

作物调亏灌溉理论与技术研究动态及其展望^{*}

庞秀明¹, 康绍忠^{2, 1}, 王密侠¹

(1 西北农林科技大学 旱区农业水土工程教育部重点实验室, 陕西 杨凌 712100;

2 中国农业大学 中国农业水问题研究中心, 北京 100083)

[摘 要] 介绍了作物调亏灌溉的概念及其生理学基础, 论述了调亏灌溉理论与技术的研究进展, 分析了调亏灌溉研究中存在的问题。最后, 对作物调亏灌溉理论与技术的发展趋势进行了展望。

[关键词] 调亏灌溉; 节水增产机理; 灌溉技术; 灌溉理论; 研究动态

[中图分类号] S274.1

[文献标识码] A

[文章编号] 1671-9387(2005)06-0141-06

调亏灌溉 (Regulated Deficit Irrigation, 简称 RD I) 是一种有效利用作物生理功能节水的灌溉方法, 是由澳大利亚持续灌溉农业研究所 Tatura 中心于 20 世纪 70 年代中期提出的^[1], 其核心是根据作物的生理生化作用受遗传特性或生长激素影响的特征, 在作物生长发育的某一阶段施加一定程度的有益亏水度, 调节其光合产物向不同组织器官的分配比例, 从而提高所需收获的产量而舍弃部分营养器官的生长量和有机物质的总量, 以达到节水增产和改善作物品质的目的。调亏灌溉概念自提出以来, 绝大部分的研究^[2, 3]主要集中在果树方面, 较少涉及到粮食和蔬菜作物。直到 20 世纪 90 年代后期, 国内外学者才开始在大田作物上进行试验, 并已初见成效, 基本证明了调亏灌溉对于大田作物也是一种非常有效的灌溉方法^[4, 5]。本文介绍了调亏灌溉的概念及其与传统灌溉的区别, 分析了调亏灌溉的发展动态及其在作物栽培上的应用现状与存在问题, 以期对调亏灌溉的进一步深入研究指明方向。

1 调亏灌溉的研究进展

1.1 调亏灌溉的提出及其与传统灌溉的区别

20 世纪 50 年代以前, 农业以“丰水高产型”的充分灌溉 (Full Irrigation) 为主要特征, 其特点是适时适量的满足作物的需水要求, 追求的是单位面积的高产而较少考虑水的效益^[6]。20 世纪 70 年代初, 充分灌溉理论发展到了最高峰, 但也逐渐暴露出用水量、效益低等缺陷^[7]。近年来, 一种和“丰水高产

型”的充分灌溉理论相对应, 以有限亏缺效应为指标的非充分灌溉 (Unsufficient Irrigation) 理论在农业灌溉的具体实践中初步产生, 并逐渐受到人们的重视^[8]。非充分灌溉实际上解决的是有限水量在作物生育期的最优分配问题或有限水量在某地区的最优分配问题, 其以按作物的灌溉制度和需水关键期进行灌溉为技术特征, 目前已发展得比较完善, 技术体系已臻于成熟, 故已得到了大面积的推广应用^[9]。

调亏灌溉不同于充分灌溉, 前者不仅在于存在水分亏缺, 更重要的是对作物生长最佳水分状态的不同理解, 按照传统理论^[10]: 供水充足, 作物生长旺盛, 单位面积产量高, 即认为作物处于最佳水分状态。而调亏灌溉研究^[11]表明, 在作物生长的某一阶段进行调亏处理, 不仅不会导致减产甚至还可能增加产量。如果调亏灌溉和密植相结合, 调整作物的群体结构, 则增产效果更好。调亏灌溉也不同于非充分灌溉, 非充分灌溉是从经济学的角度出发, 寻求一个地区灌溉作物总的净灌溉效益最大的一种灌溉方法; 而调亏灌溉则是从作物的生理角度出发, 根据作物对水分亏缺的反应, 人为主动的施加一定程度的水分胁迫, 以影响作物的生理生化过程, 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效率。

调亏灌溉的关键在于其从作物的生理角度出发, 根据作物的需水量特征进行主动的调亏处理。调亏灌溉开辟了一条最佳调控水-土-植物-环境的有效途径, 不失为一种更科学、更有效的新的灌水策

* [收稿日期] 2004-09-13

[基金项目] 国家自然科学基金重点项目 (50339030); 国家“十五”重大科技专项 (2002AA 6Z3031)

[作者简介] 庞秀明 (1977-), 男, 山东临沂人, 在读硕士, 主要从事节水灌溉原理新技术研究。

[通讯作者] 康绍忠 (1962-), 男, 湖南桃源人, 教授, 博士生导师, 主要从事农业节水与水资源方面的研究。

略。

1.2 调亏灌溉的节水增产机理研究

20 世纪 80~90 年代是调亏灌溉研究领域硕果累累的主要时期,其重要研究^[12~14]成果之一就是调亏灌溉的节水增产机理基本得以阐明。目前有两种解释方法:一是从作物的生理角度出发进行说明,另一种是从分子的角度加以阐释。

首先是根系的决定作用。调亏灌溉是通过土壤水的管理来控制植株根系生长,从而操纵地上部分的营养生长及其叶水势;叶水势可以调节气孔开度,而气孔开度则对光合作用和水分利用起着重要作用。在这一系列的生理作用过程中,根系起着决定性的作用。因为当对植株进行分根交替灌溉处理时^[15],置于受旱处理区的根系吸水受到抑制,其叶水势、膨压和脱落酸(ABA)含量不变而大部分气孔明显关闭。据此推测,在植株受旱时,根系产生某种物质,并运输到叶片中央,使气孔开度受到控制,从而导致光合和蒸腾等生理过程发生变化,最终影响到收获产量的变化^[16]。

其次,在亏水期间,植株不同组织和不同器官对水分的吸收能力有差异,对水势的敏感性不同,因而在亏水期所获得的水量也有所不同。气孔开度作用于植株的生理过程中,细胞膨大对水的亏缺最敏感,光合作用和有机物由叶片向果实的运输过程则次之。这种敏感性的差异引起的结果是:营养生长受抑制时,果实可以积累有机物,使自身的生长不会明显降低;在果实的快速膨大期,细胞的扩张因在调亏期受到抑制而产生积累的代谢物,在复水后可供给细胞壁的合成以及其他与果实生长有关的过程,使生长得以补偿,产量不至于下降。需要强调的是,水分胁迫一定要适度,如果胁迫程度过大或历时过长,细胞壁则会因之变得比较坚固,即使复水也不能恢复扩张,从而导致产量下降。这些机理使调亏灌溉的功效益在分子水平上得到解释,为在调亏灌溉领域进行定性化和可操作化的深层次研究提供了理论依据^[17,18]。

1.3 调亏灌溉的适宜时间与适宜亏水度指标研究

作物产量与品质受到许多因素的影响,包括气象条件的变化及灌水技术和方法的影响,而且即使采用同一种灌水方法,灌溉试验时不同的处理水平也会对产量和品质产生影响。其他因素,如土壤状况、极端气象条件和病虫害也是不容忽视的影响因素。但水分亏缺对作物产量和品质的影响,在很大程度上取决于水分亏缺的发生时期、持续时间和水分

亏缺的程度,这也是调亏灌溉技术所研究的主要内容之一。

有研究^[19]表明,作物不同时期对缺水的敏感度不同。所以,施加主动亏水(调亏灌溉的时期)是调亏灌溉的关键之一。对于某些作物,由于其生理生化通道受到遗传特性或生长激素的影响,在其生长发育的某些时期有目的地施加一定程度的水分胁迫,会促使光合产物在不同组织器官内进行重新分配,从而提高所需收获物的产量而降低营养器官的生长量和有机合成物质的总量。对于大多数作物来讲,早期阶段植株较小,而且气温也较低,蒸发强度小,需水强度也小,也就是说作物缺水的发展速度比较慢。蔡焕杰等^[20]研究表明,较慢的水分亏缺发展速度对作物产量的影响较小。而在作物的生长中期阶段,植株生长旺盛,需水强度大,作物缺水的发展速度比较快,不适于进行调亏灌溉。Turner^[21]也指出,作物适当阶段的适度缺水有利于作物产量的提高。

调亏灌溉的亏水度应控制在适度缺水的范围内,但何为适度很难有一个标准,因为不同地区、不同作物及同一种作物的不同阶段其亏水度的标准都不同。Meyer 等^[22]在南非用蒸渗仪对冬小麦的研究发现,当 1 m 土层的土壤水分消耗低于 33% 可利用水量时,扩大生长开始下降,为了避免扩大生长开始下降,他们建议以土壤水分消耗到 50% 可利用水量作为灌溉标准。蔡焕杰等^[20]对陕西省长武县冬小麦生育期含水率的研究表明,土壤含水率降低到田间持水量的 46% 时,对作物产量没有影响。其在甘肃民勤县进行的春小麦试验^[20]表明,在第 1 次灌水前的土壤含水率可以减少到 45%。由此可见,大田作物中各种作物的亏水度数值并不一样,但在作物的生长早期,土壤含水率控制在田间持水率的 45%~50% 不会对作物产量产生明显的不利影响。

2 调亏灌溉在作物栽培上的应用

就目前的研究成果来看,调亏灌溉的研究对象多局限于果树^[23~25]。而对粮食、蔬菜和瓜类等经济作物很少涉及。这可能是由于果树属于无限生长的植物,根系发达,亏缺后复水补偿能力较强,而且营养器官的冗余比较明显,调亏效果显著的缘故。但国内外学者对大田作物上进行的调亏灌溉^[26~29]表明,调亏灌溉不仅可以节约灌溉用水,而且能抑制枝叶的生长,同时提高作物产量,改善作物品质。

2.1 调亏灌溉对作物生理生态及产量的影响

调亏灌溉是根据灌溉对象的生长发育规律及生

产实际的需要, 通过土壤水的有效管理有目的地不充足供水, 使作物经受水分胁迫, 在特定时期限制作物某些方面的生长发育, 从而影响光合产物在不同组织器官的重新分配, 以达到控制营养生长, 促进生殖生长, 从而提高经济产量而降低营养器官的生长量和光合产物的总量。王密侠等^[30]进行了玉米不同生育期的调亏度试验, 结果发现, 玉米苗期经适度水分亏缺, 可促使水分和营养供给向根系倾斜, 增强植株后期的调节和补偿能力, 节水效益显著且对产量影响不大; 与充分供水处理相比, 苗期重度调亏、中度调亏和轻度调亏处理的根冠比分别增大了 11.5%, 23.14% 和 6.36%; 产量则分别相差 5%, 5% 和 3%; 拔节期重度调亏、中度调亏、中轻度调亏和轻度调亏处理的根冠比分别增大了 6.25%, 24.20%, 40.29% 和 43.00%; 产量则分别相差 18%, 9%, 3% 和 1%。陈晓远和罗远培^[31]对小麦进行前期干旱, 开花期复水处理, 结果发现, 小麦茎秆伸长, 单叶和单株叶面积增大, 干物质积累增加, 中度水分亏缺后充分供水, 其生物量和产量都超过对照。

2.2 调亏灌溉对水分利用效率的效应

任何一种节水方法在达到节水目的的前提下, 必须保证对产量不会产生太大的影响。近 30 年的研究结果^[32, 33]表明, 调亏灌溉在大多数作物上(尤其是果树)能够达到亏水不减产或减产不多的效果。所谓水分利用效率(Water Use Efficiency, 简称 WUE), 是指植物消耗单位水分所产生的同化物质的量, 其实质反映了植物耗水与其干物质生产之间的关系。WUE 不但是评价植物生长适宜程度的综合生理生态指标^[34], 而且是衡量作物产量与用水量关系的一种指标。对作物用水而言, 水分利用效率又可分为 3 种, 一种是单位面积产量与作物总耗水量的比值, 这就是人们所指的群体层次水分效率; 二是单位面积产量与灌溉用水量的比值, 得到的是灌溉水利用效率, 其对确定最佳灌溉定额是必不可少的; 三是单位面积产量与天然降雨量之比, 即天然降水利用效率^[35~37]。通常, 灌溉评价中采用的是第一种和第二种水分利用效率^[38]。Mao 等^[39]在华北平原对黄瓜进行调亏灌溉试验时发现, 中度的亏缺灌溉对黄瓜来说是可行的, 当灌水量为 2 400~7 500 m³/hm² 时, 黄瓜的产量随着灌水量的增大而增加, 但当灌水量低于 2 400 m³/hm² 时, 产量随着灌水量的减少而降低; 其中, 黄瓜生育期的第二阶段, 即从开始坐果到产量高峰期是水分敏感时期, 这个时期

必须保证有充足的水分供给, 否则会影响产量; 其对水分利用效率的计算结果表明, 在黄瓜坐果到产量高峰期和产量高峰期到收获时亏水量最大, 其节水效果最佳。Reddy 等^[40]对沙性土壤中花生进行的大田调亏试验结果发现, 开花期和结果期是水分敏感时期, 在此时期内需要有充足的水分供给, 不宜进行调亏; 苗期和果实成熟期中度水分亏缺处理有利于形成最佳的产量, 同时提高了水分利用效率 and 水的经济效益。因此, 建议在花生的整个生育期内, 以土壤水分为 60% 的可利用水量作为灌溉标准最为适宜。

2.3 调亏灌溉和果实品质

20 世纪 80 年代后期, 调亏灌溉除了产量的测试以外, 开始涉及到品质影响的研究, 认为调亏灌溉可以增加果实的可溶性固形物含量(Soluble Solids Concentration, SSC)^[41], 对改善品质有一定的作用。据报道^[41], 经调亏灌溉处理的果树, 果实有较高的可溶性固形物含量, 淀粉降解延后; 色泽及硬度未受影响, 储藏期间, 除了可溶性固形物含量依然保持较高之外, 淀粉含量、硬度、色泽均与正常处理无差异。Caspari 和 Behboudian 等^[42]对梨树进行的调亏灌溉试验表明, 梨的品质(硬度、SSC、糖度与矿物质浓度等)与充分灌溉无太大差异, 但在储藏期的前 4 周内, 果实硬度有明显下降, 由储藏前的 37.5 N 降低至 32~33 N。而瓜果类作物经调亏灌溉处理后, 其果实品质也有较大的改善。Yesin Erdem 和 Nedin Yukse^[43]在土耳其对西瓜进行的调亏灌溉试验发现, 水分亏缺可以提高果实的可溶性固形物含量, 瓜皮的厚度变薄, 糖含量增加, 但对酸度(即 pH 值)无大的影响。雷廷武等^[44]在内蒙古河套地区, 用微咸水对西瓜进行的调亏试验结果表明, 水分亏缺处理与水分充足的对照相比, 总糖、钙和维生素 C 的含量都有所提高, 而相应的水分含量降低。

2.4 调亏灌溉综合实施技术的研究

这里所说的灌溉综合实施技术, 主要指与调亏灌溉相配套的灌水技术与管理技术, 即优选与调亏灌溉相应的灌水技术及相应的农业技术措施。作物利用和消耗水分的过程, 历来被作为节水农业的一项重要内容而被人们所重视, 其主要目标在于减少棵间蒸发及植株过量蒸腾。各种节水灌溉措施对此各有其不同的处理方法, 如应用一些农业节水技术及管理技术, 通过改良土壤提高其保水性能; 利用覆盖技术(薄膜、麦草、砂石等)减少棵间蒸发^[45, 46]; 实行计划用水, 改进灌水技术以减少深层渗漏等^[47]。

调亏灌溉与传统的节水灌溉有很多相同之处,二者目标一致,即均以节水高效为目的;方法相同,即在作物需水不敏感时控水;目标明确,即舍弃部分干物质产量而获得最大经济产量或通过适度亏水提高产品品质。但调亏灌溉技术的最终推广必然依赖于多项已成熟技术的组装配套,西北农林科技大学康绍忠等^[48, 49]在广泛调查和了解国内外灌水技术的基础上,通过调亏机理的研究,把作物根系土壤湿润方式和作物节水机制综合起来考虑,探索出了与玉米、棉花等宽行作物调亏灌溉相配套的“控制性分根交替灌溉”新技术,1997~1998年在西北农林科技大学农业水土工程重点开放实验室和甘肃省武威地区民勤小坝口灌溉实验站进行了该种新技术的节水机理、节水增产效果和灌水技术试验,取得了明显的节水增产效果。

3 存在问题与展望

调亏灌溉技术的进一步深入研究,将会促进农田灌溉与植物水分生理及抗性生理、土壤物理、农业气象学、农田生态等边缘学科的渗透交叉,因而需从总体和相互作用上,综合考虑作物不同时期、不同程度调亏对光合产物的形成与分配,及向经济产量的转化和对水分散失影响的动态过程,对其进行定量描述,并在作物生理机制的基础上研究二者的最优分配策略,使这一领域的研究由单体的试验性质变为一门有较严谨理论基础和定量分析的科学,在此基础上根据其定量关系,以减少作物水分散失和提高光合产物向籽粒(或果实)转化的数量为目标,探讨缺水条件下作物调亏灌溉的最佳时期和最适宜的调亏灌溉标准,以指导节水农业实践,提高有限水的经济效益,为农田灌溉学科提供一条最佳的调控水-土-作物-环境关系的有效途径。

调亏灌溉技术需要进一步研究的问题主要有以下几个方面:

(1) 作物(尤其是大田作物、蔬菜等)适宜调亏模式的研究。调亏灌溉最早应用于果树上,且其研究仍然在继续,虽然不同地区、不同品种的调亏结果有一定差异,但就果树的调亏技术而言,其体系已基本成熟。而对粮食、蔬菜和瓜果等作物的调亏时期、调亏度和调亏历时的研究还远远不够,还有待于进一步研究以指导大田作物的优化灌溉。

(2) 综合调亏指标的研究。调亏灌溉的最终目标是提高和改善作物的产量和品质,但在调亏过程中,应将影响土壤水分和作物生理、生态的定量指标作为实施调亏灌溉的依据。这种指标,除能够直接或间接地反应其对作物产量和品质的影响外,还应尽可能地保证其在调亏灌溉期间可以准确量测。

(3) 调亏灌溉对作物品质影响的研究。调亏灌溉能够改善作物的品质,但其对蛋白质、糖和脂肪等成分也可能有相应的影响。而这方面的研究成果尚不多见,应成为今后深入研究的一个方向。

(4) 调亏灌溉在田间应用的研究。调亏灌溉的研究与应用虽然目前已不仅限于澳大利亚,世界其他地区也都在进行类似研究,但其研究结果仍有明显的地域局限性;同时,调亏灌溉也会影响植物个体的形态和生化变化。因此,有必要对调亏灌溉在不同地区、不同自然条件、不同作物合理密植的栽培方式及不同营养元素的配方施肥等方面,展开充分、广泛的研究,以加强该项节水技术的实践性与有效性。

通过对以上问题的研究,将会形成一套综合的节水高效调亏灌溉体系,将会使单方灌溉水的产量提高 0.5 kg 左右,结合雨水集蓄,使利用集聚雨水进行调亏灌溉的灌溉水生产效率达到 2.5 kg/m³ 以上^[50, 51],使旱区利用采集雨水和调亏灌溉发展果树与设施农业的生产效益有较大提高,从而为解决我国人口高峰期的粮食问题和促进西北旱区农村的脱贫致富作出扎扎实实的贡献。

[参考文献]

- [1] 康绍忠,蔡焕杰.作物根系分区交替灌溉和调亏灌溉的理论与实践[M].北京:中国农业出版社,2002
- [2] Chalmers D J, Mitchell P, Heek L. Control of peach tree growth and productivity by regulated water supply, tree density, and summer pruning[J]. J Amer Sol Sci, 1981, 106(3): 307- 302
- [3] 曾德超.果树调亏灌溉密植节水增产技术的研究与开发[M].北京:北京农业大学出版社,1994
- [4] 康绍忠,史文娟,胡笑涛,等.调亏灌溉对玉米生理生态和水分利用效率的影响[J].农业工程学报,1998,14(4): 82- 72
- [5] 张喜英,由懋正,王新元.冬小麦调亏灌溉制度田间试验初报[J].生态农业研究,1999,6(3): 33- 36
- [6] 康绍忠,蔡焕杰.农业水管理[M].北京:中国农业大学出版社,1996
- [7] 李 洁.亏缺灌溉的发展与现状[J].节水灌溉,1998,(5): 21- 23

- [8] 陈玉民, 肖俊夫, 王宪杰, 等. 非充分灌溉研究进展及展望[J]. 灌溉排水, 2001, 20(2): 73- 75
- [9] 杜尧东, 宋丽莉, 刘作新. 农业高效用水理论研究综述[J]. 应用生态学报, 2003, 14(5): 808- 812
- [10] 汪志农. 灌溉排水工程学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000
- [11] 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- 26
- [12] Ebel R C, Proebsting E L. Regulated deficit irrigation may alter apple maturity quality and storage life[J]. Hortscience, 1993, 28(2): 141 - 143
- [13] Jordi Marshall, Joan Girona. Relationship between leaf water potential and gas exchange activity at different phenological stages and fruit loads in peach trees[J]. J Amer Sol Hort Sci, 1997, 122(3): 415- 421
- [14] 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]. J Amer Soc for Hort Sci, 1986, 11(6): 944- 947
- [15] 梁宗锁, 康绍忠, 胡 炜, 等. 控制性分根交替灌水的节水效应[J]. 农业工程学报, 1997, (4): 58- 63
- [16] Blachman 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
- [17] 史文娟, 胡笑涛, 康绍忠. 干旱缺水条件下作物调亏灌溉技术研究状况与展望[J]. 干旱地区农业研究, 1998, 16(2): 84- 88
- [18] 何 华, 耿增超, 康绍忠. 调亏灌溉及其在果树上的应用[J]. 西北林学院学报, 1999, 14(2): 83- 87
- [19] Cai Huanjie, Kang Shaozhong. Regulated deficit irrigation and its several problems in practical use[J]. Proceedings of Annual Conference of Korean Society of Agricultural Engineers, 1999, 10: 30- 35
- [20] 蔡焕杰, 康绍忠, 张振华, 等. 作物调亏灌溉的适宜时间与调亏度的研究[J]. 农业工程学报, 2000, 16(3): 24- 27
- [21] Turner N C. Further progress in crop water relations advances in agronomy[J]. J Amer Sol Sci, 1997, 58: 293- 338
- [22] Mayer W S, Grec G C. Water use by wheat and plant indications of available soil water[J]. J Agron, 1980, 72: 253- 256
- [23] Peter D, Mitchell B, Ende P H, et al. Response of Bartlett pear to withholding irrigation, regulated deficit irrigation and tree spacing[J]. J Amer Soc Hort Sci, 1989, 114(1): 15- 19
- [24] Horst Capri W, Hossein Behboodian M, David Chalmers J. Water use, growth, and fruit yield of 'Husui' Asian pears under deficit irrigation[J]. J Amer Soc Hort Sci, 1994, 119(3): 383- 388
- [25] 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
- [26] 郭相平, 刘才良, 邵孝侯, 等. 调亏灌溉对玉米需水规律和水分利用效率的影响[J]. 干旱地区农业研究, 1999, 17(3): 92- 96
- [27] 汤 莹, 郭永杰, 蔡德英. 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- 24
- [28] 裴 冬, 张喜英, 亢 茹. 调亏灌溉对棉花生长、生理及产量的影响[J]. 生态农业研究, 2000, 8(4): 52- 55
- [29] Kang Shaozhong, Shi Wenjuan, Zhang Jianhua. An improved water-use efficiency for maize grown under regulated deficit irrigation[J]. Field Crops Research, 2000, 67: 207- 214
- [30] 王密侠, 康绍忠, 蔡焕杰, 等. 调亏灌溉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
- [31] 陈晓远, 罗远培. 开花期复水对受旱冬小麦的补偿效应研究[J]. 作物学报, 2001, 27(4): 513- 516
- [32] 梁宗锁, 康绍忠, 李新有. 有限灌溉对夏玉米产量及其水分利用效率的影响[J]. 西北植物学报, 1995, 15(1): 16- 21
- [33] 邓西平, 山 仑. 半干旱区春小麦高效利用有限灌溉的研究[J]. 水土保持研究, 1998, 5(1): 65- 69
- [34] 张岁歧, 山 仑. 植物水分利用效率及其研究进展[J]. 干旱地区农业研究, 2002, 20(4): 1- 5
- [35] 山 仑. 干旱地区植物水分利用效率和农业水的应用[J]. 植物生理学通讯, 1994, 30(1): 61- 66
- [36] Stanhill G. Water use efficiency[J]. Adv Agron, 1986, 39: 53- 85
- [37] 房全孝, 陈雨海, 李全起, 等. 灌溉对冬小麦水分利用效率的影响研究[J]. 农业工程学报, 2004, 20(4): 34- 39
- [38] 山 仑, 黄占斌, 张岁歧. 节水农业[M]. 北京: 暨南大学出版社, 清华大学出版社, 2000
- [39] Mao Xue-sen, Liu Meng-yu, Wang Xin-yuan. Effects of deficit irrigation on yield and water use of greenhouse grown cucumber in North China Plain[J]. Agricultural Water Management, 2003, 16: 219- 228
- [40] Reddy C R, Reddy S R. Scheduling irrigation for peanuts with variable amounts of available water[J]. Agricultural Water Management, 1993, 23: 1- 9
- [41] Ebel R C, Proebsting E L, Paterson M E. Regulated deficit irrigation may alter apple maturity quality and storage life[J]. Hort Science, 1993, 28(2): 141- 143
- [42] Caspari H W, Behboodian M H, Chalmers D J. Fruit characteristics of "Hosui" Asian pears after deficit irrigation[J]. Hort Science, 1996, 31(1): 162- 165
- [43] Yesin Erdem, Nedin Yuksel A. Yield response of watermelon to irrigation shortage[J]. Scientia Horticulturae, 2003, 98: 365- 383
- [44] 雷廷武, 肖 娟, 王建平, 等. 微咸水滴灌对盐碱地西瓜产量品质及土壤盐渍度的影响[J]. 水利学报, 2003, (4): 85- 89
- [45] 杜太生, 康绍忠, 石培泽, 等. "科瀚 98"保水剂在春小麦- 玉米带田上的应用试验研究[J]. 灌溉排水, 2001, 20(4): 21- 25
- [46] 陈 凤, 蔡焕杰, 王 健. "科瀚 98"秸秆覆盖条件下玉米需水量及作物系数的试验研究[J]. 灌溉排水, 2004, 23(1): 41- 43
- [47] 李学绩, 相保成. 渠道防渗不同效果的探讨[J]. 山西水利科技, 1994, (4): 23- 25
- [48] 王密侠, 康绍忠. 农业高效用水与水土环境保护[M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 2000

- [49] Kang Shao-zhon, Bill Davies, Shan Lun. Water saving agriculture and sustainable use of water and land resource[M]. 陕西: 陕西科学技术出版社, 2003
- [50] 陈军民, 王 凯. 雨水集蓄利用在西安市的发展前景[J]. 节水灌溉, 2003, (6): 18- 19
- [51] 陈 建, 李云伍. 山地丘陵雨水集蓄节水节能灌溉集成系统的研究[J]. 农业工程学报, 2002, 18(5): 92- 95

Theory and technology research development and prospect of regulated deficit irrigation on crops

PANG Xiu-ming¹, KANG Shao-zhong^{2,1}, WANG M i-xia¹

(1 Key Laboratory of Agricultural Soil and Water Engineering in Arid and Semiarid Areas,
Ministry of Education, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China;

2 Center for Agriculture Water Research in China, China Agriculture University, Beijing 100083, China)

Abstract: In this paper, the concept and physiological basis of regulated deficit irrigation, its theory and research development are briefly presented, and the problems existing in the research of regulated deficit irrigation are discussed as well. In the end, the development trend of the theory and technology of regulated deficit irrigation are prospected.

Key words: regulated deficit irrigation; water-saving and yield increasing mechanism; irrigation technology; irrigation theory; research development

(上接第 140 页)

Abstract ID: 1671-9387(2005)06-0136-EA

Design of a communication scheme for a remote measure system of water level based on GPRS, SMS and satellite communication

ZHAO Yun-xiang¹, ZHANG Qing¹, JIAO Shang-bin², ZHAO Yan¹

(1 Yangling Institute of Vocation and Technology, Yangling, Shaanxi 712100, China;

2 Xi'an University of Technology, Xi'an, Shaanxi 710048, China)

Abstract: Based on the analysis of the shortcomings of the applied water remote measure system's communication techniques, the characteristics of three different communication techniques, namely, General Packet Radio Service (GPRS), Short Message Service (SMS) and Satellite Communication are introduced. A communication scheme for water remote measure system based on GPRS, SMS and GPRS is designed in this paper, and the realization of this scheme for the system is expounded in detail.

Key words: water remote measure system; communication scheme; GPRS; SMS; satellite communication