

分类号：
学号：20222012034

密级：公开
单位代码：10759

石河子大学

硕士学位论文



基于温度波动的酿酒葡萄不同免埋土越冬方式 研究

学位申请人	马云龙
指导教师	孙钦明 副教授
申请学位门类级别	农学硕士
学科、专业名称	园艺学
研究方向	设施园艺
所在学院	农学院

中国新疆石河子
2025年6月

分类号：
学号：20222012034

密级：公开
单位代码：10759

石河子大学

硕士学位论文



基于温度波动的酿酒葡萄不同免埋土越冬方式 研究

学位申请人	马云龙
指导教师	孙钦明 副教授
申请学位门类级别	农学硕士
学科、专业名称	园艺学
研究方向	设施园艺
所在学院	农学院

中国新疆石河子
2025年6月

**Temperature Fluctuation-Driven Evaluation of No-Burial
Overwintering Methods in Wine Grape Cultivation**

A Dissertation Submitted to

Shihezi University

In Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of

Master of Agriculture

By

Ma Yun-long

(Horticulture)

Dissertation Supervisor: Assoc. Prof. Sun Qin-ming

June,2025

石河子大学学位论文独创性声明及使用授权声明

学位论文独创性声明

本人所呈交的学位论文是在我导师的指导下进行的研究工作及取得的研究成果。据我所知，除文中已经注明引用的内容外，本论文不包含其他个人已经发表或撰写过的研究成果。对本文的研究做出重要贡献的个人和集体，均已在文中作了明确的说明并表示谢意。

研究生签名：马云本

时间：2025年05月24日

使用授权声明

本人完全了解石河子大学有关保留、使用学位论文的规定，学校有权保留学位论文并向国家主管部门或指定机构送交论文的电子版和纸质版。有权将学位论文在学校图书馆保存并允许被查阅。有权自行或许可他人将学位论文编入有关数据库提供检索服务。有权将学位论文的标题和摘要汇编出版。保密的学位论文在解密后适用本规定。

研究生签名：马云本

时间：2025年05月24日

导师签名：孙钦明

时间：2025年05月24日

摘要

目的：全球气候变暖加剧了温度波动与极端低温事件的发生频率，对酿酒葡萄安全越冬构成严峻挑战。天山北麓作为新疆优质酿酒葡萄核心产区，其气候因素、地形效应与主栽品种特性共同导致冬季低温冻害频发。传统埋土越冬因人工成本高、机械化难等问题逐渐被免埋土越冬取代，但冻害风险仍存。本研究旨在通过构建标准化指数解析温度波动对酿酒葡萄生长发育的影响，分析不同覆盖材料下越冬微环境温湿度特征，探究覆盖材料与保温空间的协同效应，优化保温空间参数，最终实现天山北麓产区酿酒葡萄安全越冬，为寒区葡萄酒产业高质量发展提供科学依据。

方法：构建标准化温度适应指数（STAI），量化单纯温度波动强度；结合赤霞珠枝条低温波动胁迫实验，解析温度波动与生理损伤的关系；分析新疆四个酿酒葡萄产区 20 年温度波动变化趋势，结合产量数据评估温度波动对酿酒葡萄产量的影响。设计 7 种越冬处理，布设温湿度传感器监测枝条处、地下 20 cm 及 40 cm 土层数据，分析微环境温湿度变化特征，筛选最优覆盖方案。采用两种覆盖材料结合 6 种高度梯度（5~30 cm）设计 12 个处理，探究保温材料与空间参数的协同效应；构建神经网络模型，预测不同材料最优保温空间参数。

结果：在相同的低温条件下，温度波动增加导致赤霞珠枝条的萌芽率降低 62%，相对电导率上升 6%，PRO、MDA 和可溶性蛋白含量增加，SOD、POD 和 CAT 酶活性先上升然后下降，表明低温波动加剧了低温胁迫。新疆四大酿酒葡萄产区温度波动与产量拟合曲线的高峰与低谷相对应，二者之间存在负相关关系，产区温度波动程度增加导致产量降低。保温被处理在保温效果上最优，越冬综合指标相比彩条布处理提高 356%，最适合赤霞珠安全越冬；双层彩条布处理的越冬安全性同样优于彩条布处理，越冬综合指标相比彩条布提高 130%；隔热保温被的越冬综合指标相比彩条布提高 16%，但越冬过程中枝条温度出现在低温危险区导致其越冬安全性劣于彩条布处理。彩条布覆盖下 5 cm 高度处理保温性能最好，保温被覆盖下 25 cm 高度处理保温性能最好；使用神经网络深度学习方式构建关于保温材料与设施高度的模型，预测得出彩条布覆盖下高度在 6 cm 时保温性能最优，保温被覆盖下高度在 22 cm 时保温性能最优。

结论：本研究构建了能够表示单纯温度波动的 STAI 指数，发现温度波动会对酿酒葡萄生长发育造成负面影响；分析不同覆盖材料越冬过程中微环境温湿度特征，筛选出天山北麓产区最适合覆盖材料为保温被与双层彩条布；发现保温空间对免埋土越冬保温性存在显著影响，使用模型预测出彩条布覆盖高度在 6 cm 时保温性能最优，保温被覆盖下高度在 22 cm 时保温性能最优。本研究构建“气候解析-材料筛选-参数优化”技术体系，为酿酒葡萄产区应对气候变化、实现绿色可持续发展提供理论支持与技术方案。

关键词：气候变化；温度波动；低温胁迫；免埋土越冬；酿酒葡萄

Abstract

Object: Global warming has exacerbated the frequency of temperature fluctuations and extreme low-temperature events, posing a serious challenge to the safe overwintering of wine grapes. The northern foothills of the Tianshan Mountains, as the core production area of Xinjiang's high-quality wine grapes, are characterized by climatic factors, topographical effects and the characteristics of the main varieties, which together lead to the frequent occurrence of low-temperature freezing in winter. The traditional buried soil overwintering has been gradually replaced by non-buried soil overwintering due to high labor cost and difficult mechanization, but the risk of frost damage still exists. This study aims to analyze the impact of temperature fluctuations on the growth and development of wine grapes by constructing a standardized index, analyze the microenvironmental temperature and humidity characteristics of overwintering under different cover materials, explore the synergistic effect of cover materials and thermal insulation space, and optimize the parameters of thermal insulation space, so as to ultimately realize the safe overwintering of wine grapes in Tien Shan North Foothill Appellation, and to provide scientific basis for the high quality development of the wine industry in cold regions.

Methods: Construct the standardized temperature adaptation index (STAI) to quantify the intensity of simple temperature fluctuation; analyze the relationship between temperature fluctuation and physiological damage by combining with the low-temperature fluctuation stress experiment on Cabernet Sauvignon branches; analyze the trend of temperature fluctuation changes in the four winegrape producing areas in Xinjiang over the past 20 years, and combine with the yield data to assess the impact of temperature fluctuation on winegrape yield. Seven overwintering treatments were designed, and temperature and humidity sensors were deployed to monitor the data at the branches and in the 20 cm and 40 cm soil layers below the ground, to analyze the characteristics of temperature and humidity changes in the microenvironment, and to screen the optimal mulching scheme. Twelve treatments were designed using two cover materials combined with six height gradients (5~30 cm) to explore the synergistic effect of thermal insulation materials and spatial parameters; a neural network model was constructed to predict the optimal thermal insulation spatial parameters of different materials.

Results: Under the same low-temperature conditions, increased temperature fluctuations led to a 62 % decrease in the budding rate of Cabernet Sauvignon branches, a 6 % increase in the relative conductivity, an increase in the content of PRO, MDA and soluble protein, and a rise and then a fall in the enzyme activities of SOD, POD and CAT, indicating that low temperature fluctuations aggravated the low-temperature stress. Temperature fluctuations in the four major wine grape production areas in Xinjiang corresponded to the peaks and troughs of the yield fitting curves, and there was a negative correlation between the two, with

increased temperature fluctuations in the production areas leading to lower yields. Sandwich colored cloth treatment has the best heat preservation effect, and the comprehensive index of overwintering is 356% higher than that of colored cloth treatment, which is most suitable for Cabernet Sauvignon's safe overwintering; double-layer colored cloth treatment also has better overwintering safety than that of colored cloth treatment, and the comprehensive index of overwintering is 130% higher than that of colored cloth treatment; the comprehensive index of overwintering of heat-insulating sandwich colorful strips is 16% higher than that of colorful strips, but the temperature of the branch in the overwintering process is in the danger zone of low temperature, which makes its overwintering safety inferior to that of colored cloth treatment. However, the temperature of the branches appeared in the danger zone of low temperature during the overwintering process, which caused its overwintering safety to be inferior to that of the colorful strips treatment. The best heat preservation performance was achieved at a height of 5 cm under the colorful striped cloth cover, and at a height of 25 cm under the heat preservation quilt cover; using the neural network deep learning approach to construct a model on the height of heat preservation materials and facilities, it was predicted that the best heat preservation performance was achieved when the height of the colorful striped cloth cover was 6 cm, and that the best heat preservation performance was achieved when the height of the heat preservation quilt cover was 22 cm.

Conclusion: In this study, an STAI index was constructed to represent simple temperature fluctuations, and it was found that simple temperature fluctuations had a negative impact on the growth and development of wine grapes. The micro-environmental temperature and humidity characteristics of different cover materials during the overwintering process were analyzed, resulting in the screening of the most suitable cover treatments for the northern foothills of the Tianshan Mountains: thermal insulation quilt and double-layer colorful strips. It was demonstrated that the thermal insulation space significantly impacted the overwintering thermal insulation of unburied soil. Through predictive modeling, it was determined that colorful strips achieved optimal performance at a cover height of 6 cm, while the best thermal insulation performance for thermal insulation quilts was predicted at a cover height of 22 cm. A technical system of "climate analysis-material screening-parameter optimization" was constructed, providing theoretical support and technical solutions for alpine production areas to cope with climate change and realize green and sustainable development.

Key words: climate change; temperature fluctuations; low temperature stress; no-burial overwintering; wine grape

目录

引言.....	1
第1章 文献综述.....	3
1.1 温度波动与评价指标构建研究进展.....	3
1.1.1 全球变暖背景下温度波动及其影响研究现状.....	3
1.1.2 温度波动定量化评价指标构建研究.....	4
1.2 酿酒葡萄低温胁迫研究现状.....	5
1.2.1 低温胁迫对酿酒葡萄生长发育表型指标的影响.....	5
1.2.2 低温胁迫对酿酒葡萄生长发育生理指标的影响.....	6
1.3 酿酒葡萄越冬防寒技术研究现状.....	7
1.3.1 酿酒葡萄抗寒育种.....	7
1.3.2 酿酒葡萄抗寒栽培模式.....	8
1.3.3 酿酒葡萄化学抗寒措施.....	8
1.3.4 酿酒葡萄物理抗寒措施.....	8
1.4 研究目的及意义.....	10
1.5 技术路线.....	12
第2章 温度波动对酿酒葡萄枝条及产区产量的影响.....	13
2.1 资料与方法.....	13
2.1.1 研究区概况.....	13
2.1.2 数据来源.....	14
2.2 结果分析.....	20
2.2.1 赤霞珠越冬期枝条低温波动分析.....	20
2.2.2 新疆酿酒葡萄产区温度波动趋势与产量相关性分析.....	24
2.3 讨论.....	29
2.4 本章小结.....	30
第3章 天山北麓酿酒葡萄不同免埋土越冬覆盖方式温湿度特征分析及筛选.....	32
3.1 材料与方法.....	32
3.1.1 试验材料.....	32
3.1.2 试验处理.....	33
3.1.3 数据观测.....	33
3.1.4 数据分析.....	34
3.1.5 越冬过程枝条处低温区域划分.....	34

3.2 结果与分析.....	35
3.2.1 不同覆盖材料越冬过程中葡萄枝条处温湿度变化.....	35
3.2.2 不同覆盖材料越冬过程中地下 20 cm 温湿度变化.....	36
3.2.3 不同覆盖材料越冬过程中地下 40 cm 温湿度变化.....	38
3.2.4 不同覆盖材料对越冬期间低温持续时间的影响.....	40
3.2.5 不同覆盖材料对葡萄枝条日温度变化的影响.....	40
3.2.6 不同覆盖材料越冬过程中枝条处温度波动情况.....	42
3.2.7 基于 PCA 法综合分析评价最优越冬处理.....	42
3.3 讨论.....	43
3.4 本章小结.....	45
第 4 章 基于神经网络的酿酒葡萄免埋土越冬覆盖材料高度分析.....	46
4.1 材料与方法.....	46
4.1.1 试验材料.....	46
4.1.2 试验处理.....	46
4.1.3 数据观测.....	47
4.1.4 数据分析.....	47
4.1.5 温度预测机器学习模型的构建.....	48
4.2 结果与分析.....	49
4.2.1 越冬过程葡萄枝条温度变化趋势.....	49
4.2.2 越冬过程地下 20 cm 土层温度变化趋势.....	52
4.2.3 越冬过程地下 40 cm 土层温度变化趋势.....	54
4.2.4 基于深度神经网络预测不同覆盖材料最佳保温性能高度.....	56
4.3 讨论.....	58
4.4 本章小结.....	60
第 5 章 结论与展望.....	61
5.1 结论.....	61
5.2 展望.....	61
参考文献.....	63

主要符号表

缩写语	英文名	中文名
Rubisco	Ribulose-1,5-bisphosphate carboxylase/oxygenase	核酮糖-1,5-二磷酸羧化酶
SPI	Standardized Precipitation Index	标准化降水指数
STI	Standardized Temperature Index	标准化温度指数
DFA	Detrended Fluctuation Analysis	去趋势波动分析
ROS	Reactive Oxygen Species	活性氧
DNA	DeoxyriboNucleic Acid	脱氧核糖核酸
MDA	Malondialdehyde	丙二醛
SOD	Superoxide Dismutase	超氧化物歧化酶
CAT	Catalase	过氧化氢酶
POD	Peroxidase	过氧化物酶
ABA	Abscisic Acid	脱落酸
IAA	Indole-3-acetic Acid	吲哚乙酸
GA	Gibberellin	赤霉素
CTK	Cytokinin	细胞分裂素
STAI	Standard Temperature Adaptation Index	标准温度适应指数
MLP	Multilayer Perceptron	多层感知机
NFTM	Northern Foothills of the Tianshan Mountains	天山北麓

HTB	Tuha Basin	吐哈盆地
YQB	Yanqi Basin	焉耆盆地
IRV	Yili River Valley	伊犁河谷
TBA	Thiobarbituric Acid	硫代巴比妥酸
PRO	Proline	脯氨酸
PCA	Principal Component Analysis	主成分分析
CFII	Composite Freezing Impact Index	综合冻害指标
Adam	Adaptive Moment Estimation	自适应矩估计
MSE	Mean Squared Error	均方误差
ANN	Artificial Neural Network	人工神经网络

引言

人类活动排放的温室气体已经毋庸置疑地导致了全球变暖，而全球变暖会引起气候波动与极端气候频率的上升，农业生产高度依赖气候条件，全球三分之一的农作物产量变化可以归因于气候变化，其中气候波动对农业生产的影响尤为突出^[1-3]。气候变化与极端气候频发使葡萄酒产业的可持续发展面临严峻挑战，气候条件的长期性变化使酿酒葡萄产区的适宜性发生改变，而气候波动导致的温度，降水等环境因素的短期波动对酿酒葡萄的果实品质与产量造成显著影响，其中持续低温与温度波动造成的酿酒葡萄越冬问题，成为阻碍酿酒葡萄高寒产区稳定生产的关键因素^[4-7]。

越冬期低温冻害作为制约我国北方葡萄酒产业发展的关键因素，造成各产区长期面临酿酒葡萄产量低而不稳的困境^[8]。该问题在天山北麓酿酒葡萄产区表现得尤为突出，该产区作为新疆优质的酿酒葡萄核心产区^[9]，具有与酿酒葡萄发源地波尔多产区相似的气候条件^[10]，充足的光照与降水保证了酿酒葡萄的高质量生产，但是大陆性气候与特殊的地形造就了该产区严酷的冬季环境，叠加气候变化引发的温度波动加剧，导致越冬冻害成为该产区酿酒葡萄生产面临的主要灾害^[11]。赤霞珠（*Vitis vinifera* 'Cabernet Sauvignon'）为该产区主栽品种，其源自欧亚葡萄（*Vitis vinifera*）的特性导致该品种抗寒性弱^[12]，越冬冻害主要表现为葡萄冬芽的冻结与脱水，严重时会导致葡萄枝条的死亡，直接影响次年发芽萌芽率与生长发育，最终导致产量减少与品质下降^[13-14]。这种由气候条件，地形特征与品种特性三重因素综合导致越冬冻害成为阻碍天山北麓产区葡萄酒产业高质量发展的首要因素，如何构建有效的冻害防控体系，已成为当前亟待攻克的技术瓶颈。

为了应对越冬冻害，埋土越冬技术曾被广泛应用于天山北麓产区。该技术通过将葡萄枝条下架后覆盖土壤，利用土壤的热容起到保温作用，从而保护葡萄免受低温冻害^[15]。然而，埋土越冬存在人工成本较高，机械化程度低，操作复杂，容易导致葡萄枝条受损，影响次年葡萄生长的问题^[16]。近年来，免埋土越冬技术逐渐成为研究的热点，这一技术通过使用保温材料如化纤毯、聚乙烯薄膜、聚苯乙烯等，直接覆盖葡萄枝条，解决埋土越冬的局限性。研究表明，免埋土越冬能够提高保温效果，减少人工成本，并且具有较高的劳动效率^[17-18]。然而，使用保温材料覆盖的免埋土越冬法存在防冻效果每年不稳定的问题，在降雪晚少或存在极端低温的越冬期仍然存在发生冻害的风险^[19]。针对免埋土越冬当前尚未筛选出不同气候条件下最适合的保温覆盖材料，其次除覆盖材料本身热阻特性外，缺乏关于其余因素对保温性能的研究。在埋土越冬中，保温性能与土层厚度相关，增厚土层能够提高温度并且降低温度波动^[20]，与免埋

土越冬原理相似的温室其保温性能主要受到材料与其空间参数的影响，而免埋土越冬中空间参数对保温性能的影响尚未明确，以及空间参数与保温材料的协同作用也缺乏系统性研究，使酿酒葡萄免埋土越冬栽培缺少科学完整的理论体系。天山北麓产区现虽采用彩条布覆盖实现免埋土越冬，但越冬冻害现象仍时有发生，因此针对该产区的气候特点，探索基于温度波动的免埋土越冬技术优化方案，具有重要的现实意义。

本研究旨在探讨基于温度波动的酿酒葡萄不同免埋土越冬方式，通过解耦温度变化趋势与波动，构建独立于温度均值的波动指数，解析其对酿酒葡萄生长发育的影响，评估不同保温材料与不同覆盖方式的保温效果，通过模型预测不同材料最优保温性能所对应的空间参数，以提高越冬保温效果，减少冻害发生，确保酿酒葡萄的安全越冬及稳定生产。研究结果将为我国北方酿酒葡萄产区的免埋土越冬技术优化提供理论支持，并为推动葡萄酒产业的可持续发展提供技术保障。

第1章 文献综述

1.1 温度波动与评价指标构建研究进展

1.1.1 全球变暖背景下温度波动及其影响研究现状

联合国政府间气候变化专门委员会在《AR6 Synthesis Report: Climate Change 2023》中指出,人类活动导致大气中的 CO₂ 浓度在不断升高,使全球变暖趋势不断加剧,全球气温已上升 1.1 °C。全球气温的升高不仅影响了平均温度水平,还严重影响了温度的波动性和极端温度事件的发生情况。全球气候的温度变化呈现出一定的规律性和稳定性,但近年来,随着人类活动导致温室气体浓度的显著增加,全球范围内温度的稳定性遭遇前所未有的挑战。这一变化不仅影响了全球温度的均衡,还加剧了温度的极端波动,具体表现为极端高温、极端低温事件的增加以及温度的不均匀升高^[21-24]。温室效应造成了全球范围内温度的不均匀变化,这意味着在不同地区生长的植物会受到不同的影响,受温室效应的影响美国南部的大豆产量预计损失 2.4 %,但美国中西部的大豆预计增产 1.7 %^[25]。

气候变化引发的温度波动将显著影响植物的生理过程和形态变化。植物的光合速率是温度对植物生理影响的典型例证,核酮糖-1,5-二磷酸羧化酶(Rubisco)催化植物的光反应,温度的波动会影响 Rubisco 酶的活性,从而影响光合作用^[26]。温度对于植物形态构成的影响也十分显著,直接影响植物叶片,根系的形态发育。叶片的萌发、生长速率与温度密切相关,拟南芥中在 6~26 °C 范围内温度与叶片生长速率呈线性关系^[27],作物植物的叶片生长亦随温度升高而加速,直到达到物种特定的最适温度(例如,小麦为 26 °C,棉花为 37 °C),在叶片生长过程中温度波动会影响叶片的生长速率^[25]。叶片的形态变化,如叶柄和下胚轴的伸长,也受温度波动的影响,表现出类似于遮阴避免反应的特征^[28-29]。温度对于根系生长的影响与叶片相似,温度升高通常会升高根系生长速率,温度的波动会影响根系的生长速率。不同物种在不同温度条件下的根系形态表现各异,例如玉米在 22 °C 时根长显著增加^[30],棉花和向日葵则在特定的温度范围内显示出最佳的根系生长^[31]。温度波动对植物生殖生长同样有显著影响,温度会影响植物从营养生长到生殖生长的过渡时间,拟南芥在高温条件下会提前开花^[32],但过高的温度会减少植物积累成功繁殖所需的资源^[33],并且温度波动会影响植物花器官的发育与雄配子的活性,在拟南芥中,温度升高会导致胚珠数量减少并增加胚珠废弃率^[34],温度胁迫导致的花药细胞的早期死亡及花粉母细胞的程序性死亡是花粉

失活的主要原因^[35]，这些温度波动会导致作物受精失败，进而影响产量^[36]。气候变化所带来的温度稳定性下降使温度波动情况出现的更加频繁，除了温度变化趋势，单纯的温度波动也会对植物的生长发育造成影响^[37]，例如与持续的高温相比，波动性高温能够更进一步加速植物开花时间，说明单纯的温度波动也参与了植物开花调控^[38]，单纯的温度波动会使植物正向和反向的生化反应过程成倍的增加^[39]，在光照条件相同的情况下温度波动会导致植物的最大光合效率与 CO₂ 产生量下降^[40]，也有研究表明在温度波动条件下生长的植物可能会提高作物的产量^[41]。目前关于温度波动对植物生长发育的影响主要集中在温度的变化趋势而非单纯的温度波动本身^[42-43]。

1.1.2 温度波动定量化评价指标构建研究

关于气候波动变化特征及其影响目前已经开展了大量研究，尤其是在降水方面，McKee 等人^[44]提出了标准化降水指数（SPI），SPI 是基于标准化降水量所构建的一个关于干旱的函数，在降水时空变化特征分析方面具有广泛的应用^[45]。该指数可以检测多尺度下的干旱特征，在世界气象组织的推荐下被广泛应用于干旱演变和干旱胁迫程度^[46-54]。温度是具备与降水量相同的诸多特征的时间序列，Zscheischler 基于 SPI 定义了标准化温度指数（STI），将 STI 指数用于分析温度的时空演变特征，STI 参考了 SPI 的构建方式，与 SPI 存在相同的局限性，STI 指数只能用以表示温度变化的趋势而不能表示温度的其他方面的特征^[55]。STI 的构建来自温度期望值，不能表示出单纯的温度波动情况，在全球变暖的背景下，温度稳定性研究的意义日渐凸显，在气候研究中温度波动的重要性逐步上升。在关于温度波动的研究中多采用去趋势波动分析（DFA）、温度距平、温度方差、傅里叶分析等方法进行研究。DFA 是研究时间序列波动程度常用的方法，它通过计算时间序列在不同时间尺度上的波动幅度，能够有效揭示温度数据中的长期相关性和自相关性，DFA 通过将时间序列分段、去趋势和计算波动，能够识别出温度变化中的长期记忆效应，从而为理解气候系统的复杂性提供重要线索；温度距平通过计算某一时刻的温度值与其长期平均值的差值，能够直观地反映温度的异常变化情况，通过分析温度距平的时间序列，研究者们可以识别出极端温度事件及其对气候系统的影响；温度方差则从统计学的角度出发，通过衡量温度数据的离散程度，为评估温度波动的强度提供了量化指标，温度方差的大小能够反映温度变化的剧烈程度；傅里叶分析作为一种强大的频域分析工具，能够将温度时间序列分解为不同频率的成分，从而揭示出温度变化中的周期性特征^[21, 56-58]。使用这些方法对于温度波动的研究均未摆脱温度期望值的影响，无法表示出单纯的温度波动情况。单纯的温度波动指标的构建对于现气候波动日益增强背景下的农业气象研究具有重要意义，构建指标定量化评价温度波动程度，能够帮助减缓由于单纯的温度波动对于农业生产造成的影

响。

1.2 酿酒葡萄低温胁迫研究现状

欧亚葡萄 (*Vitis vinifera*) 是全球最广泛种植的酿酒葡萄种, 也是现代酿酒葡萄的主要来源, 大多著名的酿酒葡萄品种, 如赤霞珠、霞多丽、梅洛和黑皮诺等, 均源自欧亚葡萄种^[59]。欧亚葡萄原产于地中海区域, 温暖的地中海气候决定了其较低的抗寒能力, 随着全球葡萄酒产业的快速发展使酿酒葡萄生产处于不同气候条件下, 低温胁迫已成为全球多个酿酒葡萄产区面临的主要非生物胁迫因素之一^[60]。

1.2.1 低温胁迫对酿酒葡萄生长发育表型指标的影响

低温胁迫对酿酒葡萄的生长和发育具有广泛的影响。酿酒葡萄的萌芽期是其生长周期中的关键阶段, 标志着葡萄植株从冬季休眠期进入活跃的生长阶段。早春的低温对葡萄萌芽期有显著影响, 因为葡萄的萌芽过程主要受温度的驱动, 只有当积温达到一定值时, 葡萄芽才会萌发, 然而, 低温会减缓葡萄的生理活动, 延迟萌芽时间, 甚至可能导致部分芽的发育停滞, 从而影响整个生长季节的生产力^[61-62]。在新疆产区, 出现的“倒春寒”现象会导致温度骤降, 进而对葡萄芽造成显著的冻害, 低温可导致芽细胞结构损伤, 水分冻结后膨胀破坏细胞膜, 造成芽死亡或严重损伤^[63]。这种冻害不仅直接影响当年的产量, 还可能对第二年的生长潜力造成负面影响。冻害后, 葡萄植株可能出现“空芽”现象, 即表面看似健康的芽实际上已经死亡, 导致植物发育不良, 甚至影响后续生长和果实的成熟^[64]。

低温胁迫还会显著影响酿酒葡萄的形态建成。受到低温影响的葡萄植株, 其总枝条生长量、叶数、叶面积、枝条干重等形态学指标显著低于未受低温影响的葡萄植株^[65]。

此外, 低温胁迫对葡萄的生殖生长也存在不利影响。低温会抑制花器官的形成与发育, 葡萄花芽原基的形成需要一定的温度条件, 而花芽分化过程中气温与开花枝条的形成呈显著的正相关关系^[66]。在低温胁迫下, 葡萄的坐果率显著下降, 花粉管和胚珠的发育受到影响, 花粉管数量减少, 胚珠发育不成熟。同时, 低温还会抑制花粉中与萌发相关的酶的活性, 导致花粉萌发不完全, 花粉活力的降低直接导致授粉失败, 从而影响坐果率, 进而影响葡萄的产量^[67-68]。温度对酿酒葡萄的果实品质也有重要影响, 尤其是在可溶性固形物、可滴定酸和花青素含量方面, 这些果实品质指标直接影响葡萄酒的品质, 低温会抑制可溶性固形物的积累, 同时促进可滴定酸的生成, 导致葡萄果实酸度过高, 这不利于高品质葡萄酒的生产, 此外, 当环境温度低于 25 °C 时,