

文章编号:1007-2284(2009)08-0012-05

作物调亏灌溉理论与技术研究进展及发展趋势

郭松年¹, 丁 林², 王福霞¹

(1. 甘肃农业大学工学院, 兰州 730070; 2. 甘肃省水利科学研究院, 兰州 730000)

摘 要:就调亏灌溉的研究历史, 水分利用效率、作物品质与调亏灌溉的关系, 调亏灌溉的生物学基础, 作物对调亏灌溉的反应, 调亏灌溉效应的影响因素等方面进行了论述, 并对调亏灌溉进一步研究的问题与发展前景进行了展望。

关键词:调亏灌溉; 灌溉理论; 灌溉技术; 研究进展

中图分类号:TK730.2 **文献标识码:**A

Theoretical and Technology Research Advancement and Development Trend Prospect of Regulated Deficit Irrigation on Crops

GUO Song-nian¹, DING Lin², WANG Fu-xia¹

(1. College of Engineering, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China;

2. Gansu Provincial Water Conservancy Research Institute, Lanzhou 730000, China)

Abstract: The research history, relationship between water use efficiency, crops quality, biological basis, crops response, the affecting factors and regulated deficit irrigation are reviewed. At last the future research problems and development prospects of regulated deficit irrigation are discussed.

Key words: regulated deficit irrigation; irrigation technology; irrigation theory; research development

调控亏水度灌溉(简称调亏灌溉)是由澳大利亚持续灌溉农业研究所于上世纪 70 年代中期提出的一种灌溉理论。它是根据作物的遗传和生态特性,在作物生长的某一适当阶段,人为主动地对其施加一定程度的水分胁迫,以影响作物的生理和生化过程,对作物进行抗旱锻炼,提高作物的后期抗旱能力,即通过作物自身的变化实现高水分利用率。调亏灌溉还可以控制营养器官生长,提高根冠比,改变光合产物在营养器官和生殖器官之间的分配比例,以获得更高的经济产量,在产量增加的同时还能有效的改善作物的品质,提高了经济价值^[1-2]。

1 调亏灌溉的研究历史

上世纪 70 年代以来,国际上开始进行作物调亏灌溉的研究,其早期研究主要在果树上进行,首先在桃树、梨树等果园内^[2]。80 年代调亏灌溉研究的重心在于节水增产功效,并涉及到机理和果实品质问题。国外学者对桃树、梨树、苹果等在调亏灌溉下作物的生理生化反应、需水规律和调亏时期、调亏程度等作了大量研究,该阶段的研究主要集中在不同果树对调亏

的生理和生化反应及其适宜调亏时期和调亏程度上。80 年代后期调亏灌溉研究开始从现象向机理深入,以探讨调亏灌溉的节水增产机理^[3]。对调亏灌溉在改善作物品质方面的影响也进行了初步研究。90 年代至今的研究持续上述研究的同时,重心由产量的提高转向对品质的改善方面^[4],并开始向调亏灌溉下肥料的利用效率、咸水灌溉等方面扩展,研究的范围也越来越广。国内研究起步较晚,从 80 年代后期才有学者研究作物水分胁迫后复水出现的生长和光合作用的补偿效应,并开始在果树上进行研究。程福厚等在鸭梨果实生长的前中期,实施调亏灌溉,显著降低了果实的果形指数;控水处理期间,果实的含水量明显低于对照,但并未抑制果实的生长发育或影响果实大小;相反,对产量、单果重、果实品质及贮藏性有提高的趋势^[5]。曾德超等对果树的调亏灌溉进行了研究,但研究内容主要集中在灌水技术方面^[6]。孟兆江于 1996 - 1998 以夏玉米为材料进行了调亏灌溉试验研究^[7];张喜英等对冬小麦调亏灌溉制度田间试验进行了研究^[8];王密侠等进行了大田覆膜玉米的调亏试验^[9];胡笑涛等把调亏灌溉研究引伸到粮食作物玉米上,研究了调亏灌溉对玉米生理指标及水分利用效率的影响^[10]。90 年代后期,开始在大田作物上试验,但是研究成果尚不多见。目前的研究对不同的调亏阶段对作物生长和产量的影响以及具体的调亏指标研究还不够。国内其他的一些研究主要集中在

收稿日期:2009-03-13

作者简介:郭松年(1955-),副教授,硕士生导师,主要从事力学教学及节水灌溉方面的研究。

水量不足条件下的非充分灌溉理论问题,如作物缺水敏感指数的变化规律和有限水量的最优分配问题,对利用作物生理特性的主动调亏问题研究不够,特别是对大田作物的调亏灌溉研究近年才开始^[11]。

2 水分利用效率与调亏灌溉的关系

传统的丰水高产灌溉理论认为在整个生育期内对作物进行充分供水可使作物处于最佳的水分状态,以期获得最高产量。但按照经济原则,产量最高的需水量往往不是最经济的,只有当投入的水量所增加的产量边际效益大于增加需水量的边际费用时,这时的需水量才是经济的。很多研究表明,在充分灌溉中,有相当一部分水分被作物无效蒸腾。调亏灌溉则改变了作物的需水规律,使其在整个生育期内的需水量减少。郭相平发现玉米苗期调亏,复水后其需水量在拔节期、抽雄期均低于对照,只在灌浆期高于对照,但总需水量仍较非调亏处理有所下降^[12]。因此适当降低供水量可以提高水分利用率。事实上作物产量最高时消耗的水量并不是其水分利用率最高时所消耗的水量。邓西平在对冬小麦的研究中得到了耗水量与产量、耗水量与水分利用率之间的回归模型及相关图,得出产量和水分利用率是先随着耗水量的增加而增大,当达到一定值时,水分利用率先出现最高值,随后随着耗水量的继续增大,水分利用率反而开始下降,而产量随耗水量增大的最大值出现的时段比水分利用率的偏后,而且极值出现后,随耗水量的增大产量下降的幅度明显小于水分利用率的下降幅度^[13]。梁森也发现水稻旱作在正常年份要比水作栽培耗水量减少 50%~60%,节省灌溉水 40%~50%,灌溉水生产效率提高 1.5~2.5 倍^[14]。这说明耗水量的适度减小意味着水分利用率的提高,而如何能够使产量也不显著降低正是调亏灌溉研究的重点。作物在不同的土壤水分条件下,水分利用率相差悬殊。光合速率对土壤水分的反应有一阈值,充分灌溉的土壤水分往往超过了光合速率的最高点,光合速率反而有所下降,而蒸腾速率是随土壤水分的增加而增大,且速度快于光合速率,导致水分利用率的下降。陈玉民研究土壤水分与光合速率、蒸腾速率关系时发现,水分利用率的极大值出现在两条曲线的结合点上,而高于或低于该点都将会导致水分利用率的下降^[15-16]。

3 作物品质与调亏灌溉的关系

进入 20 世纪 90 年代,调亏灌溉的研究重点由研究产量的提高转向其品质的改善,测试指标也由原来的定性描述转为量化的调亏指标,以期科学合理地运用调亏灌溉技术体系。阿吉艾克拜尔就调亏灌溉对烟草的研究表明适当的水肥调控可改善烟叶品质^[16]。Yesim Erdem 等对西瓜进行滴灌调亏试验发现,水分亏缺可以使果实具有较高的可溶固形物浓度,含糖量增加^[17]。王锋等对荒漠绿洲区调亏灌溉下西瓜水分利用效率、产量与品质进行了研究,结果表明各亏水处理均能不同程度地提高果实的 Vc 含量,亏水处理在总体上提高了果实的可溶性固形物浓度,使西瓜更甜,改善了西瓜的口感^[18]。刘明池等(2005)、郭海涛等(2007)对番茄调亏灌溉研究结果表明,水分亏缺可明显改善果实品质,果实可溶性总糖、Vc 和有机酸含

量明显提高^[19-20]。董国锋等研究发现轻度水分亏缺可提高苜蓿粗蛋白含量^[21]。程福厚等研究发现适当水分胁迫可使鸭梨果实的可溶性固形物含量、还原糖含量和全 K 含量显著高于对照^[5]。常莉飞等研究表明温室黄瓜初花期土壤水分含量为 60%~90%田间持水量,结果期土壤水分含量保持 65%~90%田间持水量对于提高果实品质最为理想,该处理果实的还原糖、可溶性总糖、维生素 C、可溶性蛋白质的含量分别比对照高 39.94%、31.34%、3.14%、5.47%^[22]。

4 调亏灌溉的生物学基础

4.1 调亏灌溉的节水机理

调亏灌溉理论认为根系对于水分利用率的提高起到决定作用。根冠功能平衡学说认为根和冠既相互依赖又相互竞争^[24]。当环境条件一定时,根与冠的比例有一个相当稳定的数值,这是由作物的遗传因素所决定的。当环境条件发生变化时,根和冠处于竞争地位,作物能够自动把所获得的营养分配给最能缓解资源胁迫的器官,使作物受到的伤害程度最小,以避免物种的灭绝。当根系处于水分亏缺状况时,作物会改变光合产物在根与冠之间的分配比例,根系将得到更多的同化产物,生长相对有利,而冠的生长则受到抑制,使叶面积减少,意味着即使在同样蒸腾速率下,作物的蒸腾耗水量也较少,进而引起需水量的下降^[24]。调亏灌溉就是通过对于土壤水分的管理来控制植株根系的生长,从而控制地上部分的营养生长及其水势,而叶水势可以调节气孔开度,气孔开度则对光合和植株的水分利用有其重要作用^[25-26],即水分亏缺通过根系间接控制了作物的蒸腾作用。因而 Blackman 认为在植株受旱时,可能由根系产生一种物质并输送到叶片中以控制气孔开度,使光合和蒸腾等生理过程发生变化,影响其水分利用及产量^[27]。近年来研究发现,脱落酸 ABA 是控制气孔开度的主要传输信号,当调亏时期土壤逐渐干燥时,木质部携带的 ABA 信号向叶片输送,叶片 ABA 浓度增加,使气孔开度降低、阻力增大,蒸腾速率下降,作物的生理耗水减少,叶片水分利用效率提高^[28-29,24]。另外调亏灌溉还可减少作物的棵间蒸发。由于土壤水分含量较低,表层土壤蒸发和根系吸水使表层的含水量通常都在毛管断裂含水量以下,因此下层土壤水分仅能以水汽扩散方式通过上层的干燥土壤向大气散失,水汽通量很少,减少了水分的浪费^[1]。

4.2 调亏灌溉的增产机理

20 世纪 70 年代中期,Chalmers 对果树调亏的研究结果表明:果树的营养生长受到水分亏缺的影响,但果实的生长所受影响不大,从而为调亏灌溉可以获得高产提供了一定的理论依据^[30-31]。Rowson、Turner 等也发现经过控水处理的向日葵与正常相比能多产籽粒^[32]。Turner 认为,水分亏缺并不总是降低产量,早期适度的水分亏缺在某些作物上有利于增产^[33]。还有些研究也得到了同样的结论:同一植株不同的组织和器官对于水分亏缺的敏感性不同^[30],细胞膨大即生长对于水分亏缺最为敏感,而光合产物和有机物由叶片向果实的运输过程敏感性次之^[25]。Domingo R 等也认为在多数时期内冠层生长与果实生长之间存在明显的分离^[34]。当出现水分胁迫而使营养

生长受到抑制时,果实可以继续积累有机物,降低其在调亏期间所受到的影响,在调亏结束后的复水期,调亏期间积累的有机物可被用于细胞壁的合成及其他与果实生长相关的过程,弥补由于光合产物减少带来的损失。但胁迫过重或历时过长则会使复水后的细胞壁因失去弹性而无法扩张,导致产量下降^[28]。调亏灌溉可使产量的降低不显著,而它的增产效果是通过与密植相结合,调整作物的群体结构,增加灌溉面积来实现的^[25]。试验研究表明,适时适度的调亏灌溉可以不减少或增加产量^[7,28]。

5 作物对调亏灌溉的反应

山仑认为作物在经历一定的水分亏缺条件后,给予改善所呈现出的生产量快速恢复的现象称为补偿效应,如产量显著提高则称为超补偿效应^[35]。Acevedo 认为作物在经受适度的干旱产生补偿效应对环境变化的一种适应^[36]。在适度亏水条件下,作物的生理机制发生了改变,如根冠比增大,促进了后期根系吸收水分和养分的能力;渗透调节、弹性调节能力的增强,可维持一定膨压,使叶片光合作用正常进行^[37];同化产物的代谢中心改变使生殖器官分配到了更多的同化产物;脱落酸(ABA)和细胞分裂素(CTK)等内源激素可有效控制细胞的渗透调节,气孔开闭,维持光合作用,产生补偿效应^[38]。

5.1 作物的光合速率及蒸腾速率变化

Chalmers 等人首先对调亏期间光合作用对果实的生长及光合产物的分配进行了研究,结果表明:尽管水分亏缺会直接威胁到果树的长势使之产生萎蔫现象,但光合作用和有机物由叶片向果实的运输过程所受影响甚小^[30-31]。通过对生长、生理指标及产量的测定,都可发现作物具有明显的补偿生长效应。如冬小麦调亏复水后作物叶面积、主茎高度、光合蒸腾速率等都迅速恢复,达到甚至超过对照^[8]。郭相等在玉米的研究中发现,玉米调亏复水后虽然恢复较快,仍不及对照,但补偿效应往往持续很长时间,因此最终玉米的生长可达到对照的水平^[12]。James 研究发现产量与蒸腾量之间存在正的线性关系^[39],Brown 和 Tanner 的实验结果表明,在水分胁迫下苜蓿的蒸腾速率明显降低^[40]。

5.2 作物水势的变化

Kramer 认为叶水势是植物水分状况的最佳度量,当植物叶水势和膨压降低到足以干扰正常代谢功能时,即发生水分胁迫^[41]。因此,叶水势作为作物水分亏缺程度的诊断手段,遂较广泛地用于指导灌溉^[42]。在用叶水势作为作物水分亏缺程度的判定指标时,必须区分是土壤水分变化还是外界条件变化引起叶水势的变化。由于叶片水势反映的是作物水分亏缺程度,因此,应该选择与作物蒸腾强度变化规律相一致的叶片水势^[43]。

5.3 根系对调亏灌溉的反应

很多研究认为前期(尤其是苗期)进行调亏灌溉可使作物得到干旱锻炼,增大根冠比和根活力,促进后期籽粒形成和降低根系衰老速度^[44],而魏虹等在对春小麦的研究中发现,整个生育期持续受旱会使根总量增大,且后期衰亡比例高,地上部分得到的光合产物有限,因而减产严重。除三叶期复水无上述

影响外,其他时期复水均影响补偿效应。因此得出结论,根系并不是越大越好,作物根系在时间和空间上的合理分布对生长具有更重要的意义,主张应避免苗期过分干旱^[45]。

5.4 茎与叶对调亏灌溉的反应

调亏灌溉可有效减少光合产物向茎、叶等营养器官的分配比例,降低无效水分的消耗,并促进生殖器官的生长,汤莹对春小麦的研究证明了这一点。调亏复水后的补偿效应增大了光合产物向籽粒中的分配,而营养生长相对受到了抑制,使生物产量下降,经济产量得到提高^[46]。LiS-H 等认为果树承受一定程度的水分胁迫,可抑制果树的过旺营养生长,水分胁迫解除后反而能促进果实生长,从而能在采收时获得更大体积的果实^[47-48]。

6 调亏灌溉效应的影响因素

6.1 调亏灌溉的时期

在适当的阶段对作物进行水分亏缺处理是调亏灌溉的关键。作物早期耗水量小,进行调亏可使作物提前经受干旱锻炼,促使根系下扎,并对营养生长进行调控,为最终获得较高的经济产量打下基础^[49]。冬小麦返青期亏水对产量无显著影响,其余时期则有不同程度的下降^[8]。玉米苗期供水量的适当减小有利于后期有机物质的合成,拔节期控水可优化同化产物分配结构,提高经济系数^[50]。但调亏时间不宜过长,应以适度为原则,还应避免调亏过早,形成弱苗,如玉米从五叶期开始较为合适^[44]。控水时期选择不当对产量的影响很大,如 Lalonde S 等认为小麦花粉粒母细胞在减数分裂期出现水分胁迫会导致雄性不育,并最终降低谷物的产量^[51]。

6.2 调亏灌溉的程度

有效的调亏灌溉在适宜的阶段还需配合适当的亏水程度,才能真正符合作物需水生理特性,充分发挥调亏灌溉的作用,实现高产、节水、优质的目标。不同时期作物具有亏水程度的阈值不同,不超过这一阈值,作物叶水势、蒸腾及光合,产量所受到的影响不大,但调亏程度掌握不好将导致严重减产^[10]。Razi H 等也认为过重的水分胁迫会降低在正常灌溉下籽粒产量与油分含量之间的相关性^[52]。梁森等认为在水稻旱作中采用轻度调亏比较合适,产量虽略低于水作,但可使耗水量减少,提高米质^[14]。玉米拔节期温度高,耗水量大,适度而缓慢的水分亏缺可抑制地上部分旺长,产量下降不明显,如进行合理密植,可增加总产^[50]。孟兆江等在对夏玉米不同程度的调亏研究中发现适时适度的调亏灌溉可以增加产量^[7]。孟兆江等以小麦为试验材料进行了调亏灌溉试验研究,结果表明,适时适度的水分调亏显著抑制蒸腾速率,而光合速率下降不明显,复水后光合速率又具有超补偿效应,光合产物具有超补偿积累且有利于向籽粒运转与分配^[52]。高延军等认为轻度水分亏缺有利于棉花增产,与充分供水相比苗期与吐絮期干旱处理均可提高棉株产量和水分利用效率^[54]。

6.3 灌溉方式对调亏灌溉的影响

在北方的旱作地区,由于受条件所限,只能实行“雨养农业”,使产量始终处于较低水平。有些地区虽具有灌溉设施,但灌溉方式多以漫灌、沟灌为主,造成水资源大量浪费。国内外

农业科技人员经过不懈努力,创造出许多先进的灌溉方式,如滴灌、渗灌、喷灌、微灌等,并且在田间试验中取得了很好的经济效益^[49,55]。以色列是一个极度缺水的国家,由于创造并广泛应用了滴灌技术,已使灌溉水利用系数达到0.9,以同样的耗水量使农业产值增长数倍^[56]。

6.4 施肥对调亏灌溉的影响

施肥对于农业生产影响很大,合理施用并结合调亏灌溉可显著提高作物产量和水分利用效率,但如应用不当则会适得其反。土壤干旱情况下,氮、磷营养虽然皆增强了作物的渗透调节能力,但由于氮、磷营养对作物地上地下部生长的不同作用而对作物的水分状况产生了完全相反的影响。氮素营养可增强作物对干旱的敏感性,使其水势和相对含水量大幅度下降,蒸腾失水减少,自由水含量增加而束缚水含量减少,并使膜稳定性降低;而磷素营养则明显改善了植株的水分状况,增大了气孔导度,降低了其对干旱的敏感性,增加了束缚水含量,并使膜稳定性增强^[57]。调亏灌溉能够提高作物的水分利用率已被广泛认同,但需要指出的是,推行调亏灌溉不是没有风险,否则就会变适度缺水为严重缺水。为此,必须改变目前的粗放灌溉方式,逐步向精确灌溉的方向发展^[35]。调亏灌溉的效应与多种因素有关,包括气候因子、作物因素及土壤条件等,因此还需在不同地域,不同气候条件下进行研究。目前的研究多集中于果树、棉花、玉米、小麦、水稻上,还应探讨其对多种作物的影响。调亏灌溉还应与其它高产栽培技术综合配套使用,以期充分发掘作物的增产潜力。另外,作物在水分亏缺时的响应协调及补偿效应机制,如何在分子水平上对调亏灌溉进行指导应做进一步研究^[58]。

7 调亏灌溉需要进一步研究的问题与前景

水量不足是我国北方干旱半干旱地区农业生态系统良性运转和农作物产量提高的主要的限制因素。研究缺水条件下作物调亏灌溉机理与指标,对于科学合理的利用水资源,发展补充灌溉,抗御干旱,提高产量,改善生态环境,具有重要的意义。通过对农作物所做的调亏灌溉试验研究结果表明,作物调亏灌溉技术具有广阔的应用前景。由于大田调亏灌溉技术属于较新的节水灌溉技术,目前国内对其研究还不成熟,还缺少系统性的研究,以下问题的进一步研究和解决将会推动调亏灌溉技术的发展。

(1)从总体上和相互作用上综合研究作物不同时期和不同程度的调亏对光合产物形成与分配、向经济产量的转化、水分散失影响的动态过程;在作物生理机制的基础上研究不同水分供给和不同亏水条件下作物群体光合产物的最优分配策略。

(2)根据作物水分散失和光合作用及其光合产物分配和转化的定量关系中,进一步研究以减少作物水分散失和提高光合产物向籽粒(或果实)转化数量为目标,寻求考虑土壤水分胁迫状况、土壤水分运动过程(吸湿或脱湿)、大气蒸发条件、作物生理特性、根系分布状况的综合调亏灌溉指标。

(3)调亏灌溉条件下作物耕作栽培方式和水肥耦合的最佳模式研究,如调亏灌溉条件下作物的播种密度和果树的矮化密植问题,最佳施肥方式等。对咸水的调亏灌溉也需要进行进一

步研究。

(4)在不同的灌溉方式下,作物的需水规律不同,以前的研究主要是针对地面灌溉条件进行的,随着滴灌、膜下滴灌、喷灌等大面积推广应用,需要研究这些灌水方式下的调亏灌溉模式。

参考文献:

- [1] 郭相平,康绍忠. 调亏灌溉 - 节水灌溉的新思路[J]. 西北水资源与水工程,1998,9(4):22-25.
- [2] 史文娟,胡笑涛,康绍忠. 干旱缺水条件下作物调亏灌溉技术状况与展望[J]. 干旱地区农业研究,1998,16(2):84-88.
- [3] Mitchell PD, Jerie PH, Chalmers DJ. The effects of regulated water deficits on pear tree growth, flower, fruit growth and yield [J]. J Amer Soc Hort Sci,1984,109:604-606.
- [4] Peter D, Mitchell, Ian Goodwin. Irrigation of vines and fruit trees [M]. Press:AGMEDIA,1996.
- [5] 程福厚,霍朝忠,张纪英,等. 调亏灌溉对鸭梨果实的生长、产量及品质的影响[J]. 干旱地区农业研究,2000,18(4):72-76.
- [6] 曾德超,彼得·杰里. 果树调亏灌溉密植节水增产结束的研究与开发[M]. 北京:北京农业大学出版社,1994.
- [7] 孟兆江,刘安能,庞鸿宾,等. 夏玉米调亏灌溉的生理机制与指标研究[J]. 农业工程学报,1998,(4):88-92.
- [8] 张喜英,由懋正,王新元. 不同时期水分调亏及不同调亏程度对冬小麦产量的影响[J]. 华北农学报,1999,14(2):1-5.
- [9] 王密侠,康绍忠,蔡焕杰,等. 调亏对玉米生态特性及产量的影响[J]. 西北农业大学学报,2000,28(1):31-36.
- [10] 胡笑涛,梁宗锁,康绍忠. 模拟调亏灌溉对玉米根系生长及水分利用效率的影响[J]. 灌溉排水,1998,17(2):11-15.
- [11] 康绍忠,张建华. 控制性交替灌溉 - 一种新的农田节水调控思路[J]. 干旱地区农业研究,1997,15(1):1-6.
- [12] 郭相平,康绍忠. 玉米调亏灌溉的后效性[J]. 农业工程学报,2000,16(4):58-60.
- [13] 邓西平. 渭北地区冬小麦的有限灌溉与水分利用研究[J]. 水土保持研究,1999,6(1):41-46.
- [14] 梁森,韩莉,李慧娴,等. 水稻旱作栽培方式及调亏灌溉指标试验研究[J]. 干旱地区农业研究,2002,20(2):13-19.
- [15] 陈玉民,孙景生,肖俊夫. 节水灌溉的土壤水分控制标准问题研究[J]. 灌溉排水,1997,16(1):24-28.
- [16] Annandale J. G, Campbell G. S, Olivier F. C, et al. Predicting crop water uptake under full and deficit irrigation: An example using pea (*Pisum sativum*L. cv. Puget) [J]. Irrig. Sci, 2000, 19: 65-72.
- [17] 阿吉艾克拜尔. 调亏灌溉对烟草生长发育及产量品质的影响研究[D]. 南京:河海大学硕士学位论文,2006,57-58.
- [18] Yesim Erdem, A. Nedim Yuksel. Yield response of water melon to irrigation shortage [J]. Scientia Horticulturae,2003,98:365-383.
- [19] 王锋,康绍忠,王振昌. 甘肃民勤荒漠绿洲区调亏灌溉对西瓜水分利用效率、产量与品质的影响[J]. 干旱地区农业研究,2007,25(4):123-128.
- [20] 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的影响[J]. 农业工程学报,2005,(s2):92-95.
- [21] 郭海涛,邹志荣. 调亏灌溉对番茄生理指标、产量品质及水分生产效率的影响[J]. 干旱地区农业研究,2007,(3):133-137.
- [22] 董国锋,成自勇. 调亏灌溉对苜蓿水分利用效率和品质的影响

- [J]. 农业工程学报, 2006, (5): 201 - 103.
- [23] 常莉飞, 邹志荣. 调亏灌溉对温室黄瓜生长发育、产量及品质的影响[J]. 安徽农业科学, 2007, 23: 7 142 - 7 144.
- [24] Anne-Maree, Boland, et al. The effect of regulated deficit irrigation on tree water use and growth of peach[J]. Journal of Horticultural Science, 1993, 68(2): 261 - 264.
- [25] Chalmers D J, Mitchell P D, Jerie P H. The physiology of growth control of peach and pear trees using reduced irrigation[J]. Acta Horticulture, 1984, 146: 143 - 148.
- [26] Fábio M. D, Rodolfo A. L, Emerson A. S, et al. Effects of soil water deficit and nitrogen nutrition on water relations and photosynthesis of pot-grown Coffee canephora Pierre[J]. Trees, 2002, 16: 555 - 558.
- [27] Blackman P G, Davies W J. Root to shoot communication in maize plants of the effects of soil drying[J]. J Exp Bot, 1985, 36: 39 - 48.
- [28] Chalmers D J, Burge P H, Mitchell P D. The mechanism of regulation of 'Bartlett' pear fruit and vegetative growth by irrigation withholding and regulated deficit irrigation[J]. Journal of the American Society for Horticultural Science, 1986, 11(6): 944 - 947.
- [29] Bastiaanssen W. G, Bandara K. M. Evaporative depletion assessments for irrigated watersheds in Sri Lanka[J]. Irrig Sci, 2001, 21: 1 - 15.
- [30] Chalmers D J, B van den Ende. Productivity of peach trees factors affecting dry - weight distribution during tree growth[J]. Ann Bot, 1975, 39: 423 - 432.
- [31] Chalmers D J, Wilson I B. Productivity of peach trees: tree growth and water stress in relation to fruit growth and assimilate demand[J]. Ann Bot, 1978, 42: 285 - 294.
- [32] Turner NC, Begg L E. Plant water relationship and adaptation to stress[J]. Plant and Soil, 1981, 58: 97 - 131.
- [33] Turner NC. Plant water relations and irrigation management[J]. Agri Water Manage, 1990, 17: 59 - 73.
- [34] Domingo R, Ruiz-Sánchez, Sánchez-Blanco M J, et al. Water relations, growth and yield of Fine lemon trees under regulated deficit irrigation[J]. Irrig Sci, 1996, 16: 115 - 123.
- [35] 山 仓. 旱地农业技术发展趋向[J]. 中国农业科学, 2002, 35(7): 848 - 855.
- [36] Acevedo E, Hsiao T C, Henderson D W. Immediate and subsequent growth responses of maize leaves to changes in water stress[J]. Plant Physiol, 1971, 48: 631 - 636.
- [37] Jonse M M, Turner N C. Osmotic adjustment in leaves of sorghum in response to water deficits[J]. Plant Physiol, 1978, 61: 122.
- [38] 李跃强, 盛承发. 植物超补偿效应[J]. 植物生理学通讯, 1996, 32(6): 457 - 464.
- [39] Jame L W. Daily and seasonal evapotranspiration and yield of irrigated alfalfa in southern idaho[J]. Agronomy Journal, 1988, 80: 622 - 669.
- [40] Brown, P. W, C. B. Tanner. Alfalfa stem and leaf growth during water stress[J]. Agronomy Journal, 1983, 75: 779 - 805.
- [41] Kramer P J. Water Relations of Plants[M]. New York, Academic Press. 1983, 5.
- [42] Grimes DW, Yamada H. Relation of cotton growth and yield to minimum leaf water potential[J]. Crop Sci, 1982, 22(1): 134.
- [43] 张喜英. 叶水势反映冬小麦和夏玉米水分亏缺程度的试验[J]. 植物生理学通讯, 1997, 33(4): 249 - 253.
- [44] 郭相平, 康绍忠, 索丽生. 苗期调亏处理对玉米根系生长影响的试验研究[J]. 灌溉排水, 2001, 20(1): 25 - 27.
- [45] 魏 虹, 林 魁, 李凤民, 等. 有限灌溉对半干旱区春小麦根系发育的影响[J]. 植物生态学报, 2000, 24(1): 106 - 110.
- [46] 汤 莹, 郭永杰, 蔡得荣. 调亏灌溉对河西绿洲春小麦生长发育和产量的影响[J]. 甘肃农业科技, 2002, (6): 22 - 25.
- [47] Li S-H, Huguet J-G, Schoch P G, et al. Response of peach tree growth and cropping to soil water deficit at various phenological stages of fruit development[J]. J Hortic Sci, 1989, 64: 541 - 552.
- [48] Bruce D. L, Kenneth A. S, Stephen M. S, William H. O. Deficit irrigation strategies using midday stem water potential in prune[J]. Irrigation Sci, 2001, 20: 47 - 54.
- [49] 蔡焕杰, 邵光成, 张振华. 不同水分处理对膜下滴灌棉花生理指标及产量的影响[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2002, 30(4): 29 - 32.
- [50] 康绍忠, 史文娟, 胡笑涛, 等. 调亏灌溉对于玉米生理指标及水分利用效率的影响[J]. 农业工程学报, 1998, (4): 82 - 87.
- [51] Lalonde S, Beebe D U, Saini H S. Early signs of disruption of wheat anther development associated with the induction of male sterility by meiotic - stage water deficit[J]. Sex Plant Reprod, 1997, 10: 40 - 48.
- [52] Razi H, Assad M T. Comparison of selection criteria in normal and limited irrigation in sunflower[J]. Kluwer Academic Publishers, 1999, 105: 83 - 90.
- [53] 孟兆江, 贾大林, 刘安能. 调亏灌溉对冬小麦生理机制及水分利用效率的影响[J]. 农业工程学报, 2003, 19(4): 66 - 69.
- [54] 高延军, 裴 冬, 张喜英, 等. 棉花调亏灌溉效应研究[J]. 中国生态农业学报, 2004, 12(1): 138 - 139.
- [55] Mateos L. Assessing whole - field uniformity of stationary sprinkler irrigation systems[J]. Irrig Sci, 1998, 18: 73 - 81.
- [56] Stanhill G. Irrigation in Israel: past achievements, present challenges and future possibilities[C] // Water Use Efficiency in Agriculture. Rehovot, Israel Priel Publishers, 1992: 63 - 77.
- [57] 张岁岐, 山 仓, 薛青武. 氮磷营养对小麦水分关系的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2000, 6(2): 147 - 151.
- [58] 蔡大鑫. 调亏灌溉对大豆生理、生态特征及产量品质影响的研究[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2004: 1 - 7.

(上接第 11 页)

- [5] 张志澍, 郑耀泉, 田春元, 等. 灌水器工作水头对微灌系统灌水均匀度影响的研究[J]. 内蒙古水利, 1996, (1): 28 - 31.
- [6] 郑耀泉, 陈渠昌. 微灌均匀度参数之间的关系及其应用[J]. 灌溉排水, 1994, (2): 7 - 10.
- [7] 张鸿雁, 王昊利, 王元. 基于 MATLAB 的滴灌毛管计算机分析[J]. 西安建筑科技大学学报, 2004, (3): 280 - 284.
- [8] 水利部农村水利司, 中国灌溉排水发展中心. 节水灌溉工程实用手册[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2005: 313 - 334.
- [9] 吕宏兴, 水力学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2002: 148 - 151.