

葡萄调亏灌溉技术的研究现状与展望

李雅善, 赵现华, 王 华, 李 华

(西北农林科技大学葡萄酒学院, 陕西 杨凌 712100)

摘 要: 围绕葡萄调亏灌溉技术的研究现状, 对调亏灌溉的发展及其影响因素进行了系统地阐述, 并就调亏灌溉对葡萄果实品质、产量、水分利用效率的影响作了探讨。提出在适当的时期对葡萄进行适宜的水分胁迫不仅能改善果实品质及维持甚至提高产量, 而且也能提高水分利用效率。最后, 分析总结了当前在葡萄调亏灌溉中存在的问题, 并对葡萄调亏灌溉的发展趋势进行了展望, 明确了葡萄调亏灌溉技术进一步研究的方向。

关键词: 葡萄; 调亏灌溉; 果实品质; 水分利用效率

中图分类号: S663.1; S275 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-7601(2013)01-0236-06

Research advance and prospect of regulated deficit irrigation on grapevines

LI Ya-shan, ZHAO Xian-hua, WANG Hua, LI Hua

(College of Enology, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: Based on the research status of regulated deficit irrigation (RDI) on grapevines, this article expounded the development and influencing factors of RDI, and discussed the effects of RDI on fruit quality, yield and water use efficiency of grapevines. It was pointed out that imposing appropriate water deficit on grapevines during the right time could not only improve the fruit quality and maintain or even increase the yield of grape, but also increase water use efficiency. In addition, the current problems in RDI on grapevines were analyzed, the outlook of development tendency of RDI on grapevines was made, and the direction of further study was pinpointed.

Keywords: grapevines; regulated deficit irrigation; fruit quality; water use efficiency

20 世纪 70 年代中期, 调亏灌溉 (Regulated deficit irrigation, 简称 RDI) 技术由澳大利亚维多利亚持续农业研究所的科学家 Chalmers 和 Wilson 等在研究桃树和梨树的过程中首次提出^[1]。此后, 调亏灌溉技术在果树上的应用迅速发展起来。而我国在这方面的研究起步较晚。近年来, 随着经济发展的需要, 淡水资源需求日益增大, 水资源短缺的现象逐渐严峻。此外, 随着人们生活水平的提高, 对高品质葡萄及葡萄酒的需求也不断增加。如何以有限的水资源生产出高质量的葡萄及葡萄酒, 成为众多研究者关注的问题。国内外学者在这方面做了大量的研究, 取得了丰硕的成果。本文就葡萄调亏灌溉的研究现状及进展进行综合论述。

1 调亏灌溉的原理

调亏灌溉技术的全称是调控亏水度灌溉, 是一种在非充分灌溉或限水灌溉基础上发展而来的^[2]。

其原理是在作物的某一或者某几个生长阶段施加合适的水分亏缺度, 控制植物营养生长和生殖生长的速率, 调节光合产物的流向, 影响植物体内化合物合成的进程, 进而达到预先设定的目标^[3-4]。调亏灌溉不同于限水灌溉, 虽然两者都是提供的水量低于植物生育期内的腾发量, 但是限水灌溉单纯追求的是灌溉效益, 使水分生产力最大化; 而调亏灌溉则是从生物节水层面着眼, 用人为主动施加水分胁迫, 依靠作物自身的生理生化特征的改变, 影响果实品质并维持产量, 同时提高水分利用效率。之所以调亏灌溉能维持产量甚至提高产量, 是因为当作物在某阶段处于适宜的水分亏缺范围内, 在重新开始灌溉后可以产生生理和产量上的补偿效应^[5-6]。

2 国内外葡萄调亏灌溉的研究进展

2.1 葡萄调亏时期的确定

由于作物在不同的生育期内对水分亏缺的敏感

收稿日期: 2012-04-21

基金项目: 国家林业局“948”项目 (2009-4-09); 国家农业部杨凌葡萄苗木良种繁育基地资助项目 (2008)

作者简介: 李雅善 (1987—), 男, 河南鲁山人, 硕士研究生, 主要从事葡萄与葡萄酒学研究。E-mail: liys87@126.com。

通信作者: 李 华 (1959—), 男, 重庆梁平人, 教授, 博士生导师, 主要从事葡萄与葡萄酒工程方面研究。E-mail: lihuawine@nwsuaf.edu.cn。

度不同^[7],因此,合理确定水分亏缺的时期是调亏灌溉成功的关键之一^[3,8-9]。为了便于研究,Kriedemann等^[4]以萌芽、开花、坐果、转色、收获五个时间点将葡萄生育期划分开;黄兴法等^[10]则依据浆果生长的“S”曲线将其划分为3个阶段,并指出在第一阶段的后期和第二阶段施加水分亏缺,既能控制植株的营养生长,也不会对果实生长产生影响。比较看来,前者的划分更精细,在实际应用中也较多。Santesteban等^[11]指出在开花到转色之间进行水分亏缺虽然影响了坐果数量,但葡萄品质得到了提高。Acevedo-Opazo等^[12]发现在坐果后轻度水分胁迫能增加果实中可溶性固形物和花青素。Buss等^[13]指出从坐果到转色进行水分亏缺可以节水30%,增加果实质量和收益。以上这些研究均集中在转色前进行水分亏缺,因为在这段时期,新梢生长较快,水分亏缺对营养生长的控制较为明显,有利于同化物的重新分配和维持产量。但是McCarthy等^[14]认为在坐果后马上进行调亏灌溉,则可能限制细胞分化和扩大。同样,Ojeda等^[15]研究也表明在开花期到转色期进行主动亏水能影响细胞的扩大。因为在细胞分化过程中,其对水分亏缺非常敏感,因此在该时期进行不适当的水分胁迫对浆果后续生长影响甚大。但对于有些酿酒葡萄来说,较小的浆果含有更多的色素和多酚物质,因此在澳大利亚的葡萄园经常在坐果后立即实施水分亏缺^[14]。许多事实证明在葡萄生长季早期(转色前)实施水分亏缺,不仅可以减少植株的长势、促进同化物合理分配、改善冠层和叶片的微环境、减少病虫害的发生,而且也提高了果实的品质^[16-19]。在生长季后期(转色后)进行水分亏缺处理,则能增加葡萄果实内不同酚类化合物的浓度和单宁聚合度水平^[18],但其对营养生长的控制影响不大。而在葡萄收获后水分胁迫则减少根的生长,对来年葡萄生长不利^[14]。

2.2 葡萄调亏灌溉适宜亏缺度的确定

除了合理地确定水分亏缺时期外,还需要确定适宜的水分亏缺程度。适当的水分亏缺程度能提高质量、产量和水分利用效率^[20]。但这个适当范围怎么确定,则没有确定的标准,因为不同环境条件(气候、土壤等)、不同葡萄品种及葡萄不同生长阶段其亏水度的适宜范围都不尽相同^[3,21]。

刘洪光等^[22]指出对砂壤土而言,调亏下限为土壤含水量的40%,这样可以增加产量。Santesteban等^[11]以Tempranillo(*Vitis vinifera* L.)为材料,研究表明在坐果后以黎明前叶片水势 -0.8 MPa为调亏下限,可以增加果实中花青素和酚的含量,提高果实质

量。Acevedo-Opazo等^[12]研究指出以正午茎水势 -1.25 MPa ~ -1.40 MPa为调亏下限则能提高果实中可溶性固形物和花青素的含量。对葡萄叶片水势而言,Girona等^[23]指出良好灌溉的葡萄正午叶片水势在 -0.8 MPa左右, -1.0 MPa则需要开始灌溉,而Ezzahouani等^[24]却指出 -1.0 MPa的叶片水势足以维持产量和果实质量, -1.2 MPa则表明水分胁迫。这种差异可能是由环境条件及葡萄品种的不同所造成的。另外,有研究指出50%的田间持水量为调亏下限较为适宜^[25]。也有研究表明供水量在60% $\sim$ 80%的葡萄腾发量时能达到最高产量^[26]。从众多研究结果来看,答案较难统一。但是,对已有文献分析便不难发现,调亏灌溉中实施从轻度到中等水分胁迫不仅可以促进浆果的品质和维持产量,而且也能提高水分利用效率^[5,11-12,25,27-28]。因为中轻度的水分胁迫后植株可以获得补偿效应,而过度的水分胁迫则会造成对葡萄及葡萄浆果的不可逆伤害^[6]。这对于不同环境条件、不同品种、不同砧木及不同生育阶段的葡萄进行调亏灌溉都具有重要的指导意义。

2.3 葡萄调亏灌溉条件下需水信息的监测

在调亏灌溉条件下,常用来作为葡萄需水信息的指标有土壤水分含量^[29]、土壤水势^[30]、黎明前叶片水势^[11,31]、正午叶片水势^[24,32]、正午茎秆水势^[12]、茎液流动^[33]等。土壤水分含量固然可以利用烘干法测定,但是该法自动化程度较低,取样及测定时间较长,给实时灌溉预报的制定增加了难度^[34]。而用土壤水分测定仪^[22]、时域反射仪^[35]、中子散射法^[17]测定土壤水分则方便许多。若以土壤水势为监测指标,则可以用土壤水分张力计来监控^[30]。Ferreles等^[36]指出由于在定位灌溉情况下监控根区的水分状态很复杂,因此以植物为基础的方法来监测水分变化具有重要的优势。在黎明前叶片水势、正午叶片水势和正午茎秆水势这三个指示葡萄植株水分亏缺程度的指标中,茎秆水势对水分亏缺敏感度最高的,也是在中等亏缺和严重亏缺条件下最有明显差别的指标^[37]。有研究指出,黎明前的叶片水势对土壤干旱相当不敏感,因此该指标不能作为评估葡萄树水分状态和制定葡萄灌溉计划的唯一参数^[38];而叶片水势则由于葡萄植株等氢离子的特性而变化不大^[25,39-40],显然,这两者都不如茎秆水势在需水信息监测指标上有优势。一般认为,茎秆水势在 -1.0 MPa以上对葡萄来说则不存在水分限制^[12,28],只有当茎水势达到 -1.0 MPa时才是轻度水分胁迫的开始^[41]。Fernández等^[33]则利用热脉

冲来监测茎液流动,制定灌溉计划。但是茎液流动的影响因素有很多,造成测量精度难以保证^[34]。因此,在实际应用中,应该综合分析各个监测指标的适用情况,从而进行适当选择。未来调亏灌溉条件下葡萄需水信息的监测应该结合 3S 技术,并运用模糊人工神经网络技术、数据通讯技术建立适合中国国情的采集、传输、诊断和决策功能的作物精细控制灌溉系统。使调亏灌溉向系统化、智能化、精细化发展。

2.4 调亏灌溉对葡萄果实及产量的影响

促进果实的品质是调亏灌溉的一个重要目的。水分亏缺影响浆果的生长、新陈代谢和最终成分,许多研究表明,调亏灌溉能够提高果实的品质^[11-13,23,42]。调亏灌溉对果实及产量的影响可以归结为:

2.4.1 浆果大小 不少研究表明,在果实生长初期进行调亏灌溉能够引起果实大小明显下降。这可能是由于细胞分化受到影响从而减少了浆果中的细胞数量^[17],或者是因为水分亏缺可能使果皮中膨压增加从而限制浆果的膨胀^[43]。但是,也有果粒增大的情况^[22],这种情况则多是由于水分亏缺导致的疏花疏果作用。在转色后进行水分亏缺一般不会使果实体积减小^[11]。即使有减小的情况,也是转色前进行调亏灌溉减少的幅度更大^[44]。而转色过后水分亏缺引起浆果减小可能是多种机理的结果^[43]。虽然浆果体积减小,但是小浆果中可溶性固形物和花青素含量较多,对葡萄及葡萄酒质量有利^[12]。

2.4.2 多酚 葡萄浆果中的多酚主要有花色素、黄酮、聚合多酚、单宁、白藜芦醇等^[45]。而调亏灌溉则是管理葡萄中这些化合物的数量和促进葡萄酒质量的强有力工具^[46]。有许多实验表明调亏灌溉通过影响花色素和黄酮的含量而影响果实的颜色^[47-48]。无论是转色前还是转色后实施水分亏缺,浆果中的花青素增加的现象均有发现^[11,49-51]。这可能是由于较少的灌溉处理使果皮对果肉的比率增加,果皮更大有利于更多的可萃取花青素和总花青素。也有研究认为通过水分亏缺能增加有关负责合成花青素基因的表达^[44,52]。与此相反,Kennedy 等^[46]则指出水分亏缺的时间不改变黄酮的含量。推测这种结果迥异的原因,可能是由于葡萄品种、砧木类型等原因的不同。因为已有实验表明不同品种中的黄酮对调亏灌溉的反应不一^[52]。

2.4.3 糖酸含量 糖酸比对葡萄浆果的品质有重要的影响,也是确定成熟度的重要参考依据。适度的水分亏缺能够促进糖的积累,但也会引起糖类化

合物在葡萄果实中的重新分配^[53]。而严重的水分亏缺对葡萄糖度却有负面的影响^[54]。有研究指出^[44],水分亏缺无论是在转色前还是转色后施加都能加速果实中糖的积累,这可能与干旱引起植株体内 ABA 的增加有一定的关系,而在转色前施加水分亏缺对糖积累的影响更大。但是,也有实验表明果实的糖度在调亏灌溉与传统灌溉之间没有差异^[11],这可能是由于水分亏缺程度较轻而没有改变果实内部生理生化进程的缘故。

对葡萄酸度而言,Des Gachons 等^[54]认为,葡萄中可滴定酸度取决于其中的苹果酸而不是酒石酸,也受水分状态的影响,水分亏缺使可滴定酸和苹果酸的含量减少。一些研究结果^[11,55]却表明与充分灌溉相比亏缺灌溉的可滴定酸下降。对于酸度下降的原因,Santesteban 等^[11]认为一方面是由于绿色果实成长期间进行水分限制,另一方面是水分限制引起果树长势减小使果实更多暴露在阳光下,从而使温度升高呼吸速率上升而同时同化合成速率降低引起苹果酸和酒石酸减少。不过,也有研究表明不同的调亏灌溉程度果实的 pH 值和总酸并没有较大差别^[12]。

2.4.4 香气 葡萄果实中的香气来自几种成分(萜类及其衍生物、酯类、醛和硫醇),它们以非挥发的前体贮藏在外果皮的液泡中。有关调亏灌溉对葡萄浆果及葡萄酒香味的影响方面的研究还不多。Chapman 等^[56]指出与其他灌溉措施相比,调亏灌溉可以增加葡萄酒中的果香,减少葡萄酒中的植物香味。他们认为这可能是由于水分亏缺导致了氨基酸和类胡萝卜素的生物合成增加,从而增加了香气成分。El-Ansary 等^[30]指出调亏灌溉的葡萄浆果能产生更高的挥发性香气浓度。另外,通过调亏灌溉能获得较小的浆果(小浆果表面积与体积比值或者果皮对果肉的比率高)^[57],这些小浆果能集中香气成分,对葡萄酒质量更有利^[58]。Matthews 等^[58]研究表明,转色后水分亏缺酿造的葡萄酒比充分灌溉的含有更多的黑醋栗香气。Des Gachons 等^[54]指出在果实成熟阶段轻度水分胁迫结合中等条件的氮素供给,可以提高葡萄浆果中的香气,而严重的水分胁迫则限制香气的产生。

2.4.5 产量 由于细胞膨大对水分亏缺较为敏感,光合产物的运输对水分亏缺的敏感性则次之,这就使得在适当水分亏缺条件下营养生长受到限制的同时果实的生长则不受或很少受到影响^[3,59]。周磊等^[6]也提出作物在中轻度水分胁迫下,其光合作用所受影响不大,对植株的生长发育抑制也较小,复水

后生长能很快恢复,补偿作用也会很快体现出来。Acevedo - Opazo 等^[12]、Grevén 等^[60]则用试验证明了调亏灌溉不影响葡萄产量。需要指出的是,施加水分亏缺则主要是在葡萄浆果转色前尤其是果实生长初期进行的^[11,17,61]。也有研究指出在转色和收获之间进行水分胁迫则对产量也没有明显的影响^[57,62],因为在该阶段果实体积已经成型,更多的则是浆果成分的变化。刘洪光等^[22]、Blanco 等^[63]甚至指出调亏灌溉可以增加葡萄的产量的例子,这可能主要归因于复水之后产生了超补偿效应^[6]。但是,调亏灌溉也会有减产的情况发生^[11,23,41],这种减产大多是由于不适当的水分亏缺导致的坐果率下降或者果实体积下降引起的。尽管如此,这种减产反而使果实品质更高^[11],这对酿酒葡萄来说是非常有利的。

2.5 调亏灌溉对葡萄水分利用效率的影响

提高水分利用效率是调亏灌溉的一个重要目的。水分利用效率可以从单叶、植株、群体三个层次上分别表达^[5,64]。在植株受到水分亏缺时,根部产生的 ABA 信号途径木质部运往叶片,致使叶片中 ABA 浓度增加,进而降低气孔开度,蒸腾速率下降,相应的耗水也就减少^[2]。由于气孔的关闭,进入叶片的 CO_2 也减少,也影响净同化速率。但是在适度的水分亏缺条件下,蒸腾速率减小的幅度更大,从而显著地提高了叶片的内在水分效率。当对作物进行重新灌溉后,气孔导度和蒸腾速率也会随着水分的增加而迅速得到恢复,若水分亏缺时期历时较长,蒸腾速率的恢复有时会滞后于光合速率的恢复,这样作物可以充分利用水分进行补偿生长,提高了水分利用效率^[6]。Chaves 等^[65]研究也表明较低的气孔孔径可能促进水分利用效率。Zsófi 等^[25]指出中等水分亏缺(以 50% 田间持水量为灌溉下限)能使葡萄叶片的水分利用效率增加。Acevedo - Opazo 等^[12]发现调亏灌溉比对照分别节水 46% 和 89%,但是对产量却没有影响。而刘洪光等^[22]的研究结果表明调亏灌溉甚至增加了果实产量。不同基因型、砧木、接穗品种的葡萄植株适应水分亏缺的程度不一样,进一步揭示特定葡萄在特定环境下的水分利用规律对提高葡萄的 WUE 很重要。

3 存在的问题

尽管葡萄调亏灌溉技术在葡萄园水分管理中已经得到成功应用,并起着越来越重要的作用。但是,在具体实践中仍然存在着一些亟待解决的问题,主要有以下几个方面:

1) 葡萄调亏灌溉综合体系的研究。调亏灌溉应该是一套系统的技术体系,包括灌溉方式、水分亏缺时间、亏水程度、历时时间、葡萄水分状态监控等。另外,针对不同地区不同的葡萄品种,应建立与之相应的调亏灌溉技术体系。

2) 葡萄调亏灌溉与养分利用的研究。目前,在葡萄调亏灌溉与养分利用这方面研究的成果还较少。水分利用和养分利用之间存在着紧密的联系,肥能调水,水也能促肥。进一步研究葡萄种植中调亏灌溉与肥料的高效利用之间的内在关系,有助于节水节肥,也是葡萄园可持续发展中的重要一环。

3) 调亏灌溉对葡萄果实品质影响的研究。调亏灌溉能促进果实品质,这是不争的事实。但是,其促进果实品质的内在分子机制,尚未完全清楚,有待进一步研究。对于酿酒葡萄这类不以产量最大化为目标的品种来说,追求品质是他们的目标之所在。因此,深入研究调亏灌溉与葡萄果实品质之间的关系对葡萄酒产业的发展具有至关重要的作用。

4) 调亏灌溉与现代先进技术结合的研究。将现代高科技技术(如遥感技术、地理信息技术、热脉冲技术等)与葡萄园水分管理结合起来,对提高管理效率、水分利用效率及经济效益都有着巨大的推动作用。

4 展 望

随着水资源短缺问题的日益突出,世界上大多数葡萄园也将面临干旱的威胁。如何利用有限的水资源来生产优质的葡萄及葡萄酒,进而实现产业的可持续发展,是我们不得不面对的话题。在长期的探索中,调亏灌溉为解决这一难题提供了希望。在世界上,葡萄不仅种植面积大,而且绝大部分在干旱、半干旱地区,因此在葡萄园中实施调亏灌溉对于水资源的合理利用意义重大。随着科学技术的发展,葡萄调亏灌溉体系将进一步系统化、信息化、智能化,这将为实施精细葡萄产量和质量控制提供有力的支撑。

参 考 文 献:

- [1] 马福生,康绍忠,王密侠.果树调亏灌溉技术的研究现状与展望[J].干旱地区农业研究,2005,23(4):225-228.
- [2] 孙宏勇,张喜英,邵立威.调亏灌溉在果树上应用的研究进展[J].中国生态农业学报,2009,17(6):1288-1291.
- [3] 庞秀明,康绍忠,王密侠.作物调亏灌溉理论与技术研究动态及其展望[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2005,33(6):141-146.
- [4] Kriedemann P E, Goodwin I. Regulated deficit irrigation and partial

- root-zone drying[C]//Irrigation Insights. Canberra: land and water Australia, 2003.
- [5] 山 仑,邓西平,张岁岐.生物节水研究现状及展望[J]. 中国科学基金,2006,20(2):66-71.
 - [6] 周 磊,甘 毅,欧晓彬,等.作物缺水补偿节水的分子生理机制研究进展[J]. 中国生态农业学报,2011,19(1):217-225.
 - [7] 山 仑,张岁岐.节水农业及其生物学基础[J]. 水土保持研究,1999,6(1):2-6.
 - [8] 付 凌,彭世彰,李道西.作物调亏灌溉效应影响因素之研究进展[J]. 中国农学通报,2006,22(1):380-383.
 - [9] Costa J M, Ortuño M F, Chaves M M. Deficit irrigation as a strategy to save water: physiology and potential application to horticulture[J]. Journal of Integrative Plant Biology, 2007,49(10):1421-1434.
 - [10] 黄兴法,李光永,曾德超.果树调亏灌溉技术的机理与实践[J]. 农业工程学报,2001,17(4):30-33.
 - [11] Santesteban L G, Miranda C, Royo J B. Regulated deficit irrigation effects on growth, yield, grape quality and individual anthocyanin composition in *Vitis vinifera* L. cv. 'Tempranillo'[J]. Agriculture Water Management, 2011,98:1171-1179.
 - [12] Acevedo - Opazo C, Ortega - Farias S, Fuentes S. Effects of grapevine (*Vitis vinifera* L.) water status on water consumption, vegetative growth and grape quality: An irrigation scheduling application to achieve regulated deficit irrigation[J]. Agricultural Water Management, 2010,97:956-964.
 - [13] Buss P, Dalton M, Olden S, et al. Precision management in viticulture: an overview of an Australian integrated approach[J]. FAO Land and Water Bulletin, 2005,10:51-57.
 - [14] McCarthy M G, Loveys B R, Dry P R, et al. Deficit Irrigation Practices[R]. Water Reports Publication n. 22. Rome:FAO, 2002:79-100.
 - [15] Ojeda H, Deloire A, Carbonneau A. Influence of water deficits on grape berry growth[J]. Vitis, 2001,40(3),141-145.
 - [16] Dry P R, Loveys B R. Factors influencing grapevine vigour and the potential for control with partial rootzone drying[J]. Australian Journal of Grape and Wine Research, 1998,4:140-148.
 - [17] McCarthy M G. Developmental variation in sensitivity of *Vitis vinifera* L. (Shiraz) berries to soil water deficit[J]. Australian Journal of Grape and Wine Research, 2000,(6):136-140.
 - [18] Ojeda H, Andary C, Kraeva E, et al. Influence of pre and postveraison water deficit on synthesis and concentration of skin phenolic compounds during berry growth of *Vitis vinifera* cv. Shiraz[J]. American Journal of Enology and Viticulture, 2002,53:261-267.
 - [19] Ollat N, Diakou - Verdin P, Carde J P, et al. Grape berry development: a review[J]. Journal International des Sciences de la Vigne et du Vin, 2002,36(3):109-131.
 - [20] 蔡大鑫,沈能展,崔振才.调亏灌溉对左物生理生态特征影响的研究进展[J]. 东北农业大学学报,2004,35(2):129-134.
 - [21] 蔡焕杰,康绍忠,张振华,等.作物调亏灌溉的适宜时间与调亏程度的研究[J]. 农业工程学报,2000,16(3):24-27.
 - [22] 刘洪光,何新林,王雅琴,等.调亏灌溉对滴灌葡萄耗水规律及产量的影响研究[J]. 灌溉排水学报,2010,29(6):109-111.
 - [23] Girona J, Mata M, del Campo J, et al. The use of midday leaf water potential for scheduling deficit irrigation in vineyards[J]. Irrig Sci, 2006,24:115-127.
 - [24] Ezzahouani A, Williams L E. Effect of irrigation amount and pre-harvest irrigation cutoff date on vine water status and productivity of dandelion grapevines [J]. American Journal of Enology and Viticulture, 2007,58(3):333-340.
 - [25] Zsófi Z, Tóth E, Váradi G, et al. The effect of progressive drought on water relations and photosynthetic performance of two grapevine cultivars (*Vitis vinifera* L.) [J]. Acta Biol Szeged, 2008,52(2):321-322.
 - [26] Williams L E, Grimes D W, Phene C J. The effects of applied water at various fractions of measured evapotranspiration on reproductive growth and water productivity of Thompson Seedless grapevines[J]. Irrig Sci, 2010,28:233-243.
 - [27] Turner N C. Plant water relations and irrigation management[J]. Agri Water management, 1990,17:59-75.
 - [28] Cifre J, Bota J, Escalona J M, et al. Physiological tools for irrigation scheduling in grapevine (*Vitis vinifera* L.): An open gate to improve water - use efficiency[J]. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2005,106:159-170.
 - [29] 张瑞美,彭世彰,徐俊增,等.作物水分亏缺诊断研究进展[J]. 干旱地区农业研究,2006,24(2):205-210.
 - [30] El - Ansary D O, Nakayama S, Hirano K, et al. Response of Muscat of Alexandria table grapes to post - veraison regulated deficit irrigation in Japan[J]. Vitis, 2005,44(1):5-9.
 - [31] Jones H G. Irrigation Scheduling: advantages and pitfalls of plant based methods[J]. J Exp Bot, 2004,55:2427-2436.
 - [32] Girona J, Marsal J, Mata M, et al. Phenological sensitivity of berry growth and composition of Tempranillo grapevines (*Vitis vinifera* L.) to water stress[J]. Australian Journal of Grape and Wine Research, 2009,15:268-277.
 - [33] Fernández J E, Green S R, Caspari H W, et al. The use of sap flow measurements for scheduling irrigation in olive, apple and Asian pear trees and in grapevines[J]. Plant Soil, 2008,305:91-104.
 - [34] 申孝军,张奇阳,李明思,等.基于作物需水信息的实时灌溉技术研究进展[J]. 水资源与水工程学报,2008,19(3):1-5.
 - [35] Escalona J, Flexas J, Medrano H. Drought effects on water flow, photosynthesis and growth of potted grapevines[J]. Vitis, 2002,41(2):57-62.
 - [36] Fereres E, Goldhamer D A. Deciduous fruit and nut trees[C]// Stewart B A, Nielsen D R. Irrigation of agricultural crops, Agronomy 30. Madison, WI: ASA, CSSA, SSSA, 1990:987-1017.
 - [37] Choné X, Van Leeuwen C, Dubourdieu D, et al. Stem water potential is a sensitive indicator of grapevine water status[J]. Ann Bot, 2001,87:477-483.
 - [38] Paranychniak N V, Chartzoulakis K S, Angelakis A N. Influence of rootstock, irrigation level and recycled water on water relations and leaf gas exchange of Soultanina grapevines[J]. Environmental and Experimental Botany, 2004,52:185-198.
 - [39] Naor A. Relations between leaf and stem water potentials and stomatal conductance in three field - grown woody species[J]. Journal of Horticultural Science and Biotechnology, 1998,73:431-436.
 - [40] Escalona J, Flexas J, Medrano H. Drought effects on water flow, photosynthesis and growth of potted grapevines[J]. Vitis, 2002,41

- (2):57-62.
- [41] Intrigliolo D S, Castel J R. Interactive effects of deficit irrigation and shoot and cluster thinning on grapevine cv. Tempranillo water relations, vine performance and berry and wine composition[J]. Irrig Sci, 2011,29:443-454.
- [42] Schreiner R P, Tarara J M, Smithyman R P. Deficit irrigation promotes arbuscular colonization of fine roots by mycorrhizal fungi in grapevines (*Vitis vinifera* L.) in an arid climate[J]. Mycorrhiza, 2007,17:551-562.
- [43] Thomas T R, Matthews M A, Shackel K A. Direct in situ measurement of cell turgor in grape (*Vitis vinifera* L.) berries during development and in response to plant water deficits[J]. Plant, Cell and Environment, 2006,29:993-1001.
- [44] Castellarin S D, Matthews M A, Di Gasparo G, et al. Water deficits accelerate ripening and induce changes in gene expression regulating flavonoid biosynthesis in grape berries[J]. Planta, 2007,227:101-112.
- [45] 李 华.葡萄栽培学[M].北京:中国农业出版社,2008:60-75.
- [46] Kennedy J A, Matthews M A, Waterhouse A L. Effect of maturity and vine water status on grape skin and wine flavonoids[J]. American Journal of Enology and Viticulture, 2002,53:268-274.
- [47] Chaves M M, Santos T P, Souza C R, et al. Deficit irrigation in grapevine improves water use efficiency while controlling vigour and production quality[J]. Ann Appl Biol, 2007,150:237-252.
- [48] Salo J L, Chirivella C, Castel J R. Response of cv. Bobal to timing of deficit irrigation in Requena, Spain: Water relations, yield, and wine quality[J]. Am J Enol Vitic, 2005,56:1-8.
- [49] Intrigliolo D S, Castel J R. Response of grapevine cv. 'Tempranillo' to timing and amount of irrigation: water relations, vine growth, yield and berry and wine composition[J]. Irrig Sci, 2010,28:113-125.
- [50] Keller M. Deficit irrigation and vine mineral nutrition[J]. J Am Soc Hortic Sci, 2004,56(3):267-283.
- [51] Roby G, Matthews M A. Relative proportions of seed, skin and flesh, in ripe berries from Cabernet Sauvignon grapevines grown in a vineyard either well irrigated or under water deficit[J]. Australian Journal of Grape and Wine Research, 2004,10:74-82.
- [52] Deluc L G, Quilici D R, Decendit A, et al. Water deficit alters differentially metabolic pathways affecting important flavour and quality traits in grape berries of Cabernet Sauvignon and Chardonnay[J]. BMC Genomics, 2009,10:1-33.
- [53] Coombe B G. The grape berry as a sink[J]. Acta Horticulturae, 1989,239:149-158.
- [54] Des Gachons C P, Leeuwen C V, Tominaga T, et al. Influence of water and nitrogen deficit on fruit ripening and aroma potential of *Vitis vinifera* L cv Sauvignon blanc in field conditions[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2005,85:73-85.
- [55] Sheltie K C. Vine and berry response of Merlot (*Vitis vinifera* L.) to differential water stress[J]. American Journal of Enology and Viticulture, 2006,57:514-518.
- [56] Chapman D M, Roby G, Ebeler S E, et al. Sensory attributes of Cabernet Sauvignon wines made from vines with different water status[J]. Australian Journal of Grape and Wine Research, 2005,(11):339-347.
- [57] Williams L E, Matthews M A. Grapevine[C]//Stewart B A, Nielsen D R. Irrigation of Agricultural Crops, Agronomy 30. Madison, WI: ASA, CSSA, SSSA, 1990:1019-1055.
- [58] Matthews M A, Ishii R, Anderson M M, et al. Dependence of wine sensory attributes on vine water status[J]. Journal of Sciences of Food and Agriculture, 1990,51:321-335.
- [59] De la Hera - Orts M L, Martínez - Cutillas A, López - Roca J M, et al. Effects of moderate irrigation on vegetative growth and productive parameters of Monastrell vines grown in semiarid conditions[J]. Spanish Journal of Agricultural Research, 2004,2(2):273-281.
- [60] Greven M, Green S, Neal S, et al. Regulated Deficit Irrigation (RDI) to save water and improve Sauvignon Blanc quality[J]. Water Science and Technology, 2005,51(1):9-17.
- [61] McCarthy M G. 'Effect of timing of water deficit on fruit development and composition of *Vitis vinifera* cv. Shiraz.' [D]. Adelaide, Australia: University of Adelaide, 1997.
- [62] Goodwin I, Macrae I. Regular deficit irrigation of cabernet sauvignon grapevines[J]. Australian & New Zealand Wine Industry Journal, 1990,5(2):131-133.
- [63] Blanco O, Faci J M, Negueroles J. Response of table grape cultivar 'Autumn Royal' to regulated deficit irrigation applied in post - veraison period[J]. Spanish Journal of Agricultural Research, 2010,8 (S2):S76-S85.
- [64] Delrot S, Medrano H, Or E, et al. Methodologies and Results in Grapevine Research[M]. Bordeaux: Springer, 2010:123-134.
- [65] Chaves M M, Pereira J S, Maroco J, et al. How plants cope with water stress in the field[J]. Photosynthesis and growth. Ann Bot, 2002,89:907-916.