

国内外节水灌溉技术比较与认识

彭世彰, 丁加丽

(河海大学节水研究所, 江苏 南京 210098)

摘要:从喷灌、微灌、管道输水、渠道防渗衬砌、劣质水灌溉、节水灌溉管理、水稻节水灌溉等七个方面对比分析了我国与发达国家的节水灌溉技术, 认为我国在输配灌水技术方面整体水平不高, 节水灌溉管理技术发展明显落后. 指出发展我国的节水灌溉技术需要从我国国情出发, 重视改进地面灌溉技术; 因地制宜推广喷、微灌技术; 需要着眼于世界节水灌溉技术发展的趋势, 研究开发自动化、现代化的节水灌溉系统, 推动我国传统农业向高效优质农业的转化; 需要依据可持续发展的要求慎重对待污水灌溉技术, 重视灌溉不当引发的生态环境问题, 使农业和生态协调发展.

关键词:节水灌溉; 喷灌; 微灌; 管道输水; 渠道防渗; 劣质水灌溉

中图分类号: S275

文献标识码: A

文章编号: 1006-7647(2004)04-0049-04

水资源危机被公认为未来 10 年人类共同面临的最严重挑战之一. 农业是用水大户, 农业灌溉又占用了农业总用水量中的绝大部分, 世界各国均非常重视发展节水灌溉技术. 我国水资源也十分短缺, 不仅人均占有量少, 而且时空分布不均匀, 水资源区域分布与生产力布局极不匹配. 目前, 全国每年缺水 400 亿 m^3 , 农业缺水 300 亿 m^3 , 而每年农业生产中浪费水量高达 1000 亿 m^3 ^[1]. 2030 年, 我国灌溉水利用率要达到 0.6~0.7, 水分生产率提高到 1.5~1.8 kg/m^3 , 实现灌区节水 600~800 亿 m^3 , 才能保证我国的粮食安全, 实现农业的可持续发展^[2,3]. 因此, 学习和借鉴国外节水灌溉技术成果, 发展适合我国国情的节水灌溉技术就显得十分迫切和重要.

1 国内外节水灌溉技术的对比与分析

1.1 喷灌技术

喷灌技术是大面积机械化解大田作物节水灌溉的主要形式. 在喷灌机械中, 平移(包括中心支轴)式全自动喷灌机、软管卷盘式自动喷灌机及人工移管式喷灌机是世界上应用的三种主要机型. 在美国, 喷灌的机械化、自动化水平很高, 广泛应用了高度自动化喷灌设备, 喷灌类型中 69.74% 为中心支轴式系统, 干旱地区人工移动式系统约占 10.05%, 东部湿润地区自走式系统达 20.33%^[4]. 在西班牙 LQD 灌区应用的固定式、中心支轴式和平移式喷灌机, 其

均匀度分别达到 68%, 75.5% 和 80%^[5]. 目前发达国家的喷灌技术均朝着低压、节能型方向发展, 并借鉴微灌技术的特点, 积极发展喷灌的多目标利用功能^[6], 例如美国得克萨斯州, 采用的大型自走喷灌机中具有低压精准灌溉功能的占使用面积的 25%, 应用化学制剂的占 50%. 北部(内布拉斯加州)采用圆形和平移的大型喷灌机占全州灌溉面积的 63.19%, 对当地灌溉和种植业的发展起了重要的作用. 此外, 激光、红外线、电子计算机等新技术在喷灌中应用也日益广泛, 主要有应用于喷灌系统上的激光准直技术和激光测量雨滴直径技术, 用于检测喷灌效果的遥感技术, 新技术的应用大大提高了喷灌质量.

我国的喷灌技术研究始于 20 世纪 50 年代, 在喷灌参数、喷灌灌溉制度、喷灌影响因素和影响效果等方面取得了开拓性进展, 研制生产了手抬式、手推式、人工移管式喷灌机以及大型电动圆形喷灌机和电动平移式喷灌机, 并在全国示范、推广和应用. 我国喷灌技术主要应用在湿润、半湿润地区以及经济较发达地区, 应用作物为附加值较高的经济作物. 目前大面积推广的主要喷灌形式有固定式、半固定式和机组移动式三种.

1.2 微灌技术

根据国际灌溉排水委员会(ICID)2000 年的调查^[7], 世界微灌面积增长迅速. 美国在 20 世纪 90 年代间微灌面积增加了 73%, 达 105 万 hm^2 , 占世界总

基金项目: “863”节水农业重大专题资助项目(2002AA2Z4331)

作者简介: 彭世彰(1959—), 男, 上海人, 教授, 博士, 从事节水灌溉研究.

微灌面积的 29.7%。灌溉方式上由地表微灌向地下滴灌发展^[8],以延长设备的使用年限和发展污水滴灌,同时,地下滴灌没有大田滴灌系统滴灌带回收及铺设问题。试验结果表明,结合施肥技术的地下滴灌系统,可提高氮肥利用率,减少硝态氮污染。2000 年加利福尼亚地下滴灌面积达 7.04 万 hm^2 ,成为美国发展地下滴灌面积最多的州。在灌溉作物上美国微灌技术的应用逐步由果树蔬菜等少数经济作物向行播和大田作物发展,与传统地面灌溉和喷灌相比,应用于棉花的微灌分别实现增产 93% 和 60%~100% 的经济成效^[7]。以色列 25 万 hm^2 的有效灌溉面积全部实施了喷灌和微灌,且 80% 是灌溉与施肥同步进行。2000 年,以色列微灌面积发展到 16.6 万 hm^2 ,占总灌溉面积的 66% 以上^[4],现代化的滴灌系统都带有施肥装置,并在田间设水分、养分传感器和测定计算水肥需求量的计算机,按时按量将水和肥料直接送入作物根部。这种全封闭式的配肥与灌水系统使水肥的利用率达到 90% 以上,用水量减少 30%,节省肥料 30%~50%,有效地防止了土壤盐碱化和板结,增加了作物产量。澳大利亚也是世界上推广微灌面积较多的国家之一,除开发研制各种先进灌溉设备以外,还提供各种喷洒图例以满足作物在不同生育期的灌溉要求。

我国 2002 年微灌面积约为 27.9 万 hm^2 ,占我国总灌溉面积的 0.5%,主要应用在北方的果树滴灌,南方茶园微喷灌,大中城市郊区蔬菜地、花卉滴灌以及西北严重干旱缺水地大田作物的集雨工程滴灌中。经济欠发达地区应用了一些较简易的微灌技术,如“小管出流”就是一种介于微灌与管道输水地面灌溉之间的一类过渡型的微灌技术^[9]。灌溉设备生产也已具备一定的规模,生产能力基本上可以满足现阶段技术发展需求,但国产设备在产品配套、品种规格等方面存在问题。总体来讲,推动我国微灌技术发展的内在动力不足,管理、维护水平不高,经济效益不太理想,虽已有了 20 多年的发展历史,但目前尚处于从示范向推广过渡的阶段。

1.3 管道输水技术

以色列的国家输水管道工程堪称国际一流,全国除个别偏远山区外,全部实现输水管网化。以色列全国的输水管道连接了大多数地区的供水系统,形成一个平衡的网络系统,可根据需要输水供水且避免了输水过程中因蒸发和渗漏引起的损失。输水管道不仅用于供水,在冬季和旱季还是以以色列北方地区的排水管,使水重新进入地下水层,提高了水的回归和再利用率,加速了以色列引、输、灌水的自动化水平。在美国,低压管道灌溉被认为是节水最有效、

投资最省的一种灌水技术,全美近一半大型灌区实现了管道化^[4,10],干旱地区的考契拉(CVWD)灌区、盐河(SRP)灌区等,灌区支渠以下的输水系统大部分均采取了地埋管道形式。美国还采用大口径地面可移管道,一般为快速连接铝制管材和塑料软管,通过带有闸管的管道输水,可便于进行波涌灌溉。日本早在 20 世纪 80 年代,就有一半以上的新建渠系实现了管道化^[10]。旧灌区改造中发展管道输水技术也很受一些国家的重视,如加拿大伯塔灌区,灌溉水利用率由改造前的 35%~60% 提高到 75%,澳大利亚的伦马克灌区,改建地下管道后节约灌溉用水 33%。

在我国“七五”期间,低压管道输水灌溉技术被列入重点科技攻关项目,在管道管材及配套装置的研制上取得了一批成果。平原井灌区、渠灌区和提水灌区管道输水灌溉技术得以广泛应用,应用推广面积约 520 万 hm^2 ^[11]。在自流灌区,采用大口径低压管道代替明渠输水已开展实验研究。现阶段,主要存在投资、设备质量、配套和运行管理等问题,仍需加大研究力度。

1.4 渠道防渗衬砌技术

渠道衬砌仍是大多数国家灌区改造中用以提高大型渠道水利用率的主要措施。在美国、意大利和日本,刚性衬砌材料尤其是混凝土衬砌应用较为广泛,取得了较好的节水效果^[10]。钢丝网水泥由于具有低渗透性、耐久性好、维修费用低等优点,近来得到较大发展,成为代替常规混凝土的衬砌材料。另外,膜料和土料也是渠道衬砌常用材料,因各自不同的应用优势而具有各自发展的良好前景。渠道输水仍是我国农业灌溉的主要输水形式,自 1998 年实施大型灌区配套节水改造以来,全国累计衬砌干支渠道 5300 多 km,配套改造建筑物 3.8 万座,2002 年节水 110 亿 m^3 。根据渠道土壤冻层厚度、渠道流量大小、运行情况和地下水位情况,我国实践发展了不同的防渗措施,如砌石、混凝土预制板、塑料薄膜及塑料薄膜加保护层的复式结构、U 形渠等。

1.5 劣质水灌溉技术

将工业和生活污水用于农业灌溉正随着水资源的日益紧缺而备受各国关注,以色列、美国、澳大利亚和日本均发展了比较成熟的污水灌溉技术^[12~14]。以色列有 57% 的污水经过净化后用于农业灌溉和园林草地灌溉,预计到 2010 年,以色列全国 1/3 的农业灌溉将使用处理过的废污水,这些污水经加工成净水,通过国家输水管道输送,采用滴灌等先进灌水技术对作物进行灌溉。希腊则将处理过的污水用于棉花和谷物作物的灌溉,取得了良好的经济效益。日本在污水处理后用于农业方面较先进,

已建成的 2000 个污水处理厂多数采用日本农村污水处理协会研制的 ARUS 小型污水处理系统, 保证处理过的废污水各项指标均达到污水处理水质标准. 美国在 20 世纪 50 年代初就开展了对适宜灌溉水质进行评价的工作, 建立了相应的灌溉水质评价方法, 并不断进行更新和改进, 美国的劣质水灌溉发展了作物轮作、咸、淡水轮灌, 小定额多次灌等方法.

我国目前已采用了包括雨水利用、劣质水和回归水重复利用等新水源开发技术来弥补灌溉水的不足^[13,15], 其中污水灌溉面积占全国灌溉面积的 7.3% (1998 年), 主要集中于水资源严重缺乏的黄、淮、海、辽四大流域. 由于污水灌溉的管理体系严重滞后, 与污水灌溉相关的理论和技术研究不足, 污水处理能力相对薄弱, 污水灌溉技术落后等使污水灌溉中存在着严重的隐患, 一些地区污水灌溉直接导致了粮食污染、土壤污染及地下水污染, 需要引起足够的重视.

1.6 节水灌溉管理技术

建立现代化的灌溉管理技术体系, 应用高、新技术使农业灌溉向精准化方向发展是当今发达国家的普遍趋势. 在美国、以色列等国^[16], 空间信息技术和计算机模拟技术被大量用于监测和预报作物水分和土壤墒情, 灌溉预报技术得到迅速发展, 一些具有代表性的节水灌溉预报程序也广泛应用于灌区水管理. 美国的大型灌区均设有调度中心, 随时掌握各渠道的位置、输配水情况以及各闸门的水位流量、闸门启闭等情况, 并结合遥感技术进行灌溉情况调查, 及时准确反映灌溉效果, 此外, 流域的天气情况、河湖水位、水质等信息均可传输到监测中心, 用于辅助灌溉决策. 日本通常在一个水系上设中央管理站, 采用电子计算机和遥控装置对各级渠道和设备进行集中监控, 并发布指令, 自动启闭闸门和水泵以进行科学的分水和配水. 法国普罗旺斯渠道工程可实现中央控制室对整个工程的自动监测控制, 4 800 个信息采集点对水位、流量、闸门开度和水质进行遥控, 15 min 便可自动采集一次数据.

在我国干旱与半干旱地区, 土壤墒情监测预报工作广为重视, 但以人工作业记录测量为多, 各灌区限于设备和仪器的原因, 没有准确测定土壤墒情、土壤温度等信息的能力. 自 20 世纪 50 年代起, 我国便对主要农作物需水量、需水规律、灌溉制度进行了较多的试验研究, 绘制了全国主要农作物需水量等值线图, 建立了全国灌溉试验资料数据库^[17]. 最近几年, 又逐步趋向于节水高效灌溉制度, 如非充分灌溉制度、调亏灌溉制度等的研究和应用. 目前我国灌区现代化集成、配套灌溉管理技术水平较低, 灌区缺乏

数据自动收集系统和数据传输系统, 全灌区测试数据参差不齐, 很难作汇总分析. 控制系统方面已开发的产品多为面向温室的灌溉施肥系统^[18], 还没有形成规模大、应用范围广的成套灌溉控制产品. 高效农业和精准农业要求的水资源高效利用体系尚处于研究示范阶段. 因而国内专家提出需建设国家节水灌溉试验与监测网络的建议, 以期提升我国的灌溉管理水平, 提高灌溉水利用效率, 改善生态环境^[17].

1.7 水稻节水灌溉技术

我国对水稻节水灌溉技术的研究始于 20 世纪 80 年代, 发展迅速. 目前, 各地根据不同的自然条件, 在试验研究基础上, 发展了水稻控制灌溉技术, 薄露灌溉技术, 薄、浅、湿、晒灌溉技术, 水稻叶龄模式灌溉、早育稀植以及覆膜节水灌溉等技术^[19]. 实践应用中, 如在广西推广的薄、浅、湿、晒灌溉技术, 山东、江苏和宁夏引黄灌区大面积推广的水稻控制灌溉技术均取得了显著的经济和社会效益. 此外, 国内专家在 SPAC 系统中水、热、溶质传输机理和作物对水分亏缺响应机制、作物水分光合生理机理以及水分生产函数等基础理论研究方面取得的大量成果也对水稻节水灌溉技术的进一步发展提供了重要依据. 但是, 大水漫灌、过度淹灌等现象仍广泛存在于我国的稻田灌溉中, 据统计^[20], 我国西南地区稻田灌溉用水量为 9 000 ~ 13 500 m³/hm², 西北地区为 15 000 ~ 22 500 m³/hm², 远远高于当地水稻实际需要灌水量. 随着节水观念深入人心以及水稻节水灌溉技术的进一步推广和发展, 这一局面必将得以改善. 国外也有一些国家发展了比较成熟的水稻节水灌溉技术, 例如在日本, 水稻节水灌溉技术主要有强调前期以“露”为主、中后期浅水灌溉结合的原正灌溉法和地膜覆盖旱作等节水技术. 印度多采用水稻间歇灌溉技术^[21]. 埃及则利用缩短水稻生长期的方法达到节水目的^[22].

2 对我国节水灌溉技术发展的几点认识

2.1 因地制宜推广节水灌溉技术

a. 地面灌溉因其渗漏费水、灌水不均匀等缺点, 一度被认为是没有发展前途、落后的灌水技术. 近几年来, 国外的经验和国内的大量试验和示范结果表明, 改进的地面灌水方法如果合理应用, 其田间水有效利用系数可达 0.9 以上^[2]. 目前国内主要应用了优化的畦灌技术, 包括小畦灌、长畦分段短灌、宽浅式畦沟结合灌等; 节水型沟灌技术, 包括封闭式直形沟灌、方形沟灌、细流沟灌、沟畦灌等; 地膜覆盖灌水技术; 波涌灌技术以及土地平整、少耕免耕等田间管理技术, 还开展了水平畦灌这一先进的地面灌

溉技术的田间灌溉试验研究.在我国,地面灌溉占总灌溉面积的 97% 以上,该技术因其不需要能源、投资少、易操作等优点,很符合我国现阶段实际情况,因而应得到合理推广利用.

b. 国内外的微灌在总灌溉面积中占有的比重都不算大,主要是受微灌自身特点的限制^[7].微灌的用水效益虽高,但是以科技含量较高的装备和大量消耗管材为代价的.在我国这样以地面灌溉为主,农业生产水平较低,粮食生产任务很重的国家里,不可能将微灌作为主要的节水灌溉方法加以全面推广,其推广重点主要在干旱缺水地区或作物种类为经济价值较高的花卉、蔬菜等,主要用于提高作物质量,增强产品的竞争力.喷灌面积在各国的灌溉总面积中所占比重较大,应用也较广泛.其节水、省事省力、提高农产品品质等优点得到广泛认可,但喷灌本身的投资相对高,发展规模多取决于国家或地区的经济实力,对我国这样一个经济基础相对薄弱的发展中国家而言,更应首先注重喷灌系统的节水效果、工作可靠性和劳动力技术水平等方面.另外,喷灌质量还受到自然条件、气候条件等的制约,只注重优点而不论条件地加以盲目应用是不科学的.

2.2 研究开发先进的信息化自动控制管理系统

将计算机、3S 技术、太阳能等现代化高科技应用于灌溉领域,对农作物土壤墒情、气候等进行监测预测,并根据监控结果,采用精确的灌溉设施对作物进行严格有效地施肥和灌水,是世界节水灌溉技术发展的方向^[9,10].我国目前在这方面的开发研究力量仍显薄弱,整体水平不高,仍局限在单项技术的研究和推广,尤其在灌溉管理技术方面,如灌溉实时预报、灌溉自动化控制等实际的技术水平和科技成果转化应用水平还很低.面对 21 世纪的数字农业时代,单凭单项技术是不可能满足参与国际竞争所需的高效农业和精准农业的要求的.因而在已有的研究工作基础上,认真学习、吸收国外先进的灌溉技术,开发我国的信息化节水灌溉系统,尤其是目前发达国家普遍采用而我国刚刚开始应用的遥感、地理信息系统、全球定位系统等技术,是摆在我们面前一项长期的挑战和一项紧要的任务.

2.3 加强研究灌溉引发的生态环境问题

没有灌溉,就没有农业,人们越来越重视节水灌溉的成效,却忽略了随之而来的生态环境问题.渗漏水引起的地下水位上升,导致土壤次生盐碱化;地下水位持续下降,引起草场退化、树木死亡和沙化威胁;河流上游一味扩大灌溉面积,致使下游河道断流(黄河、塔里木河),土地沙化等.华北平原地区由于地下水严重超采致使地下水位平均每年下降 1 m 多,大

面积地下漏斗区 56 个,漏斗总面积 8.2 万 km²,渤海湾地区因地下水下降已有 1450 km² 地区受海水入侵影响^[11].我们在认真地认识和解决这些问题的同时也需要考虑如何更好、更合理地利用、宣传和推广节水灌溉技术.

2.4 重视用水户参与灌溉管理

目前很多国家多趋向于将灌溉工程的运行、维护和管理交给地方性的非盈利组织,此类组织一般由灌溉工程受益区用水户组成,或者用水户在其中占有重要的地位.灌区运行和维护责任的转移,导致用水户必须支付灌溉用水的实际成本,促使用水户自觉节水.如日本的田间工程建成之后便交由受益农户组织的团体^[23],即土地改良区管理,所需经费也由受益农户分担.另外印度、意大利等国^[10]也都十分重视农民参与管理和发挥作用,节约灌溉用水,扩大灌区面积,改进灌溉技术.我国的灌溉水管理大部分显得比较粗放^[2],节水效益与用水户自身利益相脱节,节水与否与交多少水费无直接关系,农民为谋求土地的最大受益,要求尽可能多的灌溉用水,造成农业灌溉用水的巨大浪费.应建立相关政策调动用水户的自觉节水积极性,以促使我国的农业灌溉“以供定需”局面的形成.

3 结 语

21 世纪我国将面临更多挑战、更多竞争,为使农业不再成为我国经济发展的“瓶颈”,需要积极认真做好我国的节水灌溉工作,虚心学习国外先进的灌溉技术和方法,尤其是高科技在农业领域的应用,发展有中国特色的现代化高效农业.本文在分析我国节水农业面临的严峻形势和对比国内外节水灌溉技术的基础上,对我国的节水灌溉技术发展现状提出几点认识,仍有许多问题需要进一步研究.

参考文献:

- [1] 李发东,李隆海.我国农业水资源可持续利用面临的问题与对策[J].节水灌溉,2001(4):1~3.
- [2] 翟浩辉.当前发展节水灌溉应注意的几个问题[J].农村水利水电,2002(11):1~3.
- [3] 张岳.全国建设小康社会的水利发展目标.水利水电科技进展,2003,23(2):1~5.
- [4] 薛克宗.国内外压力管道灌溉发展概况[J].节水灌溉,2003(1):35~37.
- [5] Dechmi F, Playan E, Faci T M. Analysis of an irrigation district in northeastern Spain[J]. Agricultural Water Management, 2003, 16(2):93~109.
- [6] 余根坚,李久生,龚时宏,等.喷微灌技术发展的影响因素分析[J].节水灌溉,2002(5):1~4. (下转第 60 页)

质量检测方法技术的研究实践方面,孜孜不倦探求,取得不少成果.虽然如此,仍不能完全满足快速无损检测的要求,仍有许多值得我们继续努力的地方.

4 结 语

对截渗墙质量进行快速无损检测时间虽然不长,但近年来全国各有关单位已经进行了大量相关研究与实践,取得了一些成果.但由于截渗墙自身的特殊性,如何针对截渗墙的特点,优化检测方案,高效优质地完成检测任务,仍旧是一个值得深入研究的课题.根据近年来从检测工作中获得的研究及实际经验,笔者认为,采用以可控源音频大地电磁测深法为主,配合地震映像法、垂直反射法或其他方法进行地面检测,以弹性波工程 CT 方法作为详测手段,条件允许时,用同位素示踪进行墙体渗漏或渗透系数检测的方案是比较合理的.因为弹性类方法(主要是体波)探测中,墙体与周围介质波速差异大,受体积影响小,但垂直声波反射法和多波地震映像法的探测深度有限且只能做定性分析,在一定探测深度内具有较好的效果.电磁法中可控源音频大地电磁测深法能够克服近场、地形、屏蔽、体积效应等不利

因素,但可控源音频大地电磁测深法对截渗墙接缝和开叉等缺陷的分辨率有限.从探测效果和效率两方面考虑,垂直声波反射法、多波地震映像法、电磁法等方法适合对截渗墙进行普查性质的快速检测,遇到重点可疑或发现异常的区段,再有针对性地布置少量钻孔并采用精度高、信息量大的弹性波工程 CT 技术及获取墙体渗透系数的有效手段——同位素示踪技术对其可靠性进行检测,可以有效提高截渗墙质量检测的准确性.继续各种方法的深化研究是今后一段时间内该技术的发展趋势.

参考文献:

- [1] 刘江平.截渗墙质量检测中的综合浅层地震技术[J].中国地球物理学会年刊,2000:136
- [2] 杜国平,郑喜莲,王律,等.航空定向技术在地下水流流向中的应用研究[J].南京航空航天大学学报,2000,32(4):483~486.
- [3] 冷元宝.工程 CT 技术在工程勘察中的应用[A]. '98 水利水电地基与基础工程学术交流会论文集编辑委员会. '98 水利水电地基与基础工程学术交流会论文集[C]. 天津:天津科学技术出版社,1999.520~524.
(收稿日期:2003-10-17 编辑:熊水斌)
- [7] 李光永.世界微灌发展态势[J].节水灌溉,2001(2):24~27.
- [8] Thompson T L, Doerge T A. Subsurface drip irrigation and fertigation of broccoli[J]. Soil Science Society of America Journal, 2002, 66(1):186~192.
- [9] 冯广志.关于微灌技术与推广的几个问题[J].节水灌溉,2000(2):6~8.
- [10] 吴景社.国外节水灌溉技术发展现状与趋势[J].世界农业,1994(1):20~30.
- [11] 黄修桥,高峰,王宪杰.节水灌溉与 21 世纪水资源的持续利用[J].灌溉排水,2001,20(3):1~5.
- [12] 古智生.以色列水资源的开发与利用[J].节水灌溉,1999(6):34~35.
- [13] 刘润堂,许建中.我国污水灌溉现状、问题及其对策[J].中国水利,2002(10):123~125.
- [14] Tsadilas C D, Vakalis P S. Economic benefit from irrigation of cotton and corn treated wastewater[J]. Water Science and Technology: Water Supply, 2003, 3(4):223~229.
- [15] 张祖新.我国北方雨水集蓄与节水灌溉技术[J].节水灌溉,2000(3):13~14.
- [16] Renato S F, Fibeiro R. Fuzzy logic based automated irrigation control system optimized via neural networks[D]. Chattanooga: The University of Tennessee, 1998.
- [17] 康绍忠.关于建设国家节水灌溉试验与监测网络的建议[J].中国农村水利水电,2002(12):18~22.
- [18] 张兵,袁孝其,成立.节水灌溉自动化技术的发展及趋势[J].灌排机械,2003,21(2):37~41.
- [19] 水利部农村水利司.水稻节水灌溉技术[M].北京:中国水利水电出版社,1998.
- [20] 金千瑜,欧阳由男.中国农业可持续发展中的水危机及其对策[J].农业现代化研究,2003,24(1):23~27.
- [21] Khepar S D, Yadav A K, Sondhi S K. Water balance model for paddy fields under intermittent irrigation practices[J]. Irrigation Science, 2000, 19(4):199~208.
- [22] Oad Ramchand, Azim RAjab. Irrigation policy reforms for rice cultivation in Egypt[J]. Irrigation and Drainage Systems, 2002, 16(1):15~31.
- [23] 关光男.日本农业用水的现状[J].灌溉排水,1999,18(4):60~63.
(收稿日期:2003-10-22 编辑:熊水斌)

