



薛婷婷, 张佳佳, 聂榕博, 付东艳, 王志磊, 张亮, 张军翔, 徐国前. 中国酿酒葡萄越冬特性与保护措施研究进展[J]. 中国农业大学学报, 2025, 30(05): 83-95.
XUE Tingting, ZHANG Jiajia, NIE Rongbo, FU Dongyan, WANG Zhilei, ZHANG Liang, ZHANG Junxiang, XU Guoqian. Research progress on winter survival characteristics and protection measures of wine grapes in China[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2025, 30(05): 83-95.
DOI: 10.11841/j.issn.1007-4333.2025.05.07

中国酿酒葡萄越冬特性与保护措施研究进展

薛婷婷^{1,2} 张佳佳¹ 聂榕博¹ 付东艳³ 王志磊^{1,2} 张亮^{1,2} 张军翔^{1,2} 徐国前^{1,2*}

(1. 宁夏大学 葡萄酒与园艺学院, 银川 750021;

2. 葡萄与葡萄酒教育部工程研究中心/宁夏葡萄与葡萄酒工程技术研究中心, 银川 750021;

3. 宁夏贺兰山东麓葡萄酒产业技术协同创新中心, 银川 750021)

摘要 为保障酿酒葡萄的越冬安全及葡萄酒产业的稳定发展, 针对低温、大风等气象灾害频繁侵袭影响酿酒葡萄越冬的问题, 本研究采用文献研读的方法, 对酿酒葡萄越冬相关领域的研究进行了全面综述, 涵盖酿酒葡萄越冬生理特性与萌芽机制、影响酿酒葡萄越冬能力的因素以及越冬保护措施等方面。结果表明: 1) 酿酒葡萄在生育期进程和外界温度变化的交互作用下, 经抗寒锻炼进入休眠期以增强抗寒能力; 2) 葡萄品种、温度条件及田间管理措施相互关联, 共同影响其越冬能力, 且不同品种抗寒特性差异显著, 合理田间管理可显著提升抗寒能力; 3) 覆盖和防风障等管理手段能有效减轻冬季寒害和规避晚春霜冻。综上, 酿酒葡萄越冬管理需综合考虑多因素, 并优化措施以应对气候变化挑战, 保障越冬质量和来年产量。

关键词 抗寒性; 休眠; 越冬; 埋土; 酿酒葡萄

中图分类号 S663.1

文章编号 1007-4333(2025)05-0083-13

文献标志码 A

Research progress on winter survival characteristics and protection measures of wine grapes in China

XUE Tingting^{1,2}, ZHANG Jiajia¹, NIE Rongbo¹, FU Dongyan³, WANG Zhilei^{1,2},
ZHANG Liang^{1,2}, ZHANG Junxiang^{1,2}, XU Guoqian^{1,2*}

(1. School of Enology and Horticulture, Ningxia University, Yinchuan 750021, China;

2. Engineering Research Center of Grape and Wine, Ministry of Education/Ningxia Grape and Wine Engineering Technology Center, Yinchuan 750021, China;

3. Collaborative Innovation Center for Wine Industry Technology of Ningxia Helan Mountain Eastern Foothills, Yinchuan 750021, China)

Abstract In order to ensure the over-wintering safety of wine grapes and stable development of the wine industry, aiming at the problem that meteorological disasters such as low temperatures and strong winds frequently affect the over-wintering of wine grapes, this study comprehensively reviewed the research in the related fields of wine grapes over-wintering through literature review. The review covered the over-wintering physiological characteristics and budding mechanism of wine grapes, factors influencing the over-wintering ability of wine grapes, and over-wintering protection measures. The results indicate that: 1) Under the interaction of the growth period process and external temperature changes, the cold-resistance ability of

收稿日期: 2024-06-21

基金项目: 宁夏自然科学基金项目(2023AAC03064, 2023AAC03143); 国家自然科学基金项目(32360804); 宁夏回族自治区重点研发计划项目(2023BCF01026-02); 宁夏贺兰山东麓葡萄酒产业技术协同创新中心葡萄酒领域科技人才开放课题(CXZXKT2024016)

第一作者: 薛婷婷(ORCID:0000-0003-1721-5756), 博士, 副教授, 主要从事酿酒葡萄冬季免埋土和生态栽培研究, E-mail: xtt@nxu.edu.cn

通讯作者: 徐国前(ORCID:0000-0003-3122-2872), 博士, 讲师, 主要从事酿酒葡萄冬季免埋土和生态栽培研究, E-mail: xgq@nxu.edu.cn

wine grapes is enhanced by undergoing cold-hardening and entering the dormancy period. 2) The grape varieties, temperature conditions, and field management measures are interrelated and jointly affect the overwintering ability of wine-making grapes. There are significant differences in cold-resistance characteristics among different grape varieties, and reasonable field management can significantly enhance grape's cold-resistance ability. 3) Management measures such as covering and windbreak can effectively reduce winter cold damage and avoid late-spring frost. In summary, the overwintering management of wine grapes needs to consider multiple factors comprehensively, and measures should be optimized to meet the challenges of climate change to ensure the overwintering quality and the yield of the following year.

Keywords cold resistance; dormancy; overwintering; soil-burial; wine grape

世界上大部分酿酒葡萄产区受地中海气候影响,而中国的大多数酿酒葡萄种植在明显具有大陆性季风气候的地区,这些地区的特点是夏季炎热多雨,冬季寒冷干燥^[1-5]。葡萄树冬春季易受低温冻害、干害和霜冻等多种不利环境因素影响^[3,6-7]。

尽管高品质葡萄与葡萄酒的生产受诸多因素共同作用,但气候条件在葡萄生长进程中起关键作用^[8-9]。此外,欧亚种葡萄(*Vitis vinifera*)具有高度的形态和遗传多样性,由于其果实品质高,大多数生产栽培品种都源自欧亚种葡萄,但欧亚种葡萄抗寒性较低^[10]。中国北方葡萄产区主要种植欧亚种葡萄,冬季常面临气温低于 -15°C 及大风天气所致的冻害与枝条干枯问题,多采用埋土防寒措施保障酿酒葡萄安全越冬。中国90%的酿酒葡萄种植在冬季埋土防寒区,葡萄冬季修剪后进行埋土,春季再出土^[3-4,11]。

然而,下架、埋土、出土及上架等频繁操作,致使酿酒葡萄的劳动强度和生产成本增加,对葡萄树体造成损伤,缩短了植株寿命且降低了产量。同时,埋土过程中各个环节的机械化程度有限,这对提升葡萄产业的机械化水平产生一定制约^[4,6]。劳动力日益短缺的现状将对中国葡萄产业的可持续发展构成限制。此外,冬季埋土时间最长可达6个月,埋土时翻动土壤会导致土壤表面裸露,使葡萄园更易受到风蚀影响^[4,6]。中国北方的葡萄埋土区主要位于干旱和半干旱地区,与中国主要的农田风蚀区域高度重合,因此,埋土导致的土壤裸露进一步增加了葡萄种植区的风蚀风险^[4]。因此,探索替代埋土的其他措施,以确保葡萄免受冬季低温和大风影响,是中国北方葡萄产区的迫切需求。

1 葡萄越冬与萌芽

果树通过在一年中最冷的时候停止生长以避

免冬季低温等不利气候因素产生的损害,顺利越冬^[12]。葡萄植株的越冬能力受到多个因素的综合影响,包括品种特性、植株生长状况、生育期、器官类型、树龄、枝条成熟度以及病虫害等。其中,品种的遗传特性是最为关键的因素^[13-14]。环境因素也在葡萄的越冬性中发挥重要作用,主要包括冬季极端低温、温度下降速度、低温持续时间、风力大小、日照和降雪等条件^[15-16]。此外,不同的葡萄管理模式也会影响其越冬表现^[4]。

葡萄的越冬能力不仅体现为其抗寒特性,同时也包括对其他不良环境因素如干旱的综合抗性,涉及果树进入休眠期的能力、土壤条件、果树品种和栽培管理等多方面的因素,包含了果树从秋季进入休眠到春季恢复生长的整个过程^[4]。作为世界重要的园艺作物之一,葡萄对寒冷气候具有中等耐受性,但在寒冷的栽培地区仍可能受到低温的影响和损害^[17]。葡萄的抗寒性是一种在低温条件下的耐受能力,这一过程是动态的,随着植株生育期和外界温度的变化而调整。在冬季,当外界温度逐渐降低时,葡萄植株通过抗寒锻炼逐步提升其抗寒性,最终进入休眠状态,进一步增强其抵御寒冷的能力^[9]。

1.1 抗寒锻炼

低温会对抗寒性差的葡萄品种造成严重损害^[18]。葡萄品种的抗寒性是一个复杂的现象,例如,寒冷发生前的一段温暖天气会使葡萄植株变得更易受寒冷影响^[17]。在低于零度的环境中,葡萄的抗寒性逐步提升,这一过程被称为抗寒锻炼。抗寒锻炼是由低温驱动的生理、生化和表观遗传变化赋予抗寒性的过程^[19-20]。在严冬来临前,日照和逐渐降低的温度促使葡萄植株进行抗寒锻炼,此过程中植株的外在形态和内部生理功能均发生相应变化,以适应冬季低温,增强其抗寒性。葡萄在抗寒锻炼

期间,光合强度、呼吸作用、酶活性及某些细胞内物质都会发生变化,包括细胞渗透调节、水分生理、膜脂结构和透性变化,光合作用减弱,可溶性糖和蛋白质含量增加,蔗糖积累,激素代谢的调整及酶相关基因的表达^[21-24]。

深入研究低温锻炼和脱锻炼过程中渗透调节物质的变化,对于阐明北方葡萄的越冬机制至关重要。研究表明,葡萄在抗寒锻炼过程中发生的生理代谢变化与其遗传背景密切相关。通过高通量测序技术,分析一种山葡萄在4℃低温下处理48 h后的基因表达谱,结果显示抗寒锻炼后大量表达的基因主要涉及防御、转录、信号传导、运输及各种代谢过程,揭示了低温条件下山葡萄抗寒反应的关键基因和代谢途径^[18,25]。对酿酒葡萄和河岸葡萄在相同

低温条件下的抗寒锻炼研究显示,抗寒性较强的河岸葡萄在抗寒相关的转录因子CBF1、CBF2、CBF3和CBF4上的表达水平更高^[17]。研究还发现,在相同的低温条件下,抗寒性较强的山葡萄和麝香葡萄幼苗进行抗寒锻炼后,其叶片中积累了不同的代谢物质,如碳水化合物、氨基酸和有机酸等^[24];亮氨酸、缬氨酸、脯氨酸、2-氧戊二酸和腐胺等代谢物在山葡萄中积累,而在麝香葡萄中未见显著积累;两者之间的代谢物差异反映了抗寒锻炼后基因表达水平的不同,这可能与山葡萄的优良耐寒性有关^[24]。

在抗寒锻炼过程中,随着外界温度的降低,葡萄植株的整体代谢强度逐渐减弱,生长缓慢停止,最终进入休眠状态(图1)。

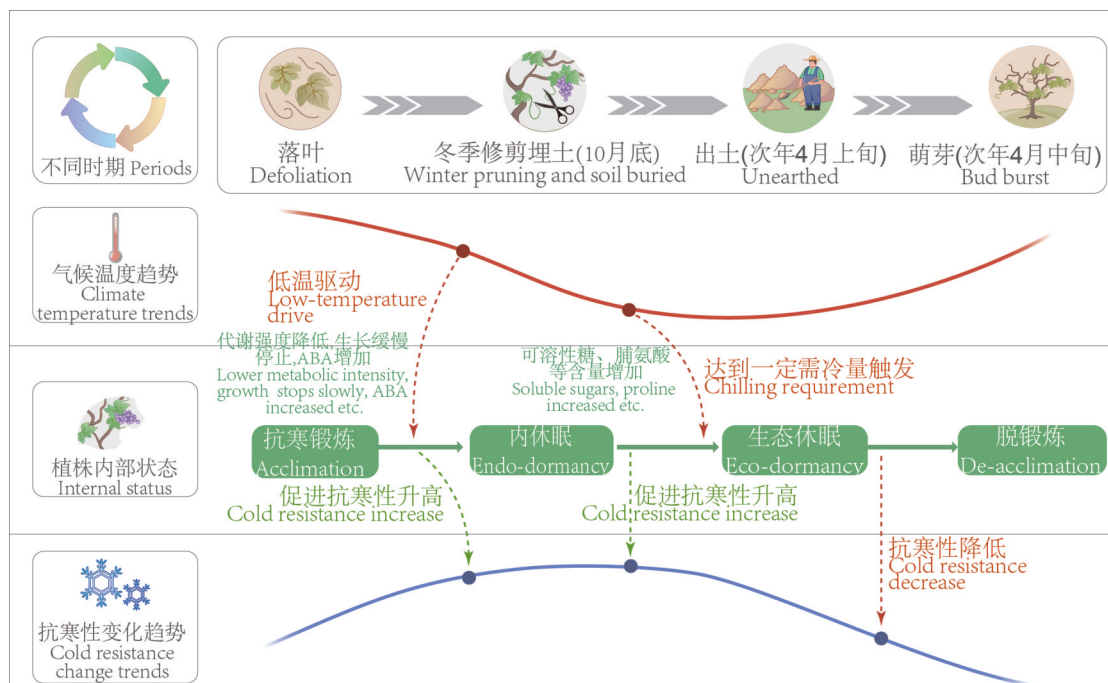


图1 酿酒葡萄在埋土区越冬的过程(以贺兰山地区东麓为例)

Fig. 1 The wintering process of wine grapes in buried soil regions (Taking the Eastern Foothills of the Helan Mountains as an example)

1.2 休眠及抗寒性

抗寒性在整个休眠季节动态改变,主要受温度影响,光周期的作用相对较弱。在秋季,植株逐渐适应寒冷环境,对低于零度的温度变得更加耐受;而到春季,植株则会经历脱锻炼过程,逐渐失去抗寒性^[15,26]。整个越冬过程中,抗寒性遵循着从抗寒锻炼到脱锻炼的顺序。随着温度下降,植株通过抗

寒锻炼获得抗寒能力并进入生态休眠期,只要温度持续相对较低且稳定,抗寒性通常在仲冬保持稳定。每个冬季的特定环境条件、遗传特性和变异决定了休眠芽的最大抗寒性,而这种抗寒性并非每个冬季都会自动达到。冻害可能会影响葡萄藤的多个器官和组织,包括根系、树干、木质部、韧皮部、形成层以及休眠芽。休眠芽依靠一种称为过冷的机

制,在冰冻条件下存活^[16,21]。对于不同器官来说,多年生部分的抗寒性优于新生枝条,而在不同生育期,休眠期的抗寒能力明显强于生长期^[20]。此外,最大抗寒性需要持续的低温冬季才能达到。根据品种的不同,葡萄芽可承受低至 $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下的温度^[27]。

休眠并非生命活动的终止,而是植物对季节性环境适应的一种生物学现象,对植株的长期生存具有重要的生态和生物学意义^[28]。休眠的形成受到光照周期逐渐缩短和温度逐渐下降的双重作用^[28-29]。植株进入休眠的本质是为了应对冬季不利的环境条件,通过推迟萌芽,避免因短暂的冬季气温回升而引发早期发芽,从而防止对植株造成损害^[27]。

内休眠是由内部因素决定的,帮助芽适应寒冷气候,并在冬季耐受冰冻温度^[27]。植株的休眠特性与抗寒能力密切相关,在抗寒锻炼过程中,植株的生长逐渐受到抑制,细胞分裂停止,呼吸等代谢活动减少,细胞内物质发生一系列变化,大幅度增强了葡萄的抗寒性,使其能够适应冬季低温^[30]。休眠是通过多种代谢综合调控和多基因协同作用的结果。果树芽在休眠期的生理代谢变化与生长期不同,虽然表面看似停止活动,实际内部仍有复杂的代谢过程,主要涉及抗氧化、水分、激素和呼吸代谢等方面^[31-33]。通过低温放热差热分析技术,可以精确测量休眠芽的抗寒性,研究表明休眠组织对温度的响应与冬季抗寒性之间存在重要联系^[30,34]。

分析不同品种休眠期抗寒性成分表明,葡萄幼苗的含水量、蛋白质、氨基酸、脯氨酸、糖类和抗坏血酸含量是衡量葡萄抗寒性的重要指标。进入深度休眠后,原生质脱水,细胞表面形成厚纤维素膜和拟脂物质,可溶性糖、氨基酸和脯氨酸含量增加,而抗氧化物质如SOD酶等呈下降趋势^[15]。这些变化与植株抗逆性的提高密切相关。激素如赤霉素(GAs)和脱落酸(ABA)在调控植株发育过程中发挥重要作用,尤其在种子休眠和萌发中。冬季期间,赤霉素促进种子萌发,而脱落酸则诱导并维持休眠^[35-36]。研究表明,葡萄芽在达到最大休眠深度时,ABA的含量达到峰值,并在内休眠结束时逐渐下降。ABA还被观察到可以促进休眠芽中的淀粉合成,并调节休眠深度^[27]。

1.3 葡萄萌芽机理

生态休眠代表了葡萄越冬过程的后半部分,此

时葡萄开始脱锻炼,为春季的萌芽做准备^[16]。萌芽率的高低、萌芽期的早晚及萌芽整齐度能够体现葡萄对冬季恶劣环境的综合抗性,并且与其遗传特性密切相关。温度是影响葡萄生长发育的关键环境因素,但在不同生长阶段,葡萄对温度的需求有所不同。芽从进入休眠、解除休眠到萌芽的整个过程均受温度调控^[37]。温度对葡萄芽萌发的影响主要体现在需冷量和积温2个方面。果树在冬季受到外部环境的影响进入休眠,需冷量达到特定要求后,植株由内休眠转为生态休眠,休眠解除,芽才进入萌发准备阶段^[28,38-40]。

当需冷量满足要求并打破冬芽的休眠后,随着外界温度逐步升高,植株开始累积有效积温。当有效积温满足葡萄的萌发需求时,芽会萌发,随后完成次年的生长和发育过程。空气和土壤的有效积温共同影响葡萄萌芽,且与萌芽进程呈显著正相关^[12]。然而,一旦芽在脱锻炼过程中开始膨胀并逐渐失去硬度,其抗寒性会迅速下降,极易受到霜冻损害^[27,41]。

葡萄顺利解除休眠并正常萌芽的主要原因是需冷量和有效积温均达到植株需求,此外地下根系的调控及其他因素也对萌芽过程有影响^[42]。研究表明,干旱胁迫会改变植物活动——休眠周期的潜在机制;水分胁迫通过延迟内生休眠的开始、减少解除内生休眠所需的需冷量,并加速生态休眠期间的生长准备,从而缩短了休眠周期;支持干旱胁迫调控网络与调节休眠周期的环境信号和激素信号相互作用^[43]。

2 中国北方地区酿酒葡萄越冬面临的生产问题

在中国北方的葡萄种植中,越冬阶段至关重要。不同的栽培模式、葡萄园管理方式以及抗寒措施都会直接影响葡萄的越冬效果^[4]。如果葡萄在冬季未能顺利越冬,植株就会遭受损害,不仅影响产量和品质,严重时甚至可能导致植株死亡。酿酒葡萄的越冬能力与其生长动态和内部生理变化密切相关。许多因素可能导致葡萄越冬性不佳,如冬季低温和植株因各种原因导致的生理干旱,萌芽过早以及早春气温波动也可能造成芽体或嫩梢冻伤^[27]。在中国北方,葡萄在冬季面临低温、干旱和温度骤变等不利环境因素的影响,酿酒葡萄的越冬能力是

指其对这些不利条件的综合抵抗能力。抗寒能力虽然是决定葡萄越冬性的关键因素,但抗寒性强的品种或植株不一定就具有良好的越冬能力,因为干燥和大风的气候也会严重影响其越冬表现^[16,27]。

与其他葡萄酒生产国不同,中国北方的气候以大陆性季风气候为主,冬季寒冷干燥;而其他国家主要是地中海气候,冬季凉爽湿润^[3,44-45]。在北方的大部分地区,主栽的欧亚种葡萄在冬季气温低至 -15°C 时,必须采用埋土措施进行越冬。根据积温和干燥度的不同,酿酒葡萄种植区可以划分为多个适宜性区域:当活动积温(AAT) $<2\,500^{\circ}\text{C}$ 时,不适合种植葡萄;AAT $\geq 2\,500^{\circ}\text{C}$ 、无霜期(FFP) $<160\text{d}$ 的地区适合种植山葡萄,通常在这些区域的北部仍需使用抗寒砧木并采取冬季埋土措施以防寒;AAT $\geq 2\,500^{\circ}\text{C}$ 、FFP $\geq 160\text{d}$ 、干燥度(DI) ≥ 1 的地区为欧亚种葡萄的传统种植区,虽然90%的区域需要埋土防寒,但这些地区适合欧亚种和欧美杂交种葡萄的露地栽培;AAT $\geq 2\,500^{\circ}\text{C}$ 、FFP $\geq 160\text{d}$ 、DI为0.6~1.0的区域,热量充足,适合欧美杂交种的栽培,而欧亚种在此区则需要避雨栽培;DI <0.6 的地区虽然热量充足,但降水过多,必须采取避雨栽培措施,原产于此区域的毛葡萄和刺葡萄可以露地生长^[3,46]。中国北方葡萄种植地区越冬面临的生产问题主要有低温伤害和抽干伤害^[40,45]。

2.1 低温伤害

温度因素在很大程度上影响植物的分布和生长,低温对植物的损害频率较高,且危害严重。冻害限制了多年生农作物的生长范围^[34,47]。葡萄作为全球重要的园艺作物,对寒冷条件具有中等的耐受性,但在不同地区仍会受到低温伤害^[17]。在中国北方,葡萄的低温冻害主要发生在冬季和春季。冬季休眠期的植株可能因低温环境受到冻害,而春季气温的不稳定则容易导致芽体冻伤等问题,最终影响葡萄的质量和产量^[4,48](图2)。

2.1.1 冬季冻害

全球范围内,葡萄的种植纬度约在 $30^{\circ}\sim 45^{\circ}\text{S}$ 和 $20^{\circ}\sim 52^{\circ}\text{N}$,尤其 $37^{\circ}\sim 43^{\circ}\text{N}$ 被视为酿酒葡萄种植的黄金地带,因昼夜温差大、光照充足,许多著名的葡萄酒产区如法国、意大利、美国、澳大利亚、智利、南美和北美的葡萄园分布在该区域^[46]。相比之下,同纬度地区的冬季,中国是最为寒冷的国家^[3]。葡萄冬季埋土措施是影响葡萄种植及生产效益的关

键因素之一,同时也是葡萄气候区划中的重要指标。根据对中国北方葡萄种植区多年的研究,欧亚种葡萄不需要埋土的温度下限大约为年极端最低气温为 $-14\sim -15^{\circ}\text{C}$ 的地区,主要分布在西藏、云南、四川、甘肃、陕西、山西、河南、江苏和山东等省份(自治区)^[46]。如果某一地区每5~10年出现一次 -15°C 或更低的气温,该地区种植的欧亚种葡萄在冬季则需要采取埋土防寒措施^[4]。

冬季低温通过破坏细胞组织影响葡萄的越冬安全,造成植株损伤或死亡,最终导致产量减少和果实品质下降^[6,49]。酿酒葡萄对低温伤害的反应涉及4条关键途径,包括:1)钙/钙调素介导的信号传导;2)碳水化合物代谢,如细胞壁果胶和纤维素的水解、蔗糖分解、棉子糖的合成以及糖醇解的抑制;3)不饱和脂肪酸合成和亚麻酸代谢;4)次生代谢产物的合成,特别是黄酮类化合物^[50]。埋土防寒措施是影响葡萄园收入和管理的重要因素之一。在埋土防寒边缘地区,推荐引进更多抗寒品种,如山葡萄是一种耐寒性极强的品种,能够在低至 -40°C 的条件下安全生存,是培育耐寒杂交品种的重要资源^[3]。

2.1.2 春季霜冻

晚霜冻是指在寒冷季节向温暖季节过渡时发生的霜冻,通常在中纬度平原地区的春季出现,因此也被称为春霜冻^[51]。春霜冻对果树的种植常常造成巨大的损害,带来严重的经济损失^[41,52-53]。植物的结构对低温的敏感程度不同,这取决于它们的耐寒水平(随季节变化)以及维持低温的能力。实际上,绿色组织、花朵和果实比木质组织更容易受到低温伤害,因为它们的含水量较高,且过冷能力较弱。此外,未来冬季的气温稳定性预期会下降,因此有必要使用对所谓“假春天”反应较弱的品种^[16]。“假春天”指的是一段异常温暖的时期,导致植物过早萌芽生长,随后遭遇冰冻天气。此后气温骤降会对光合作用组织和生殖组织产生更严重的损害,影响植物多年的生长和发育^[27,53]。

春季是酿酒葡萄生长发育的关键时期,尤其是春季的气象条件,特别是温度,对葡萄的生长、产量和品质有重要影响。春季气温骤降会导致幼芽和嫩梢发生晚霜冻害,从而降低浆果质量和产量^[41,52-53]。近年来,春季晚霜冻害频繁发生,对葡萄生产造成了极大威胁。2004年和2012年,葡萄因晚

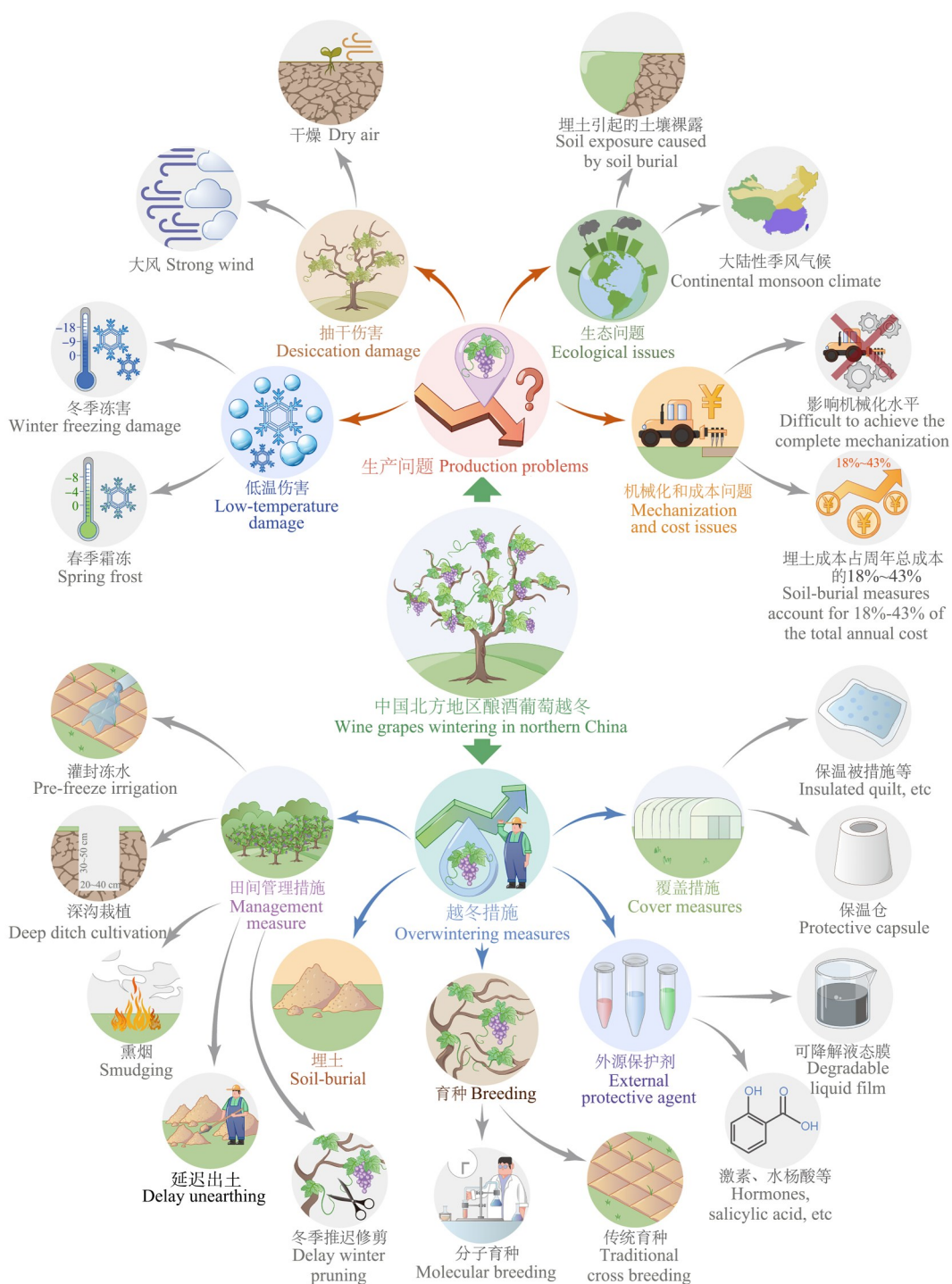


图2 北方越冬酿酒葡萄的生产问题及生产措施

Fig. 2 Production challenges and management measures for wintering wine grapes in northern regions

霜冻害损失严重,产量受到了很大影响,而轻微的晚霜每年也不同程度地发生^[54]。在其他国家的葡萄种植区,部分年份也会出现霜冻,影响葡萄生产^[52]。

中国西北地区是主要的葡萄产区之一,气温波

动较大,春季升温快但不稳定,易出现倒春寒天气,频繁的霜冻严重影响葡萄的生长并降低产量^[55-56]。霜冻的发生是由于地面或近地表空气温度短时间内降至 0°C 以下,导致植株受到低温伤害或死亡^[57]。欧亚种葡萄在芽刚萌发时可以忍受 $-1\sim-2^{\circ}\text{C}$ 的

低温,但在 $-3\sim-4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时就会受到冻害。春季气温的骤降常常对葡萄的新芽造成伤害^[58]。葡萄的不同器官以及不同生长期对低温的耐受能力各不相同,植株在休眠期对低温的耐受能力最强,而在春季,幼芽、嫩梢和幼叶等幼嫩器官的耐寒能力大幅下降。因此,霜冻发生的时间越晚,对植株的损害就越严重^[55,59]。种植者通常采取一系列措施来减少霜冻的影响,例如在易发生霜冻的地区选择萌芽较晚的葡萄品种^[27]。

2.2 抽干伤害

中国北方属于大陆性季风气候,是世界上干旱半干旱地区面积较大的国家之一,冬季低温少雨、大风频繁、空气干燥^[60]。在越冬期间,桃、梨、苹果和葡萄等果树可能由于气候因素发生抽干现象,表现为1~2年生枝条或地上部干枯死亡,严重阻碍树体的生长发育和开花结果,造成生产损失^[57,60-61]。冬季抽干伤害会对葡萄栽培以及葡萄酒的生产和质量产生不利影响^[60,62]。一些冬季温度不是很低的地区,影响葡萄越冬的主要因素可能是干害引起的抽条,这种伤害被称为“干冻害”。葡萄的冻害和抽干在外部症状表现上有明显的不同。枝条受到外界低温伤害严重时截面会变褐,其地上部分发生伤害的顺序是自下而上,而发生大风等因素引起的干害时枝条从逐渐呈白色到最后发生抽干,是自上而下的干枯。冬季雨雪较少时,果树的冻旱灾害更加严重,在低温及干旱条件的综合影响下,树体脱水形成生理干旱,导致组织皱缩干枯^[60,62](图2)。

抽干伤害的发生与植株的遗传特性有关,皮孔较大、角质层与木栓层不发达的果树更易发生抽干现象^[62]。大风天气会降低土壤和空气的湿度,加速葡萄枝条水分蒸发,导致地上部失水与根系水分吸收失衡,最终引发干害,并严重影响第2年的芽眼萌发。无论何种因素导致的地上部失水,只要根系水分吸收不平衡,都会导致干害的发生。例如,春季果树蒸腾量增加,而根系无法从未解冻的土壤中吸收足够的水分,导致植株组织失水,进而引发抽干伤害^[60]。低温还会影响植株的生理生化反应,降低根系活动能力,减少水分供应,使植株发生生理性干旱并出现抽条现象^[60]。良好的抗寒锻炼能够增强葡萄的越冬能力,提高其对低温和抽干伤害的抵抗力。

2.3 生态问题

葡萄园具有多重价值,包括粮食生产、生态扶

贫、生物多样性保护、固碳释氧、生态旅游、空气净化、养分积累、保水增效以及水土保持等功能^[45,63-64]。此外,葡萄园还可以作为一个有效的碳汇生态系统,其中大部分碳储存在土壤表面,而葡萄藤本身的大部分碳则存于其多年生器官中,如多年生枝条和根部^[63]。通过应用如免埋栽培技术、行间种草技术和冬季修剪后悬挂葡萄枝条等栽培措施,可以进一步提升葡萄园生态系统的服务功能,并挖掘其潜在效益^[45,64]。然而,葡萄园土壤容易受到侵蚀,其有机碳含量普遍较低。部分葡萄园位于陡坡或浅层土壤,暴雨时易产生径流,且过度耕作加剧了土壤流失^[65](图2)。

中国90%的酿酒葡萄在冬季需要通过埋土防寒措施越冬,在这些防寒区种植的鲜食葡萄也需要类似的埋土措施。不同地区葡萄的埋土时间各不相同,最长可达6个月。冬季埋土过程中,地表的土壤被翻动并起垄,导致土壤裸露,尤其在北方干燥多风的季风气候条件下,更容易引发风蚀,对生态环境产生负面影响。因此,为实现中国葡萄与葡萄酒产业的可持续发展,必须解决葡萄冬季埋土对生态环境的影响^[4]。

在埋土防寒区,葡萄的埋土措施会破坏原有地表结构,导致土壤在冬春两季裸露,进而引发风蚀^[66]。目前,其他农业领域防治风蚀的措施主要通过削弱风的侵蚀力或增强地表抗风能力。例如,仿真固沙灌木、免耕栽培、保留作物残茬和秸秆覆盖等,通过降低近地表的风速,减少风沙流动,从而减轻农田土壤的风蚀^[4,45,66-67]。对于冬季需埋土防寒的葡萄种植区,防治风蚀尤为重要。为改善葡萄园生态环境,需研究冬季防风蚀保护措施。已有研究探索了推迟葡萄冬季清园的时间,将冬季修剪的枝条悬挂在植株上保留到来年春季,以减少冬春季土壤风蚀^[63,66]。使用一些代替冬季埋土的越冬措施也可以起到减少土壤翻动,进而减少风沙上扬的问题。

可持续发展的理念强调减少资源消耗、改善生态环境和提升生活质量。可持续葡萄栽培的目标是根据不同生态类型选择合适的品种和栽培模式,实现科学管理。在大陆性季风气候下的干旱与半干旱地区,葡萄栽培方法应简便、快捷、节省劳动力、易于机械化操作,以改善和修复生态条件,同时提升葡萄的品质与产量,确保葡萄园的生物多样性。

性,延长葡萄植株的寿命,维护葡萄园的景观^[4]。

2.4 机械化及成本问题

冬季埋土措施显著增加了葡萄全年的管理成本。作为中国北方葡萄越冬的主要手段,埋土操作包括下架、埋土、出土和上架等环节。由于整体机械化水平较低,加之冬季修剪技术复杂,不利于提高机械化效率,使得葡萄种植的工作量大幅增加,生产效率受到显著影响。这种操作模式需要更多的生产成本和劳动力投入,而这些地区通常又面临劳动力短缺,进一步增加了葡萄生产成本,限制了葡萄产业的可持续发展^[4](图2)。研究表明,中国埋土越冬区的埋土措施平均占到全年管理总成本的15%~43%^[4]。

3 中国北方地区葡萄越冬措施

葡萄冬季埋土措施虽可保障葡萄安全越冬,但会损伤树体,缩短植株寿命,阻碍机械化水平提升,不利于葡萄园冬季生态保护,且增加生产成本^[4]。故研究适合埋土防寒区的栽培模式或其他可代替埋土的越冬保护措施很有必要。为了选择适宜的越冬保护措施,世界各地的学者进行了大量研究,涵盖了种间杂交育种、砧木嫁接、调整植株负载、使用防寒材料以及延迟修剪等方法^[4,10,68-70](图2)。

3.1 因地选种

抗寒酿酒葡萄种质的筛选和寒地区划对于抗寒育种和发展寒地葡萄栽培具有重要意义,通过种质鉴定与区划为栽培和引进不同品种提供参考价值^[71-75]。北方葡萄种植区主要为大陆性季风气候,冬季存在温度低、降水少和空气较为干燥的特点,应选择或者育种研究出越冬前枝条能充分成熟,抗寒性较强的品种^[30]。在北方高寒地区,可选用早熟或中熟的美洲种及欧美杂交种葡萄代替广泛栽培的欧亚种葡萄。此外,由于不同葡萄品种对低温的忍受能力不同,可以使用嫁接措施,将具有所需品质的接穗与抗寒砧木结合起来,提高植株的抗寒能力,目前‘山葡萄’或‘贝达’葡萄砧木较为常见^[59]。砧木-接穗相互作用的研究非常复杂,它整合了嫁接界面的结构变化、水力整合、激素交流,甚至遗传物质的交换,不同的无性系-砧木组合可以影响和消除品种间的抗寒性差异^[76-77]。传统育种方法在过去已经成功地用于选择具有经济价值特征的新品种,在葡萄等多年生作物中,整个传统育种程序和评估过

程可能需要很多年才能完成^[27,78]。

最近引入的分子育种新方法,使葡萄植株能够实现更快速、更精准的杂交^[27]。分子育种方法亦称基因工程育种法,是在分子水平上将外来的由其他生物中提取的或人工合成的DNA(或RNA)分子片段,人工进行重组,通过载体导入葡萄的细胞内,使后代“表达”出新引入的DNA(或RNA)携带的遗传信息所控制的遗传性状,一般包括转基因育种(Genetically modified breeding)、分子标记辅助选择(Marker assisted selection, MAS)和基因编辑育种,还需借助生物信息学等技术^[79-80]。

葡萄的抗寒转基因育种是利用现代分子生物学技术将一个或多个基因添加到一个生物基因组,培育了一批抗寒性状的转基因植株,其技术方法包括农杆菌介导法等^[79]。Shu等^[80]从中国野生山葡萄中克隆了 *VaSAP15* 基因,结果显示 *VaSAP15* 蛋白定位于细胞核和细胞膜上;*SAP15* 基因在不同葡萄基因型中呈现特异性组织表达,于耐寒的‘双优’葡萄及对低温敏感的‘红地球’葡萄茎中表达强烈;研究采用农杆菌介导法,获得过量表达 *VaSAP15* 的‘汤普森无核’品系,验证了该基因在低温胁迫中的作用;此外,通过酵母双杂交技术筛选出与 *VaSAP15* 相互作用的蛋白,并利用双分子荧光互补实验进行了验证。在实际育种过程中,一些性状的目标基因已经得到确认,可以直接检测后代中是否具有此基因。但有些性状对应的目标基因是未知的,可借助分子标记对目标性状基因型进行选择,利用分子标记与决定目标性状基因紧密连锁的特点,即可检测到目标基因的存在,缩短育种年限,加快育种进程,提高育种效率^[81]。利用基因组编辑技术可以精确地修改葡萄基因组中的特定基因,从而实现对重要性状的改良^[82]。

3.2 生长季管理及优化

田间生产管理时,采取一些具体措施可以有效防止低温引发的冰冻,增强葡萄植株的越冬能力,减轻秋冬低温伤害和春季霜冻的影响。这些措施包括深沟种植、灌封冻水、熏烟防冻、喷淋防冻、适时延迟出土、分批次出土和春季灌水以延迟萌芽,以及在农田周围建设防护林等^[27,58,83-84]。此外,根据环境和土壤条件的差异,还应采取适当的管理措施,如生长季管理。生长季管理包括春季抹芽、去除副梢、新梢修剪、夏季摘心和剪枝等,保持合理的

负载量、控制产量、防治病虫害、适时采收,避免树势过旺或过弱,确保冬季修剪前枝条和芽眼充分成熟,以提升树体抗寒能力。另外,生长季的一些生产管理措施,如亏缺灌溉和适当的冠层管理措施也会对抗寒性产生有利影响,与种植区域内的位置、地块大小、葡萄园内海拔高度的可变性、水分状况和葡萄树特性等因素密切相关^[85]。

冬季修剪时间对葡萄的抗冻能力有重要影响。在生长季末至严冬期间,约1月前,一年生枝条中的养分开始向老蔓和根部转移。由于北方葡萄种植区需要进行冬季埋土,修剪工作通常在11—12月完成。过早修剪会导致植株营养流失,影响次年葡萄的萌芽、花序分化和新梢生长,还会削弱植株的抗寒能力。冬季修剪的最佳时间是在植株完全进入休眠期后到伤流期前的30 d内^[68,86]。

3.3 施用外源保护剂

外源保护剂有助于葡萄顺利越冬,如施用外源CaCl₂、水杨酸(SA)、ABA或复合活性物质,可增强果树的抗寒能力^[14,87]。研究表明,在葡萄冬季休眠期前施用不同浓度的水杨酸和硫酸钾(K₂SO₄),可以通过影响丙二醛、氧化氢酶、超氧化物歧化酶的活性、相对含水量和电解质渗透率,从而提高植株的抗冷能力并减少葡萄芽的损伤^[88]。外源ABA则通过促进可溶性糖的积累,提高葡萄芽的抗寒性^[89]。此外,表面防冻保护剂(如CM-96-018)可形成疏水性颗粒薄膜屏障,防止冰晶在植物内形成,减轻冻害对植物组织的伤害,已被用于土豆、葡萄和柑橘等作物的低温防护中^[66,89]。已有研究采用主要成分为农用沥青的可降解液态地膜,其喷施后形成保护膜,于冬季温度约-15℃的非极寒地区应用,能保护次年的葡萄萌芽率等指标与埋土相近^[4,6,66]。

3.4 采用覆盖或保温罩保护措施

冬季采用覆盖物防护葡萄免受冻害和干害是一种物理防护手段。常见的覆盖材料包括棉被、秸秆和塑料膜等,但这些材料不适合大面积推广。其中,聚乙烯塑料地膜虽然能提高保温效果和减少劳动力成本,但由于其难以降解,在土壤中残留时间长,易引发环境污染,影响土壤渗透性,降低农作物抗旱能力,最终导致减产,故不适合大范围使用^[66]。此外,还有一种保护仓技术,其目的是在保证树体安全越冬的同时,防止春季新梢受晚霜影响。贺兰

山东麓的葡萄种植区中,保护仓措施可维持仓内湿度在一定水平,帮助葡萄安全越冬并避免晚霜^[90]。但目前,保护仓技术的机械化水平还较差,不能进行大规模的推广。

4 结论与展望

4.1 结论

在中国,酿酒葡萄产区受大陆性季风气候影响,冬季寒冷干燥,低温与晚霜分别对葡萄越冬及春季生长造成严重威胁。在越冬生理机制方面,抗寒锻炼时低温驱动葡萄生理生化及表观遗传改变,光合、呼吸、酶活、渗透调节物质与激素等显著变化。休眠期抗寒性主要受温度影响下呈动态变化,休眠芽靠过冷机制抗冻。葡萄的安全越冬不仅受冬季温度作用,干旱胁迫等环境因素也参与影响。葡萄萌芽主要受温度需冷量和积温调控,同样体现了其受环境变化的影响特性。

在生产实践中,埋土越冬措施虽长期保障葡萄安全,但存在人力投入大、机械损伤、时间把控难等问题,影响葡萄生长周期与产业效益。因此,探索兼顾越冬安全、机械化水平和生态友好性的替代措施,是推动酿酒葡萄产业可持续发展的关键。可替代埋土的理想越冬措施需要满足以下4个条件:1)保障葡萄安全越冬和一定的萌芽率,并确保葡萄不能过早提前萌芽。葡萄提前萌芽会使其暴露在春季晚霜的威胁之下,增加晚霜伤害的概率,从而影响葡萄的产量和品质。2)替代埋土的越冬措施应具备较高的机械化水平,可以保证越冬措施实施的效率,并降低人工操作带来的损伤,增强产业竞争力。3)替代埋土的越冬措施需具备一定的成本合理性,过高的成本会增加酿酒葡萄的生产成本,降低产业的经济效益。4)生态友好型是现代农业发展的必然要求,新的越冬措施不能对环境造成破坏,例如不能导致更大程度的葡萄园风蚀等生态问题,以实现酿酒葡萄产业与生态环境的和谐发展。

4.2 展望

葡萄越冬能力的提升取决于品种、温度等环境因素及田间管理措施因素的共同影响。所以在进行酿酒葡萄的越冬研究时应注意保证枝条有充足的抗寒锻炼,推迟冬季修剪时间,重视传统杂交育种和分子育种研究。近年来,在田间管理模式方面不断探索,枝条挂枝、行间生草等措施得以实施,葡

萄园管理水平得以提升,葡萄酒生态环境也得到改善。同时,保温被、保护仓、可降解液体膜等越冬措施的研究与推广工作也在持续推进。由于每种措施都存在各自的优缺点,所以在不同产区、不同年份,需因地制宜、因时制宜地选择恰当的越冬保护措施。在中国埋土防寒的边缘区域,可以尝试使用可降解液态膜对欧亚种葡萄进行越冬保护。保温被和保护仓都是被验证有效代替埋土越冬措施的方式,但是应该加强相关措施的机械化水平和解决大面积使用后保温被和保温仓在其他季节存放位置的问题。

未来的工作应聚焦育种、田间管理措施和越冬保护措施等方面继续进行研究,多方面提升葡萄的越冬能力和越冬措施保护效果。在育种方面,传统杂交育种应借助现代生物技术,如基因编辑与分子标记辅助选择,精准定位并整合抗寒、耐旱等优良基因,加速培育综合性状优异的新品种。田间管理研究要向精细化、智能化迈进,利用物联网、大数据与人工智能技术,构建葡萄园环境监测与管理决策系统,精准调控土壤肥力、水分及树体营养。越冬保护措施选择应聚焦绿色、高效、多功能方向,保障葡萄安全越冬与春季正常萌芽,推动酿酒葡萄产业在气候变化背景下可持续高效发展。

参考文献 References

- [1] Wen J, Lu L M, Nie Z L, Liu X Q, Zhang N, Ickert-Bond S, Gerrath J, Manchester S R, Boggan J, Chen Z D. A new phylogenetic tribal classification of the grape family (Vitaceae) [J]. *Journal of Systematics and Evolution*, 2018, 56(4): 262-272
- [2] Lu L M, Ickert-Bond S, Wen J. Recent advances in systematics and evolution of the grape family Vitaceae [J]. *Journal of Systematics and Evolution*, 2018, 56(4): 259-261
- [3] Wang X Q, Xie X L, Chen N, Wang H, Li H. Study on current status and climatic characteristics of wine regions in China [J]. *Vitis*, 2018, 57(1): 9-16
- [4] Han X, Xue T T, Liu X, Wang Z L, Zhang L, Wang Y, Yao F, Wang H, Li H. A sustainable viticulture method adapted to the cold climate zone in China [J]. *Horticulturae*, 2021, 7(6): 150
- [5] Wang X Q, Wang H, Li H. The influence of recent climate variability on viticultural zoning and variety regionalization of *Vitis vinifera* in China [J]. *OENO One*, 2020, 54(3): 523-541
- [6] Xue T T, Han X, Zhang H J, Wang Y, Wang H, Li H. Effects of a biodegradable liquid film on winter chill protection of winegrape cultivars [J]. *Scientia Horticulturae*, 2019, 246: 398-406
- [7] Lisek J, Lisek A. Cold hardiness of primary buds of wine and table grape cultivars in Poland [J]. *South African Journal of Enology and Viticulture*, 2020, 41(2): 189-196
- [8] Hoegh A, Leman S. A spatio-temporal model for assessing winter damage risk to east coast vineyards [J]. *Journal of Applied Statistics*, 2015, 42(4): 834-845
- [9] Mills L J, Ferguson J C, Keller M. Cold-hardiness evaluation of grapevine buds and cane tissues [J]. *American Journal of Enology and Viticulture*, 2006, 57(2): 194-200
- [10] Wan Y Z, Wang Y J, Li D, He P C. Evaluation of agronomic traits in Chinese wild grapes and screening superior accessions for use in a breeding program [J]. *Vitis*, 2008, 47(3): 153-158
- [11] Geng K Q, Li D M, Zhang J, Zhang Y X, Zhan Z N, Wang Z P. Evolution of volatile aroma compounds and amino acids in cabernet gernischt grape berries (*Vitis vinifera* L.): Comparison of different training systems for mechanical soil burial [J]. *Foods*, 2022, 11(11): 1568
- [12] Rodríguez A, Pérez-López D, Centeno A, Ruiz-Ramos M. Viability of temperate fruit tree varieties in Spain under climate change according to chilling accumulation [J]. *Agricultural Systems*, 2021, 186: 102961
- [13] Afshari H, Tajabadipour A, Hokmabadi H, Moghadam M M. Determining the chilling requirements of four Pistachio cultivars in Semnan province (Iran) [J]. *African Journal of Agricultural Research*, 2009, 4(2): 55-59
- [14] Centinari M, Smith M S, Londo J P. Assessment of freeze injury of grapevine green tissues in response to cultivars and a cryoprotectant product [J]. *HortScience*, 2016, 51(7): 856-860
- [15] Vyse K, Pagter M, Zuther E, Hinch D K. Deacclimation after cold acclimation-a crucial, but widely neglected part of plant winter survival [J]. *Journal of Experimental Botany*, 2019, 70(18): 4595-4604
- [16] Londo J P, Kovaleski A P. Deconstructing cold hardiness: Variation in supercooling ability and chilling requirements in the wild grapevine *Vitis riparia* [J]. *Australian Journal of Grape and Wine Research*, 2019, 25(3): 276-285
- [17] Karimi M, Ebadi A, Mousavi S A, Salami S A, Zarei A. Comparison of *CBF1*, *CBF2*, *CBF3* and *CBF4* expression in some grapevine cultivars and species under cold stress [J]. *Scientia Horticulturae*, 2015, 197: 521-526
- [18] Wu J, Zhang Y L, Yin L, Qu J J, Lu J. Linkage of cold acclimation and disease resistance through plant-pathogen interaction pathway in *Vitis amurensis* grapevine [J]. *Functional & Integrative Genomics*, 2014, 14(4): 741-755
- [19] North M, Workmaster B A, Atucha A. Effects of chill unit accumulation and temperature on woody plant deacclimation kinetics [J]. *Physiologia Plantarum*, 2022, 174(3): e13717
- [20] Anzanello R, Fialho F B, dos Santos H P. Chilling requirements and dormancy evolution in grapevine buds [J]. *Ciência E Agrotecnologia*, 2018, 42(4): 364-371
- [21] Horiuchi R, Arakawa K, Kasuga J, Suzuki T, Jitsuyama Y. Freezing resistance and behavior of winter buds and canes of wine grapes cultivated in northern Japan [J]. *Cryobiology*, 2021, 101: 44-51
- [22] De Rosa V, Falchi R, Moret E, Vizzotto G. Insight into carbohydrate metabolism and signaling in grapevine buds during dormancy progression [J]. *Plants*, 2022, 11(8): 1027
- [23] Noriega X, Rubio S, Pérez F J. Sucrose accumulation and endodormancy are synchronized events induced by the short-day photoperiod in grapevine buds [J]. *Plant Physiology and Biochemistry*, 2022, 190: 101-108
- [24] Chai F M, Liu W W, Xiang Y, Meng X B, Sun X M, Cheng C, Liu G

- T, Duan L X, Xin H P, Li S H. Comparative metabolic profiling of *Vitis amurensis* and *Vitis vinifera* during cold acclimation [J]. *Horticulture Research*, 2019, 6: 8
- [25] Liang G P, Hou Y J, Wang H, Wang P, Mao J, Chen B H. *VaBAM1* weakens cold tolerance by interacting with the negative regulator *VaSR1* to suppress β -amylase expression[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2023, 225: 1394-1404
- [26] Pagter M, Arora R. Winter survival and deacclimation of perennials under warming climate: Physiological perspectives [J]. *Physiologia Plantarum*, 2013, 147(1): 75-87
- [27] De Rosa V, Vizzotto G, Falchi R. Cold hardiness dynamics and spring phenology: Climate-driven changes and new molecular insights into grapevine adaptive potential [J]. *Frontiers in Plant Science*, 2021, 12: 644528
- [28] Londo J P, Johnson L M. Variation in the chilling requirement and budburst rate of wild *Vitis* species[J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2014, 106: 138-147
- [29] Grant T N L, Gargrave J, Dami I E. Morphological, physiological, and biochemical changes in *Vitis* Genotypes in response to photoperiod regimes[J]. *American Journal of Enology and Viticulture*, 2013, 64(4): 466-475
- [30] Kose B, Uray Y, Kaya O, Turk F, Bayram K, Svyantek A. Foliar applications improves grapevine plant cold hardiness [J]. *Scientia Horticulturae*, 2024, 330: 113088
- [31] Fang-Liu, Li J B, Chao-Liu, Wu S L, Chang-Liu, Wang H F. Study on dormancy stage of winter bud of grape[J]. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2020, 446: 032108
- [32] Orrantia-Araujo M A, Martínez-Téllez M Á, Rivera-Domínguez M, Hernández-Oñate M Á, Vargas-Arispuro I. Changes in the endogenous content and gene expression of salicylic acid correlate with grapevine bud dormancy release [J]. *Journal of Plant Growth Regulation*, 2021, 40(1): 254-262
- [33] Rubio S, Noriega X, Pérez F J. Absciscic acid (ABA) and low temperatures synergistically increase the expression of CBF/DREB1 transcription factors and cold-hardiness in grapevine dormant buds[J]. *Annals of Botany*, 2019, 123(4): 681-689
- [34] Kovalski A P, North M G, Martinson T E, Londo J P. Development of a new cold hardiness prediction model for grapevine using phased integration of acclimation and deacclimation responses[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2023, 331: 109324
- [35] Zheng C L, Acheampong A K, Shi Z W, Mugzech A, Halaly-Basha T, Shaya F, Sun Y F, Colova V, Mosquna A, Ophir R, Galbraith D W, Or E. Absciscic acid catabolism enhances dormancy release of grapevine buds [J]. *Plant, Cell & Environment*, 2018, 41(10): 2490-2503
- [36] Zheng C L, Halaly T, Acheampong A K, Takebayashi Y, Jikumar Y, Kamiya Y, Or E. Absciscic acid (ABA) regulates grape bud dormancy, and dormancy release stimuli may act through modification of ABA metabolism [J]. *Journal of Experimental Botany*, 2015, 66(5): 1527-1542
- [37] Cooke J E K, Eriksson M E, Junttila O. The dynamic nature of bud dormancy in trees: Environmental control and molecular mechanisms[J]. *Plant, Cell & Environment*, 2012, 35(10): 1707-1728
- [38] Pérez F J, Rubio S. Relationship between bud cold hardiness and budbreak in two *Vitis vinifera* L cultivars, chardonnay and Thompson seedless[J]. *Journal of Plant Growth Regulation*, 2022, 41(2): 840-847
- [39] Viti R, Andreini L, Ruiz D, Egea J, Bartolini S, Iacona C, Campoy J A. Effect of climatic conditions on the overcoming of dormancy in apricot flower buds in two Mediterranean areas: Murcia (Spain) and Tuscany (Italy)[J]. *Scientia Horticulturae*, 2010, 124(2): 217-224
- [40] Darbyshire R, Webb L, Goodwin I, Barlow S. Winter chilling trends for deciduous fruit trees in Australia [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2011, 151(8): 1074-1085
- [41] Vitasse Y, Rebetez M. Unprecedented risk of spring frost damage in Switzerland and Germany in 2017[J]. *Climatic Change*, 2018, 149(2): 233-246
- [42] Rahemi A, Fisher H, Dale A, Taghavi T, Kelly J. Bud dormancy pattern, chilling requirement, and cold hardiness in *Vitis vinifera* L. 'Chardonnay' and 'Riesling' [J]. *Canadian Journal of Plant Science*, 2021, 101(6): 871-885
- [43] Shellie K, Kovalski A P, Londo J P. Water deficit severity during berry development alters timing of dormancy transitions in wine grape cultivar Malbec[J]. *Scientia Horticulturae*, 2018, 232: 226-230
- [44] Ingrà C, Del Frari G, Favole M, Tumminelli E, Rossi D, Collina S, Prati M, Ferreira R B, Ferrandino A. Effects of growing areas, pruning wound protection products, and phenological stage on the stilbene composition of grapevine (*Vitis vinifera* L.) canes [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2024, 72(20): 11465-11479
- [45] Wang Z L, Cao X, Zhang L, Han X, Wang Y, Wang H, Li H. Ecosystem service function and assessment of the value of grape industry in soil-burial over-wintering areas[J]. *Horticulturae*, 2021, 7(7): 202
- [46] 王蕾. 基于数字高程模型的中国酿酒葡萄气候区划及品种区域化研究 [D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2017
- Wang L. Study on climate regionalization and variety regionalization of wine grapes in China based on digital elevation model [D]. Yangling: Northwest A & F University, 2017 (in Chinese)
- [47] Meza F, Darbyshire R, Farrell A, Lakso A, Lawson J, Meinke H, Nelson G, Stockle C. Assessing temperature-based adaptation limits to climate change of temperate perennial fruit crops [J]. *Global Change Biology*, 2023, 29(9): 2557-2571
- [48] Sanderson M G, Teixeira M, Graça A. Cold-air pooling in the upper Douro valley: An observational study [J]. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 2022, 61(12): 1893-1904
- [49] Marengo J, Espinoza J C, Bettolli L, Cunha A P, Molina-Carpio J, Skansi M, Correa K, Ramos A M, Salinas R, Sierra J P. A cold wave of winter 2021 in central South America: Characteristics and impacts [J]. *Climate Dynamics*, 2023, 61(5/6): 2599-2621
- [50] Han X, Li Y H, Yao M H, Yao F, Wang Z L, Wang H, Li H. Transcriptomics reveals the effect of short-term freezing on the signal transduction and metabolism of grapevine [J]. *International Journal of Molecular Sciences*, 2023, 24(4): 3884
- [51] Faralli M, Martintoni S, Dotti Giberti F, Bertamini M. Dynamic of bud ecodormancy release in *Vitis vinifera*: Genotypic variation and late frost tolerance traits monitored via chlorophyll fluorescence emission [J]. *Scientia Horticulturae*, 2024, 331: 113169
- [52] Schultze S R, Sabbatini P, Luo L F. Interannual effects of early season growing degree day accumulation and frost in the cool climate viticulture of Michigan [J]. *Annals of the American Association of Geographers*, 2016, 106(5): 975-989
- [53] Liu Q, Piao S L, Janssens I A, Fu Y S, Peng S S, Lian X, Ciais P, Myneni R B, Peñuelas J, Wang T. Extension of the growing season increases vegetation exposure to frost [J]. *Nature Communications*, 2018, 9(1): 426

- [54] 马麒龙, 鞠延仑, 李若兰, 刘敏, 王童孟, 房玉林. 甘肃河西走廊酿酒葡萄晚霜冻害对葡萄品质的影响及预防措施[J]. 西北农业学报, 2016, 25(11): 1672-1678
- Ma Q L, Ju Y L, Li R L, Liu M, Wang T M, Fang Y L. Effect of late frost on wine grape quality and preventive measures in the Hexi Corridor of Gansu Province [J]. *Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica*, 2016, 25(11): 1672-1678 (in Chinese)
- [55] 李华, 王华, 游杰, 火兴三, 王耀祺. 近45年霜冻指标变化对我国酿酒葡萄产区的影响[J]. 科技导报, 2007, 25(15): 16-22
- Li H, Wang H, You J, Huo X S, Wang Y Q. Relationship between frost indexes and viticulture zoning in China in recent 45 years[J]. *Science & Technology Review*, 2007, 25(15): 16-22 (in Chinese)
- [56] 蒯传化, 刘三军, 孙桂香, 于巧利, 陈勇朋, 孙传珍, 刘崇怀. 黄河中下游地区葡萄晚霜冻害的发生与防治[J]. 中外葡萄与葡萄酒, 2010(7): 45-47
- Kuai C H, Liu S J, Sun G X, Yu Q L, Chen Y P, Sun C Z, Liu C H. Occurrence and control of grapevine late frost injury in the middle and lower valleys of Yellow River[J]. *Sino-Overseas Grapevine & Wine*, 2010(7): 45-47 (in Chinese)
- [57] 黄丽萍, 杨萍, 赵武娟, 茹慧玲, 陈双建. 晚霜对桃幼果及新梢的影响[J]. 山西农业科学, 2015, 43(6): 748-750
- Huang L P, Yang P, Zhao W J, Ru H L, Chen S J. Effect of late frost on peach new shoots and young fruit[J]. *Journal of Shanxi Agricultural Sciences*, 2015, 43(6): 748-750 (in Chinese)
- [58] 王建友, 王琴, 蒋江照, 张山清, 刘凤兰, 韩宏伟. 春季葡萄冻害及防治措施[J]. 北方园艺, 2015(24): 211-214
- Wang J Y, Wang Q, Jiang J Z, Zhang S Q, Liu F L, Han H W. Spring frost damage on grape and control measures[J]. *Northern Horticulture*, 2015(24): 211-214 (in Chinese)
- [59] 陈淑丽. 覆盖防寒对葡萄越冬性的影响[D]. 秦皇岛: 河北科技师范学院, 2015
- Chen S L. Effect of mulching on wintering of grape[D]. Qinhuangdao: Hebei Normal University of Science & Technology, 2015 (in Chinese)
- [60] 曹柠. 不同葡萄砧木抗旱及抗抽干能力的调查研究[D]. 银川: 宁夏大学, 2018
- Cao N. Investigation and study on drought resistance and drainage resistance of different grape rootstocks [D]. Yinchuan: Ningxia University, 2018 (in Chinese)
- [61] 刘竞择, 曹柠, 张艳霞, 陈祖民, 史晓敏, 王振平. 葡萄砧木冬季抗抽干能力及抗旱性综合评价[J]. 果树学报, 2020, 37(3): 339-349
- Liu J Z, Cao N, Zhang Y X, Chen Z M, Shi X M, Wang Z P. Comprehensive evaluation on resistance of different grape rootstocks to vine dehydration and drought stress during overwintering[J]. *Journal of Fruit Science*, 2020, 37(3): 339-349 (in Chinese)
- [62] 闫军辉. 葡萄新品种‘龙紫宝’抗抽条、抗冻试验[D]. 秦皇岛: 河北科技师范学院, 2015
- Yan J H. Experiment on the resistance to stripping and freezing of a new grape variety ‘Longzibao’ [D]. Qinhuangdao: Hebei Normal University of Science & Technology, 2015 (in Chinese)
- [63] Zhang L, Xue T T, Gao F F, Wei R T, Wang Z L, Li H, Wang H. Carbon storage distribution characteristics of vineyard ecosystems in Hongsibu, Ningxia[J]. *Plants*, 2021, 10(6): 1199
- [64] Zhang L, Wang Z L, Xue T T, Gao F F, Wei R T, Wang Y, Han X, Li H, Wang H. Combating desertification through the wine industry in Hongsibu, Ningxia[J]. *Sustainability*, 2021, 13(10): 5654
- [65] Garcia L, Celette F, Gary C, Ripoché A, Valdés-Gómez H, Metay A. Management of service crops for the provision of ecosystem services in vineyards: A review[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2018, 251: 158-170
- [66] 薛婷婷, 韩星, 张红娟, 李华. 埋土防寒区葡萄不同越冬措施的防风沙效应风洞试验研究[J]. 泥沙研究, 2018, 43(5): 58-64
- Xue T T, Han X, Zhang H J, Li H. Study on wind erosion control of grapes by different methods in wind tunnel experiments[J]. *Journal of Sediment Research*, 2018, 43(5): 58-64 (in Chinese)
- [67] 王珊, 李华, 王华. 埋土防寒区葡萄冬剪后挂枝的防风效果[J]. 农业工程学报, 2015, 31(12): 206-212
- Wang S, Li H, Wang H. Wind erosion prevention effect of suspending shoots on wires after winter pruning in soil-burying zones over-wintering [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015, 31(12): 206-212 (in Chinese)
- [68] Buesa I, Yeves A, Sanz F, Chirivella C, Intrigliolo D S. Effect of delaying winter pruning of Bobal and Tempranillo grapevines on vine performance, grape and wine composition [J]. *Australian Journal of Grape and Wine Research*, 2021, 27(1): 94-105
- [69] Kupe M, Ercisli S, Baron M, Sochor J. Sustainable viticulture on traditional ‘Baran’ training system in eastern Turkey[J]. *Sustainability*, 2021, 13(18): 10236
- [70] Taskesenlioglu M Y, Ercisli S, Kupe M, Ercisli N. History of grape in Anatolia and historical sustainable grape production in Erzincan agroecological conditions in Turkey [J]. *Sustainability*, 2022, 14(3): 1496
- [71] Wang Z L, Wang Y, Wu D, Hui M, Han X, Xue T T, Yao F, Gao F F, Cao X, Li H, Wang H. Identification and regionalization of cold resistance of wine grape germplasms (*V. vinifera*) [J]. *Agriculture*, 2021, 11(11): 1117
- [72] Yilmaz T, Alahakoon D, Fennell A. Freezing tolerance and chilling fulfillment differences in cold climate grape cultivars[J]. *Horticulturae*, 2021, 7(1): 4
- [73] Diez-Zamudio F, Laytte R, Grallert C, Ivit N N, Gutiérrez-Gamboa G. Viticultural performance of hybrids and *Vitis vinifera* varieties established in Annapolis valley (nova Scotia)[J]. *Horticulturae*, 2021, 7(9): 291
- [74] DeKrey D H, Klodd A E, Clark M D, Blanchette R A. Grapevine trunk diseases of cold-hardy varieties grown in Northern Midwest vineyards coincide with canker fungi and winter injury [J]. *PLoS One*, 2022, 17(6): e0269555
- [75] Wang Y, Xin H P, Fan P G, Zhang J S, Liu Y B, Dong Y, Wang Z M, Yang Y Z, Zhang Q, Ming R, Zhong G Y, Li S H, Liang Z C. The genome of Shanputao (*Vitis amurensis*) provides a new insight into cold tolerance of grapevine[J]. *The Plant Journal*, 2021, 105(6): 1495-1506
- [76] Zhang L, Marguerit E, Rossdeutsch L, Ollat N, Gambetta G A. The influence of grapevine rootstocks on scion growth and drought resistance [J]. *Theoretical and Experimental Plant Physiology*, 2016, 28(2): 143-157
- [77] Rahemi A, Fisher H, Carter K, Taghavi T. Mitigating grapevine winter damage in cold climate areas[J]. *Horticultural Science*, 2022, 49(2): 59-70
- [78] Wang Z L, Xue T T, Gao F F, Zhang L, Han X, Wang Y, Hui M, Wu D, Li H, Wang H. Intraspecific recurrent selection in *V. vinifera*: An effective method for breeding of high quality, disease-, cold- and drought-resistant grapes[J]. *Euphytica*, 2021, 217(6): 111
- [79] Li J D, Lv K, Wu J P, Xie Y P, Zhang J X, Zhang N B, Xu W R. Exogenous melatonin promotes cold tolerance in grape seedlings: Physiological, transcriptomic, and functional evidence [J]. *Journal of*

- Agricultural and Food Chemistry*, 2023, 71(50): 19970-19985
- [80] Shu X, Ding L, Gu B, Zhang H J, Guan P Y, Zhang J X. A stress associated protein from Chinese wild *Vitis amurensis*, VaSAP15, enhances the cold tolerance of transgenic grapes [J]. *Scientia Horticulturae*, 2021, 285: 110147
- [81] Liu J H, Wang H, Fan X C, Zhang Y, Sun L, Liu C H, Fang Z W, Zhou J F, Peng H, Jiang J F. Establishment and application of a Multiple nucleotide polymorphism molecular identification system for grape cultivars[J]. *Scientia Horticulturae*, 2024, 325: 112642
- [82] Tricoli D M, Debernardi J M. An efficient protoplast-based genome editing protocol for *Vitis* species [J]. *Horticulture Research*, 2023, 11(1): uhad266
- [83] Jitsuyama Y, Kita Y, Arakawa K, Suzuki T. A possibility of influence factors on winter physical damage of grapevines in a snowy vineyard [J]. *Vitis*, 2022, 61(4): 125-132
- [84] 兰学成, 丁改秀, 王保明, 王保国. 果树防霜新型产品的应用研究[J]. 山西农业科学, 2014, 42(4): 387-390
Lan X C, Ding G X, Wang B M, Wang B G. Application research of a new fruit tree defrosting agent [J]. *Journal of Shanxi Agricultural Sciences*, 2014, 42(4): 387-390 (in Chinese)
- [85] Jasinski M K, Reynolds A G, Di Profio F A, Brown R B, Pasquier A, Touffet M, Fellman R, Lee H S. Terroir of winter hardiness: Bud LT₅₀, water metrics, yield, and berry composition in Ontario Cabernet franc [J]. *Canadian Journal of Plant Science*, 2022, 102(1): 49-73
- [86] Ferrara G, Magarelli A, Palasciano M, Coletta A, Crupi P, Tarantino A, Mazzeo A. Effects of different winter pruning times on table grape vines performance and starch reserves to face climate changes [J]. *Scientia Horticulturae*, 2022, 305: 111385
- [87] 黄翔. 复合外源活性物质对几种作物抗寒性的影响及其机理研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2008
Huang X. Effect of compound exogenous active substances on cold resistance of several crops and its mechanism [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2008 (in Chinese)
- [88] Fuller M P, Hamed F, Wisniewski M, Glenn D M. Protection of plants from frost using hydrophobic particle film and acrylic polymer [J]. *Annals of Applied Biology*, 2003, 143(1): 93-98
- [89] Dami I, Zhang Y. Variations of freezing tolerance and sugar concentrations of grape buds in response to foliar application of abscisic acid [J]. *Frontiers in Plant Science*, 2023, 14: 1084590
- [90] 张光弟, 俞晓艳, 李玉鼎, 李欣, 尹清雨, 李金娜. 贺兰山东麓酿酒葡萄越冬保护仓温湿度变化规律观察[J]. 中外葡萄与葡萄酒, 2019(2): 32-37
Zhang G D, Yu X Y, Li Y D, Li X, Yin Q Y, Li J N. Observations on the variation of temperature and humidity in the protective capsule for wine grape at eastern foot of Helan mountain during overwintering [J]. *Sino-Overseas Grapevine & Wine*, 2019(2): 32-37 (in Chinese)

责任编辑: 申青苗



第一作者简介: 薛婷婷, 博士, 硕士生导师, 宁夏大学葡萄酒与园艺学院副教授。主要从事酿酒葡萄冬季免埋土和生态栽培研究, 集成宁夏贺兰山东麓产区葡萄生态栽培措施的生理和分子技术, 将高效生态的生产措施进行基础理论研究并推广应用。主持国家自然科学基金项目、省级引才专项和宁夏自然科学基金项目各1项; 参与宁夏回族自治区科技重大专项和自然科学基金地区基金项目各1项; 主持校级教改项目2项。发表论文10余篇, 其中SCI 5篇, 国内核心期刊2篇; 参与发明专利2项。



通讯作者简介: 徐国前, 博士, 宁夏回族自治区引进高层次人才, 硕士生导师, 中国民主同盟盟员。主持参与国家重点研发、农业科技推广等项目10余项; 获国家发明专利1个; 出版著作4部; 主持或参与起草制定地方标准8个; 获宁夏回族自治区科技进步奖2项。