

特约综述 Invited Review

交替灌溉的节水调质机理及同位素技术在作物水分利用研究中的应用

杜太生¹, 康绍忠¹, 张建华^{2,*}¹中国农业大学中国农业水问题研究中心, 北京100083; ²香港浸会大学生物系, 香港

摘要: 基于节水灌溉技术原理与作物感知缺水的根源信号理论而提出的根系分区交替灌溉, 是交替对作物部分根区进行正常的灌溉, 其余根区受到适度水分胁迫的灌溉方式。应用同位素示踪技术追溯分根区交替供水条件下土壤-作物系统水分运转途径并揭示其节水调质机理是一个重要的研究方向。本文对根系分区交替灌溉的节水调质效应、节水机理、稳定性氢氧同位素在植物水分运移中的应用以及稳定性碳同位素在植物水分利用效率中的应用研究进展及应用前景作了简要介绍, 并对将来需要重点研究的方向作了展望。以期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有效的调控途径。

关键词: 分区交替灌溉; 同位素技术; 水分传输; 作物品质; 水分利用效率

Water-Saving and Crop Quality Improvement of Alternate Partial Root-Zone Irrigation and Application of Isotope Technology in the Research of Crop Water Use

DU Tai-Sheng¹, KANG Shao-Zhong¹, ZHANG Jian-Hua^{2,*}¹Center for Agricultural Water Research in China, China Agricultural University, Beijing 100083, China; ²Department of Biology, Hong Kong Baptist University, Hong Kong, China

Abstract: Alternate partial root-zone irrigation (APRI) is a new irrigation technique and requires that approximately half of the root system is exposed to drying soil while the remaining half is irrigated as in full irrigation. This irrigation method can reduce plant water consumption and is based on theory of root-to-shoot long distance signaling and regulation. To understand its mechanism and other effects on the crop quality, it is important to investigate the water movements and hydraulic connections between the dry and wet root-zones and from soil to the roots, xylem, leaves and fruits. Stable hydrogen isotopic tracing and carbon isotopic implicating technology provides a promising tool for such research. In this review, the effects of APRI on water-saving and fruit quality improving; application of stable hydrogen isotopic tracing in water transformation and carbon isotopic implicating on water use efficiency are discussed; and some important scientific issues which should be studied in the future are also commented. It is expected that APRI should have the potential to improve crop water use efficiency, maintain yield and enhance product quality so that agricultural resources are most effectively used.

Key words: alternate partial root-zone irrigation; isotope technology; water transport; crop quality; water use efficiency

随着全球气候变暖、水资源紧缺以及耕地面积的下降, 有关生物节水的研究已成为科学界研究的热点, 其巨大的节水潜力也越来越受到人们的重视, 相对于以减少无效耗水为目的的工程节水而言, 以“真实节水”为目标的生物节水正在显示出巨大的节水潜力和应用前景。近年来, 在传统灌溉理论的基础上, 生物节水理论的研究呈现以下趋势: 调控理念上由被动补水转向主动调控灌溉; 时间上由全生育期充分灌溉转向在需水非敏

感期适度亏水; 空间上由全部根区充分均匀湿润转向部分根区交替湿润; 研究重点由仅考虑灌水技术转向灌水方式与干旱信号、作物需水信息、气孔响应和需水调节相结合; 调控重点由输水过程节水、田间灌水过程节水逐步转移到生物节

收稿 2011-07-05 修定 2011-07-21

资助 国家自然科学基金项目(51079147, 50939005)和香港RGC项目(HKBU 262307)。

* 通讯作者(E-mail: jzhang@hkbu.edu.hk; Tel: 852-34117350)。

水、作物精量控制用水与节水系统科学管理有机结合; 农业水管理的重点由单纯的水量管理向水量、水质联合管理转变, 并注重水环境的监控和保护以实现灌溉水源的可持续利用和产品品质的提高(康绍忠等2004; 陈兆波2007)。因此, 如何通过改变作物根系区域的土壤湿润方式, 调节根系系统的生产功能, 实现节水优质高效生产, 对我国农业节水和水资源高效利用具有重要意义。

传统的非充分灌溉主要考虑不同时间的灌溉水量调控, 而根系分区交替灌溉(alternate partial root-zone irrigation, APRI)则是基于节水灌溉技术原理与作物感知缺水的根源信号理论, 通过交替对部分根区进行灌溉, 改变根区剖面土壤湿润方式从而刺激根系吸水的补偿效应, 以调节气孔开度, 减少叶片“奢侈”蒸腾, 提高水分利用效率, 从而达到节水、丰产、优质、高效的目的(康绍忠等1997; Kang和Zhang 2004)。基于同位素技术追溯分根区交替供水条件下土壤-作物系统水分运转途径并揭示其节水调质机理和水分利用过程, 将为研究根系分区交替灌溉条件下作物水分运输和分配机理提供大量的未知信息, 有益于进一步明确根系分区灌溉的根系补偿效应、光合同化产物的运转效应和节水调质效应, 从而实现节水、丰产、优质、高效的调控目标。

1 根系分区交替灌溉的节水调质机制

1.1 根系分区交替灌溉条件下的水分利用过程研究

根系分区交替灌溉理念最初源于植物生理学中对传统的分根试验和根源干旱信号的探索研究, 在部分根区干燥(partial root-zone drying, PRD)技术作为一种主动的灌溉调控思路提出之前, 主要针对PRD条件下根冠信息传递和相关生理指标的反应进行研究, 尤其对部分根区干燥条件下干旱信号ABA的产生、长距离运输与传导、ABA在不同部位的代谢与木质部汁液pH值的变化以及导致气孔开度降低的机理进行了深入的研究(Sauter等2001; Hartung等2002; Schachtman和Goodger 2008)。但与此相反, 对西红柿和大豆等作物的一些试验研究则既未观测到PRD处理使气孔导度和蒸腾速率下降, 也没有发现木质部汁液pH值有任何变化(Stikic等2003; Wakrim等2005)。为了进一步揭示其原因, 很多研究以根系补偿生长效应和

根系水分传导为切入点进行探讨, Green和Clothier (1999)的研究表明当表层土壤在水平面上呈均匀湿润时, 苹果树根系吸水的70%发生在根系层上部0.4 m深的范围内, 而当仅在根系区域的一侧灌水时, 其水分吸收的形式变化很快, 根系从湿润侧土壤吸水的速率比均匀供水时增加了20%, 而且根液流的热脉冲测定结果也表明经干燥后重新复水的根系吸收功能存在明显的补偿效应, 这些研究结果证明苹果树有调节其根系吸水形式以适应土壤含水量局部变化的能力。Poni等(1992)的试验也表明根系在局部干燥时有以比全部根区湿润时大得多的速率传输水分的能力。自康绍忠等(1997)系统提出APRI的概念、理论基础与技术体系以来, 众多学者对这种灌溉方式下的气孔响应、补偿生长效应、地上地下生物量变化、产量、水分利用效率和品质等方面开展了大量的试验研究, 发现让根系经受一定程度的干旱锻炼后, 对其水分传导具有明显的补偿作用(康绍忠等2007; Hu等2011)。此类研究初步揭示了局部根区干燥时湿润区根系存在补偿效应, 但由于研究方法的限制, 仍未能解释不同根区间水分的有效性动态变化以及根系-木质部-果实(或籽粒)之间的水力联系与相互作用机制。

由于根系生长于地下, 准确取样和测定有一定困难, 传统的对植物水分利用过程研究采用的方法(尤其是挖掘或打根钻取样)往往是破坏性的, 并且耗时而又不切实际, 在APRI研究中也多采用这些传统方法, 并借助根系扫描仪等得到了根量、根长密度等一些有价值的信息(梁宗锁等2000; 杜太生等2007; Abrisqueta等2008; Tang等2010), 但对作物不同部位水的传输机制及其水力联系仍缺乏系统的研究, 尤其对于西红柿等多次采摘作物, 其水分传输过程不同于一般的大田作物(Stikic等2003), 而且很多机理性的研究结果互相矛盾, 有必要引入同位素示踪技术, 进一步了解其果实与根、茎、叶之间水分的响应机制和流通环节, 进一步追溯其长期的水分利用过程, 解析植物体内的水分信息流动及其调控果实品质的机理, 重点探讨分根区交替供水条件下不同根区、作物不同部位水分运转与分配响应机制, 在此基础上深入研究分根区交替供水的根系补偿效应、液流运输

特征和生长调控效应, 进一步阐明局部根区灌溉的节水调质机理。

1.2 根系分区交替灌溉的节水调质效应研究

近年来, 应用根系分区交替灌溉技术改善作物品质逐渐成为一个新的研究热点。其作为一种主动的灌溉调控技术在果树和瓜类作物上得到了较广泛的应用。在澳大利亚酿酒葡萄上的研究表明, 交替灌溉处理的葡萄修剪量明显减少而产量未下降, 葡萄口感、颜色改善, 酿制的葡萄酒色泽、口感、品评等级也有所提高(Kriedemann和Goodwin 2003; Loveys等2004)。国外在地中海气候条件下得到的比较一致的结论是: APRI技术可显著减少葡萄的营养生长冗余, 大量节水而不减产或减产幅度较小, 葡萄或酿制的葡萄酒品质提高。Davies等(2000)的试验结果表明, APRI处理的西红柿与对照相比, 单株水果数、单株产量干重、成熟度无显著差异, 而果实可溶性固形物含量增加了21%, 果实pH值无变化, 水分利用效率提高了93%, 其外观品质则表现为APRI处理的西红柿更甜、香味浓郁、无涩感。Kirda等(2004)也得到了类似的结论。

目前在生物节水领域, 国际上的一个重要发展趋势是把调亏灌溉(regulated deficit irrigation, RDI)和APRI结合起来研究其对不同作物果实品质的综合影响。Zegbe等(2003)对西红柿的研究表明, 亏缺灌溉和APRI处理(灌水量均为对照的1/2)的果实数目与含水量较对照显著降低, 但可溶性固形物含量显著提高, APRI的西红柿成熟期较亏缺灌溉和常规灌溉提前一周, 而其干物质产量和品质构成无显著差异。De la Hera等(2007)在西班牙半干旱地区连续3年的田间试验结果表明, 全生育期APRI处理显著提高了葡萄产量和水分利用效率, 但对葡萄和葡萄酒的品质未有显著影响, 这与很多报道的结果一致(Bravdo等2004), 但也有一些研究的结论与之相矛盾(Loveys等2004; Neuhaus等2009)。这说明根系分区交替灌溉条件下品质对不同的灌溉模式、灌水量、灌溉频率、交替周期都有不同程度的响应。Chaves等(2007)在葡萄牙对两个不同品种的酿酒葡萄进行的3年连续试验发现, 调亏灌溉和根系分区交替灌溉不会减产, 而且根系分区交替灌溉下的果实品质更好, 主要表现

在可获得较高浓度的果皮花色素和总酚。此外, 在芒果、苹果等果树上的研究也得到了类似的结论(Spreer等2007; Leib等2006), 但也有一些研究结论与此相反(De la Hera等2007; Sadras 2009), 其原因尚需进一步明确。

国外APRI技术的应用对象主要是酿酒葡萄、西红柿等经济价值较高的作物, 近年来开始在苹果、梨等果树上进行研究; 研究内容主要集中于该技术对果树产量、用水量、水分利用效率等方面, 并逐步由室内盆栽试验向保护地和大田应用方向发展。分析指标除生长状况、产量等指标外, 还涉及水果的品质、修剪量等。所应用的灌溉方式主要是双管交替滴灌, 近年来开始研究某些果树隔沟交替灌溉的应用效果。关于APRI技术节水机理方面的研究主要集中于干旱信号转导方面, 而对这种灌溉方式下不同根区水流的运移机理、土壤水分入渗规律、动态分布与数值模拟等尚未引起足够的重视, 尚未见同位素技术应用于不同根区水流运动规律及其节水机理研究的报道。国内目前对APRI的概念与技术体系、节水效应、水肥利用及其对水分利用效率(water use efficiency, WUE)的影响等均进行了系统深入的研究。但更多的是偏重于室内试验和玉米等大田作物, 主要应用方式是隔沟交替灌溉, 研究内容则多侧重于生理生态指标、产量和水分利用效率的研究, 近年来逐渐关注该灌水方式下农作物或水果的品质改善效应(Du等2008; 宋磊等2008; 杨启良等2009; Jensen等2010; Zegbe和Serna-Perez 2011)。

综上所述, APRI技术具有显著的节水调质效应, 应用该技术可达到大量节水的目的, 产量保持同等水平或略有下降, 但可促进糖分向果实运移, 保证果实生长, 提高口味和品质。但其机理尚不明确, 尤其对于作物不同根系区域水的运移规律、不同组织(器官)水流通量受根系分区交替灌溉调控的机制, 需要借助同位素技术的研究方法做系统深入的探索。

2 同位素技术在作物水分利用研究中的应用

2.1 稳定性氢氧同位素对作物水分运移过程的追溯作用研究

土壤水分是植物最重要和直接的水分来源, 在植物根系对土壤水分的吸收过程中, 水分在被

植物根系吸收与从根部向上运输过程中均不发生稳定氢氧同位素的分馏,植物导管内水分保持与来源水分相同的同位素组成。根对水分的吸收尽管改变了土壤水分含量,而水分在植物根部与茎干之间运输时,在到达叶片或幼嫩未栓化的枝条之前,其同位素组成并不发生变化。因此,植物茎木质部水分的同位素组成能反映出植物利用的不同水源稳定氢氧同位素信息。只需通过测定植物木质部水分和不同层次土壤水分的氢氧同位素比(δD 、 $\delta^{18}O$),便可间接确定植物水分利用来源,从而克服传统方法需要对地下根系进行破坏取样的问题(Burgess等2000)。目前已有一些研究证实,稳定氢氧同位素(D、T、 ^{18}O)可为定位定量研究和区分植物水分利用提供重要的信息(段德玉和欧阳华2007;张丛志等2008;苑晶晶等2009)。植物体内水分的同位素组成是各种来源水分同位素组成共同组合的结果,通过二项或三项分隔线性混合模型即可以定量区分不同利用水分的来源及其对植物相对贡献的大小。

作物中氢的主要来源是水,而氧同位素主要存在于与作物发生作用的 CO_2 和 H_2O 中。很多研究表明水中氢同位素在植物根系吸收时不发生分馏,利用氢稳定同位素方法可定量分析不同生境下作物所利用水的来源及去向(White等1985; Dawson 1993)。随着对同位素判别过程原理认识的不断加深,以及质谱测定技术的发展,稳定同位素技术在植物不同时间尺度内的水分利用效率、水分胁迫、水分来源判别以及蒸发蒸腾等方面得到了初步的应用(Korol等1999)。在国内,史建君和陈晖(2002)采用模拟污染物的同位素示踪技术研究了灌溉和降雨条件下含氡水在青菜—土壤模拟生态系统中的迁移与分布动态,发现当灌入氡水后,根系迅速吸水,并向地上部运输,通过茎到达枝条、叶片和果实中;根系以自由水氡的形式吸收。在吸收和运输自由水氡的同时向结合态氡的形式转化。目前氢同位素示踪对水分在植物各个器官中的运输和分配研究甚少,更未见对交替灌溉条件下水分在植物各个器官中运输路径示踪的报道。

植物吸水、运输和分配是一个复杂的体系,稳定性氢氧同位素示踪技术将提供水分到达植物的各个器官的时间以及在各个器官的含量等信息,

明确水分在植物体内的运输与分配规律。今后在植物的水分运输机制方面尚有以下问题亟待研究:(1)进一步明确不同灌溉方式下水分在不同植物体内的运移规律;(2)进一步研究水分在植物的根系、茎、枝条、叶片、果实中的分配规律,为确定合理的灌水方式和时间提供依据。(3)深入研究水分在植物不同根区间的横向运输能力,上述研究将为根系分区交替灌溉灌水指标的控制、交替周期、交替阈值的确立提供理论依据。

2.2 稳定性碳同位素对植物水分利用过程的指示作用研究

在自然界中,碳有 ^{12}C 和 ^{13}C 两种稳定性同位素,其中, ^{12}C 占98.89%,而 ^{13}C 只占1.11%。然而,在植物组织的有机化合物中,稳定性碳同位素 ^{13}C 和 ^{12}C 之间的比值不是恒定不变的,而正是这种比值的变化包含了在碳转移固定过程中的物理、化学和生物代谢等方面大量的信息。在植物组织中的 ^{13}C 与 ^{12}C 比值都普遍小于大气 CO_2 中的 ^{13}C 与 ^{12}C 比值(Farquhar和Richards 1984),这表明 CO_2 在通过光合作用形成植物组织的过程中,会产生碳同位素分馏,而这种分馏的大小与植物的光合作用类型、遗传特性、生理特点、生长环境及其他因素密切相关。同时,由于这两种同位素是稳定的,所以,只要没有碳元素的损失,碳同位素比值所包含的内在信息是不变的。基于这一特性,生物体组织中的稳定性碳同位素可用于光合作用途径和植物水分利用率的研究。

传统的长期WUE(生物量法或产量法)和瞬时WUE(光合仪法)测定方法都存在一些缺陷:前者由于需要测定一段时期内植物水分消耗和生物量或产量增量,必需在田间进行大规模试验,工作量较大;而后的测定结果仅代表了测定时瞬间的作物胞内与大气 CO_2 浓度比[the ratio of leaf intercellular CO_2 concentration (C_i) to the ambient atmosphere CO_2 concentration (C_a), C_i/C_a]和WUE值,而且受天气的影响很大。与这两种方法相比,碳同位素法具有以下优势:(1)实验室碳同位素测定快捷、准确,而且不需要测定作物水分消耗和生物量增量,大大简化了WUE的测定过程,其结果更为准确;(2)采样后碳同位素实验室分析时间无限制,有利于大批量的田间试验取样分析;(3)由于作物

组织的 $\delta^{13}\text{C}$ 值可以表示出其在整个生活史中的WUE, 通过测定作物不同组织(器官)的 $\delta^{13}\text{C}$ 值可测定出不同时间尺度的WUE, 克服了其他方法只能测定某一时间尺度的缺陷。植物体内的稳定性碳同位素比($\delta^{13}\text{C}$)可以提供植物较长时间尺度的水分利用效率信息(Farquhar和Richards 1984), 在很多作物的试验研究中都发现 $\delta^{13}\text{C}$ 与WUE呈正相关关系(Martin和Thorstenson 1988)。自从Farquhar等(1989)系统阐述了碳同位素比($\delta^{13}\text{C}$)和碳同位素分辨率($\Delta^{13}\text{C}$)的计算方法, 并确立了碳同位素分辨率与植物叶间 CO_2 浓度(C_i)的关系以后, 稳定性碳同位素在植物水分利用效率研究中得到了更为广泛的应用。已有相关证据表明, 较高的 $\delta^{13}\text{C}$ 和WUE伴随着较低的(C_i/C_a), 而该比值的降低可能是由气孔导度降低或光合速率提高或二者共同作用的结果(Condon等2004)。但是, 碳同位素技术也存在一些缺点: (1)测定所需质谱仪价格昂贵, 且需专门的技术人员操作; (2)任何影响气孔导度或光合能力的因子, 如光合有效辐射、水分亏缺、光照、空气温湿度、饱和差等均会对测定值产生一定的影响; (3)尽管大量研究认为 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\Delta^{13}\text{C}$ 与WUE有很好的相关性, 但也有相反的结论, 特别是水分胁迫导致植物体中 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\Delta^{13}\text{C}$ 与WUE的相关性不显著或不相关。因此, 利用碳同位素指示WUE还必须与不同时间尺度的WUE研究相结合。

陈世莘等(2004)研究了内蒙古锡林河流域6个水分条件下黄囊苔草叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值的变化, 发现随着土壤含水量的降低, 叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值显著增大, 然而, 在绝大部分情况下 $\delta^{13}\text{C}$ 值和WUE之间并不是线性关系, 而是随着水分供应的增加趋于一个稳定值(Anderson等2002)。存在这一普遍趋势的原因在于气孔导度(g_s)是联系 $\delta^{13}\text{C}$ 与水分供应的主要因子。而在充分灌溉条件下, g_s 将达到最大, 因而 $\delta^{13}\text{C}$ 不会相应变化。在应用稳定性碳同位素技术研究水分亏缺条件下植物WUE方面也已取得了大量成果。对APRI、调亏灌溉等不同亏缺灌溉方式下葡萄不同组织 $\Delta^{13}\text{C}$ 与水分利用效率关系的研究表明二者呈负相关关系(de Souza等2005); 而朱林等(2009)发现不同基因型春小麦扬花期旗叶 $\Delta^{13}\text{C}$ 有显著差异, 在重度亏水处理下, 旗叶中的灰分含量与 $\Delta^{13}\text{C}$ 呈显

著正相关, 中度水分胁迫处理的扬花期旗叶中的 K^+ 含量与 $\Delta^{13}\text{C}$ 呈显著负相关, 中度亏水处理和正常灌水处理条件下扬花期旗叶中Mg的含量与 $\Delta^{13}\text{C}$ 呈显著正相关, 而WUE与 $\Delta^{13}\text{C}$ 呈显著正相关; Zhao等(2006)研究表明, 水分亏缺导致的植物 $\delta^{13}\text{C}$ 与WUE呈负相关或相关性不明显。

2.3 同位素技术在作物节水调质机理研究中的应用

目前对于局部根区灌溉条件下植物水分利用过程多从生理角度解释, 即当作物受到水分胁迫时, 将通过主动的渗透调节来增强自身的抗旱性, 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, 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(Mills等1996; Promper和Breen 1997)。同时, 在受到水分胁迫时, 叶源光合同化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(Yakushij等1998)。对部分根区干燥条件下干旱信号ABA的产生、长距离运输与传导、ABA在不同部位的代谢过程及木质部汁液pH值的变化与果实品质的关系也有较系统的分析和总结(Sauter等2001; Schachtman和Goodger 2008)。为了进一步探明不同水分亏缺对不同组织水分利用效率的影响, Cui等(2009)通过对温室与大田梨枣树不同调亏灌溉处理, 研究了叶片碳稳定同位素分辨率(Δ_L)与相应时段叶片瞬时WUE (photosynthesis rate/transpiration rate, WUE_i ; photosynthesis rate/stomatal conductance of CO_2 , WUE_n)、产量水平WUE (yield/crop water consumption, WUE_y)与最终产量的关系以及果实碳稳定同位素分辨率(Δ_F)与 WUE_y 、产量和耗水量(ET_c)的关系。发现不同生育期亏水对梨枣树 $\Delta^{13}\text{C}$ 、 Δ_F 影响显著, 不同生育期亏水处理的 Δ_L 与 WUE_i 、 WUE_n 仅在果实成熟期呈显著负相关, Δ_F 与 WUE_y 、产量也仅在果实成熟期呈显著负相关, 全生育期所有亏水处理下 Δ_L 对叶片水平WUE具有一定指示性, 且对 WUE_n 的指示性优于 WUE_i , Δ_F 对 WUE_y 、 ET_c 指示效果较理想。Wang等(2010)研究了盆栽西红柿APRI和亏缺灌溉条件下WUE与 $\delta^{13}\text{C}$ 的关系, 发现APRI提高WUE的

主要原因是优化了植株氮素(N)的分配比例。在这种灌溉方式下气孔导度(g_s)- $\Delta^{13}\text{C}$ -N-WUE关系的研究将为揭示根系分区交替灌溉的节水调质机理提供更多有价值的信息。

3 问题与展望

根系分区交替灌溉的节水调质效应已经被越来越多的试验研究证实,目前已有大量研究证实了稳定性碳同位素对植物水分利用效率的指示作用,比如植物的碳同位素比($\delta^{13}\text{C}$)和碳同位素分辨率($\Delta^{13}\text{C}$)值在一定程度上可以表征植物长期的水分利用效率,而氢同位素D (^2H)、T (^3H)为水分子的组成成分且具有很高的稳定性,在水分的运输和分配研究中具有独特的指示功效。因此,将稳定性同位素示踪技术用于根系分区交替灌溉节水调质机理研究,将进一步明确局部根区供水条件下水分的信息流动途径,解释地下不同部分根系的吸收情况以及地上不同部位水分利用情况,为根系分区交替灌溉的节水机理及其对果实品质的调控机制提供更深层的机理解释。但尚有以下科学问题需要回答: (1)根系分区交替灌溉条件下植物体内的水分是否均衡的来源于干湿交替的根系区域? (2)在根系分区灌溉模式下部分根区出现干旱胁迫时,湿润根区的水分是优先供应地上部生长还是横向运输至干旱区根系使其解除干旱胁迫? (3)根系分区交替供水如何影响植物各部分器官的水分利用过程? (4)在土壤-根系-木质部-果实的运转途径中,如何调控果实水分的供应以及品质的形成过程?

利用稳定性氢同位素示踪技术研究水分在不同根区及植物体内的运输与分配规律,利用碳同位素指示WUE从而把不同时间尺度的WUE研究有机结合起来,将进一步明确局部根区供水条件下水分的信息流动途径,解释地下不同部分根系的吸收情况以及地上不同部位水分利用与运转情况。深刻认识局部根区交替灌水过程中不同时间尺度下“干湿区域不同根系水分运输微循环”、“根系-木质部水分运输微循环”、“木质部-果实水分运输微循环”中水分的纵向与横向运输与分配规律。在进一步深刻认识不同根系分区交替灌溉模式下植株水分生理状况、气孔调控与用水过程响应的基础上,以多尺度水分利用效率研究为核心,

围绕经济产量的形成和水分-品质响应关系,有望进一步阐明作物木质部-叶片-果实液流交换与相应的光同化产物的运输与分配机制。

参考文献

- 陈世莘,白永飞,韩兴国,安吉林,郭富存(2004). 沿土壤水分梯度黄囊苔草碳同位素组成及其适应策略的变化. 植物生态学报, 28 (4): 515~522
- 陈兆波(2007). 生物节水研究进展及发展方向. 中国农业科学, 40 (7): 1456~1462
- 杜太生,康绍忠,张建华(2007). 不同局部根区供水对棉花生长与水分利用过程的调控效应. 中国农业科学, 40 (11): 2546~2555
- 段德玉,欧阳华(2007). 稳定氢氧同位素在定量区分植物水分利用来源中的应用. 生态环境, 16 (2): 655~660
- 康绍忠,杜太生,孙景生,丁日升(2007). 基于生命需水信息的作物高用水调控理论与技术. 水利学报, 38 (6): 661~667
- 康绍忠,胡笑涛,蔡焕杰,冯绍元(2004). 现代农业与生态节水的理论创新及研究重点. 水利学报, 35 (12): 1~8
- 康绍忠,张建华,梁宗锁,胡笑涛,蔡焕杰(1997). 控制性交替灌溉——一种新的农田节水调控思路. 干旱地区农业研究, 15 (1): 1~6
- 梁宗锁,康绍忠,石培泽,潘英华,何立绩(2000). 隔沟交替灌溉对玉米根系分布和产量的影响及其节水效益. 中国农业科学, 33 (6): 26~32
- 史建君,陈晖(2002). 青菜-土壤生态系统中氘水的迁移与分布动态. 生态学报, 22 (8): 1260~1265
- 宋磊,岳玉苓,狄方坤,魏钦平,高照全,张继祥(2008). 分根交替灌溉对桃树生长发育及水分利用效率的影响. 应用生态学报, 19 (7): 1631~1636
- 杨启良,张富仓,刘小刚(2009). 根系分区交替滴灌对苹果幼苗生理特性和水分利用效率的影响. 西北植物学报, 29 (7): 1364~1372
- 苑晶晶,袁国富,罗毅,孙晓敏,张娜(2009). 利用 $\delta^{18}\text{O}$ 信息分析冬小麦对浅埋深地下水的利用. 自然资源学报, 24 (2): 360~368
- 张丛志,张佳宝,赵炳梓,张辉(2008). 稳定同位素在作物水分关系研究中的应用. 土壤, 40 (2): 167~173
- 朱林,梁宗锁,许兴,李树华(2009). 三种土壤水分条件下春小麦旗叶碳同位素分辨率与灰分含量的关系. 中国农业大学学报, 14 (1): 66~72
- Abrisqueta JM, Mounzer O, Alvarez S, Conejero W, Garcia-Orellana Y, Tapia LM, Vera J, Abrisqueta I, Ruiz-Sanchez MC (2008). Root dynamics of peach trees submitted to partial rootzone drying and continuous deficit irrigation. *Agr Water Manage*, 95 (8): 959~967
- Anderson WT, Bernasconi SM, McKenzie JA, Saurer M, Schweingruber F (2002). Model evaluation for reconstructing the oxygen isotopic composition in precipitation from tree ring cellulose over the last century. *Chem Geol*, 182 (2-4): 121~137
- Bravdo B, Naor A, Zahavi T, Gal Y (2004). The effect of water stress

- applied alternately to part of the wetting zone along the season (PRD-partial rootzone drying) on wine quality, yield and water relations of red wine grapes. *Acta Hort*, 664: 101~109
- Burgess SSO, Adams MA, Turner NC, Ward B (2000). Characterization of hydrogen isotope profiles in an agroforestry system: implications for tracing water sources of trees. *Agr Water Manage*, 45 (3): 229~241
- Chaves MM, Santos TP, Souza CR, Ortuño MF, Rodrigues ML, Lopes CM, Maroco JP, Pereira JS (2007). Deficit irrigation in grapevine improves water-use efficiency while controlling vigour and production quality. *Ann Appl Biol*, 150 (2): 237~252
- Condon AG, Richards RA, Rebetzke GJ, Farquhar GD (2004). Breeding for high water-use efficiency. *J Exp Bot*, 55 (407): 2447~2460
- Cui NB, Du TS, Kang SZ, Li FS, Hu XT, Wang MX, Li ZJ (2009). Relationship between stable carbon isotope discrimination and water use efficiency under regulated deficit irrigation of pear-jujube tree. *Agr Water Manage*, 96 (11): 1615~1622
- Davies WJ, Bacon MA, Thompson DS, Sobeih W, Rodríguez LG (2000). Regulation of leaf and fruit growth in plants growing in drying soil: exploitation of the plants' chemical signalling system and hydraulic architecture to increase the efficiency of water use in agriculture. *J Exp Bot*, 51 (350): 1617~1626
- Dawson TE (1993). Hydraulic lift and water use by plants: implications for water balance, performance and plant interactions. *Oecologia*, 95 (4): 565~574
- De la Hera ML, Romero P, Gomez-Plaza E, Martinez A (2007). Is partial root-zone drying an effective irrigation technique to improve water use efficiency and fruit quality in field-grown wine grapes under semiarid conditions? *Agr Water Manage*, 87 (3): 261~274
- de Souza CR, Maroco JP, dos Santos TP, Rodrigues ML, Lopes CM, Pereira JS, Chaves MM (2005). Impact of deficit irrigation on water use efficiency and carbon isotope composition ($\delta^{13}\text{C}$) of field-grown grapevines under Mediterranean climate. *J Exp Bot*, 56 (418): 2163~2172
- Du TS, Kang SZ, Zhang JH, Li Fusheng, Yan BY (2008). Water use efficiency and fruit quality of table grape under alternate partial root-zone drip irrigation. *Agr Water Manage*, 95 (6): 659~668
- Farquhar GD, Ehleringer JR, Hubick KT (1989). Carbon isotope discrimination and photosynthesis. *Annu Rev Plant Physiol Plant Mol Biol*, 40: 503~537
- Farquhar GD, Richards RA (1984). Isotopic composition of plant carbon correlates with water use efficiency of wheat genotypes. *Aust J Plant Physiol*, 11 (6): 539~552
- Green S, Clothier B (1999). The root zone dynamics of water uptake by a mature apple tree. *Plant Soil*, 206 (1): 61~77
- Hartung W, Sauter A, Hose E (2002). Abscisic acid in the xylem: where does it come from, where does it go to? *J Exp Bot*, 53 (366): 27~32
- Hu TT, Kang SZ, Li FS, Zhang JH (2011). Effects of partial root-zone irrigation on hydraulic conductivity in the soil-root system of maize plant. *J Exp Bot*, doi: 10.1093/jxb/err110
- Jensen CR, Battilani A, Plauborg F, Psarras G, Chartzoulakis K, Janowiak F, Stikic R, Jovanovic Z, Li G, Qi X et al (2010). Deficit irrigation based on drought tolerance and root signalling in potatoes and tomatoes. *Agr Water Manage*, 98 (3): 403~413
- Kang SZ, Zhang JH (2004). Controlled alternate partial rootzone irrigation: its physiological consequences and impact on water use efficiency. *J Exp Bot*, 55 (407): 2437~2446
- Kirda C, Cetin M, Dasgan Y, Topcu S, Kaman H, Ekici B, Derici MR, Ozguven AI (2004). Yield response of greenhouse grown tomato to partial root drying and conventional deficit irrigation. *Agr Water Manage*, 69 (3): 191~201
- Korol RL, Kirschbaum MUF, Farquhar GD, Jeffreys M (1999). Effects of water status and soil fertility on the C-isotope signature in *Pinus radiata*. *Tree Physiol*, 19 (9): 551~562
- Kriedemann PE, Goodwin I (2003). Regulated Deficit Irrigation and Partial Rootzone Drying. Canberra: Land & Water Australia, 51~55
- Leib BG, Caspari HW, Redulla CA, Andrews PK, Jabro JJ (2006). Partial rootzone drying and deficit irrigation of 'Fuji' apples in a semi-arid climate. *Irrig Sci*, 24: 85~99
- Loveys BR, Stoll M, Davies WJ (2004). Physiological approaches to enhance water use efficiency in agriculture: exploiting plant signaling in novel irrigation practice. In: Bacon MA (ed). *Water Use Efficiency in Plant Biology*. Oxford: Blackwell Publishing, 113~142
- Martin B, Thorstenson YR (1988). Stable carbon isotope composition ($\delta^{13}\text{C}$), water use efficiency, and biomass productivity of *Lycopersicon esculentum*, *Lycopersicon pennellii*, and the F_1 hybrid. *Plant Physiol*, 88: 213~217
- Mills TM, Behboudian MH, Clothier BE (1996). Water relations, growth, and the composition of 'Braeburn' apple fruit under deficit irrigation. *J Am Soc Hortic Sci*, 121 (2): 286~291
- Neuhaus A, Turner DW, Colmer TD, Blight A (2009). Drying half of the root-zone from mid fruit growth to maturity in 'Hass' avocado (*Persea americana* Mill.) trees for one season reduced fruit production in two years. *Sci Hortic*, 120 (4): 437~442
- Poni S, Tagliavini M, Neri D, Toselli M (1992). Influence of root pruning and water stress on growth and physiological factors of potted apple, grape, peach and pear trees. *Sci Hortic*, 52 (3): 223~236
- Promper KW, Breen PJ (1997). Expansion and osmotic adjustment of strawberry fruit during water stress. *J Am Soc Hortic Sci*, 122 (2): 183~189
- Sadras VO (2009). Does partial root-zone drying improve irrigation water productivity in the field? A meta-analysis. *Irrig Sci*, 27 (3): 183~190
- Sauter A, Davis WJ, Hartung W (2001). The long-distance abscisic acid signal in the droughted plant: the fate of the hormone on its

- way from root to shoot. *J Exp Bot*, 52 (363): 1991~1997
- Schachtman DP, Goodger JQD (2008). Chemical root to shoot signaling under drought. *Trends Plant Sci*, 13 (6): 281~287
- Spreer W, Nagle M, Neidhart S, Carle R, Ongprasert S, Müller J (2007). Effect of regulated deficit irrigation and partial rootzone drying on the quality of mango fruits (*Mangifera indica* L. cv. 'Chok Anan'). *Agr Water Manage*, 88 (1-3): 173~180
- Stikic R, Popovic S, Srdic M, Savic D, Jovanovic Z, Prokic Lj, Zdravkovic J (2003). Partial root drying (PRD): A new technique for growing plants that saves water and improves the quality of fruit. *Bulg J Plant Physiol*, (Special Issue): 164~171
- Tang LS, Li Y, Zhang JH (2010). Biomass allocation and yield formation of cotton under partial rootzone irrigation in arid zone. *Plant Soil*, 337 (1-2): 413~423
- Wakrim R, Wahbi S, Tahj H, Aganchich B, Serraj R (2005). Comparative effects of partial root drying (PRD) and regulated deficit irrigation (RDI) on water relations and water use efficiency in common bean (*Phaseolus vulgaris* L.). *Agr Ecosyst Environ*, 106 (2-3): 275~287
- Wang YS, Liu FL, Andersen MN, Jensen CR (2010). Improved plant nitrogen nutrition contributes to higher water use efficiency in tomatoes under alternate partial root-zone irrigation. *Funct Plant Biol*, 37 (2): 175~182
- White JWC, Cook ER, Lawrence JR, Broecker WS (1985). The D/H ratios of sap in trees: Implications of water sources and tree ring D/H ratios. *Geochim Cosmochim Acta*, 49 (1): 237~246
- Yakushij H, Morinaga K, Nonami H (1998). Sugar accumulation and partitioning in Satsuma mandarin tree tissues and fruit in response to drought stress. *Am Soc Hortic Sci*, 123 (4): 719~726
- Zegbe JA, Serna-Perez A (2011). Partial rootzone drying maintains fruit quality of 'Golden Delicious' apples at harvest and postharvest. *Sci Hortic*, 127 (3): 455~459
- Zegbe JA, Behboudian MH, Liang A, Clothier BE (2003). Deficit irrigation and partial rootzone drying maintain fruit dry mass and enhance fruit quality in 'Petopride' processing tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.). *Sci Hortic*, 98 (4): 505~510
- Zhao FJ, Gao RF, Shen YB, Su XH, Zhang BY (2006). Foliar carbon isotope composition ($\delta^{13}\text{C}$) and water use efficiency of different populus deltoids clones under water stress. *Front For China*, 1 (1): 89~94