调亏灌溉模式下节水增产效应研究综述

付　凌[1],李　超[2]

(1.河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室,江苏 南京　210098;2.云南农业大学,云南 昆明　650201)

摘要:介绍调亏灌溉的节水机制和增产机理,对作物调亏灌溉节水增产效果进行概述,提出了调亏灌溉中需要进一步研究的问题.

关键词:节水灌溉技术;调亏灌溉;节水增产机理;综述

中图分类号:S275　　文献标识码:A　　文章编号:1006-7647(2005)S1-0177-04

我国水资源短缺,人均水资源占有量仅为世界人均占有量的 1/4,灌溉水的利用率约 40%左右,仅为发达国家的一半.据专家预测,就目前的农业用水水平,到 2010 年农业用水短缺约 300 亿 m^3,将严重制约农业和国民经济的发展.因此,寻求缓解我国水资源短缺的途径迫在眉睫.而调亏灌溉是对传统灌溉农业的创新,具有节水、增产、高效、优质等优点,对提高我国农业节水科技水平有着重要的作用.

1　调亏灌溉的概念及节水增产机理

1.1　调亏灌溉的基本概念

人们在传统的'丰水灌溉'基础上建立了非充分灌溉理论,放弃单产最高,追求总产或净效益最大,研究者在大量的实验中发现在通常情况下,一定程度的水分胁迫对作物生长不会有太大的影响,只有当水分亏缺到一定程度时才会对作物产生不良影响.

调亏灌溉(regulated deficit irrigation,简称 RDI)是澳大利亚维多利亚州持续农业灌溉研究所的科学家在 20 世纪 70 年代中期研究提高密植果园生产率的过程中首次提出并得到实际验证的一种节水灌溉管理技术[1].调亏灌溉的理论基础不同于充分灌溉与有限灌溉,它与非充分灌溉也不同.非充分灌溉的缺水是被动的,为追求有限水量在作物的各生长阶段最优分配,以获得最大的经济效益.而调亏灌溉则是使作物经历有益的亏水锻炼,是主动缺水,它是根据作物的遗传和生态特性,即从作物生理角度出发,在作物的某些生理生化通道受到遗传特性或生长激素影响时,使其生长发育的某些时期受到一定程度的水分胁迫,通过影响光合产物向不同组织器官的分配,从而提高最终产量而舍弃营养器官的生长量和有机合成物质的总量,达到节水、增产、优质的目的.

目前,调亏灌溉的基本趋势是在研究内容进一步深入的同时,使用各种配套的先进仪器,以建立全自动化的测试系统为导向,开发整套的作物栽培管理体系,实现科学用水、科学管水,使调亏灌溉在作物生理机制基础上达到最优分配.

1.2　调亏灌溉的节水增产机理

根冠功能平衡学说[2]认为,根和冠既相互依赖又相互竞争.当环境条件一定时,根与冠的比例有一个相当稳定的数值.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.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,蒸腾耗水量也较少,进而引起需水量的下降.调亏灌溉通过对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[3].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[4].当调亏时期土壤逐渐干燥时,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[5].由于土壤水分含量较低,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,减少了水分的浪费[6].

早期适度的水分亏缺在某些作物上有利于增

作者简介:付凌(1980—),女,河南新乡人,硕士研究生,从事节水灌溉理论与技术研究.

产[7].同一植株不同的组织和器官对于水分亏缺的敏感性并不相同,细胞膨大对于水分亏缺最为敏感,而光合作用和有机物由叶片向籽粒的运输过程敏感性次之[8].当出现水分胁迫而使营养生长受到抑制时,作物籽粒继续积累有机物,使其在调亏期的生长不明显降低.在调亏结束后的复水期,调亏期间累积的代谢产物,在水分供应量恢复后有补偿生长效应,用于弥补由于光合产物减少带来的损失,以至不会因适度胁迫而引起产量下降.但胁迫程度过大或历时过长会使复水无法起到补偿效应,导致产量下降[5].这在分子水平上解释了调亏灌溉的增产机理,为研究调亏灌溉技术提供了理论依据.

2 调亏灌溉的研究动态

作物调亏灌溉已成为目前国际上作物灌溉及相关领域研究的一个热点.20 世纪 80 年代后期调亏灌溉研究开始从现象向机理深入,探讨调亏灌溉的节水增产机理,并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 年代研究的重心由产量的提高转向对品质的改善方面,研究范围也越来越广.

我国从 20 世纪 80 年代后期开始了调亏灌溉的研究工作,首先是研究果树的调亏灌溉,分别对不同调亏条件下果树长势、土壤养分淋溶和盐分淋洗等方面进行了研究[9].其后在陕西渭北等地开展了大田作物的调亏灌溉试验,分析了不同亏水处理对玉米光合速率、气孔导度、蒸腾速率以及根冠比、产量、耗水量、水分利用率的影响,揭示了调亏灌溉的节水机理[10,11];研究了玉米、棉花在调亏条件下生理指标、产量、水分利用效率等;进行了不同调亏时期、不同调亏水平对冬小麦的产量影响研究;对夏玉米调亏条件下生理机制及其适宜指标也进行了研究[12-15].这些研究所得出的基本结论是一致的,即调亏灌溉不仅适宜于果树,也适宜于大田作物,与充分灌溉相比,调亏灌溉具有一定的节水增产功效.

3 调亏灌溉的补偿生长及节水增产效果

3.1 复水后的补偿生长效应

水分胁迫对作物生理性状和需水规律影响的研究成果已经很多,但多集中于水分胁迫阶段,而对其后效性研究较少[9].一些研究认为无论是玉米、棉花还是小麦,实施调亏灌溉都是可行的,调亏灌溉在大田作物提高水分利用效率方面具有优越性.适时适度的水分调亏显著抑制蒸腾速率,复水后光合速率、蒸腾速率都有恢复而且光合速率又具有超补偿作用.

玉米苗期调亏处理具有较长的后效性,能在生长后期保持较高的叶片光合速率、蒸腾速率和根系活力.苗期调亏处理能够减少苗期、拔节期和抽雄期需水量,而灌浆期需水量显著增加,但总需水量减少[10].复水后玉米根系和地上部分的生长速度加快,根系活力和光合速率提高,随调亏程度加大其补偿作用也越明显[11],这为作物后期的恢复生长提供了有利条件.中国气象局固城农业气象试验基地的夏玉米苗期水分胁迫拔节期复水试验结果表明[12],复水增加了夏玉米叶片气孔导度和光合速率,提高叶片水平上的水分利用效率,使苗期受旱的夏玉米株高、叶面积、地上(下)部分干物重和根系生长发育都恢复到或接近充分供水的植株生长水平.

在棉花水分调亏期间,随亏水度加重,光合速率和蒸腾速率均降低,且蒸腾降低更明显.复水后光合速率恢复很快,具有超补偿效应,复水后 3 d 接近或超过对照,蒸腾恢复得慢些[13].不同程度的亏水处理都使植株高度明显降低,而茎秆直径随亏水度的增加而减小,但调亏结束后的情况显示,茎秆横截面积发生了明显的补偿生长现象,而且与对照相比,茎秆的补偿生长比例超出了植株高度的补偿生长比例,说明适宜的调亏处理可使棉花植株的长势呈现矮粗壮的特点[14].各个生育阶段的 RDI 对棉花产量具有不同的影响,苗期进行水分调亏,可控制枝叶旺长,复水后生长补偿效应显著,补偿时间充裕,有利于增加籽棉产量;蕾期适度的水分调亏可控制营养生长,促进生殖生长,有利于为丰产打下基础;花铃期为营养生长和生殖生长并进的旺盛生长阶段,对水分亏缺非常敏感,水分亏缺造成严重减产;吐絮期生长变慢,适度的水分亏缺不会影响产量,反而有促进棉铃顺畅吐絮,并提高棉花纤维品质;但过度亏水会降低铃重和纤维质量[15].

3.2 节水增产效果

莱阳试验点的试验研究结果表明,小麦产量为 6 000 ~ 7 500 kg/hm^2 的水平,耗水量下限较常规下降了 1 500 ~ 3 000 mm/hm^2,表明水分利用率的提高起到了增产作用[16].邓西平[17]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,其研究表明,产量和水分利用率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.这说明耗水量的适度减小意味着水分利用率的提高.

苗期干旱胁迫使夏玉米植株经过干旱"锻炼",复水后,叶片水分状况得到改善,而叶片又可以在较

长时间内保持较强的渗透调节能力，这不仅有利于叶片的延伸生长，还使叶片在气孔运动、光合、蒸腾等生理代谢方面表现出有利于植株生长的优势[18]. 在对夏玉米的调亏研究中发现，其经济产量的变化趋势是：产量最高的处理比对照提高 54.19%，并节水 14.75%；另有 3 个处理分别比对照增产 39.68%，17.42%和 11.94%，且节水 6.71% ~ 16.07%[19]. 对玉米生理指标的测定结果表明，调亏使叶水势下降，气孔开度减小，蒸腾量降低，从而达到节水的目的；适度的水分亏缺可以增加根系活力，有利于根系生长，还可以提高脯氨酸含量，增强作物渗透调节能力，最大程度地减少作物所受的伤害；适当的水分胁迫可以提高玉米抵御干旱的能力，增加可溶性糖类物质含量，改善作物的品质[20]. 复水后的夏玉米植株生长发育、叶面积、叶片气孔导度、光合速率和叶片水平上的水分利用效率在短时间内就可恢复到充分供水水平，体现了显著的补偿效应[21]. 调亏灌溉使作物产量和需水量都降低，但需水量下降幅度更大，作物总需水量减少，从而在不降低产量的情况下提高了水分生产效率[22].

棉花苗期是根系的形成期，根、冠的生长是密切相关的. 当根系的生长因苗期土壤水分亏缺而受阻时，冠部的生长则受到更大的限制. 这时，苗期未用的碳水化合物就可用于后期果实的生长[23]，从而提高了收获指数. 适度的亏水可以有效地抑制棉花茎枝的延伸，减少了大量的生长冗余，使得株型更加紧凑，通风透光条件改善，无效花蕾和蕾铃脱落数目减少，同时也为密植度增加和产量进一步提高创造了条件. 一定程度的水分调亏处理可以有效地抑制营养生长，同时减少落花落果数量，并保持较高的棉桃数量和较高的经济产量[24]. 研究发现，无论对棉花哪个生育阶段进行水分调亏，随着土壤含水量控制下限降低，耗水量依次递减[25].

上述试验研究证明，调亏灌溉这种有限水分胁迫供水方式是可行的，可以实现节水、高产和高效的目标.

4 需进一步研究的问题

自从实施调亏灌溉以来，已发挥了一定的节水增产潜力，但因其起步相对较晚，因而也存在着一些需要进一步研究的问题.

a. 调亏灌溉这一节水灌溉模式与水稻生产中实际应用的灌溉模式有一定差异，需要农民进一步了解应用推广这项节水高产的灌水技术，同时还需要政府加大投资力度，从真正意义上使调亏灌溉给农民带来切身利益.

b. 调亏灌溉较少涉及蔬菜等经济作物. 但一些蔬菜作物的试验结果表明，在一个短期胁迫后水分可重新利用时，短时间内生长会很快，以至不会因胁迫而引起净生长的下降. 大量试验研究表明：植物在经受适度干旱后普遍存在着补偿效应，在不改变其他条件的情况下，能够在节约用水的同时提高产量. 所以，调亏灌溉的应用前景很广阔，应该把调亏灌溉应用于更多的作物上去.

c. 调亏灌溉中各种调亏指标和测试指标都与环境因子及作物种类等有关，还需要进一步研究不同区域不同作物调亏灌溉下的作物调亏时间和程度的定量化等综合指标问题，由此构建调亏灌溉模式.

d. 需要进一步研究作物不同生育阶段、不同程度的亏水对水分散失、光合作用的影响，经济产量转化的效率问题，以及在缺水条件下作物群体光合产物的最优分配策略问题.

通过以上关键问题的研究，将会形成一套综合的节水高效优质的调亏灌溉技术体系.

5 结 语

调亏灌溉通过人为地造成一定程度的水分胁迫，提高了作物品质，达到了节水高产的目的. 调亏灌溉的发展将使农业节水灌溉的生产效益大幅度提高，为我国农业水资源的可持续发展作出巨大贡献. 因此，作为一种主动利用水分胁迫正面效应的高效节水灌溉新技术，调亏灌溉具有广阔的发展潜力.

参考文献：

[1] 蔡大鑫，沈能展，崔振才. 调亏灌溉对作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.

[2] BOLAND Anne-Maree. The effect of regulated deficit irrigation on tree water use and growth of peach[J]. Journal of Horti cultural Science，1993，68(2)：261-264.

[3] CHALMERS D J，MITCHELL P D，JERIE P H. The physiology of growth control of perch an pear trees using reduced irrigation [J]. Acta Horticulture，1984(146)：143-148.

[4] 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.

[5] CHALINERS 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

[6] 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.

[7] TURNER N C. Plant water relations and irrigation management [J]. Agri Water Manag, 1990(17): 59-75.
[8] CHALINERS D J, BVANDEN E. Productivity of peach trees factors affecting dry-weight distribution during tree growth [J]. Ann Bot, 1975(39): 423-432.
[9] 王和洲,张晓萍. 调亏灌溉条件下的作物水分生态生理研究进展[J]. 灌溉排水, 2001, 20(4): 73-74.
[10] 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): 59-60.
[11] 王密侠,康绍忠,蔡焕杰. 玉米调亏灌溉节水调控机理研究[J]. 西北农林科技大学学报:自然科学版, 2004, 32(12): 87-89.
[12] 刘庚山,郭安红,任三学,等. 夏玉米苗期有限水分胁迫拔节期复水的补偿效应[J]. 生态学杂志, 2004, 23(3): 24-29.
[13] 孟兆江,刘安能,庞鸿宾,等. 棉花调亏灌溉的生态生理效应[J]. 灌溉排水学报, 2003, 22(4): 30-33.
[14] 史文娟,康绍忠,宋孝玉. 棉花调亏灌溉的生理基础研究[J]. 干旱地区农业研究, 2004, 22(3): 92-93.
[15] 孟兆江,刘安能,庞鸿宾,等. 棉花调亏灌溉的生态生理效应[J]. 灌溉排水学报, 2003, 22(4): 30-33.
[16] 林琪,石岩,位东斌. 土壤水与冬小麦产量形成的关系及节水灌溉方案[J]. 华北农学院学报, 1998, 13(3): 1-4.
[17] 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): 43-46.
[18] 康绍忠. 新的农业科技革命与 21 世纪我国节水农业的发展[J]. 农业工程学报, 1998, 16(1): 11-17.
[19] 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.
[20] 刘安能,孟兆江. 玉米调亏灌溉效应及其优化农艺措施[J]. 农业工程学报, 1999, 15(3): 108-111.
[21] 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.
[22] 郭相平,刘才良,邵孝侯. 调亏灌溉对玉米需水规律和水分生产效率的影响[J]. 干旱地区农业研究, 1999, 17(3): 93-95.
[23] CHALMERS D J, ENDE B V D. Productivity of peach trees and factors affecting dry-weight distribution during tree growth [J]. Ann Bot, 1975, 39(4): 423-433.
[24] 史文娟,康绍忠,宋孝玉. 棉花调亏灌溉的生理基础研究[J]. 干旱地区农业研究, 2004, 22(3): 92-93.
[25] 孟兆江,刘安能,庞鸿宾,等. 棉花调亏灌溉的生态生理效应. 灌溉排水学报, 2003, 22(4): 30-33.

(收稿日期:2004-09-29 编辑:高建群)

(上接第 168 页)

[26] CASTRO I P, BRADSHAW P. The turbulence structure of a highly curved mixing layer[J]. J Fluid Mech, 1976, 73: 265-304.
[27] GILLIS J C, JOHNSTON J P. Experiments on the turbulent boundary layer over convex walls and its recovery to flat-wall conditions[C]//Proceedings of the 2nd International Symposium on Turbulent Shear Flows, London, 1979.
[28] BRADSHAW P, WONG F Y F. The reattachment and relaxation of a turbulent shear layer[J]. J Fluid Mech, 1972, 52: 113-135.
[29] McGUINNESS M. Flow with a separation bubble-steady and unsteady aspects[D]. Cambridge University, 1978.
[30] 董宇飞. 轴对称钝体分离流动特性及其控制[D]. 北京:北京大学, 1996.
[31] 董宇飞,魏中磊. 分离再附运动的实验研究[J]. 力学进展, 1999, 29(1): 87-96.
[32] KASAKI N, HIRATA M, YOKOBORI S. Visual studies of large-eddy structures in turbulent shear flows by means of smokewire method[C]//Proceeding of the 1st International Symposium on Turbulent Shear Flows, Pennsylvania State College, 1977.
[33] CHANDRSUDA C. A reattaching turbulent shear layer in incompressible flow[D]. Imperial College of Science and Technology, 1975.
[34] ROOS F W, KEGELMAN J T. Control of coherent structures in reattaching laminar and turbulent shear layers[J]. AIAA 85-0554, 1985.
[35] TROUTT T R, SCHEELKE B, NORMAN T R. Organized structures in a reattaching separated flow field[J]. J Fluid Mech, 1984, 143: 413-427.
[36] ROTHE P H, JOHNSTON J P. Free-shear-layer behavior in rotating systems[J]. J Fluid Engng, 1979, 101(3): 117-119.
[37] 王玲玲. 大涡模拟理论及其应用综述[J]. 河海大学学报:自然科学版, 2004, 32(3): 261-265.
[38] ARNAL M, FRIEDRICH R. On the effects of spatial resolution and subgrid-scale modeling in large eddy simulation of a recirculating flow[C]//Proceedings of the Ninth GAMM Conference on Numerical Methods in Fluid Mechanics, Lausanne, 1995.
[39] AKSELVOLL K, MOIN P. Large eddy simulation of turbulent confined coannular jets and turbulent flow over a backward facing step[R]. Report TF-63, Department of Mechanical Engineering, Stanford University, Stanford, CA, 1995.
[40] 王小华,樊洪明,何钟怡. 后阶流动的数值模拟[J]. 计算力学学报, 2003, 20(3): 361-365.
[41] 王兵,张会强,王希麟,等. 不同亚格子模式在后台阶湍流流动大涡模拟中的应用[J]. 工程热物理学报, 2003, 21(1): 157-160.
[42] HUNG LE, PARVIZ MOIN, JOHN KIM. Direct numerical simulation of turbulent flow over a backward-facing step[J]. J Fluid Mech, 1997, 330: 349-374.

(收稿日期:2005-03-14 编辑:马敏峰)