

DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2012.07.007

农业节水措施对地下水涵养的作用及其敏感性分析*

彭致功 刘 钰 许 迪 王 蕾

(中国水利水电科学研究院流域水循环模拟与调控国家重点实验室,北京 100038)

【摘要】 以北京市大兴区为研究区,利用经校验的水平衡模型,通过调整灌溉满足率和灌溉水利用系数,探讨了不同农业节水措施对增加地下水补给量和减少地下水开采量的作用及其敏感性。结果表明,不同水文年型下,降低灌溉满足率及提高灌溉水利用系数都能减少地下水开采量,且降低灌溉满足率对减少地下净开采量的作用更为显著,有利于区域地下水涵养。在参数取值范围内,地下水净开采量对灌溉满足率的敏感性较大,而地下水补给量对灌溉水利用系数的敏感性较高。与提高灌溉水利用系数相比,对资源性缺水区域,采用先进节水技术,适度降低区域灌溉满足率,对促进水资源持续有效利用及加大地下水涵养具有更显著的效果。

关键词: 农业节水措施 灌溉满足率 灌溉水利用系数 地下水开采量 地下水补给量 相对敏感度

中图分类号: S278 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2012)07-0036-06

Effect of Agricultural Water-saving Measures on the Quantity of Groundwater Extraction and Recharge and Its Sensitivity

Peng Zhigong Liu Yu Xu Di Wang Lei

(State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin,
China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China)

Abstract

Daxing distict of Beijing was selected as the study area, the effect of agricultural water-saving measures on the quantity of groundwater extraction and recharge was studied by rejusting irrigation water supply rates and irrigation water supply rates based on the calibrated water balance model. The main results were as follows: when irrigation water supply rates decreased and water use efficiency increased, groundwater extraction was decreased significantly in different hydrological years. When irrigation water supply rates decreased, the net groundwater extraction was decreased much more than when irrigation water use efficiency increased. The sensitivity analysis showed that irrigation water supply rate is much more sensitive variable to the groundwater extraction. On the other hand, irrigation water use efficiency is much more sensitive to groundwater recharge. Within the value of index level selection, the variation of irrigation water supply rate is much more sensitive to groundwater extraction and exchange. With the increace of irrigation water use efficiency, the sensitivity to groundwater extraction and exchange is decreased. Therefore, compared with the increase of irrigation water use efficiency, the decrease of regional irrigation water supply rates is much better to promote regional water resource continuously and effectively as well as to reduce groundwater extraction for water shortage region under any water-saving condition.

Key words Agricultural water-saving measures, Irrigation water supply rates, Irrigation water use efficiency, Groundwater extraction, Groundwater exchange, Sensitivity

收稿日期: 2011-08-05 修回日期: 2011-09-21
* 国家重点基础研究发展计划(973 计划)资助项目(2006CB403405)、农业部作物需水与调控重点开放实验室基金资助项目(CWRR201004)和水利部公益行业专项(201001068-2)
作者简介: 彭致功,高级工程师,博士,主要从事农业水管理研究,E-mail: pengzhg@iwhr.com
通讯作者: 刘钰,教授级高级工程师,博士,主要从事节水灌溉理论与技术研究,E-mail: liuyu@iwhr.com

引言

水资源短缺已成为制约北京社会经济发展的瓶颈。为满足日益增长的用水需求,北京长期超采地下水,使地下水位持续下降;与 1980 年末相比,2009 年末地下水位下降 16.83 m,年均下降 0.58 m^[1]。地下水具有有限性和不可再生性特点,长期超采不仅导致严重的地面沉降等地质问题,还引发一系列环境问题,使战略储备水量减少直至危及居民饮水安全。农业作为北京城区生态依托和屏障,其用水量主要来自开采地下水。相关研究表明,大力推广农业节水措施、减少地下水开采量,能基本控制地下水位大幅度下降,从而缓解平原区的地下水危机^[2]。当前农业节水工作多注重节水措施实施后源头取水量减少及作物水分生产率提高等方面,且大多研究成果集中于田间尺度上作物与水分响应关系方面^[3-9],而对于大区域尺度下农业节水措施对地下水涵养的作用等方面的探讨较少。

本文以北京市大兴区为研究区,利用经率定和验证后的 CPSP 模型为技术支持,并依据该模型结构特点,通过调整灌溉满足率及灌溉水利用系数,探讨不同农业节水措施对增加地下水补给量和减少地下水开采量的作用及其敏感性。

1 研究区域与方法

1.1 研究区概况

选定北京市大兴区为研究区,该区全境为平原,气候条件等方面与华北地区绝大多数区域相近或一致,并且在井灌区农业节水方面具有一定代表性,该区域属中纬度暖温大陆性季风气候,多年平均气温 12℃,多年平均水面蒸发量 1 021.0 mm;多年平均降水量 472.0 mm,降水量年际变化较大,季节分布不均,主要集中在 6~9 月份,该区域供水基本来源于地下水。由于降水量从 1976 年至今呈减少趋势,其中 1980~1994 年、1999~2005 年为连续枯水年,所以降水对地下水补给能力下降;同时因社会发展工业及居民生活用水持续增加,造成自 20 世纪 80 年代以来该区域地下水位总体上呈下降趋势,区域用水矛盾非常突出。

1.2 CPSP 模型概述

CPSP 模型由国际灌排委员会(ICID)开发,适用于综合考虑人类对水的各种需要,特别是灌溉发展和土地利用变化对区域水平衡的影响,该模型包含自然模块、人类活动模块、地表水模块、地下水模块及需水模块等。模型参数包括:植被参数、土壤水

分参数、地表水及地下水资源转换参数等,可依据模型设定的缺省值对参数进行假定,然后利用已有的气象水文观测数据,反演确定。本文利用研究区数字高程模型(DEM)和实际人工矢量河网数据,采用 GIS 技术将研究区分成 5 个子流域,结合 2004 和 2005 年的 ET(蒸发蒸腾量)数据、地下水蓄变量对模型进行校验表明,不同土地利用类型遥感 ET 与计算 ET 间的 Nash 效率系数大于 0.92;地下水蓄变量的观测值与计算值间的 Nash 效率系数大于 0.55,率定后 CPSP 模型能用于模拟作物腾发过程及地下水变化趋势,模型介绍及校验过程参照文献[10]。

1.3 研究方法

1.3.1 典型年

对 1976~2005 年降水量进行频率分析,先按矩法计算年降水量的统计参数,如多年平均降水量、变差系数和离差系数等,再以适线法确定采用值,其中理论频率曲线选用皮尔逊Ⅲ分布,适线法以中等和较小降水量数据拟合较好为原则,在变差系数为 0.31 及离差系数为 1.09 时,得到不同频率下年降水量,即丰水年(25%)为 551.29 mm、平水年(50%)为 446.03 mm、干旱年(75%)为 364.60 mm、特旱年(90%)为 309.52 mm、多年平均为 471.98 mm。根据不同频率下的年降水量,选择与其降水量接近的 3 年降水月分配比例系数均值确定各频率下降水的月际分布。

1.3.2 地下水净开采量

地下水净开采量指某时段内该区域地下水经过抽取、使用、蒸发、回补等水文循环过程之后的消耗量,能直接反映地下水位储量的变化,可用地下水开采总量扣除地下水补给总量进行计算。

1.3.3 敏感性分析

采用相对敏感度来评价农业灌溉用水量、农业耗水量及区域地下水位对灌溉满足率及灌溉水利用系数的敏感程度,相对敏感度越大,则响应变量对该指标的敏感性越强。相对敏感度计算公式为

$$S_{RD} = \frac{|Y_{i+1} - Y_i| X_i}{|X_{i+1} - X_i| Y_i} \tag{1}$$

式中, X_{i+1} 、 X_i 分别为第 $i+1$ 和 i 个设定水平下指标的取值; Y_{i+1} 、 Y_i 分别为相应指标值 X_{i+1} 、 X_i 由 CPSP 模型模拟得到的响应变量值。研究灌溉满足率及灌溉水利用系数的变化对地下水涵养的敏感性时,灌溉满足率取值水平为 0、0.1、0.2、0.3、0.4、0.5、0.6、0.7、0.8、0.9、1.0;灌溉水利用系数的取值水平为 0.60、0.65、0.70、0.75、0.80、0.85、0.90、0.95。

2 结果分析

2.1 调整灌溉满足率

2.1.1 地下水采补平衡

由图 1 可看出,降低灌溉满足率,能减少地下水开采量,在灌溉水利用系数不变条件下使灌溉回归地下水量下降,造成地下水补给量减少。在地下水灌区,与对地下水补给量影响相比,降低灌溉满足率对地下水开采量影响更显著,所以降低灌溉满足率能显著减少地下水净开采量,起到抬升地下水位或者减缓地下水超采的作用。降低灌溉满足率对地下

水采补平衡的作用因降雨多寡而呈一定差异,与丰水年相比,降低灌溉满足率对干旱年地下水采补量影响更显著。当灌溉满足率降低 0.1,与丰水年相比,特早年地下水开采量相对减少量为 0.187 亿 m^3 ,地下水补给量的相对减少量为 0.041 亿 m^3 ,地下水净开采量的相对减少量为 0.146 亿 m^3 。由此可见,对于资源性缺水的地下水灌区,若采用亏缺灌溉技术适度降低灌溉满足率,虽在一定程度上会减少灌溉回归水对地下水的补给量,但能明显减少地下水净开采量,对于涵养地下水资源能起到重要作用,特别是在干旱年份能有效缓解区域地下水超采压力。

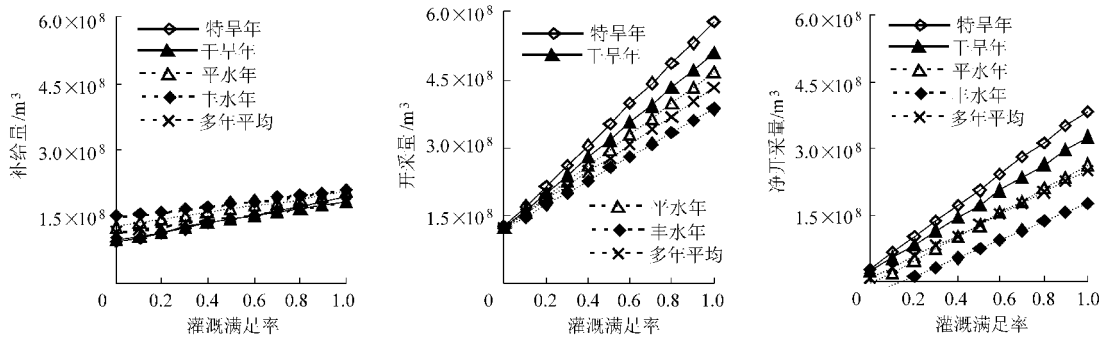


图 1 灌溉满足率对地下水补给量、开采量及净开采量的影响

Fig.1 Effect of different irrigation water supply rates on groundwater supply, groundwater extraction and net groundwater extraction

2.1.2 敏感性分析

由图 2 可看出,随着灌溉满足率的降低,各水文年地下水补给量及开采量的敏感度降低。随着灌溉满足率的降低,在丰水年与平水年地下水净开采量的相对敏感度呈增加趋势;而在干旱年,地下水净开采量的相对敏感度呈减少趋势。通过比较地下水补给量、地下水开采量及地下水净开采量的相对敏感度随灌溉满足率的变化情况知,地下水净开采量对灌溉满足率变化的敏感度最大,丰水年灌溉满足率在 0~0.1 范围内最敏感;其次为地下水开采量,在多年平均降水条件下相对敏感度达 0.72;而地下水补给量对灌溉满足率变化的相对敏感度最小,在多年平均降水条件下相对敏感度达 0.38。不同降水

年型,地下水采补量对灌溉满足率变化的相对敏感度存在一定差异,与丰水年相比,在干旱年地下水补给量及地下开采量对灌溉满足率变化的相对敏感度高;而地下水净开采量对灌溉满足率变化的相对敏感度与丰水年相比,在干旱年相对敏感度较低。所以,适度降低灌溉满足率,不仅能在干旱年缓解区域地下水超采的压力,也能在丰水年进一步加大区域地下水回补力度。

2.2 调整灌溉水利用系数

2.2.1 地下水采补平衡

由图 3 可看出,提高灌溉水利用系数,能减少地下水开采量,地下水补给量显著减少,对减少地下水净开采量也有一定效果。在不同降水条件下,提高

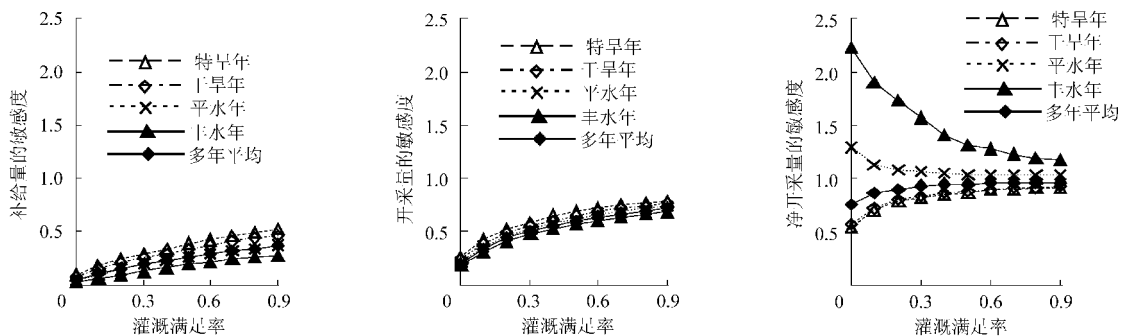


图 2 地下水采补量对灌溉满足率变化的敏感性

Fig.2 Sensitivity of the quantity of groundwater extraction and recharge to the variation of irrigation water supply rates

灌溉水利用系数对地下水采补平衡的作用呈一定差异;与丰水年相比,提高灌溉水利用系数对干旱年地下水采补量影响更显著。当灌溉水利用系数提高 0.1,与丰水年相比,在特旱年下地下水开采量相对减少量为 0.103 亿 m^3 ,地下水补给量的相对减少量

为 0.091 亿 m^3 ,地下水净开采量的相对减少量为 0.012 亿 m^3 。另外,各降水频率年下提高灌溉水利用系数能显著减少地下开采量及补给量,但对减少地下水净开采量作用不明显。

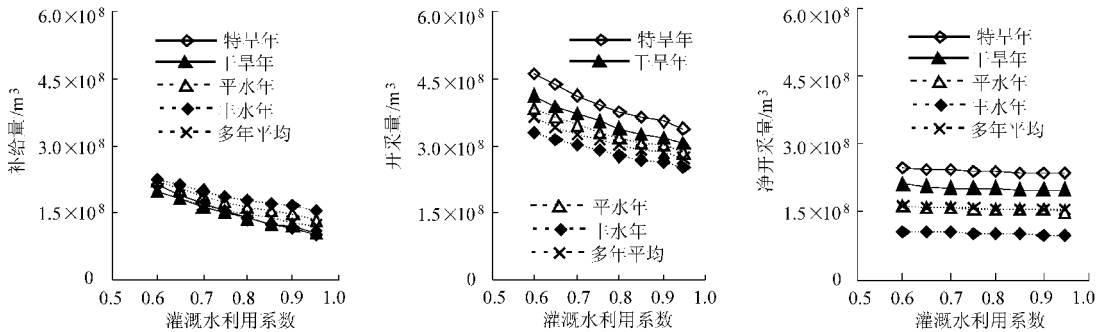


图 3 灌溉水利用系数对地下水补给量、开采量及净开采量的影响

Fig. 3 Effect of different irrigation water use efficiency on groundwater supply, groundwater extraction and net groundwater extraction

2.2.2 敏感性分析

地下水采补量对灌溉水利用系数变化的敏感性见图 4,随着灌溉水利用系数的提高,各水文年下地下水开采量及净开采量的相对敏感度呈减小趋势,而地下水补给量的相对敏感度呈增加趋势。通过比较地下水补给量、地下水开采量及地下水净开采量的相对敏感度随灌溉水利用系数的变化情况可知,地下水补给量对灌溉水利用系数的敏感度最大,其中灌溉水利用系数在 0.85~0.90 范围内最敏感,在多年平均降水条件下相对敏感度为 1.04;其次为地

下水开采量,在多年平均降水条件下相对敏感度为 0.61;而地下水净开采量对灌溉水利用系数变化的敏感度最小,在多年平均降水条件下相对敏感度仅为 0.16。不同降水年型下,地下水采补量对灌溉水利用系数变化的相对敏感度呈一定差异,与丰水年相比,地下水补给量与地下水开采量对灌溉水利用系数变化的相对敏感度在干旱年较高;而与丰水年相比,地下水净开采量对灌溉水利用系数变化的相对敏感度在干旱年较低。

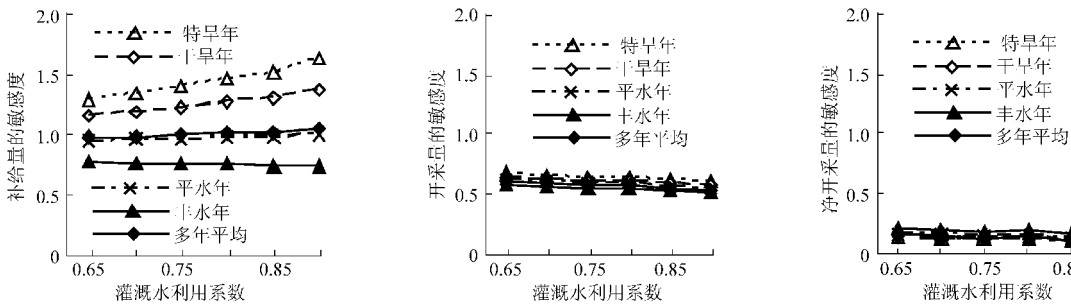


图 4 地下水采补量对灌溉水利用系数变化的敏感性

Fig. 4 Sensitivity of the quantity of groundwater extraction and recharge to the variation of irrigation water use efficiency

2.3 不同节水措施对区域地下水涵养的作用及其敏感性的差异

2.3.1 地下水采补平衡

不同水管理模式对各频率年下地下水补给量、地下水开采量及地下水净开采量的影响如表 1 所示。不同降水频率年,灌溉满足率降低 0.1 或灌溉水利用系数提高 0.1 对减少地下水开采量都具有显著作用,其中降低灌溉满足率对减少地下水开采量的作用稍大;与灌溉满足率降低 0.1 相比,提高 0.1 的灌溉水利用系数对减少地下水补

给量作用较大,但对减少地下水净开采量作用很小。提高灌溉水利用系数,减少了地下水开采量,但亦减少了地下水补给量,二者联合作用使地下水净开采量减少不明显;而降低灌溉满足率,能显著减少地下水开采量,但对地下水补给量减少作用影响不明显,二者联合作用使地下水净开采量显著降低。为此,针对资源性缺水的地下水灌区,与提高灌溉水利用率相比,采取降低灌溉满足率节水管理模式对提升区域地下水位或减缓地下水超采趋势更有效。

表 1 不同用水管理方式对地下水采补平衡的影响

Tab.1 Effect of different water management measures on the balance of groundwater extraction and recharge

节水措施	降水年型	补给减少 量/m ³	开采减少 量/m ³	净开采 减少量/m ³
灌溉满足率 下调 0.1	特旱年	1.00 × 10 ⁷	4.54 × 10 ⁷	3.54 × 10 ⁷
	干旱年	8.6 × 10 ⁶	3.87 × 10 ⁷	3.01 × 10 ⁷
	平水年	7.6 × 10 ⁶	3.43 × 10 ⁷	2.67 × 10 ⁷
	丰水年	5.9 × 10 ⁶	2.67 × 10 ⁷	2.08 × 10 ⁷
	多年平均	6.9 × 10 ⁶	3.11 × 10 ⁷	2.42 × 10 ⁷
灌溉水利用 系数提高 0.1	特旱年	3.14 × 10 ⁷	3.54 × 10 ⁷	4.0 × 10 ⁶
	干旱年	2.68 × 10 ⁷	3.02 × 10 ⁷	3.4 × 10 ⁶
	平水年	2.42 × 10 ⁷	2.72 × 10 ⁷	3.0 × 10 ⁶
	丰水年	1.98 × 10 ⁷	2.23 × 10 ⁷	2.5 × 10 ⁶
	多年平均	2.23 × 10 ⁷	2.51 × 10 ⁷	2.8 × 10 ⁶

表 2 多年平均降水条件下地下水采补量对各水管理方式的最大相对敏感度

Tab.2 Maximum sensitivity of the quantity of groundwater extraction and recharge to different water management measures under mean annual precipitation

水管理方式	补给量		开采量		净开采量	
	最大敏感度	最敏感范围	最大敏感度	最敏感范围	最大敏感度	最敏感范围
调整灌溉满足率	0.38	0.9 ~ 1.0	0.72	0.9 ~ 1.0	0.97	0.9 ~ 1.0
调整灌溉水利用系数	1.04	0.85 ~ 0.90	0.61	0.60 ~ 0.65	0.16	0.60 ~ 0.65

性较大,而地下水补给量对灌溉水利用系数的敏感性较高。

3 讨论

(1)降低灌溉满足率能显著减少地下水净开采量,利于涵养区域地下水。与丰水年相比,降低灌溉满足率对干旱年地下水采补量影响更显著。敏感度分析表明,对灌溉满足率变化的敏感度最大是地下水净开采量,依次为地下水开采量及地下水补给量;与丰水年相比,在干旱年地下水补给量及地下水开采量对灌溉满足率变化的相对敏感度高,而地下水净开采量对灌溉满足率变化的相对敏感度稍低。所以,适度降低灌溉满足率,不仅能在干旱年缓解区域地下水超采的压力,也能在丰水年进一步加大区域地下水回补力度。

(2)提高灌溉水利用系数,能显著减少地下水开采量和补给量,但对减少地下水净开采量作用不明显,所以对涵养区域地下水作用不大;与丰水年相比,提高灌溉水利用系数对干旱年地下水采补量影响更显著。敏感度分析表明,对灌溉水利用系数变化敏感度最大的是地下水补给量,依次为地下水开采量及地下水净开采量;各水文年下地下水净开采

2.3.2 敏感性差异

表 2 给出了多年平均降水条件下地下水采补量对不同水管理方式的最大相对敏感度,以及相应的水管理方式所对应参数的取值范围。分析表明,与调整灌溉水利用系数相比,调整灌溉满足率对地下水开采量、地下水净开采量影响较大,对地下水补给量影响作用稍小。降低灌溉满足率,地下水开采量及地下水净开采量减少,地下水补给量下降,地下水采补量对其变化的相对敏感度下降。随着灌溉水利用系数提高,地下水开采量及地下水净开采量减少,地下水补给量减少;随着灌溉水利用系数取值增大,地下水开采量及净开采量的相对敏感度呈下降趋势,而地下水补给量的相对敏感度呈增加趋势。另外,通过比较地下水净开采量、地下水开采量及地下水补给量对不同水管理方式的敏感性发现,在参数取值范围内,地下水净开采量对灌溉满足率的敏感

量对灌溉水利用系数变化的敏感性,随着灌溉水利用系数的提高而呈减小趋势。为此,在节水改造效果较好的地区,若仍致力于渠系改造,即使能进一步提高区域灌溉水利用系数,也会由于地下水净开采量相对敏感度的降低而造成区域地下水采补平衡影响效果的减弱。

(3)与降低灌溉满足率相比,提高灌溉水利用系数能显著减少地下水补给量,但并不能有效减少地下水开采量与净开采量。敏感性分析表明,在参数取值范围内,地下水净开采量对灌溉满足率的敏感性较高,而地下水补给量对灌溉水利用系数的敏感性较高。可见,在任意节水条件的资源性缺水区域,采用先进节水技术以适度降低区域灌溉满足率,对促进区域水资源持续有效利用及加大区域地下水涵养,都具有明显效果。

4 结束语

以北京市大兴区为研究区,利用经校验的水平衡模型,探讨了不同农业节水措施对地下水涵养的作用及敏感性,研究表明:在资源性缺水的井灌区,提高灌溉水利用系数,加大源头取水量的节约量,地下水补给量也显著减少,二者共同作用使地下水涵

养作用不明显;适度降低灌溉满足率,能显著减少地下水量,避免地下水过度超采,利于促进区域水资源的良性循环。

参 考 文 献

1 北京水资源公报编委会. 北京水资源公报 2009[M]. 北京市水务局,2009.

2 李振声. 控制华北平原深层地下水超采与大力推广节水农业[J]. 中国科学院院刊, 2006, 21(5):367~368.
Li Zhensheng. Strengthening development of water-saving agriculture and control of the deep level groundwater overdraft [J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2006, 21(5):367~368. (in Chinese)

3 刘小刚, 张富仓, 杨启良, 等. 交替隔沟灌溉条件下玉米群体水氮利用研究[J]. 农业机械学报, 2011, 42(5):100~105.
Liu Xiaogang, Zhang Fucang, Yang Qiliang, et al. Group use of water and nitrogen on maize under alternative furrow irrigation [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(5):100~105. (in Chinese)

4 邵光成, 刘娜, 陈磊. 温室辣椒时空亏缺灌溉需水特性与产量的试验[J]. 农业机械学报, 2008, 39(4):117~121.
Shao Guangcheng, Liu Na, Chen Lei. Character of water demand and yield of space-time deficit irrigation for hot pepper in greenhouse [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(4):117~121. (in Chinese)

5 王洪源, 李光永. 滴灌模式和灌水下限对甜瓜耗水量和产量的影响[J]. 农业机械学报, 2010, 41(5):47~51.
Wang Hongyuan, Li Guangyong. Effect of drip irrigation model and irrigation start point on water consumption and yield of sweet melon[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010,41(5):47~51. (in Chinese)

6 张寄阳, 段爱旺, 申孝军, 等. 基于蒸发量的膜下滴灌棉花灌溉预警装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2010, 41(9):56~59, 89.
Zhang Jiyang, Duan Aiwang, Shen Xiaojun, et al. Design and experiment of scheduling irrigation device based on pan evaporation for drip irrigated cotton under plastic mulch [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(9):56~59, 89. (in Chinese)

7 代快, 蔡典雄, 张晓明, 等. 不同耕作模式下旱作玉米氮磷肥产量效应及水分利用效率[J]. 农业工程学报, 2011, 27(2):74~82.
Dai Kuai, Cai Dianxiong, Zhang Xiaoming, et al. Effects of nitrogen and phosphorus on dry farming spring corn yield and water use efficiency under different tillage practices [J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(2):74~82. (in Chinese)

8 赵娜娜, 刘钰, 蔡甲冰, 等. 双作物系数模型 SIMDual_Kc 的验证及应用[J]. 农业工程学报, 2011,27(2):89~95.
Zhao Nana, Liu Yu, Cai Jiabing, et al. Validation and application of dual crop coefficient model SIMDual_Kc [J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(2):89~95. (in Chinese)

9 张杰, 任小龙, 罗诗峰, 等. 环保地膜覆盖对土壤水分及玉米产量的影响[J]. 农业工程学报, 2010, 26(6):14~19.
Zhang Jie, Ren Xiaolong, Luo Shifeng, et al. Influences of different covering materials mulching on soil moisture and corn yield [J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(6):14~19. (in Chinese)

10 彭致功, 毛德发, 王蕾, 等. 基于遥感 ET 数据的水平衡模型构建及现状分析[J]. 遥感学报, 2011, 15(2):318~323.
Peng Zhigong, Mao Defa, Wang Lei, et al. Establishment of the regional water balance analysis model based on RS ET data and current situation analysis [J]. Journal of Remote Sensing, 2011, 15(2):313~317. (in English)

11 高胜国, 黄修桥, 贾艳辉, 等. 地下水与地表水联合调度智能监控系统[J]. 排灌机械工程学报, 2011, 29(6):542~546.
Gao Shengguo, Huang Xiugiao, Jia Yanhui, et al. Intelligent monitoring system for joint operation of surface water and groundwater[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2011, 29(6):542~546. (in Chinese)