

文章编号:0559-9350(2011)02-0245-08

基于水分-品质响应关系的特色经济作物节水调质高效灌溉

杜太生, 康绍忠

(中国农业大学 中国农业水问题研究中心, 北京 100083)

摘要:传统的非充分灌溉理论主要基于水分生产函数考虑产量损失最小或总产量及效益最佳, 较少考虑水分-品质响应关系及其对节水效益的影响。针对此问题, 本文归纳了节水调质高效灌溉的生理学、生物学和工程学基础, 探讨了水分-品质响应关系的研究进展与存在的问题。在此基础上, 针对特色经济作物构建了基于水分-品质响应关系的节水调质高效灌溉理论, 提出了节水调质高效灌溉的实施思路, 阐述了节水调质高效灌溉需要解决的几个重要科学问题。以期能为充分挖掘作物生理节水潜力, 大幅度提高作物水分利用效率和实现节水、丰产、优质、高效的综合目标提供理论支撑。

关键词:水分-品质响应; 节水调质; 非充分灌溉; 品质

中图分类号: S274.3

文献标识码: A

近年来, 非充分灌溉研究主要基于作物水分生产函数, 寻求有限水量对作物产量贡献最大的生育时段, 以确保获得总产量和效益最佳, 或者追求有限水量条件下的产量损失最小, 其研究对象主要针对大田作物。在干旱半干旱地区, 调整农业种植结构, 大量压缩高耗水作物种植面积, 大力发展节水型特色瓜果、温室蔬菜等产业, 已成为缓解当地水资源供需矛盾, 确保农民致富、农村增收和农业可持续发展的重要措施。但不合理灌溉导致的品质低下及其对环境的影响是制约特色农业可持续发展和农民增收的主要因素。很多地区仍主要依靠水、肥等资源的大量投入来追求高产, 不仅水的利用效率不高, 而且形成了高水肥—高投入—高产量—低品质—低价格—低效益的恶性循环。随着人民生活水平的日益提高, 消费者会更多地关注农产品的品质, 而灌溉是旱区和设施农业中最为频繁的管理措施之一, 如何对这些特色经济作物进行科学、合理的灌溉以达到节水、丰产、优质、高效的目的, 是现代农业生产中迫切需要解决的科学问题。

近年来的研究表明, 许多农产品的品质与水分供应, 尤其与后期的水分供应有密切关系^[1-7]。所谓节水调质高效灌溉是从作物水分-品质响应的生理机制出发, 在筛选水分敏感型品质参数的基础上, 建立作物水分-品质-产量-效益综合模型, 通过精量的实时亏缺灌溉调控作物体内的信息流动, 进而调控果实的品质, 从而保证在一定产量的前提下以较少的耗水量生产出更高质量的农产品, 最终实现节水、丰产、优质、高效目标的节水新思路。

1 节水调质高效灌溉的理论基础

1.1 节水调质高效灌溉的生理学基础 在农业生产中, 水分不仅作为各种物质转运的载体, 而且还直接参与细胞分裂、糖分转化等生理生化过程。当作物受到水分胁迫时, 将通过主动的渗透调节来

收稿日期: 2009-04-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(50939005; 51079147); 教育部长江学者创新团队发展计划(IRT0657); 水利部公益性行业科研专项经费项目(201001061)

作者简介: 杜太生(1975-), 山东东阿人, 博士, 副教授, 主要从事节水灌溉理论与技术研究。

E-mail: dutaisheng@cau.edu.cn

通讯作者: 康绍忠(1962-), 湖南桃源人, 博士, 教授, 主要从事节水与水资源研究。E-mail: kangsz@cau.edu.cn

增强自身的抗旱性,使脱落酸(ABA)、脯氨酸和可溶性糖等的含量增加,促进气孔关闭,降低水势并保持一定的膨压,使其在低渗透势下仍能从环境中吸收水分和养分;相应的,植物体内水势的下降也会引起果实水势及渗透势的下降,从而维持果实的膨压,发生所谓主动渗透调节作用^[8-9]。同时,在受到水分胁迫时,叶源光合同化产物如葡萄糖和果糖等除用于作物生长储存外,大部分也直接参与渗透调节,并使生理库中的非结构性碳水化合物以及相应成份得以提高^[10-11];另一方面,灌水可能增加果实产量,但却常常伴随着果实内糖和有机酸等可溶性固形物含量的降低。在水分亏缺条件下,对果实细胞来说,膨压是主动渗透作用的驱动力,可溶性糖的累积一方面可以降低水势,维持水和溶质向果实流入;另一方面使果实中的糖代谢维持在一个适当的水平^[8]。研究表明,在果实生长发育的第三阶段进行水分胁迫,果实可溶性固形物含量增加;而在果实生长发育的第一、第二阶段进行水分胁迫对果实可溶性固形物含量的影响不明显^[12]。可见,通过灌溉调控可以改变糖酸向果实的运输,引起糖的叠加效应,进而调控果实的品质。

已有研究表明,在适度的水分亏缺下,根源ABA浓度增加将导致木质部汁液中ABA浓度升高。尤其在果实成熟期,枝叶与果实木质部联系程度降低导致源库间的液流量减少,从而使果实表皮细胞中ABA的累积量远低于茎叶中的含量,尽管其营养生长被抑制,果实中糖的积累和色素形成过程却没有受到明显的影响^[13-14]。此外,受水分调控驱动的作物体内ABA浓度的增加还能提高谷氨酰胺酶底物 γ -谷氨酰磷酸的合成活力,通过影响细胞内 H^+ 的分泌,改变细胞的pH值^[15]。上述这些生理过程均直接或间接影响果实品质的形成与转化过程。

1.2 节水调质高效灌溉的生物学基础 大量研究表明,在作物生长发育的某些阶段主动施加一定程度的水分胁迫,其叶面积指数减小,植物透光率增大,有利于果实的着色和相应营养元素的合成^[16],而合理的灌溉能使根、茎、叶各部分不产生冗余生长,控制作物各部分的最优生长量,维持根冠间协调平衡的比例,不仅可以有效地控制营养生长,使更多的光合同化产物输送到生殖器官,而且可大大节省修剪工作量,简化田间的栽培管理并提高栽植密度,以调节作物的生长进程,并诱发补偿生长效应^[16-19]。实现提高经济产量和水分利用效率而又大量节水的目的。

果实的生长发育是一个连续的生理过程。水的可利用性在整个生长期都会影响果实糖酸含量。灌溉也许通过降低碳水化合物水平,减少糖酸向果实的运输,或引起酸的稀释效应,从而对果实的糖酸含量起综合作用^[16,18-19]。而糖类和有机酸类物质的转化是果实生长发育过程中物质转化的主要表现之一,它将导致果实风味的变化。此外,适量灌溉情况下,果树的生理病害也较少,果树的大小年现象也会相应减轻。

1.3 节水调质高效灌溉的工程学基础 作物耗水过程的监测与模拟是节水调质高效灌溉理论研究的前提,也是贯穿作物高用水调控与节水调质管理的基础科学问题。在叶片尺度、单株尺度、群体尺度和区域尺度上,应用水量平衡法、液流计-微型蒸渗仪法、波文比-能量平衡法、空气动力学法、涡度相关法和遥感法等进行了大量研究^[20-23],而且建立了单层P-M模型和双层S-W模型以及考虑遮荫和局部湿润的PRI模型^[24]。热脉冲、热扩散和热平衡技术提供了在作物自然生长状态下实时测量木质部液流从而简捷准确地确定作物蒸腾耗水量的途径;此外,现代果蔬产业和设施农业的快速发展也为精量控制灌溉奠定了基础,初步形成了基于激光控制土地平整技术、地面灌溉过程控制技术和精细地面灌溉系统设计与评价方法的精细地面灌溉技术体系^[25];基于作物耗水过程的监测与模拟,以信息技术为手段,应用先进的自动化控制技术,开发了一系列节水灌溉自动监测与控制系统。这些均为节水调质高效灌溉的实施提供了工程学基础。

综上所述,节水调质高效灌溉的理论基础主要体现在受水分调控驱动的植物生理激素(如ABA、乙烯、蔗糖转化酶、pH等)的变化以及生理过程和生长的响应,而这些激素对作物生长和品质形成的生理生化影响主要是由不同水分条件下品质指标变化过程对激素代谢与合成响应的差异导致的。因此,基于水分-品质响应关系进行根域土壤水分的精量调控将更有利于提高作物的综合效益,实现节水、丰产、优质、高效的目标。

2 水分-品质响应关系研究进展

2.1 作物品质对水分亏缺的响应机理 作物的品质可分为外观品质、营养品质、贮运品质、风味品质和加工品质。其中外观品质如果实体积、形状、大小、颜色、光泽、坏斑数量和面积等与果实的等级划分和销售收益关系密切；营养品质如蛋白质、总糖、各种单糖、总酸、糖酸比、可溶性固形物、维生素、矿物质等是决定商品性能的重要指标。影响作物外观品质和营养品质的主要因素有灌水方法、灌水时间、灌水量、水分亏缺时期和程度、肥料种类与用量、田间小气候与管理水平等。其中灌水方法和灌水量会影响果实的大小和体积，不同生育阶段亏水也会影响果实的营养品质。例如在西瓜座果膨大期水分亏缺，将提高可溶性固形物含量，降低果酸含量；而后期灌水过多则会降低果实的含糖量，而且易发生裂果^[26-27]。贮运品质主要包括果实硬度、含水量、果皮厚度、果实密度与保鲜时间。有研究表明，亏缺灌溉开始的时间越早，果实的硬度就越大^[28]。另外，亏缺灌溉可降低加工番茄的含水率，有助于降低在烘干过程中的投入^[29]。

灌溉是作物生产过程中最为频繁的管理措施之一，目前的研究主要集中于不同水分胁迫程度对单一品质指标的影响。对瓜类作物的研究表明，重度亏水处理甜瓜单瓜重明显小于轻度亏水和充分灌溉的处理^[30]；瓜的纵径与灌水量呈正相关，而灌水间隔与单瓜重呈负相关，当耗水量减少时，含糖量增加，而果酸含量则减少^[5,31]；亏水条件下的单瓜重与瓜长显著下降，而瓜皮厚度变化不显著，全生育期适度亏水的可溶性固形物含量最高，但pH值无显著差异^[32]。而对果树的研究则表明，苹果树果实生长后期控水，果实总可溶性固形物含量较高^[10]；苹果梨生育后期控水可显著提高果实可溶性固形物含量和Vc含量^[33]；此外，亏水处理的柑橘果实大小与单果重较小，但可溶性固形物含量和有机酸含量提高，而且果实转色期提前，有利于提早上市时间^[34]。可见，确定适宜的亏缺灌溉控制指标并实施精量灌溉有利于果实品质的改善。

以上研究主要集中于分析作物全生育期亏水对果实品质的影响，不同生育期亏水程度、亏水历时、亏水方式等与品质指标响应关系的研究相对较少。目前国外在这方面有一些定性研究结果，例如苹果盛花期亏水有利于品质改善^[35-36]；而对于加工番茄，果实成熟前期是实施水分亏缺的理想阶段^[37-38]；酿酒葡萄转熟前期亏水可显著提高葡萄与葡萄酒的品质^[39-40]。滴灌条件下西红柿可溶性固形物含量随水分亏缺程度的增大而增加^[38]。此外，还有一些研究对不同阶段的亏水程度与果实单项品质指标之间进行了相关分析，并建立了简单的经验模型^[5,7,38,41-42]，为节水调质提供了一定的理论依据，这些经验模型尽管回归精度较高，但缺乏一定的生理基础。

目前有关作物品质对水分亏缺响应机理的研究主要集中于不同亏缺灌溉时期对品质指标的影响方面，还存在以下几个亟待解决的问题：(1)仅限于对单一品质指标的变化进行趋势分析，没有从机理上进行深入研究，对一些品质指标的响应没有从生理角度解释水分调控驱动的机制；(2)各品质指标之间存在一定程度的相关性，对其内在相关关系的研究将为作物综合品质的改善提供依据，这也是下一步研究的重点；(3)在某一特定灌水方式下，各品质指标与不同生育阶段水分亏缺之间的定量关系尚不明确，对这一问题的研究将为寻求产量和品质的最佳结合点从而制定节水优质高效灌溉模式提供理论依据；(4)品质不但与水分关系密切，还与作物生长的气候、土壤、养分、光照、作物品种、储藏条件、后期加工方法等因素有密切关系，结合其它生长因素尤其是水肥耦合作用对品质进行综合研究也是未来研究的重点方向。

2.2 水分敏感型品质指标优选与品质综合评价方法 品质评价常用的数学方法有聚类分析、模糊综合评判、主成分分析和灰色关联度法等。如陈在新等^[43]运用模糊综合评判法对柑橘的主要品质指标进行了综合评定。张海英等^[44]采用主成分分析和聚类分析将桃的品质指标简化为5个代表性指标。雷莹等^[45]利用系统聚类和主成分分析法将夏橙的18个品质评价指标简化为6个。张振文等^[46]应用主成分分析法对芒果采后品质指标进行了综合分析，并根据所选取的主成分构建了评价模型。此外，作为定性和定量分析综合的一种方法，层次分析法在品质评价中也得到了初步应用^[47-48]。尽管上述

研究均未涉及灌溉和土壤水分条件，但可为不同灌溉调控模式下的品质评价提供理论参考。

现阶段对品质理解的差异主要是由于风俗文化及饮食习惯不同所导致的，西方人对果实着色、大小、酸甜度等品质的要求与我们有一定的差异。这种对果实品质需求的不同，使得对于国内市场 and 国外市场的开发要有不同的策略，应充分考虑潜在市场的差异化需求。目前，在水分敏感型品质指标优选与品质综合评价方法研究中还存在以下几个迫切需要解决的问题：(1)作物品质自身涉及指标较多而且影响因子复杂，基于水分-品质响应的生理机制对其内在相关关系的研究将是未来研究的重点；(2)单项品质指标对土壤水分调控的响应规律与水分敏感型品质指标的选择及其对不同水分亏缺模式的响应关系；(3)综合品质评价指标的数学描述，单项品质指标很难准确表征产品的综合品质，针对不同用户群的农产品“品质期望”，通过市场调查、专家打分确定权重和隶属度，应用模糊数学方法确定其综合品质评价指标，将是水分-品质响应关系研究的重要突破；(4)综合品质评价模型的建立，目前常用的方法有模糊综合评判、主成分分析、灰色关联度分析、层次分析法等，这些方法是否适于不同灌溉模式下品质的模糊综合评判及模型建立尚需进一步探讨。

2.3 水分-品质-产量-效益综合函数及节水调质高效灌溉决策方法 基于水分-品质-产量-效益综合函数进行作物节水调质高效灌溉决策的研究目前几乎还是空白。其总体思路是：在精确测定作物需水信息和对水分响应敏感的品质指标筛选的基础上，综合考虑“优质优价”和不同农产品消费终端的“品质期望”与潜在市场价值，建立作物水分-综合品质-产量-综合效益评价模型，将水分调控对品质指标的影响定量化，结合节水指标、产量指标与经济效益指标；确定不同指标合理的权重(隶属度)，借助熵权理论、灰色关联度分析、层次分析、模糊数学等方法建立量化的灌溉决策模式，从而在保证一定产量的前提下以最低的耗水量生产出最高质量农产品，最终使农户获得较高的经济效益。

特色经济作物节水调质高效灌溉模式优化在目标函数、优化决策方法和约束等方面均与传统的非充分灌溉不同，这也是节水调质高效灌溉决策需要进一步研究的问题：(1)在目标函数方面，传统的非充分灌溉模式优化以有限水量分配后获得最大产量或相对产量最大为目标；而节水调质高效灌溉模式的优化决策是从产量和品质两个方面综合考虑其对总经济效益的影响，以有限水量的总效益最大，或者营养元素期望值的绝对含量最大，或者单位产品的生产成本最小为目标，通常是一个多目标多因素规划问题；(2)在优化方法方面，传统的作物水分生产函数一般采用 Jensen 模型，利用动态规划、随机动态规划、动态规划渐近法及非线性规划法进行优化决策。而对于特色经济作物，如何基于水分生产函数进一步考虑品质以及“优质优价”条件下不同收获批次产品价格的影响，针对不同的生产和销售目的以及终端消费人群，建立相应的品质指标筛选方法和多品质指标的综合评价方法，最终建立所谓“水分-产量-综合品质生产函数”是一个亟待解决的难点；(3)在约束条件方面，传统的非充分灌溉模式优化决策是一个被动的决策过程，可供水量决定了相应的非充分灌溉模式；而节水调质高效灌溉模式优化的约束除考虑不同时期可供水量外，更应进一步考虑不同时期果实产品的价格变动约束、不同品级果实的价格差异与潜在市场约束、环境影响约束(如土壤养分淋洗量临界约束)以及食品安全约束(如温室作物农药残留约束)等。

3 节水调质高效灌溉的实施思路

基于水分-品质响应关系的节水调质高效灌溉是在以往非充分灌溉理论上提出的一种新的灌溉调控理念。其实施途径是在精确测定植株水势、液流、茎秆与果实微变化、冠层温度、声波等作物需水信息的前提下，通过不同尺度耗水分析，实现由单株向农田、区域尺度的转换，为水分调控提供精准的可控指标；根据作物品种、生育期、地块位置、气象条件等的不同，实时制定动态的灌溉制度，利用遥感、自动控制、人工智能等技术实现变量施肥和灌溉。在此基础上，分析不同作物品质指标与不同阶段、不同程度、不同方式控水的关系，筛选出水分敏感型的主要品质参数，建立水分-品质响应函数，面向不同作物的产品用途建立受水分调控驱动的作物品质指标体系，确立品质

指标采集与综合效益评价标准，构建不同区域灌溉调控品质数据库，分析比较各种灌溉模式的应用条件及适用性，基于水分-综合品质-产量-综合效益模型，优选出适于不同作物的节水调质高效灌溉模式，分析各种模式应用的条件及适用性，用于指导土壤水管理和精量控制灌溉决策。

实现作物节水调质高效灌溉还需要做大量的研究工作，目前的研究应集中于经济效益较高的果树、温室瓜果、蔬菜等作物，重点研究不同区域、品种和管理水平下的水分-品质响应机制、水分敏感型品质指标优选与综合品质指标的评价、节水调质高效灌溉制度、指标与模式以及不同调控模式的风险规避措施；同时，应大力加强作物需水信息采集设备、变频精量灌溉、精量施肥控制设备等的研发工作，为节水调质高效灌溉提供硬件保障。

4 节水调质高效灌溉需要解决的几个重要科学问题

在保证一定产量的前提下，提高水分利用效率(WUE)和改善品质从而获得较高的经济效益是节水调质高效灌溉理论研究的最终目标，对于大田作物，WUE一般用籽粒产量(或干物质积累量)与同期农田耗水量之比表示，而对于特色经济作物，单位水量收获产物的鲜重以及营养物质积累的效率则更加重要。因此，节水调质高效灌溉需要解决以下几个重要科学问题。

4.1 作物品质综合评价指标的构建 特色经济作物的内在品质是果实商品性优劣的重要指标，主要由糖、酸、香气、蛋白质、脂肪、维生素、矿物质等构成，其中糖类组成和含量及糖酸比是决定果实风味的重要指标。目前有关水分与品质关系研究涉及较多的指标也主要是可溶性固形物、总糖、酸及糖酸比。这些指标可以量化，但主观上的口感、果实形状等“模糊”指标则难以量化，因此，如何针对不同特色经济作物筛选出水分敏感型品质指标，在此基础上如何客观地评价其综合品质是确定水分-品质响应关系所要解决的首要问题。所谓“品质综合评价指标”至少有以下几个方面的含义：其形状、色度等外观品质是受消费者欢迎的，口感、芳香气味等内在品质较优，可溶性固形物、Vc等营养元素以及特有微量元素含量相对较高。此外，对于水分敏感型品质指标，选择何种方法优选以及如何将其运用于品质综合评价指标的数学描述还是一项新的课题。

4.2 水分-综合品质响应关系的量化 在水分-综合品质响应关系的量化研究方面，目前主要集中在某个或某几个品质指标与全生育期耗水量或灌水量经验关系的建立上。如何寻求一种具有物理意义和生理学基础的，体现产量和品质受水分调控驱动差异的函数来表征水分-综合品质-产量的响应关系尚待进一步研究。此外，作物产量形成的敏感期已有较多的报道，但对品质形成的敏感期尤其是综合考虑产量和品质敏感期的研究相对较少，已有的研究也主要限于定性研究^[26,28,37]。还有研究者提出可溶性固形物产量的概念，即可溶性固形物含量与产量的乘积^[49]，这不失为一种将品质和产量相结合的途径。但其合理性以及如何将品质、产量、效益与耗水量相结合尚有待商榷。

4.3 水分-综合品质-产量-经济效益综合模型的构建 如何通过对不同水分条件与灌溉模式下特色经济作物外观品质、营养品质、运输储藏品质、风味品质和加工品质参数的监测，分析不同品质参数对水分的响应关系，建立不同作物的单一品质参数对水分的响应函数尚待进一步研究；如何应用主成分分析、聚类分析等方法从众多品质参数中针对不同作物特点优选出水分敏感型品质指标，并通过市场调查、专家打分，并应用模糊数学方法确定不同水分敏感型品质参数的权重，提出不同作物的综合品质评价指标有待进一步深入；如何建立作物综合品质评价指标对水分的响应函数，分析作物综合品质-产量-效益的耦合关系，建立特色经济作物的水分-综合品质-产量-效益综合模型也是一项新的研究内容。

5 结论

非充分灌溉理论以往较多考虑在水资源有限条件下如何从时间上分配灌水量，实行补充灌溉或限水灌溉，以达到提高水分利用效率的目的，没有基于作物水分-综合品质-产量耦合关系，在时间

和空间上对作物根域土壤水分实施主动的精准调控。基于水分-品质响应关系提出的特色经济作物节水调质高效灌溉理论是在以往非充分灌溉理论基础上的一种新的灌溉调控理念, 不仅能够回答基于需水信息和水分-综合品质-产量耦合模型的作物节水调质高效灌溉决策方法与灌溉控制阈值等科学问题, 而且将推动以水量平衡理论和单纯考虑作物水分-产量模型为基础的传统农田灌溉理论, 向以作物需水信息和综合考虑水分-产量-品质耦合为基础的节水调质高效灌溉新理论的发展, 促进农业水利学科的基础理论的发展与创新。

致谢: 感谢王峰、陈峰、陈平、康敏、张赞、崔宁波、张宝忠、刘晓志、邱让建、王若水等在资料收集中的帮助和在论文修改过程中的宝贵建议。

参 考 文 献:

- [1] Spreer W, Nagle M, Neidhart S, et al. Effect of regulated deficit irrigation and partial rootzone drying on the quality of mango fruits (*Mangifera indica* L., cv. 'Chok Anan') [J]. *Agricultural Water Management*, 2007, 88 (1-3): 173-180.
- [2] Ma F S, Kang S Z, Li F S, et al. Effect of water deficit in different growth stages on stem sap flux of greenhouse grown pear-jujube tree [J]. *Agricultural Water Management*, 2007(90): 190-196.
- [3] Cui N B, Du T S, Kang S Z, et al. Regulated deficit irrigation improved fruit quality and water use efficiency of pear-jujube trees [J]. *Agricultural Water Management*, 2008, 95: 489-497.
- [4] Du T S, Kang S Z, Zhang J H, et al. Water use efficiency and fruit quality of table grape under alternate partial root-zone drip irrigation [J]. *Agricultural water management*, 2008, 95: 659-668.
- [5] 王若水. 民勤绿洲区三种温室作物耗水规律及节水效应试验研究 [D]. 北京: 中国农业大学, 2008.
- [6] 康敏. 石羊河流域苹果树耗水规律及节水调质试验研究 [D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2009.
- [7] 陈平. 石羊河流域温室番茄节水调质及优化灌溉制度试验研究 [D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2009.
- [8] Promper K W, Breen P J. Expansion and osmotic adjustment of strawberry fruit during water stress [J]. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 1997, 122(2): 183-189.
- [9] Mills T M, Behboudian M H, Clothier B E. Water relations, growth, and the composition of 'Braeburn' apple fruit under deficit irrigation [J]. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 1996, 121(2): 286-291.
- [10] Behboudian M H, Lawes G S, Griffiths K M. The influence of water deficit on water relations, photosynthesis and fruit growth in Asian pear (*Pyrus serotina* Rahd) [J]. *Acta Horticulturae*, 1994, 60: 89-99.
- [11] Yakushij H, Morinaga K. Sugar accumulation and partitioning in Satsuma mandarin tree tissues and fruit in response to drought stress [J]. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 1998, 123(4): 719-726.
- [12] Paul E. Kriedemann, Ian Goodwin. Regulated Deficit Irrigation and Partial Rootzone Drying [R]. *Irrigation Insights*, 2003.
- [13] Davies W J, Bacon M A, Thompson D S. Regulation of leaf and fruit growth in plants growing in drying soil: exploitation of the plants' chemical signaling system and hydraulic architecture to increase the efficiency of water use in agriculture [J]. *Journal of Experimental Botany*, 2000, 51 (350): 1617-1626.
- [14] Sauter A, Davies W J, Hartung W. The long-distance abscisic acid signal in the droughted plant: the fate of the hormone on its way from root to shoot [J]. *Journal of Experimental Botany*, 2001, 52(363): 1991-1997.
- [15] Wilkinson S, Davies W J. Xylem sap pH increase: A drought signal received at the apoplastic face of the guard cell that involves the suppression of saturable Abscisic Acid uptake by the epidermal symplast [J]. *Plant Physiology*, 1997, 113: 559-573.
- [16] 关军锋. 果实品质生理 [M]. 北京: 科学出版社. 2008.
- [17] Kang S Z, Shi W J, Zhang J H. An improved water-use efficiency for maize grown under regulated deficit irrigation [J]. *Field Crops Research*, 2000, 67: 207-214.
- [18] dos Santos T P, Lopes C M, Rodrigues M L, et al. Effects of deficit irrigation strategies on cluster microclimate for improving fruit composition of Moscatel field-grown grapevines [J]. *Scientia Horticulturae*, 2007, 112(3): 321-330.
- [19] Goldhamer D A, Viveros M, Salinas M. Regulated deficit irrigation in almonds: effects of variations in applied water and stress timing on yield and yield components [J]. *Irrigation Science*, 2006, 24: 101-114.

- [20] Williams L E. Irrigation of winegrapes in California . Practical Winery and Viticulture[J] . 2001(21) : 211–216 .
- [21] Gong D Z, Kang S Z, Yao L M , Zhang L . Estimation of evapotranspiration and its components from an apple orchard in northwest China using sap flow and water balance methods [J] . Hydrological Processes, 2007, 21: 931–938.
- [22] Zhang B Z, Kang S Z, Li F S, Zhang L . Comparison of three evapotranspiration models to Bowen ratio–energy balance method for a vineyard in an arid desert region of northwest China[J] . Agricultural and Forest Meteorology, 2008, 148: 1629–1640 .
- [23] Li S E, Kang S Z, Zhang L, et al . A comparison of three methods for determining vineyard evapotranspiration in the arid desert regions of northwest China[J] . Hydrological Processes, 2008, 22: 4554–4564.
- [24] Zhang B Z, Kang S Z, Zhang L, et al . An evapotranspiration model for sparsely vegetated canopies under partial root–zone irrigation[J] . Agricultural and Forest Meteorology, 2009, 149(11): 2007–2011 .
- [25] 许迪, 李益农 . 精细地面灌溉技术体系及其研究的进展[J] . 水利学报, 2007, 38(5): 529–537 .
- [26] 王锋 . 干旱荒漠绿洲区调亏灌溉对西瓜水分利用与品质影响的研究[D] . 杨凌: 西北农林科技大学 . 2007 .
- [27] 庞秀明 . 干旱荒漠绿洲区西瓜耗水规律与调亏灌溉模式研究[D] . 杨凌: 西北农林科技大学 . 2006 .
- [28] 刘明池, 张慎好, 刘向莉 . 亏缺灌溉时期对番茄果实品质和产量影响[J] . 农业工程学报, 2005(增): 92–94 .
- [29] Zegbe J A, Ehboudiana M H, Lang A, et al . Deficit irrigation and partial rootzone drying maintain fruit dry mass and enhance fruit quality in ‘Petopride’ processing tomato (*Lycopersicon esculentum*, Mill .) [J] . Scientia Horticulturae, 2003(298): 505–510 .
- [30] Dogan E, Kirnak H, Berekatoglu K, et al . Water stress imposed on muskmelon (*Cucumis Melo L .*) with subsurface and surface drip irrigation systems under semi–arid climatic conditions [J] . Irrigation Science, 2008, 26: 131–138 .
- [31] Sensoy S, Ertek A, Gedik I, et al . Irrigation frequency and amount affect yield and quality of field–grown melon (*Cucumis melo L .*) [J] . Agricultural Water Management, 2007, 88: 269–274 .
- [32] Yesim E, Nedim A Y . Yield response of watermelon to irrigation shortage [J] . Scientia Horticulturae, 2003, 98: 365–383 .
- [33] 刘晓志 . 石羊河流域苹果梨液流变化规律与调亏灌溉机理研究[D] . 北京: 中国农业大学 . 2009 .
- [34] Treeby M T, Henriod R E, Bevington K B, et al . Irrigation management and rootstock effects on navel orange fruit quality [J] . Agricultural Water Management, 2007, 91: 24–32 .
- [35] Kilibi A W, Behboudian M H, Mills T M . Composition and quality of ‘Braeburn’ apples under reduced irrigation [J] . Scientia Horticulturae, 1996, 67: 1–11 .
- [36] Leib B G, Caspari H W, Redulla C A, et al . Partial rootzone drying and deficit irrigation of ‘Fuji’ apples in a semi–arid climate [J] . Irrigation Science, 2006, 24: 85–99 .
- [37] Johnstone P R, Hartz T K, LeStrange M, et al . Managing fruit soluble solids with late–season deficit irrigation in drip–irrigated processing tomato production [J] . HortScience, 2005, 40: 1857–1861 .
- [38] Waldir A M, Washington L C . Water tension thresholds for processing tomatoes under drip irrigation in Central Brazil [J] . Irrigation Science, 2007, 25: 411–418 .
- [39] Reynolds A G, Savigny C . Influence of girdling and gibberellic acid on yield components, fruit composition, and vestigial seed formation of Sovereign Coronation table grapes [J] . HortScience, 2004, 39: 541–545 .
- [40] Shellie K C . Vine and berry response of Merlot (*Vitis vinifera*) to differential water stress [J] . American Journal of Enology and Viticulture, 2006, 57: 514–518 .
- [41] Fabeiro C, Martin F, Juan J A . Production of muskmelon under controlled deficit irrigation in a semi–arid climate [J] . Agricultural Water Management, 2002, 54: 93–105 .
- [42] Machado R M A, Oliveira M R G . Tomato root distribution, yield and fruit quality under different subsurface drip irrigation regimes and depths [J] . Irrigation Science, 2005, 24: 15–24 .
- [43] 陈在新, 王宜雄, 李金秋, 等 . 湖北公安县柑橘果实品质分析与模糊综合评判 [J] . 安徽农业科学, 2006, 34(18): 4518–4519 .
- [44] 张海英, 韩涛, 王有年, 等 . 桃果实品质评价因子的选择 [J] . 农业工程学报, 2006, 22(8): 235–239 .
- [45] 雷莹, 张红艳, 宋文化, 等 . 利用多元统计法简化夏橙果实品质的评价指标 [J] . 果树学报, 2008, 25(5):

640-645.

- [46] 张振文, 姚庆群. 主成分分析法在芒果贮藏特性分析中的应用[J]. 亚热带植物科学, 2005, 34(2): 25-28.
- [47] 刘遵春, 包东娥, 廖明安. 层次分析法在金花梨果实品质评价上的应用[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2006(8): 131-134.
- [48] 张万琴, 刘遵春, 包东娥, 等. 数学模型在金花梨果实品质评价上的应用[J]. 西北农业学报, 2006, 15(4): 188-191.
- [49] Renquist A R, Reid J B. Processing tomato fruit quality: influence of soil water deficits at flowering and ripening [J]. Australian Journal of Agricultural Research, 2001, 52: 793-799.

Efficient water-saving irrigation theory based on the response of water and fruit quality for improving quality of economic crops

DU Tai-sheng, KANG Shao-zhong

(China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract: The traditional insufficient irrigation theory is based on less yield reduction or more gross yield and benefit by utilizing the water production function. In this paper, an integrated theory of efficient water-saving irrigation for improving quality of economic crops based on response of water and fruit quality was established. Physiological and biological mechanism for response of water and fruit quality was analyzed. The recent status of response of water and fruit quality was summarized. The way for implementing the efficient water-saving irrigation for improving quality was discussed, and some important scientific topics which should be studied were also suggested.

Key words: Response of water and fruit quality; efficient irrigation for improving fruit quality; insufficient irrigation; quality

(责任编辑: 吕斌秀)