简称 MK 检验）是世界气象组织（WMO）推荐的一种非参数检验法，常用来分析降水、气温、径流等水文气象要素时间序列的趋势变化，其优点是不需要样本遵从一定的分布，也不受少数异常值的干扰，计算简便，适合于水文、气象等非正态分布的时间序列(魏凤英, 1999)。

本文选用 MK 检验方法对日喀则试验田 2024 年逐日气象数据进行趋势分析。假定一组气象时间序列 $X=(x_1, x_2, \dots, x_n)$ (n 为样本容量)，构造标准正态分布统计量 Z 公式如(2-1)至(2-4)所示：

$$Z = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{\text{Var}(S)}}, & \text{if } S > 0 \\ 0, & \text{if } S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{\text{Var}(S)}}, & \text{if } S < 0 \end{cases} \quad (2-1)$$

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sgn}(x_j - x_i) \quad (2-2)$$

$$\text{sgn}(x_j - x_i) = \begin{cases} +1, & \text{if } (x_j - x_i) > 0 \\ 0, & \text{if } (x_j - x_i) = 0 \\ -1, & \text{if } (x_j - x_i) < 0 \end{cases} \quad (2-3)$$

$$\text{Var}(S) = \frac{[n(n-1)(2n+5) - \sum_{k=1}^m t_k(t_k-1)(2t_k+5)]}{18} \quad (2-4)$$

式中：当 $n > 10$ 时，统计量 S 近似服从正态分布； $\text{Var}(S)$ 为方差， m 为相等数据的组数， t_k 为第 k 组相等数据的个数。

对于给定的显著性水平 α ：若 $|Z| \geq Z_{1-\alpha/2}$ ，则否定原假设，说明序列存在显著上升或下

降趋势，且当 $Z>0$ 时，存在显著上升趋势， $Z<0$ 时，存在显著下降趋势； $|Z|<Z_{1-\alpha/2}$ ，则原假设成立，说明序列不存在明显趋势变化，当 $Z>0$ 时，存在无显著上升趋势， $Z<0$ 时，存在无显著下降趋势。本研究取 $\alpha=0.05$ 。

降水量（Precip）呈现弱显著下降趋势（ $Z = -0.98$ ， $p = 0.327$ ）。降水在月尺度上的波动较为剧烈，表现出典型的高原雨季（7 - 8 月）集中型分布特征，同时在 9 - 10 月出现了异常的降水峰值。5 - 11 月恰为青稞生育的关键窗口，水分资源的时序分布直接决定了苗期出土顺利程度、拔节至抽穗阶段的营养生长强度以及灌浆期的物质转运效率。雨季提前结束或降水量减少，可能导致土壤有效水分不足，加剧灌浆后期的干旱胁迫，限制高产。

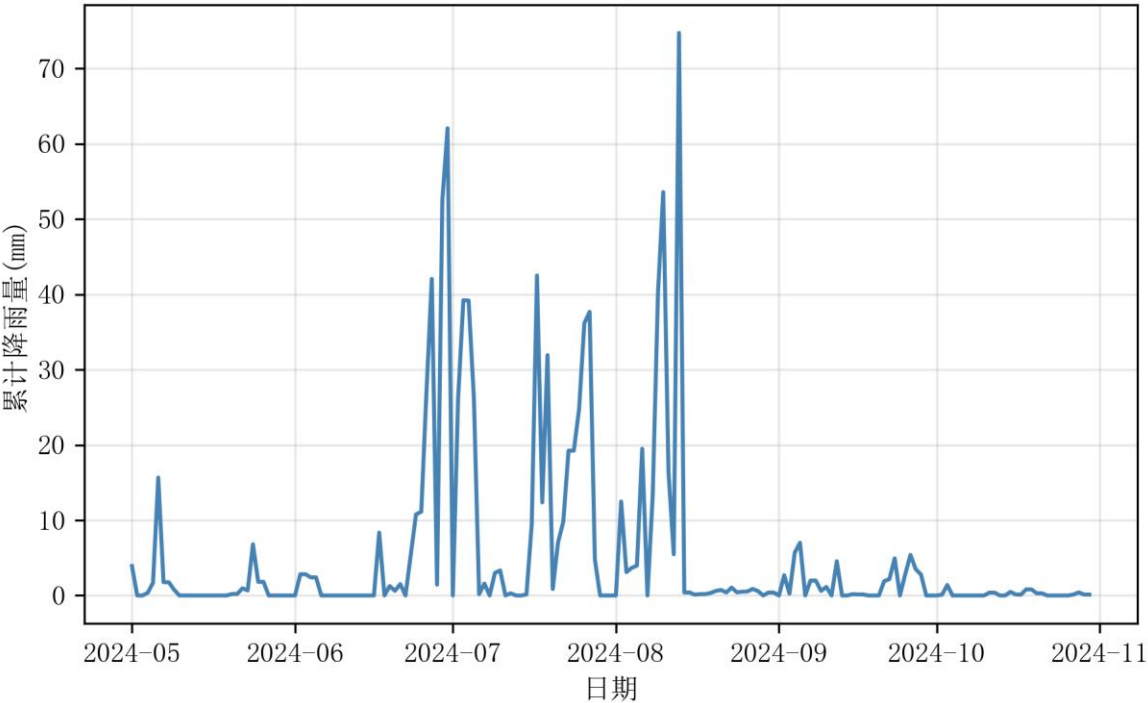


图 2-2 降水量 MK 检验结果图

日平均温度（ T_{avg} ）在 5 - 10 月期间呈现“前升后降”的双峰趋势，整体趋势表现为显著下降（ $Z = -4.25$ ， $p < 0.001$ ），气温峰值集中在 6 - 8 月间，符合青藏高原地区夏季短促、温升迅速但持续时间有限的特点。此类温度变化模式对青稞早期生长阶段极为关键，出苗至拔节期间积温不足将延缓生育进程，而高温迅速退却可能导致灌浆末期热量供应不足，影响籽粒灌浆速率与干物质积累。此外，温度波动还可能加剧冻害或高温胁迫的偶发风险，尤其对过早或偏晚播种的青稞生育历程产生放大效应。

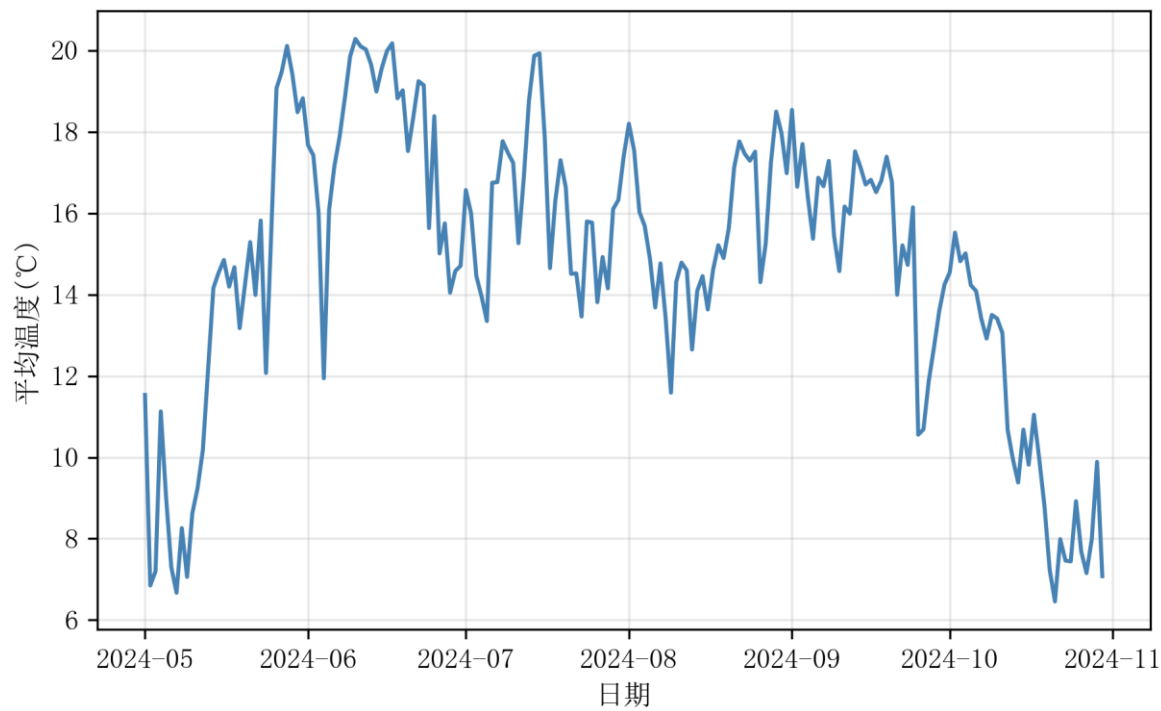


图 2-3 平均温度 MK 检验结果图

日均太阳辐射量（SRAD）呈现显著下降趋势（ $Z = -2.17$ ， $p = 0.007$ ），反映出观测期内辐射资源总体下降趋势。其潜在机制可能包括大气气溶胶浓度增加、云量增多以及空气湿度变化等因素的叠加效应。辐射能量是驱动光合作用的核心要素，在青稞的营养生长期和灌浆期中均起到决定性作用。若灌浆高峰期辐射水平偏低，将直接影响碳同化速率与籽粒充实程度，不利于产量形成。

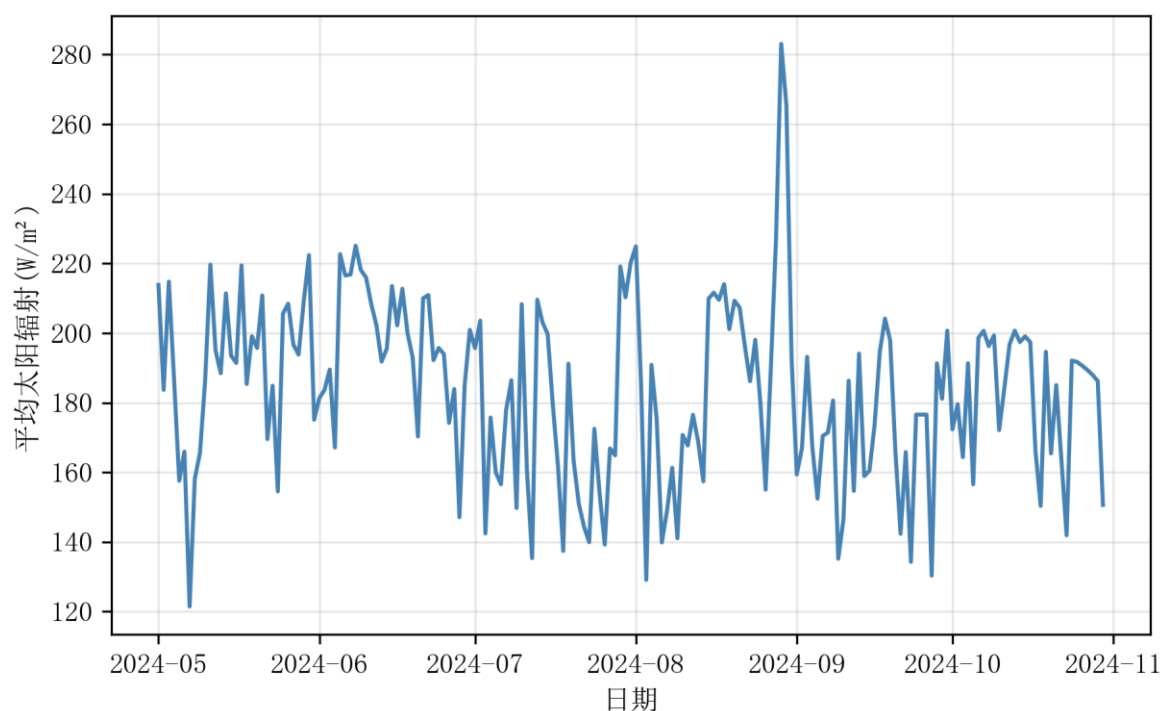


图 2-4 日均太阳辐射量 MK 检验结果图

日照时长 (DL) 亦呈现极显著下降趋势 ($Z = -13.78$, $p < 0.001$), 这一变化趋势与北半球的季节性变化规律相符, 即随着季节由夏季过渡至秋季和冬季, 日照时长逐渐缩短。具体而言, 日照时长从 5 月初的约 13.5 小时逐步下降至 11 月初的约 10.5 小时。

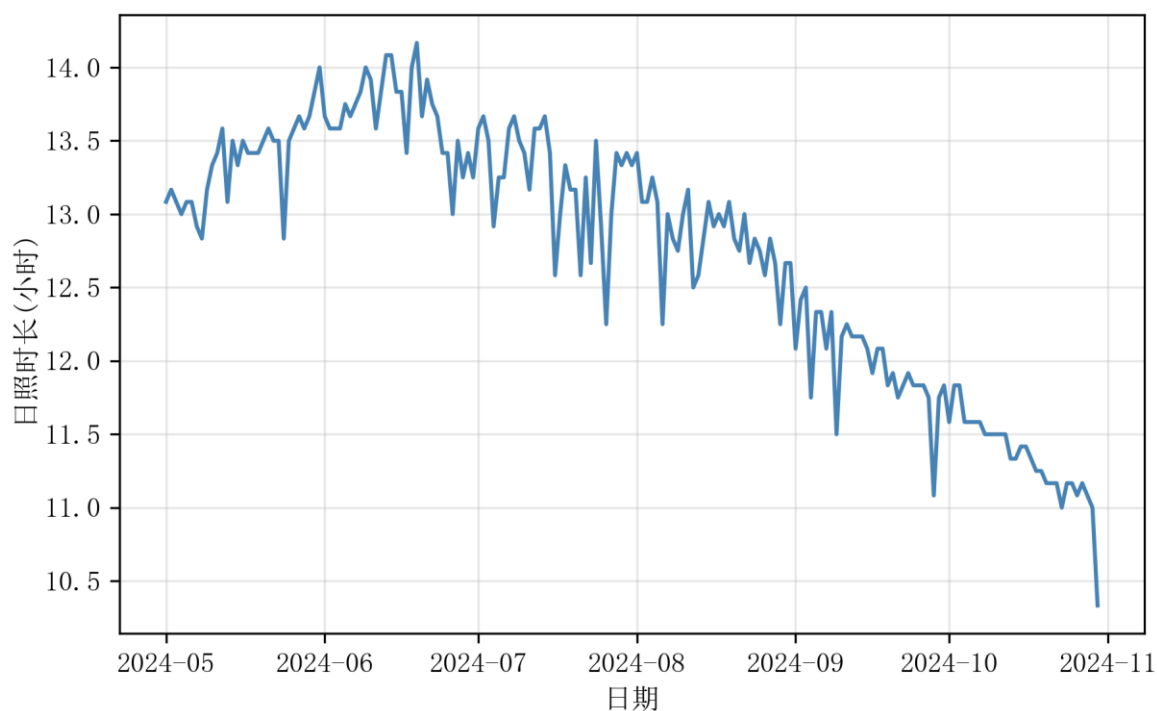


图 2-5 日照时长 MK 检验结果图

综上所述，2024 年 5 - 11 月期间，日喀则试验区气象要素普遍呈现显著下降趋势，体现区域性、季节性气候特点，深刻影响青稞生育周期内的发育进度与产量构建。因此，在开展播期优化与品种选择工作时，必须充分考虑当前气候变异的方向性特征，构建更加适应热量限制与辐射削弱环境的栽培管理策略，提升系统整体的气候适应能力与稳产保障水平。

2.4.2 土壤数据

实测土壤数据需通过严格的质量控制流程以验证其合理性，首先对原始土壤数据剔除异常值，分析各指标是否符合客观规律。

基于对不同播期条件下 8 月与 10 月土壤有机质（Soil Organic Matter, SOM）及全氮（Total Nitrogen, TN）含量的对比分析结果（图 2-6 和图 2-7）显示，10 月土壤中 SOM 和 TN 水平均显著高于 8 月（ $p < 0.05$ ），呈现出明显的时序积累效应。此差异主要归因于青稞生育中后期植物根系的持续生长及其分泌物释放，加之收获期地上和地下残体逐步还田，为土壤提供了丰富的碳氮源，促进了有机质的累积与氮素的转化固定。同时，进入 10 月后，随着气温逐步下降及土壤水分状况趋于稳定（湿度适中、蒸发减弱），微生物活性由快速分解阶段转向稳定矿化阶段，提高了有机质向腐殖质的转化效率，并在一定程度上增强了氮素的微生物固定作用。这一过程与高寒地区“秋季腐殖化过程活跃化”特征相一致，表明晚期气候条件对土壤有机碳和氮素积累具有正向调节作用。

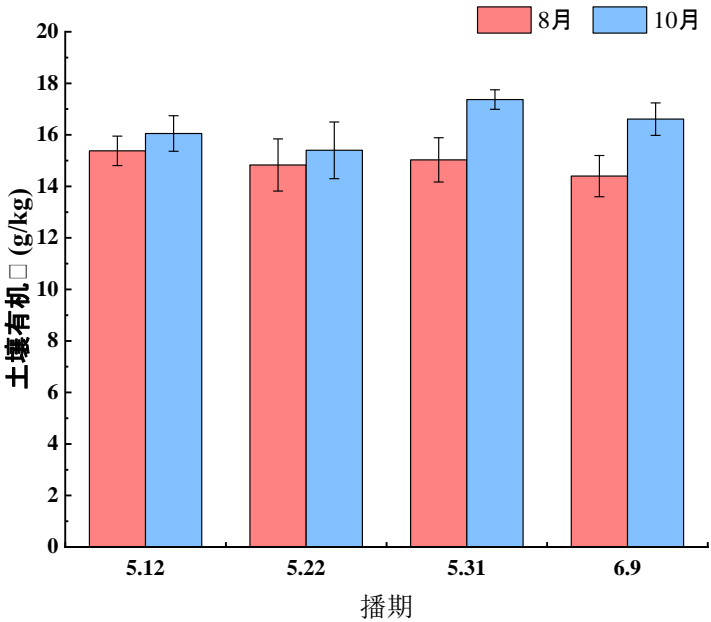


图 2-6 土壤有机质对比分析图

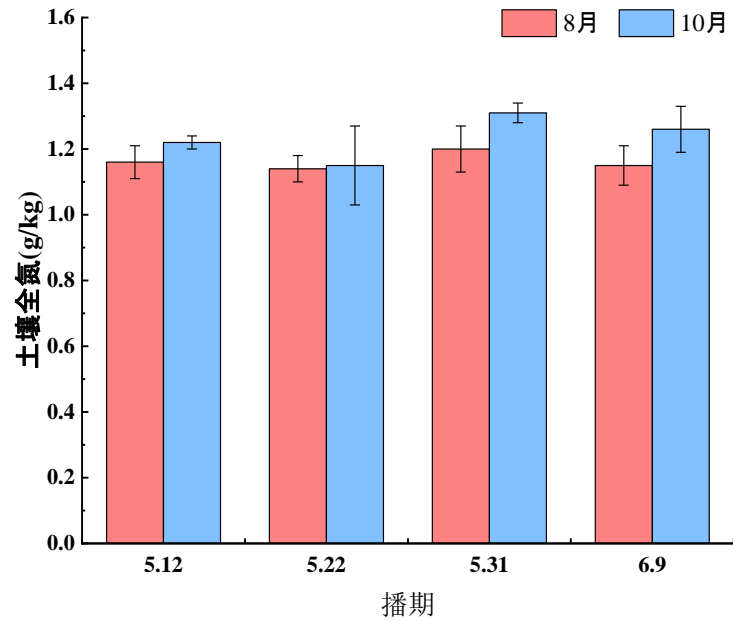


图 2-7 土壤全氮对比分析图

针对土壤重量含水量（Soil Water Content, SWC）的季节性变化特征分析（图 2-8）表明，10 月 SWC 水平较 8 月显著升高，差异达统计显著性水平（ $p < 0.05$ ），反映出显著的水分积累效应。尽管 8 月为降水高峰期，累积降水量显著高于 10 月，但该阶段处于高原夏季辐射强烈、气温偏高的时段（日均气温 $\geq 15^{\circ}\text{C}$ ），强烈的太阳辐射通量与高温环境导致地表潜在蒸发蒸腾（ ET_0 ）显著增强，致使土壤表层水分迅速散失，难以有效储存于耕作层土壤中。相比之下，10 月进入青藏高原地区的冷凉生长末期，气温显著下降（日均气温 $\leq 10^{\circ}\text{C}$ ），且日照时长逐渐缩短，整体气象条件转向以低辐射、低温为主的状态，有效抑制了土壤水分的蒸发速率。同时，由于作物生育进程接近终止，作物蒸腾耗水需求显著降低，进而减缓了土壤水分的自然耗散过程。这种由“高温高蒸发”向“低温低蒸发”的转变过程，促成了 10 月土壤水分的季节性盈余。

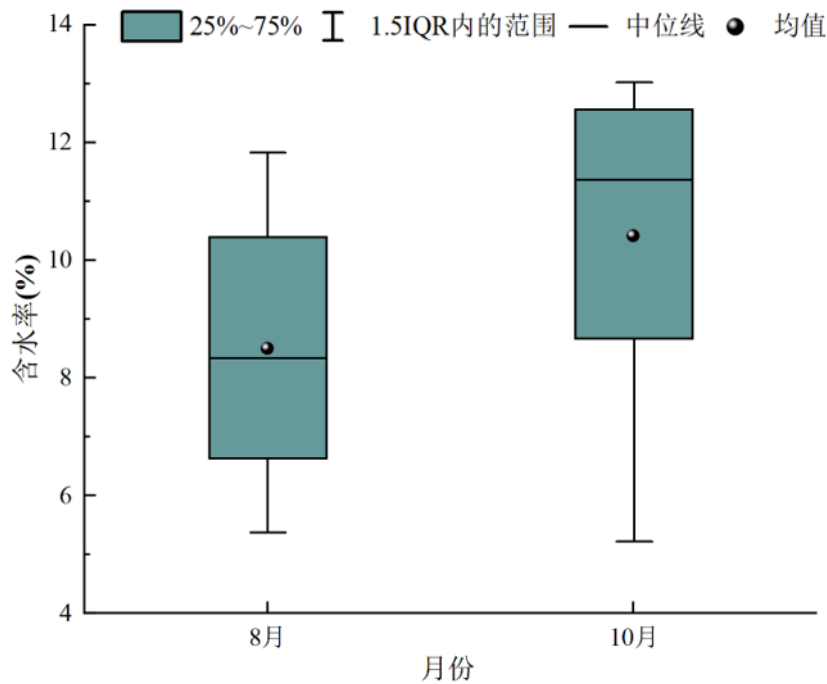


图 2-8 土壤重量含水量变化特征图

基于对试验区土壤理化性质与养分含量数据的综合分析结果表明，不同青稞品种在土壤环境适应性方面表现出显著差异。这种差异不仅体现在品种对特定土壤水分与养分条件的生理响应能力上，还包括其生长发育过程中的关键农艺性状特征差异。例如，不同品种在株高、根系形态结构、分蘖能力及叶片光合效率等方面存在显著变异，这些特征直接影响其对水分和氮素等养分资源的获取与利用效率。部分品种表现出较强的水分保持能力与根际吸收潜力，从而在土壤水分含量较低的环境下仍能维持正常的生理代谢与产量形成。此外，8 月与 10 月采集的土壤有机质、全氮含量、土壤含水量等指标，揭示了青稞品种对土壤环境反馈机制的动态特征，反映了作物—土壤—气候系统中存在的复杂耦合关系。

综上所述，本研究中获取的土壤样本数据在空间一致性、时间完整性及数据质量方面均满足科学性要求，能够为青稞品种和生育期分析提供坚实的数据支撑。

2.5 模型构建及评估

2.5.1 模型构建方法

(1) 温度响应函数

积温法假设某一植物或作物品种完成某一发育阶段所要求的超过某一限定值的日平均温度的总和为一固定常数，将温度因素与作物生育速度作为线性关系处理，因此根据逐日温度值就可以通过积温推算发育进程(Gao 等, 1992; 殷新佑等, 1999)。本研究引入温度响应函数，旨在更精准地刻画作物在不同温度条件下的发育进程。

温度响应函数利用基数温度来计算日积温，并利用日积温来预测发育阶段的发生。在青稞的研究中，温度响应函数可以用于模拟青稞对温度变化的响应，尤其是在青藏高原等气候变化敏感区域。公式如（2-5）所示：

$$f_T(T_i, T_b) = \begin{cases} T_i - T_b, & \text{if } T_b > T_i \\ 0, & \text{if } T_i < T_b \end{cases} \quad (2-5)$$

式中， T_i 为第*i*天的日平均气温； T_b 为作物生育起始的基温。

（2）光周期响应函数

光周期响应函数在对日照长度敏感的发育阶段考虑日长对物候的影响，即光周期效应。参考 DSSAT 系统中的 CERES 模型中，作物的发育进程受到日长的影响(Jones 等, 2003)。本研究通过设置临界日长和日长敏感性参数，来模拟作物对日长变化的响应。当日长超过临界值时，发育速率会根据敏感性参数进行调整。公式如（2-6）所示：

$$f(DL) = \begin{cases} 1 + P_s \times (DL - P_{crit}), & \text{if } DL > P_{crit} \\ 1, & \text{if } DL \leq P_{crit} \end{cases} \quad (2-6)$$

式中， DL 是日长； P_s 是日长敏感系数； P_{crit} 是临界日长。

（3）冻害风险指数

作物的冻害风险主要受最低气温（ T_{min} ）影响，青稞是耐寒性较强的作物，在不同生育阶段的抗冻能力不同。一般来说，青稞的种子发芽和幼苗期较为敏感，低于一定温度时会遭遇冻害。公式如（2-7）所示：

$$F_d = \sum_{i=1}^n P(T_{min,i} < T_{freeze}) \quad (2-7)$$

式中， $T_{min,i}$ 是第*i*天的最低气温； T_{freeze} 是冻害的阈值温度，通常为 -1°C 至 -5°C ； $P(T_{min,i} < T_{freeze})$ 是气温低于冻结温度的概率，取值 0 或 1； n 为总天数。

2.5.2 模型评估方法

模型评估方面，单一评估指标在表征模型综合性能方面存在局限性，因此本研究运用多元统计指标系统评估模型性能，通过平均绝对误差（MAE）反应模型整体精度，均方根误差（RMSE）反应模型稳定性。公式如（2-8）和（2-9）所示：

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i - \bar{y}_i| \quad (2-8)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y}_i)^2} \quad (2-9)$$

式中， n 是样本数量； y_i 和 \bar{y}_i 分别是第*i*个发育阶段的观测日期和模拟日期。

对于 MAE 和 RMSE，数值越小，估算结果和实测结果间差距越小，模型精度更高。

第3章 青稞生育期模型构建

作物生育期模型是农业系统模型的重要组成部分，也是连接作物生长动态与环境响应过程的核心工具。该类模型通过数学与机制建模方法，定量描述作物从播种至成熟全过程中与环境因子（如温度、光照、水分等）的动态交互关系，从而为产量预测、播种策略优化和农业气象风险评估等提供关键支持。

本章以青稞为研究对象，依据其在不同生态环境中的生育特征与生理响应规律，构建了一个面向高寒区的作物生育期模拟模型。模型以 $G \times E$ 框架为基础，综合考虑品种遗传特性（Genotype, G）和气候环境变量（Environment, E）对作物发育过程的耦合调控机制。其中，环境驱动模块聚焦温度与光周期两个主导因子，通过构建非线性温度响应函数与光周期响应函数，动态模拟青稞关键生育阶段（出苗、分蘖、拔节、抽穗、开花、灌浆至成熟）的启动与推进过程。

为提升模型在区域尺度的适应性与可靠性，本章进一步设定了阶段性热量积与光周期敏感参数，并通过引入逐日气象数据驱动，实现对不同播期条件下青稞生育进程的连续模拟。模型结构清晰、逻辑完备，具备良好的可参数化与可扩展特性，为后续播期推荐模型的构建与冻害风险识别提供了坚实的过程基础。

3.1 模型构建

从系统动力学出发，作物生长模型对真实农业生态系统进行了概括和简化，是考虑作物生长发育过程与大气、土壤、生物、管理等因素相互作用的机理过程模型。作物模型已被越来越多的农业科学家广泛使用，能揭示作物与环境因子间的互作机制，且可以定量描述作物生长发育及产量的形成过程，是智慧农业研究领域的重要工具。随着计算机技术的快速发展和对作物生理过程认识的深入，研究学者们基于不同的侧重点和研究目的开发了大量的作物生长模型，如 WOFOST、EPIC、DSSAT、APSIM 等（基于 APSIM-Maize 模型的玉米生长模拟与水分管理系统研究），被广泛应用于农作物生长发育过程中的产量预测、管理优化等多方面，为世界农业发展添砖加瓦。

本研究参考 WOFOST、APSIM 等模型，根据常用的发育阶段划分方法，将出苗-开花归为营养生长阶段（vegetative growth period, VGP），开花-成熟归为生殖生长阶段（reproductive growth period, RGP），采用生理过程驱动机制构建日喀则青稞生育期模型。模型以气候条件、品种参数、管理措施（播期等）为驱动因子，以热量积（Growing Degree Days, GDD）为主导变量，融合光周期响应函数，分阶段综合模拟青稞的出苗（emergence）、分蘖（tillering）、拔节（jointing）、抽穗（heading）、开花（flowering）、灌浆（grain_filling）、

乳熟（milking）和成熟（maturity）共八个生育时期。模型输入为品种标识、田间试验数据（播种期、生育期观测值）与逐日气象数据（逐日平均温度、日照时长等），输出为各生育阶段的播后天数。模型核心架构基于以下三个模块：数据预处理模块、光温联合响应模块、生育期阈值判定模块，具有较强的系统性和应用性。

3.1.1 数据预处理模块

本模块负责读取和标准化逐日气象数据，核心包括日期格式转换、必要气象变量筛选与字段统一。输入气象数据格式为 Excel 或 CSV 文件，字段包括日平均气温（℃）、日均太阳辐射（W/m²）、日照时长（h）等。模型对日期字段统一处理为 datetime 格式，对温度数据进行了异常值修正（限制温度范围为-10~40℃）和日照时长的缺失值前向填充，并构造自播种日起始后的逐日热量积与光周期数据，确保输入数据的物理合理性与连续性，为后续生育进度模拟提供基础。

3.1.2 光温联合响应模块

作物生育过程受环境因子的多重驱动，温度和光周期是控制其发育进程的两个主要生态因子。温度决定了生理发育速率，光周期则作为植物生殖转变的重要信号，特别是在青稞这类对日照长度敏感的作物中，二者耦合对模拟精度与生物一致性具有决定性影响。本模块通过累积生长期（GDD）动态耦合，体现光周期和温度协同作用效应。

（1）温度响应模块

温度响应模块是青稞生育进程模拟的核心构成单元。本模块以热量积（Growing Degree Days, GDD）理论为基础，模拟青稞在不同生育阶段对温度积累的敏感性，并以逐日热量响应函数动态驱动各阶段的推进速度。该模块预先设定每个生育阶段的温度积需求（GDD 阈值），并在每日累计热量的基础上，判断各阶段的起始时点。对于不同青稞品种，该模块支持设定特定的阶段温度响应参数，以适应其不同生态区的生长特性。

（2）光周期响应模块

本研究采用基于临界阈值的光周期响应函数构建光周期响应模型，以量化日照时长对青稞发育速率的调节作用。该函数形式在保证响应连续性的同时，能够较好反映短日与长日对作物不同阶段的影响。为表征不同品种对光周期的敏感性差异，引入两个生理参数：（1）日长敏感系数是（ P_s ），用于刻画作物对日照变化的响应敏感程度；（2）临界日长（ P_{crit} ），表示在发育速率变化的最短日照要求。

在模型参数设定中，为避免模拟中的极端值干扰，该函数将日照长度限制在 8 - 16

小时的合理范围内进行计算，超出该范围即默认数据为无效值。该约束基于作物光周期反应的一般生理规律，即大多数品种在日照变化下表现为有限的发育调节幅度，而不会出现极端的促进或抑制效应。通过该机制控制，模型能够在保证拟合能力的同时，提升参数稳定性与解释性，为不同青稞品种的光周期响应模拟提供通用性支持。

3.1.3 生育期阈值判断模块

该模块基于 GDD 累计与光周期修正结果，对每个生育阶段的到达时间进行判定。模型设定如下八个阶段：出苗期、分蘖期、拔节期、抽穗期、开花期、灌浆期、乳熟期和成熟期。每个阶段设定特定热量积阈值并叠加光周期调控因子，逐日判断累积热量是否达到该阈值，从而输出播后天数（days after sowing, DAS）形式的阶段预测值。预测结果以字典形式输出，便于后续播期优化与风险分析模块直接调用。

3.2 模型参数优化

本研究在模型构建完成后，对青稞八个生育阶段的积温进行参数调整，分别设定阶段性热量积温阈值，以矫正模型输出结果，提高模型模拟精度。优化后的各品种阶段性积温参数如表 3-1 所示：

表 3-1 青稞各生育阶段积温参数表

品种	GDD_出苗	GDD_分蘖	GDD_拔节	GDD_抽穗	GDD_开花	GDD_灌浆	GDD_乳熟	GDD_成熟
喜马拉雅 22	93	418	605	850	1000	1075	1200	1425
藏青 2000	110	450	630	900	1050	1250	1408	1600
藏青 3000	120	500	720	1000	1150	1400	1530	1750

从表中可以看出，不同品种在各生育阶段的热量需求具有显著差异。总体来看，“喜马拉雅 22”在前中期阶段的热量需求较低，适宜较短季节栽培条件；而“藏青 3000”整体 GDD 需求最高，尤其是在拔节至成熟期，其积温阈值普遍高于其他两个品种，反映出其较长的生育期特点。

3.3 模型验证和评价

模型在“喜马拉雅 22”“藏青 2000”和“藏青 3000”三个青稞主栽品种上进行了验证，验证数据来源为 2024 年日喀则青稞播期试验数据。采用实测生育期数据（表 3-2）与模型模拟结果（表 3-3）进行逐阶段比较，并以均方根误差（RMSE）、平均绝对误差（MAE）等指标作为评价准则。结果显示模型在出苗至灌浆阶段具有良好的一致性，成熟期误差略高。

通过比对试验生育期记录数据，部分播期存在关键生育阶段数据缺失或异常波动，

严重影响了模型评估的完整性和稳定性。如“喜马拉雅 22”和“藏青 3000”在 6 月 9 日播期未记录乳熟期数据，藏青 3000 在 5 月 12 日播期缺失开花期和灌浆期数据，严重影响了模型评估的完整性；灌浆期至乳熟期存在同一品种不同播期间生育期长度差异过大的情况，如藏青 2000 于 5 月 12 和 22 日播种对应的灌浆期比播期是 5 月 31 日的灌浆期约早 30 天到达。

表 3-2 试验青稞生育期记录表

品种	播期	出苗	分蘖	拔节	抽穗	开花	灌浆	乳熟	成熟
喜马拉雅 22	5/12	8	30	44	60	65	71	95	106
	5/22	7	28	34	63	77	83	96	113
	5/31	11	39	54	74	87	112	122	130
	6/9	10	30	45	65	78	103	—	121
藏青 2000	5/12	8	30	44	58	—	78	106	123
	5/22	7	28	34	63	77	83	96	121
	5/31	11	39	54	74	87	112	122	130
	6/9	10	30	45	65	78	103	—	121
藏青 3000	5/12	8	30	44	60	—	—	95	123
	5/22	7	28	34	63	77	83	96	121
	5/31	11	39	54	74	87	112	122	130
	6/9/	10	30	45	65	78	103	—	121

表 3-3 青稞生育期模拟表

品种	播期	出苗	分蘖	拔节	抽穗	开花	灌浆	乳熟	成熟
喜马拉雅 22	5/12	9	32	44	64	78	84	97	116
	5/22	7	28	43	63	76	84	95	114
	5/31	7	28	44	64	80	86	96	116
	6/9	5	30	44	68	81	87	98	120
藏青 2000	5/12	10	33	44	64	77	94	108	123
	5/22	7	33	42	63	75	93	105	121
	5/31	7	29	43	64	78	94	107	125
	6/9	6	30	43	67	80	95	109	135
藏青 3000	5/12	10	32	44	64	75	95	104	120
	5/22	7	28	43	62	73	93	103	119
	5/31	7	29	44	63	76	95	105	124
	6/9/	6	30	45	67	78	97	107	132

表 3-4 和表 3-5 是模型输出精度的结果。从整体上看，模型在各生育阶段均具有较高的拟合精度，平均 MAE 在 6.1 – 6.6 天之间，平均 RMSE 在 7.7 – 8.7 天之间，符合区域尺度作物模型模拟的精度要求。其中，“藏青 2000”的平均 MAE 和 RMSE 最低，分别为 6.1 天和 7.7 天，说明该品种的模拟稳定性较高，模型对其生育阶段的模拟较为准确。

表 3-4 模型平均绝对误差表

品种	出苗	分蘖	拔节	抽穗	开花	灌浆	乳熟	成熟	平均
喜马拉 22	2.5	3.2	5	4.2	6	14	9.7	8.0	6.6
藏青 2000	2.5	3.5	5.2	4.5	4.3	13	8.7	6.8	6.1
藏青 3000	2.5	3	4.8	4.5	5	11	11	7.5	6.2

表 3-5 模型均方根误差表

品种	出苗	分蘖	拔节	抽穗	开花	灌浆	乳熟	成熟	平均
喜马拉 22	3.2	5.6	6.7	5.6	7.5	16.6	15.1	9.3	8.7
藏青 2000	3	5.2	6.9	5.9	5.4	13.6	10.2	11.3	7.7
藏青 3000	3	5.1	6.7	6	6.8	11.9	11.8	10.1	7.7

图 3-1 至图 3-8 清晰地展示了模型在不同青稞品种与生育阶段的模拟误差表现。

从阶段分布来看，在出苗阶段，三个品种的 MAE 均为 2.5 天，RMSE 也均为 3.0 - 3.2 天之间，表明模型在出苗初期的气候响应模拟较为精准。这一阶段受控因素较为单一，主要由地温、播种深度与播期决定，因而模型在温度驱动机制下能较好反映实际生长动态。

分蘖、拔节与抽穗等生育阶段的误差略有上升，MAE 在 3.0 - 5.2 天，RMSE 在 5.1 - 6.9 天之间，仍维持在可接受范围。相比之下，灌浆期和乳熟期的误差明显增大，成为模型误差的主要来源，尤其在喜马拉 22 与藏青 2000 两个品种上表现突出。该现象的可能原因是青稞的灌浆速率受营养状况、昼夜温差、光照资源等复合环境因子影响，而现阶段模型核心以温度驱动为主，未充分引入碳同化效率、叶面积动态等变量。相较之下，藏青 3000 的灌浆期和乳熟期误差略低，可能得益于其生育期更集中，对环境变化的波动响应较小。

此外，成熟期的模拟误差虽然相对较高（MAE 在 6.8 - 8.0 天，RMSE 在 9.3 - 11.3 天），但从整体上看其值并不极端。同时由于成熟期的模拟误差受到全生育过程误差累积的影响，可认为该阶段的误差是对模型整体偏差的综合反映。模型在该阶段的相对稳定表现其具备较强的一致性与稳定性。

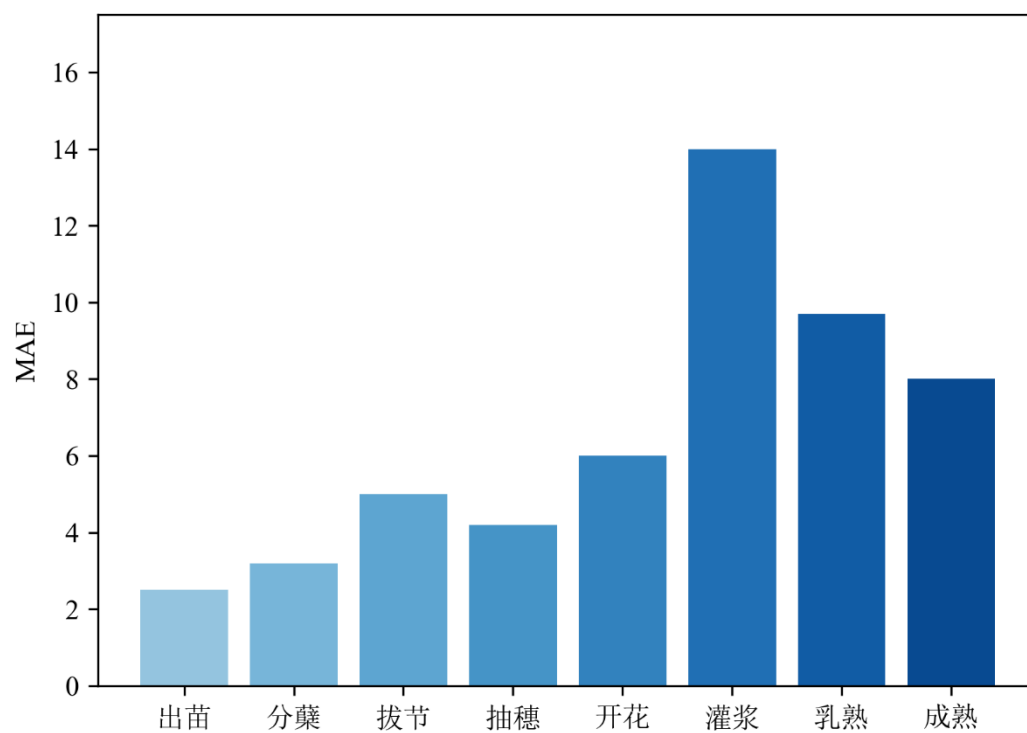


图 3-1 喜马拉雅 22 生育期模拟平均绝对误差 (MAE) 分布图

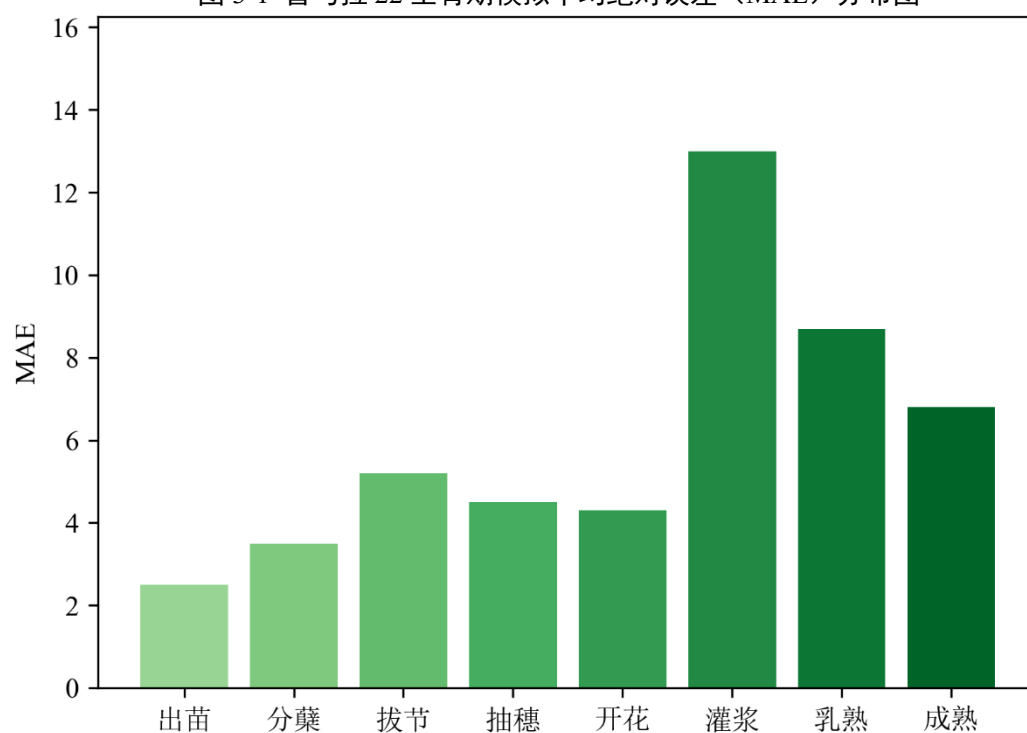


图 3-2 藏青 2000 生育期模拟平均绝对误差 (MAE) 分布图

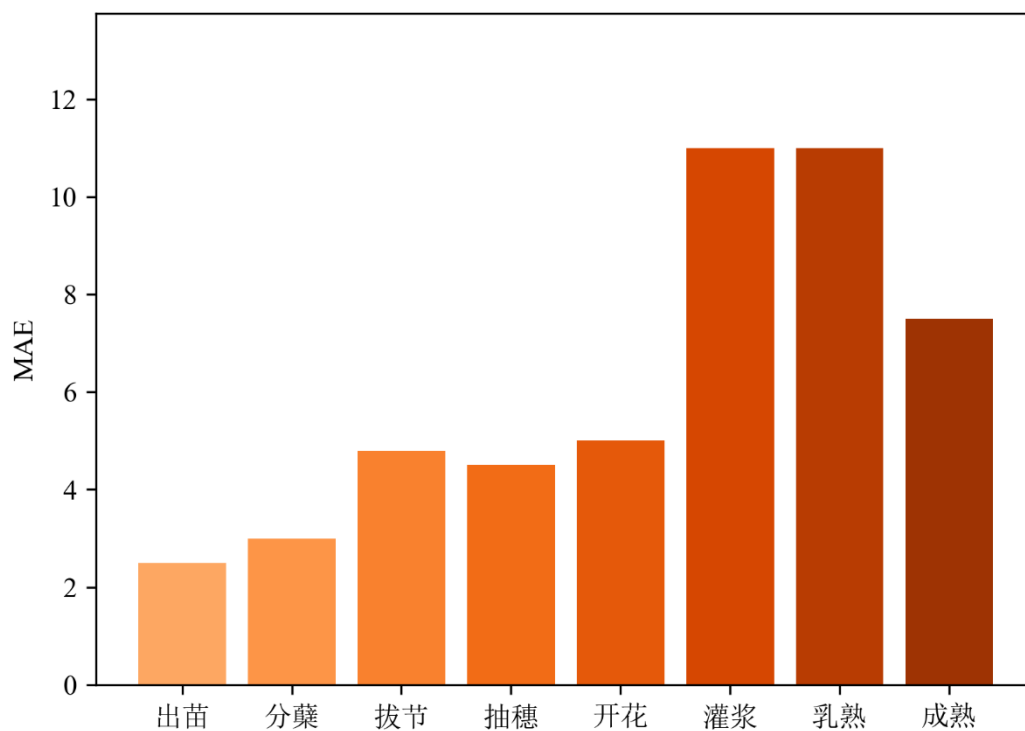


图 3-3 藏青 3000 生育期模拟平均绝对误差 (MAE) 分布图

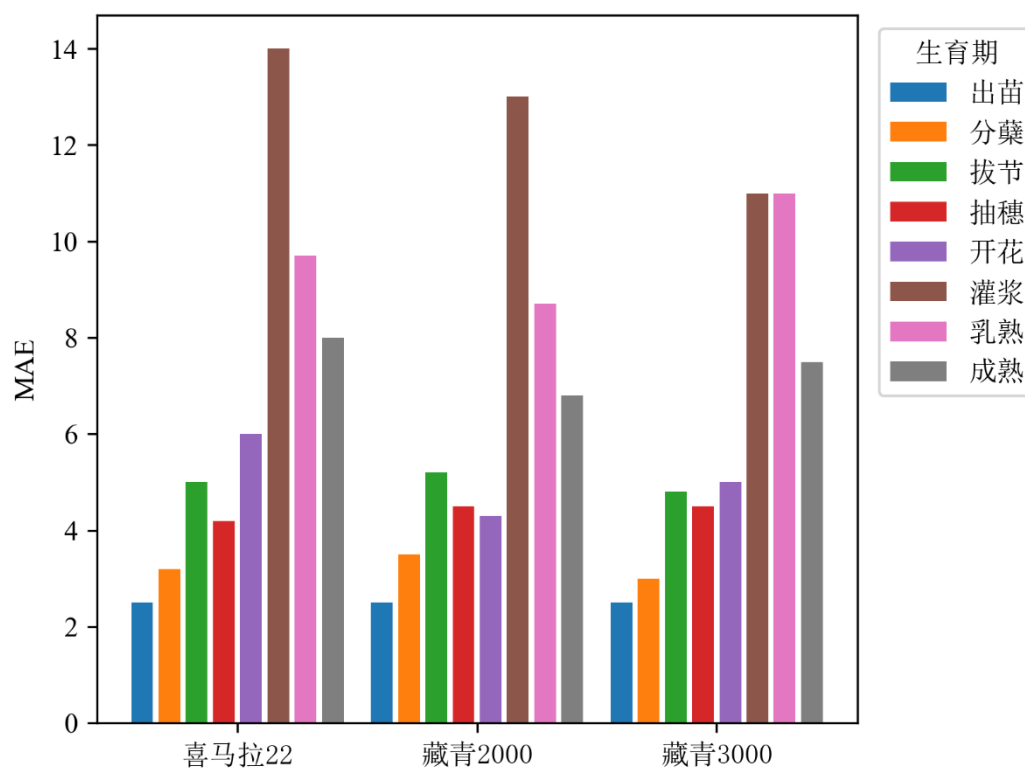


图 3-4 青稞生育期模拟平均绝对误差 (MAE) 比较图

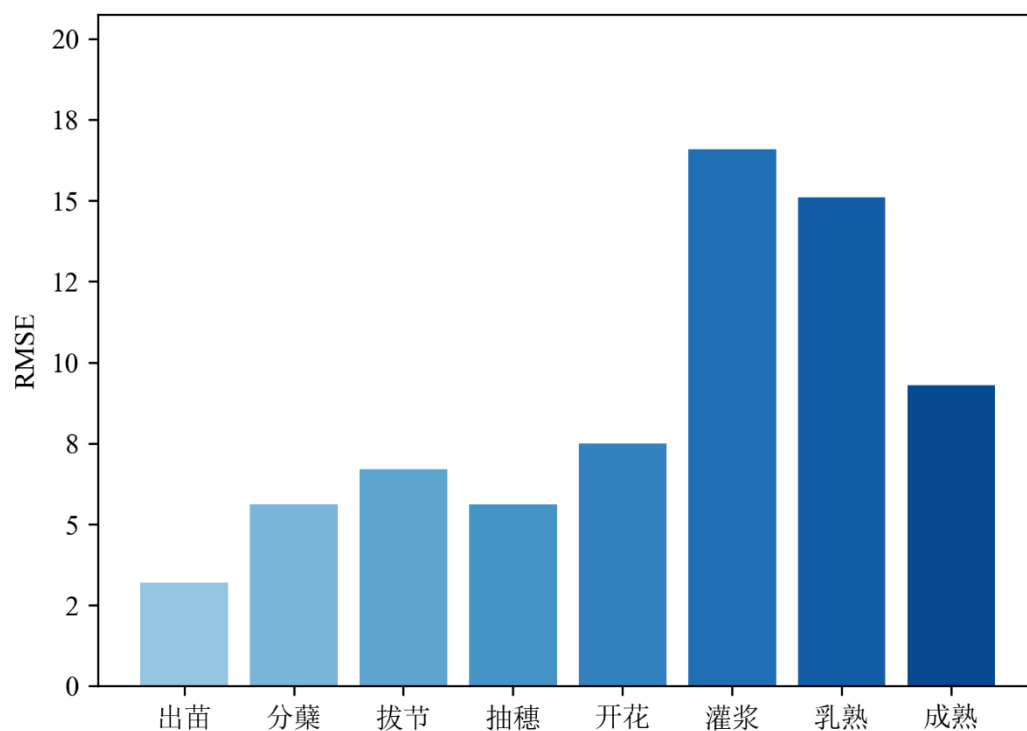


图 3-5 喜马拉雅 22 生育期模拟均方根误差 (RMSE) 分布图

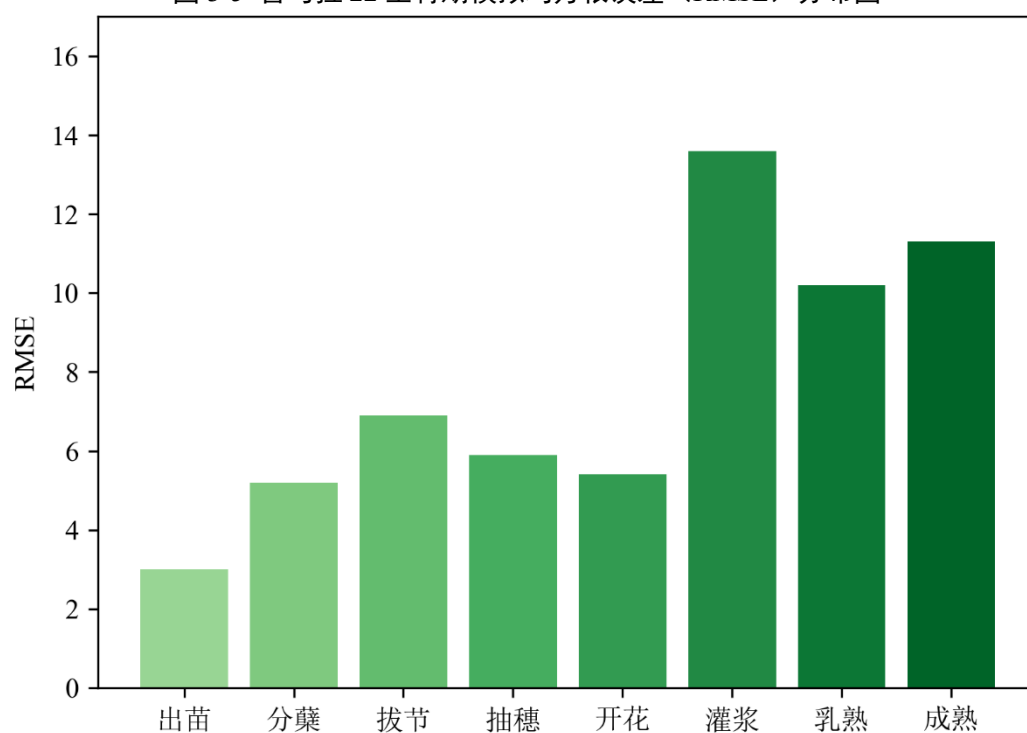


图 3-6 藏青 2000 生育期模拟均方根误差 (RMSE) 分布图

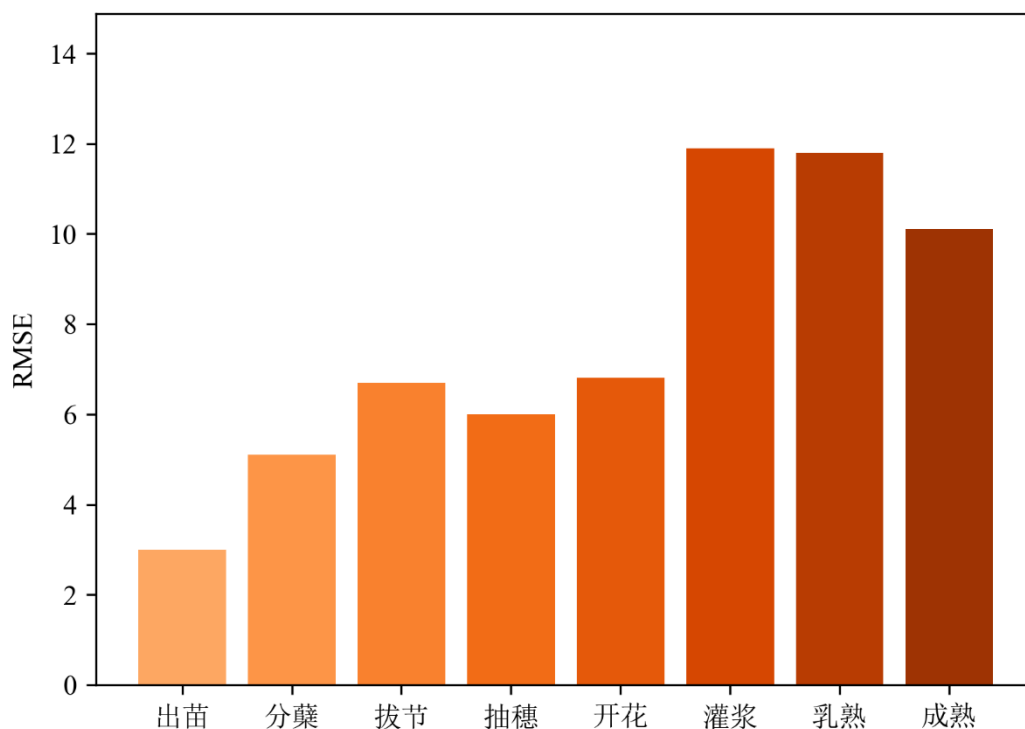


图 3-7 藏青 3000 生育期模拟均方根误差 (RMSE) 分布图

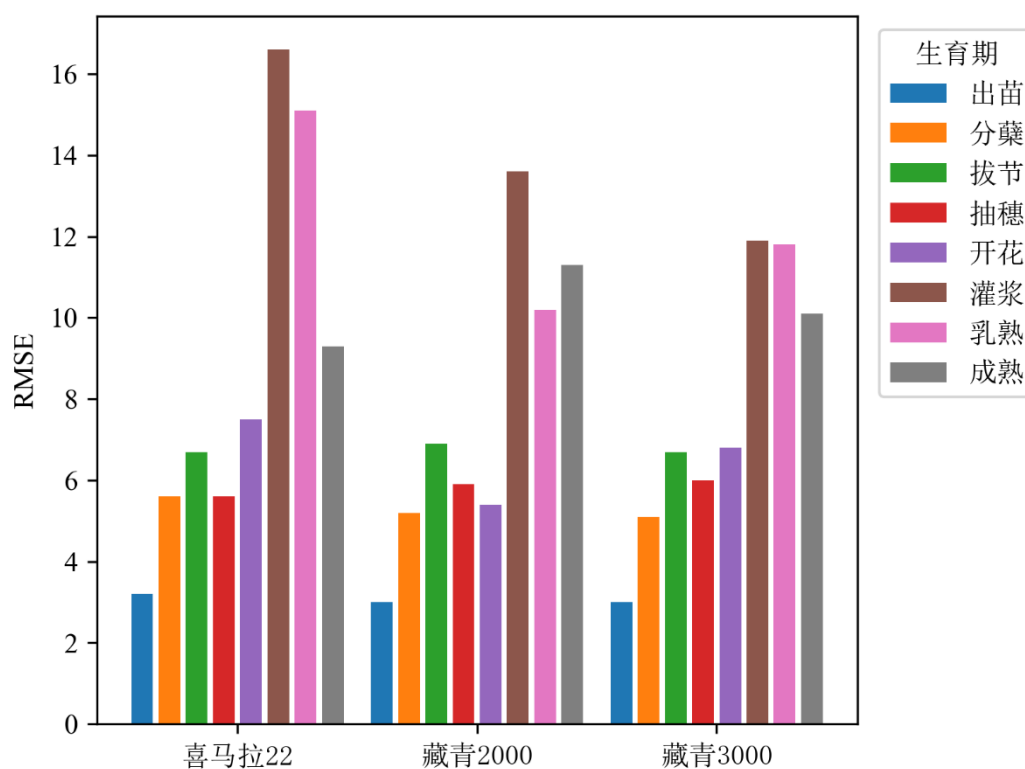


图 3-8 青稞生育期模拟均方根误差 (RMSE) 比较图

综上所述, 试验数据中存在一些数据缺失、生育期异常等问题, 这些不确定性因素对模型精度造成不良影响。后续田间试验中需加强关键生育期节点的标准化观测与连续记录, 提升数据质量; 加强对青稞生长后期低温影响、籽粒灌浆速率等因素的, 增强模

型评估的科学性与可靠性。

3.4 小结

本章围绕青稞产量优化目标，依托构建的青稞多阶段生育期模拟模型，深入分析了温度响应与光周期调控机制对青稞物候进程的影响，主要结论如下：

（1）模型能够较准确地模拟出苗至成熟各主要生育阶段，平均 MAE 在 6.1 – 6.6 天之间，RMSE 在 7.7 – 8.7 天之间，基本满足青藏高原区域模拟精度要求。

（2）模型在出苗、分蘖、拔节至抽穗等中前期生育阶段表现良好，误差较小；但在灌浆与乳熟期等后期阶段误差偏大，说明模型需加强对后期低温影响、生理成熟速度与品种差异的表达能力。

（3）实测数据存在阶段缺失、记录不完整等问题，在一定程度上限制了模型评估的全面性与准确性，未来需提高数据获取的连续性与客观性，确保模型校准质量。

第4章 青稞适播期模型构建

在青稞的种植管理中，播种期的选择对于作物整个生育过程的温度协调性与产量形成具有决定性作用。合理的播期不仅能够使作物在关键生育阶段充分利用有利的温光资源条件，促进营养物质的积累，还能够增强苗期植株的抗逆能力，为后续的生长发育、灌浆与成熟奠定基础。青稞作为典型的高原春播作物，其生长发育过程对温度与光照条件高度敏感，尤其在苗期与灌浆期对冻害极为脆弱。因此，科学制定适宜播种期，对于降低气象风险、保障青稞产量稳定性与生态适应性具有重要意义。

基于青稞不同生育阶段对温度的响应特性，本章以生育期内的温度限制为理论依据，综合考虑播期对生育进程的驱动作用与气象灾害（特别是低温）的限制效应，构建了一个适用于日喀则高原生态区的青稞播期预测模型。该模型在已有青稞生育期动态模拟模型的基础上，引入冻害风险识别与成熟性判别模块，通过逐日气象数据驱动模拟不同播期条件下的发育进程与关键风险窗，进而筛选出温度协调性高、冻害风险低且具备成熟保障的最优播期区间。模型不仅可为研究区青稞高效栽培提供科学依据，也为拓展至其他高寒区开展播种策略优化提供方法基础与技术支撑。

4.1 模型构建

本研究构建了一个基于生育期模拟的青稞播期推荐模型（Sowing Window Model），该模型在集成日喀则地区青稞生育期预测模型（Enhanced Barley Model）模拟结果的基础上，进一步引入气象风险判别机制，实现了对播期适宜性的综合评估。模型以逐日气象数据为驱动输入，针对设定播期范围内的每一候选日期，分别评估两个关键指标：（1）冻害风险指数，即从播种至分蘖前发育阶段内，日最低气温低于冻害阈值温度的累计天数；（2）成熟性判断，即灌浆期是否遭遇低温胁迫，进而影响最终能否顺利成熟。模型输出包括每个候选播期对应的出苗期与成熟期（以播后天数计）、冻害风险天数以及“能否成熟”的分类标记，并据此筛选出同时具备最小冻害风险与可顺利成熟特征的最优播期。

该模型有效融合了作物生育过程模拟与冻害窗口分析逻辑，形成了面向高寒区实际应用的播期模拟推荐系统。通过结构化参数输入与模块化设计，模型具备良好的可拓展性与适应性，能够为青稞在高寒生态区的播期优化提供科学依据，也为应对气候变化背景下的区域播种策略制定提供了理论支撑与技术路径。

4.1.1 数据读取与标准化模块

数据读取与标准化模块主要负责逐日气象数据的加载与标准化处理，支持 Excel 与

CSV 等常用数据格式。输入数据需至少包含日期字段及日最低气温列，以满足冻害风险评估的需求。为确保与青稞生育期模拟模块（Enhanced Barley Model）保持数据结构一致性，本模块复用其数据读取与清洗逻辑，并统一采用“日期”与“最低温度（℃）”作为标准气象字段命名。模型在读取数据时自动校验时间跨度是否覆盖整个播种候选窗口及其之后的完整潜在生育期，以保障后续生育阶段模拟与低温风险识别的时效性与完整性。

4.1.2 冻害风险评估模块

冻害风险评估模块通过模拟不同播期下青稞早期生育阶段所面临的低温胁迫情况，为播期优化提供定量依据。基于预设播期的青稞生育期模拟结果，设定自播种日起至分蘖前的冻害阈值温度（ T_{freeze} ），统计该生育阶段内日最低气温（ T_{min} ）低于该阈值的总天数，作为冻害风险天数。该指标反映了青稞该阶段遭遇潜在冻害胁迫的频率和强度，数值越大，苗期发育受阻、分蘖阶段延迟或冻害致死的风险越高。该阶段为青稞的早期发育阶段，冻害会影响出苗率，幼苗长势和后续阶段的物质积累，因此该模块在最适播期选择中尤为重要。

4.1.3 成熟性判断模块

成熟性判断模块旨在基于不同播期条件下模拟的灌浆期内温度变化过程，评估作物能否在特定气候背景下顺利完成籽粒灌浆与成熟过程。青稞作为高寒区作物，其灌浆阶段对低温极为敏感。相关研究表明，灌浆期出现日最低气温降至 -2°C 以下，籽粒灌浆速率将显著降低，甚至停止灌浆，从而导致品质与产量损失。因此，本研究设定 -2°C 为灌浆阶段的低温临界阈值。模型在模拟过程中，针对每一个候选播期，提取其对应灌浆期内的逐日气象数据，若该时间段内任一日出现日最低气温低于阈值，则判定该播期下青稞“无法成熟”。

该模块作为播期适宜性筛选的必要判别条件，能有效识别由于晚播所导致的生育进程滞后、灌浆期间遭遇早霜或冷害的情况，从而剔除潜在存在成熟风险的播期选择，提高播期推荐的可靠性。

4.1.4 播期最优推荐模块

该模块构造候选播期时间序列，逐日调用青稞生育期模型预测各播期下的生育阶段天数，并结合冻害风险与成熟性判断结果，构建综合评估表格。最终依据“能成熟”和“冻害风险指数最小”策略推荐最优播期，若多个播期风险指数相同，则输出全部最优方案。

输出格式为包含“品种、播期、出苗期、成熟期、冻害风险指数、能否成熟”字段的 DataFrame 表，并支持保存为 Excel 文件，便于科研人员或农技人员进行后续分析与应用。

4.2 模型验证和评价

本研究构建的播期模型基于青稞早期生育阶段对低温敏感的生理基础，结合了“冻害风险评估”和“成熟性判断”的双重指标，体现了模型的逻辑合理性。

通过分析三个品种在不同播期下的生育期模拟结果，发现模型的推荐播期位于低温胁迫最小且能顺利成熟的时段（5月中旬至6月上旬），符合青藏高原气候下的播期试验结果，验证了模型和青稞生理过程的适配性。

4.3 模型结果分析

对“喜马拉雅 22”“藏青 2000”与“藏青 3000”三个青稞品种的生育期和播期模拟结果（图 4-1 至图 4-3）分析表明，各品种的成熟期随播期变化呈现显著的“U”形响应曲线，即随着播期延迟，成熟所需天数先减少后增加。该响应曲线反映出播期与光温资源协同调控作物生育进程的作用机制：早播虽然有较长的生育期进行器官发育和干物质的积累，但在播种初期受到低温胁迫的限制会抑制生长发育速率，导致成熟期延长；中播（5月中旬至6月上旬）阶段气候条件最为适宜，热量与光照资源能够较好支撑作物快速完成各生育阶段，成熟天数显著缩短，但相应物质积累时间会略微减少，可能不利于亩产的增加；晚播则由于发育后期光照时长缩短及温度累积不足，青稞生育速率减缓，尤其在灌浆期更易受到温度降低影响，导致成熟期延长，甚至无法成熟。

从不同品种的反应规律来看：

喜马拉雅 22 成熟期最短仅需 113 - 114 天，明显短于其他两个试验品种，表现出对光温资源的高效利用能力，在适播窗口内可迅速完成生育过程，属于典型的早熟品种；其“U”形响应曲线更为陡峭，表明播期对其成熟期影响更为显著，早播和晚播间存在的温度差异将显著延长其生育进程。

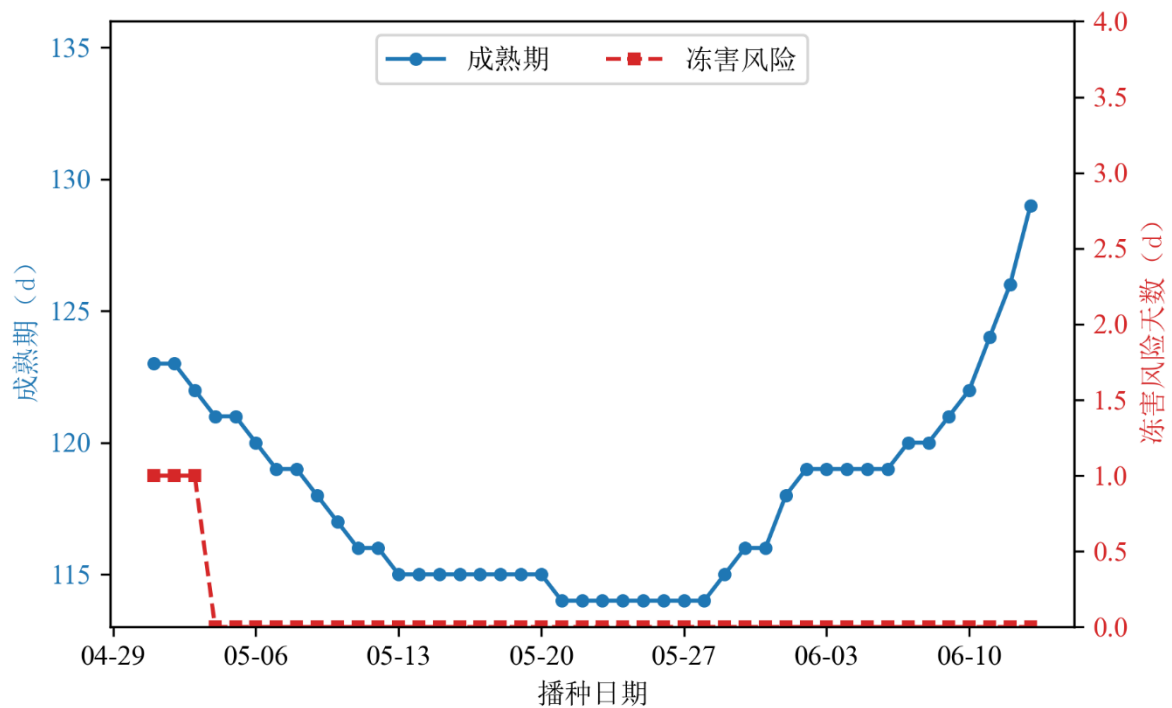


图 4-1 喜马拉雅 22 播期与冻害响应图

藏青 2000 在 5 月 15 日至 5 月 25 日期间播种时，成熟所需天数最短，约 121 天；其“U”型曲线相较其他试验品种更为平缓，生育期较为稳定，抗逆能力较强。

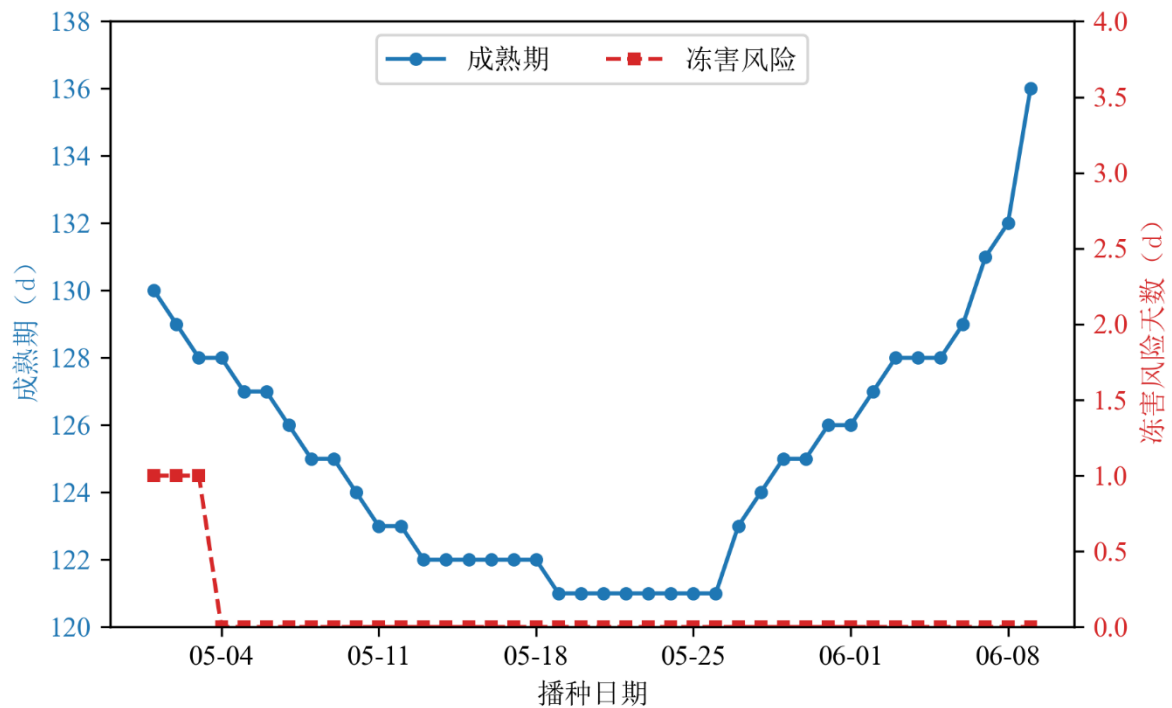


图 4-2 藏青 2000 播期与冻害响应图

藏青 3000 的成熟期随播期变化趋势与藏青 2000 高度一致，但其在所有播期条件下的成熟期均略短，最短可达 119 天，体现其较优的早熟潜力；其“U”型曲线更浅，拐

点更早，表明其在较早播期即可达到适宜发育速率，对光温资源响应积极。

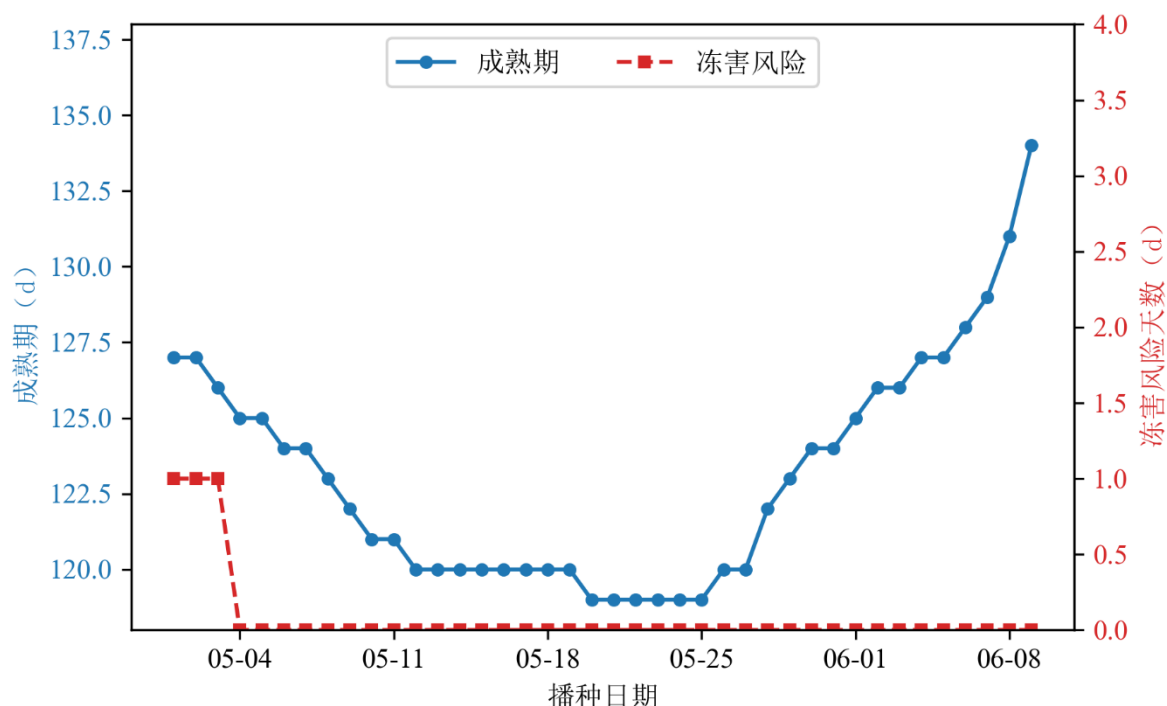


图 4-3 藏青 3000 播期与冻害响应图

三个品种均显示在 5 月上旬至 6 月上旬之间播种可同时规避播种至出苗结束阶段和灌浆期的低温胁迫，是冻害风险较低、成熟度较高的播种窗口。其中，“喜马拉雅 22”因其生育期较短的品种特性，能够更快避开晚春的低温窗口，适宜在无霜期较短的高原生态区推广，但其对播期波动的敏感性也更强，播期选择需更加精准以避免早播或晚播对成熟造成不利影响。

理论上，随着播期后移，早期生育阶段所处的环境气温逐步升高，从而有效降低早期冻害的发生概率。然而，由于气象站数据的时间范围限制气象数据未能覆盖足够宽广的播种窗口，在预设播期内仅 5 月 3 日存在低温胁迫，没有体现出冻害风险随播期推迟而逐步下降直至趋于零的变化趋势。

综上所述，播期调控对不同品种青稞的生长发育具有显著影响，青稞对光温资源的高效利用可以缩短生育期、减少冻害风险，但相应产量不一定最优。应结合品种特性与地区气候资源优化播期选择，以满足在最低冻害风险的前提下尽可能延长生育期的物质积累时间，进而提高产量。

4.4 小结

本章围绕青稞产量优化目标，构建了结合光温资响应、成熟性判断与冻害风险分析的青稞播期推荐模型，重点识别了日喀则地区主栽品种的最优播种窗口，并提出播期管

理优化路径。主要结论如下：

（1）本章构建了一个适用于高寒区的青稞播期推荐模型（Sowing Window Model），在结合青稞生育期模拟结果的基础上加入冻害风险评估与成熟性判断模块，实现对适宜播期的综合评估。模型结构清晰，模块功能明确，具备较强的区域适应性与应用价值。

（2）本研究构建的播期模型基于青稞早期和灌浆期对低温敏感的生理特性，融合冻害风险与成熟性判断双指标，推荐播期集中于 5 月中旬至 6 月上旬，与青藏高原青稞播种规律相符，体现了模型结构的合理性。

（3）不同品种青稞对播期与环境因子的响应存在显著差异。喜马拉 22 对播期波动更敏感，适宜在无霜期较短地区种植；藏青 2000 和藏青 3000 表现出较强的适应性与稳定性，播期窗口较宽。研究结果表明，合理播期选择可有效规避苗期与灌浆期冻害，缩短或延长生育期以适应不同年份光温条件的变化，从而实现“稳产增产”的目标。

第5章 青稞产量优化方案制定

青稞是青藏高原最重要的高寒粮食作物之一，其在保障区域粮食安全、支撑高原生态农业系统稳定运行以及提升农牧民收入方面发挥着不可替代的作用。然而，受高原典型的高海拔、低气温、多变气候特征影响，青稞生产始终面临复杂而严峻的生态环境胁迫，特别是春季低温、初夏干旱与灌浆期早霜等逆境因素，严重制约其产量潜力的发挥与生产稳定性的提升。因此，在确保作物顺利成熟的基础上，实现播种期与生态资源的高效耦合，是实现青稞稳产增产的关键环节。

在前述第三章中，构建了基于温度响应与光周期调控机制的青稞生育期模拟模型，能够动态模拟不同播期条件下作物从出苗至成熟的阶段进程；第四章进一步开发了适用于日喀则区域的青稞播期智能推荐模型，在考虑冻害风险、光温积累与成熟可达性等因素基础上，识别最优播种时间窗口。本章将在此基础上，进一步整合模型输出结果与实地试验验证数据，围绕“优化播种期—适配品种—规避风险”的产量提升策略框架，系统构建以青稞为对象的产量优化决策方案。

具体而言，本章将基于模型模拟的关键生育阶段时序及其与气象资源的匹配特征，识别影响产量构成的主导限制因子，分析不同播期与品种组合在光温利用效率与抗逆性的差异，并结合2024年田间产量实测数据，评估模型推荐的播期组合在现实情境下的产量响应表现。最终，提出一套可在区域农业实践中推广的青稞产量优化路径，为高寒区作物系统管理与精准种植提供技术支撑与理论基础。

5.1 产量数据分析

为验证模型推荐播期在实际生产中的产量表现，本研究对2024年5月12日与5月22日两个典型播期的实地测产数据进行了系统比对与分析。结果表明，两播期处理在产量构成因子上表现出一定差异：

在5月12日播种处理中，平均千粒重达到53.86 g，小穗平均重量为0.98 g，每穗实粒数为18.2粒，最终测得平均亩产为172.8 kg/亩。而5月22日播种处理下，平均千粒重略增至54.35 g，但小穗平均重量下降至0.93 g，平均每穗实粒数为17.2粒，对应的平均亩产为165.8 kg/亩，相较5月12日均略有下降。

上述实测数据表明，尽管5月22日处理在千粒重上略有优势，但由于其有效粒数与小穗重量的下降，最终产量表现不及5月12日播种处理。这一结果与模型预测中“5月中旬为冻害风险低、光温资源匹配良好的适宜播期”结论相符，说明模型在产量形成机制与适宜播期识别方面具备较好的现实解释力与应用价值。相关产量实测数据如表所示，可为播期优化策略提供实证依据。

表 5-1 播期试验产量数据表

播期	品种	千粒重 (g)	小穗平均重量 (g)	每穗实粒数	每亩产量 (公斤)
5 月 12 日	喜马拉 22	48.25	1.08	22.33	163.00
		52.66	1.14	21.68	201.88
		50.86	0.84	16.55	124.48
		56.75	0.92	16.16	138.77
5 月 12 日	藏青 3000	55.92	1.02	18.27	212.47
		51.74	0.81	15.70	139.90
		59.01	1.05	17.72	215.68
		58.11	0.87	14.96	157.66
5 月 12 日	藏青 2000	51.48	1.06	20.66	201.30
		59.02	0.92	15.56	136.34
		56.30	1.04	18.56	222.62
		55.05	0.88	16.04	116.11
5 月 22 日	喜马拉 22	48.76	0.86	17.70	172.17
		52.82	0.94	17.86	179.05
		53.99	0.97	17.93	237.58
		53.84	0.92	17.05	115.47
5 月 22 日	藏青 2000	54.32	0.91	16.75	163.94
		55.07	0.93	16.91	149.30

在本研究的实地试验过程中，原计划对四个播期开展全生育期观测与产量测定工作，以期系统评估不同播期条件下青稞产量的变化趋势，为产模型验证提供数据支撑。但由于试验期间人员沟通问题，未能对 5 月 31 日和 6 月 9 日两个播期进行测产工作，导致相关产量数据缺失，无法比较四个播期之间的产量关系，在后续工作中进行沟通优化。

5.2 产量优化方案制定

本研究构建的日喀则青稞生育期模型（Enhanced Barley Model）和播期模型（Sowing Window Model）在逐日模拟 2024 年播期范围内各候选日期的青稞生育进程、冻害风险与成熟条件后，筛选出同时具备较长生育期、低冻害风险且可顺利成熟的播种日期。结果显示，三个主要青稞品种的产量最优播期分别为：喜马拉 22 最优播期为 6 月 14 日，对应的模拟生育期为 133 天；藏青 2000 最优播期为 6 月 9 日，对应生育期 135 天；藏青 3000 最优播期为 6 月 10 日，对应生育期 136 天。

上述产量最优播期在冻害可接受范围内可适度前移播种时间，虽然物候发育历程有所缩短，但灌浆期的冻害风险也相应降低，有利于减少气温波动对青稞成熟的影响。

同时考虑到早播对青稞产量的有利影响，在冻害风险小时尽早播种既可以提高产量，又规避了灌浆期的低温胁迫风险，同样是青稞的适播窗口。

上述结果表明，各品种播期设置在早播阶段可以协助青稞优化光合产物分配，且灌

浆高峰期提前，有效避开后期低温胁迫，生育期较长，适宜增产增量；而在晚播期阶段不仅可规避播种至分蘖前的冻害窗口，同时也能在气象条件允许范围内最大限度延长其生育周期，优化光温积累过程，有利于干物质的形成与分配，为籽粒产量提供物质保障。

5.3 小结

本章围绕青稞产量优化目标，依托构建的生育期模型与播期推荐模型，系统评估了播期对产量的影响，并结合田间试验数据验证模型推荐方案的可行性与应用价值，主要结论如下：

（1）基于2024年典型播期（5月12日与5月22日）的实测数据分析表明，早播处理在亩产、有效粒数及小穗重量等产量构成因子上整体优于晚播处理。尽管5月22日播期下的千粒重略有提升，但由于其他因子的下降，最终产量不及5月12日播种，验证了中甸播期在保障成熟与提高产量之间的平衡优势。

（2）在冻害风险较低的年份条件下，适度提前播种可使青稞提前进入灌浆高峰期，避开后期低温胁迫，提升粒重与干物质积累效率；而在晚播期阶段，通过合理延长生育期与最大化利用光温资源，也有利于提升产量稳定性与应对极端气候波动，体现出播期弹性管理的价值。

第6章 结论与展望

6.1 主要结论

本研究以西藏日喀则地区为代表的典型高寒农区为研究区域，聚焦青稞这一高原主粮作物，综合开展了生育期模拟模型构建、适播期识别模型开发与产量优化路径评估等系统性工作，形成了面向实际生产需求的技术方法体系。主要结论如下：

(1) 本研究基于温度积累与光周期响应机制，构建了包含九个关键发育阶段的青稞生育期模拟模型，可动态预测不同播期与气候条件下的作物物候进程，模型在 2024 年多播期、多品种试验数据验证中表现良好 (MAE 为 6.1 - 6.6 天, RMSE 为 7.7 - 8.7 天)，具备较强的适应性与泛化能力。

(2) 综合冻害风险、成熟可达性及光温资源匹配关系，构建 Sowing Window Model 模型，能够逐日模拟播期内各候选播种日期的适宜性。模型结果显示，青稞适播窗口集中于 5 月中旬至 6 月上旬，不同品种的播期响应特征存在显著差异，具有较强的生产指导价值。

(3) 通过对 2024 年典型播期的产量测定发现，模型推荐的 5 月中旬播期在田间表现出较高的产量构成因子与最终产出，产量最高达 215.68 kg/亩，印证了模型在产量形成规律识别与播期优化中的可行性。

(4) 在生育期预测与播期筛选的基础上，建立“品种适配—播期调控—风险规避”三位一体的产量提升方案，明确了不同青稞品种在生态条件约束下的最优播种时间与增产潜力路径，为高寒区作物种植管理与精准决策提供理论支撑与技术工具。

6.2 不足与展望

尽管本研究在模型构建、验证及应用方面取得了一定进展，但仍存在以下不足，后续研究可在以下方向进一步拓展和深化：

(1) 观测数据量有限，覆盖区域和年际代表性仍需加强。本研究主要基于 2024 年单年度、单区域田间试验数据开展建模与验证，气候波动对模型鲁棒性评估不足。未来应结合多年、多点多样本数据，提升模型适应性与时空泛化能力。

(2) 未充分纳入水分胁迫、病害等非温光因子的影响。当前模型以气温与光周期为主要驱动因子，未考虑春季干旱、病虫害等非气象胁迫因素对生育进程与产量的复合作用，后续可引入水分平衡模拟或多因子综合响应机制，增强模型对真实生态系统的刻画能力。

(3) 产量预测模型有待进一步构建与集成。本研究虽通过产量实测验证播期优化

路径的有效性，但尚未建立完整的过程型产量预测模块，未来可将物候模型与干物质积累、籽粒灌浆等模拟环节集成，提升对产量形成全过程的动态预测能力。

参考文献

- 巴桑次仁, 格桑卓玛, 2018. 日喀则气候变化对青稞生产潜力和增产空间的影响分析[J/OL]. 农业与技术, 0(11)[2025-05-15].
- 付永硕, 李昕熹, 周轩成, 等, 2020. 全球变化背景下的植物物候模型研究进展与展望[J]. 中国科学: 地球科学, 50(9): 1206-1218.
- 弓开元, 何亮, 邬定荣, 等, 2020. 青藏高原高寒区青稞光温生产潜力和产量差时空分布特征及其对气候变化的响应[J]. 中国农业科学, 53(4): 720-733.
- 郝帅宋艳玲, HAO SHUAI S Y ling, 2023. 气候变化对青藏高原青稞生产影响的研究综述[J/OL]. 中国农业气象, 44(05): 398. DOI:10.3969/j.issn.1000-6362.2023.05.005.
- 李荣平, 周广胜, 阎巧玲, 2005. 植物物候模型研究[J]. 中国农业气象(4): 8-12.
- 伦珠朗杰李慧慧, LHUNDRUPNAMGYAL H H L, 2019. 西藏青稞冬春性鉴定及抽穗期多样性与稳定性分析[J/OL]. 作物学报, 45(12): 1796-1805. DOI:10.3724/SP.J.1006.2019.91025.
- 洛桑次仁, 巴桑玉珍, 顿珠加布, 等, 2023. 藏西南高海拔地区青稞产业发展现状与前景. | EBSCOhost: 卷 19[EB/OL]. 87[2025-05-15].
- 普卓玛, 央金, 边巴普赤, 等, 2023. 西藏江孜县青稞种植气象服务指标与对策分析[J/OL]. Climate Change Research Letters, 12: 664. DOI:10.12677/CCRL.2023.124068.
- 石磊杜军, 2016. 气候变化对日喀则保灌地青稞生育期的影响[J/OL]. 中国农学通报, 32(33): 182-186. DOI:10.11924/j.issn.1000-6850.casb16070057.
- 史继清豆永丽, SHI JI-QING D Y li, 2023. 西藏青稞生育期干旱强度变化特征分析[J/OL]. 中国农业气象, 44(09): 834. DOI:10.3969/j.issn.1000-6362.2023.09.007.
- 孙全平, 刘国一, 唐亚伟, 等, 2016. 密度, 播期和施肥对西藏不同青稞品种籽粒灌浆特性影响[J]. 中国农学通报, 32(21): 67-74.
- 魏凤英, 1999. 现代气候统计诊断与预测技术[M]. 气象出版社.
- 殷新佑, XINYOU Y I N, 1999. 对预测作物发育的积温法的评价[J]. 作物学报, 25(04): 474-782.
- 赵金兰, 2010. 青稞早播对其防冻增产影响研究[J]. 现代农业科技(18): 87-87.
- ARLO RICHARDSON E, SEELEY S D, WALKER D R, 1974. A Model for Estimating the Completion of Rest for 'Redhaven' and 'Elberta' Peach Trees1[J/OL]. HortScience, 9(4): 331-332. DOI:10.21273/HORTSCI.9.4.331.
- BRUNS E, CHMIELEWSKI F M, VLIET A J H van, 2003. The global phenological monitoring concept[M/OL]//Phenology: An integrative environmental science. 93-104[2025-05-15].
- CAFFARRA, A, DONNELLY, A, CHUINE, I, 等, 2011. Modelling the timing of Betula pubescens budburst. I. Temperature and photoperiod: a conceptual model[J/OL]. Climate research, 46(2).
- CAFFARRA, A, DONNELLY, A, CHUINE, I, 2011. Modelling the timing of Betula pubescens budburst. II. Integrating complex effects of photoperiod into process-based models[J/OL]. Climate research, 46(2).
- EUROPEAN COOPERATION IN SCIENCE AND TECHNOLOGY, LIPA W, DONNELLY A, 等, 2009.

- Final scientific report of COST 725: establishing a European data platform for climatological applications[M/OL]. Publications Office of the European Union[2025-05-15].
- GAO L, JIN Z, HUANG Y, 等, 1992. Rice clock model—a computer model to simulate rice development[J/OL]. Agricultural and Forest Meteorology, 60(1): 1-16. DOI:10.1016/0168-1923(92)90071-B.
- HÄNNINEN H, 2016. Boreal and Temperate Trees in a Changing Climate[M/OL]. Dordrecht: Springer Netherlands[2024-11-26].
- JONES J W, HOOGENBOOM G, PORTER C H, 等, 2003. The DSSAT cropping system model[J/OL]. European Journal of Agronomy, 18(3-4): 235-265. DOI:10.1016/S1161-0301(02)00107-7.
- KRAMER K, 1994. Selecting a Model to Predict the Onset of Growth of *Fagus sylvatica*[J/OL]. Journal of Applied Ecology, 31(1): 172-181. DOI:10.2307/2404609.
- LANDSBERG, J. J, 1974. Apple Fruit Bud Development and Growth; Analysis and an Empirical Model[J/OL]. Annals of Botany, 38(5): 1013-1023. DOI:10.1093/oxfordjournals.aob.a084891.
- MEIER U, BLEIHOLDER H, BUHR L, 等, 2009. The BBCH system to coding the phenological growth stages of plants – history and publications –[J/OL]. Journal of Cultivated Plants: 41-52 Pages. DOI:10.5073/JFK.2009.02.01.
- XIA T, ZHANG L, XU J, 等, 2017. The alternative splicing of EAM8 contributes to early flowering and short-season adaptation in a landrace barley from the Qinghai-Tibetan Plateau[J/OL]. Theoretical and Applied Genetics, 130(4): 757-766. DOI:10.1007/s00122-016-2848-2.

致 谢

当我敲下这段文字时，窗外的树正摇曳着满枝新绿，花朵绽放在阳光里，四年时光的重量，很难装在短短的致谢里。

首先要感谢我的父母，自我呱呱坠地，二十多年的养育之恩无以为报。无论我在人生哪一段经历起伏，你们始终是最坚实的依靠，用宽广的胸怀包容我的任性与迷茫，用坚定的支持鼓励我不断前行，给予我最大的爱与力量。

感谢我的导师于强研究员，您开阔的科研视野和活跃的科研思维不断启发我思考与探索，拓展了我对科研的认知。在文献阅读、课题思考等各方面，您教导我不仅要理解内容，更要设身处地思考“若我是作者，将如何写作与构思”，这一思维方式深刻影响了我对科研逻辑与方法的理解。您的悉心指导让我领悟到科研的严谨与魅力。

感谢我的导师赵刚教授，您严谨的治学态度像一把标尺，为我标正学术的道路，让我在面对问题时学会了思考的深度与广度。在课题组中，您平易近人的风格营造出一个团结温馨的学习氛围，使我在学术之外也深感归属与温暖。

感谢何建强教授，您热情的为我指导论文的种种问题，对我的研究工作倾注了极大的关注与耐心。您的鼓励与指导让我在不断探索中坚定前行。

感谢姚宁副教授，四年来您作为我们的班主任，不仅在学习上给予悉心指导，更在生活中给予无微不至的关怀。您温和的处事方式和对学生的深切关爱，是我未来人生道路上学习的榜样。

感谢我的师兄师姐们，感谢你们在我迷茫之际的耐心指引、在研究过程中细致的讲解与无私的帮助。在数据处理、模型搭建、代码调试等诸多方面，你们总是不吝赐教、倾囊相授，是你们的鼓励与支持让我顺利完成毕业论文的撰写。

最后，感谢我的朋友们，凌晨的阶梯教室和同行的旅途，我们一起看过太多风景，一起经历太多故事，你们的陪伴绘成了大学四年最多彩的回忆，是我青春中不可或缺的章节。今此一别，祝愿诸君山高水长、前程似锦！

故事的开头总是极具温柔，可故事的结尾往往伴随这感伤与离别。站在毕业的门槛回望，从求学路上收获的远不止书本上的知识，成长的过程也不总是平坦顺遂，目标的破灭、感情的失败都是人生经历的一个个关隘，经历痛苦，却也收获成长。站在人生新阶段的起点，我会继续怀揣感恩，砥砺前行，所有的关心与帮助，都将成为我继续前行的力量！

学生姓名：何智健

日 期：2025 年 5 月 20 日