排灌机械工程学报
Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering
2013 年 3 月 Mar. 2013 | 第 31 卷 第 3 期 Vol. 31 No. 3

doi:10.3969/j.issn.1674-8530.2013.03.015


彭世彰

灌区灌溉用水时空优化配置方法

彭世彰[1], 王莹[1,2], 陈芸[3], 高晓丽[1], 张和喜[4]
(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. 云南农业大学水利水电与建筑学院, 云南 昆明 650201; 3. 澳大利亚联邦科工组织水土研究所, 澳大利亚 堪培拉 2601; 4. 贵州省水利科学研究院, 贵州 贵阳 550000)

摘要: 将传统的灌溉水量在作物间的优化分配模型和建立的渠系工作制度多目标优化模型与地理信息系统相集成,提出了基于空间决策支持系统的灌区灌溉用水优化配置的新方法. 综合考虑了灌区内作物、土壤、气象站点、渠系布置的空间差异、年季间气象以及作物不同生育阶段对应参数的时间差异. 与传统优化方法相比,该方法可根据管理者对优化精度的要求,灵活选择优化尺度,同时,简化了求解时空优化配水问题的繁琐程度,结果表现形式更加丰富. 在此基础上建立的空间决策支持系统界面友好,运行效率高,可移植性和通用性强. 经实例验证,优化后的配水方案与原配水方案相比较,灌溉总用水量减少 29.6%,产量增加 24.3%,水分生产率提高 0.5 kg/m^3,灌溉净效益增加 16.8%. 优化后配水方案具有将有限的水资源向经济价值较高作物转移的趋势. 该方法为灌区灌溉用水优化配置提供了新思路.

关键词: 灌溉用水;优化配置;时空差异;空间决策;灌区管理
中图分类号: S277.9; TV93 **文献标志码**: A **文章编号**: 1674-8530(2013)03-0259-06

Method for optimal spatial and temporal allocation of water in irrigation districts

Peng Shizhang[1], *Wang Ying*[1,2], *Chen Yun*[3], *Gao Xiaoli*[1], *Zhang Hexi*[4]
(1. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 210098, China; 2. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering and Architecture, Yunnan Agricultural University, Kunming, Yunnan 650201, China; 3. CSIRO, Land and Water, Canberra 2601, Australia; 4. Guizhou Hydraulic Research Institute, Guiyang, Guizhou 550000, China)

Abstract: The optimization of allocation of water in irrigation districts is very important for improving irrigation water management and alleviating the pressure of irrigation water availability as well as maintaining agricultural sustainability. Therefore, a new method was proposed to optimize allocation of water in irrigation districts by combining the traditional optimization method, in which the model for optimal allocation of water among different crops is used, and the optimization model with a multi-objective function for canal scheduling as well as GIS. In this method, the spatial difference in crop, soil, meteorological station and canal network pattern and the temporal difference in water required by corps in various growth stages. Compared with the traditional optimization method, in the new method the number of optimization variables can be chosen flexibly according to the accuracy of optimization by an irrigation district manager. As a result of this, not only the optimization of allocation of water in irrigation districts was simplified but its results can be displayed in various ways. The decision support system for

收稿日期: 2012-10-22
基金项目: "十二五"国家科技支撑计划项目(2011BAD25B07); 水利部公益性行业科研专项经费项目(201201025)
作者简介: 彭世彰(1959—),男,上海黄浦人,教授,博士生导师(szpeng@hhu.edu.cn),主要从事节水灌溉理论与农田生态效应研究.
王莹(1982—),女,河北秦皇岛人,讲师,博士(通信作者,ying.wang2002@gmail.com),主要从事节水灌溉理论与灌区水管理研究.

optimization allocation of water established here has a friendly interface and high computational efficiency; further, it is transplantable and universal. The results of a case study have shown that the water productivity, crop yield and irrigation net benefit are increased by 0.5 kg/m^3, 24.3%, 16.8%, respectively, while the irrigation water volume is reduced by 29.6% after optimization. Additionally, a tendency that the limited water resources are allocated to high-value crops was shown in the optimized allocation of water. This approach provides a new way for spatial and temporal allocation of water in irrigation districts.

Key words: irrigation water distribution; optimization; temporal-spatial varieties; spatial decision; irrigation management

目前,水资源短缺已成为制约社会经济发展的主要问题,并且严重影响了农业生产的发展,如何用更少的水生产更多的粮食,已成为世界各国面临的非常紧迫的问题[1]. 然而,农业生产用水浪费现象严重,灌溉用水管理水平有待提高[2]. 大型灌区作物种植结构复杂、土壤类型不一、降雨分布不均、渠系配水效率不同,传统的配水方法难以满足灌区灌溉用水时空配置最优的需求.

Cakr 等[3]基于田间试验并运用作物水分生产函数,建立了不同灌溉可供水量情况下、不同生育期烤烟的灌溉决策模型. Zhang 等[4]将土壤水量平衡模型、作物物候模型、根长生长模型、作物水分生产函数以及灌溉管理模型相结合,建立了田块尺度作物灌溉管理决策支持系统. Brown 等[5]提出了一个适用于不同季节有限供水的情况下逐日灌溉水量优化,以使得农场的收益最大的灌溉制度决策支持方法. 但其中大部分模型或系统为集总式的结构,而分布式灌溉用水优化配置的研究刚刚起步[6]. 空间决策支持系统(spatial decision support system, SDSS)是在地理信息系统(geographic information system, GIS)与决策支持系统(decision support system, DSS)基础上应运而生,可用于解决与空间有关问题的决策支持系统,为解决灌区灌溉用水优化配置提供了新思路[7-8]. 因此,通过将传统灌溉用水优化配置方法与先进的空间决策支持系统建模方法和优化软件相结合,可解决灌溉用水时空最优配置的半结构化或非结构化问题. 文中针对前人模型中的不足,提出基于空间决策支持系统的灌区灌溉用水优化配置方法,为解决灌溉可供水量有限条件下灌溉用水时空配置最优化和缓解灌溉供需紧张矛盾提供有效途径.

1 数学模型

灌溉用水时空优化配置通过3个概化的数学模型进行描述,即年灌溉用水量分布式优化模型、月灌溉用水量分布式优化模型以及渠系工作制度多目标优化模型. 在灌溉用水有限的条件下,首先对灌区各子区域作物的年灌溉用水量进行优化,并将优化结果作为第2个模型的约束条件之一,再对子区域作物的月灌溉用水量进行优化;将月灌溉用水量的优化结果与灌溉制度相结合作为第3个模型的约束条件之一,通过运行渠系工作制度多目标优化模型最终得到较优的渠系工作制度.

其中前2个优化模型建立在作物与水分生产函数的基础上,增加了水量分配方案约束,即根据作物经济价值的高低,人为地将灌溉用水分为高灌溉保证率分配的水量和普通灌溉保证率分配的水量. 同时,前2个模型建模时,根据精度要求,灌区被划分为密集的网格,决策变量的标志由单一的行政区域编号或作物编号变为具有作物、土壤、气候以及渠道设计参数等不同属性的综合编码,提高了优化结果的精度. 第3个渠系工作制度多目标优化模型是新建模型,文献[9]有详细的阐述. 该模型将渠系运行过程中的2个重要的指标流量平稳度与渗漏损失作为目标函数,并采用多目标优化方法进行求解,使得优化后的渠系工作制度更符合渠系运行的要求.

1.1 年灌溉用水量分布式优化模型

目标函数为灌区灌溉用水产生的经济净效益最大.

目标函数:

$$\max B = \sum_{i=1}^{N} (Y_{ai}A_i p_i - X_i A_i F_i \eta_{Di}), \qquad (1)$$

式中:Y_{ai}为第i子区域作物实际产量,kg/hm^2;A_i为第i子区域作物灌溉面积,hm^2;p_i为第i子区域作物价格,元/kg;X_i为决策变量,即第i子区域年灌溉用水量,m^3/hm^2;F_i为第i子区域的水价,元/m^3;η_{iD}为第i子区域的渠系水利用系数;N为子区域个数.

Gosling 等[9]在1974年提出的Stewart总量模型式(2)被联合国粮农组织(FAO)推荐使用：

$$\left(1-\frac{Y_a}{Y_m}\right)=k_y\cdot\left(1-\frac{ET_a}{ET_m}\right), \tag{2}$$

式中：Y_m为作物最大产量，kg/hm^2；k_y为作物产量反应系数或敏感系数；ET_m为最大蒸发蒸腾量，mm；ET_a为实际蒸发蒸腾量，mm；根据水量平衡原理与X_i建立联系.

约束条件：

① 可供水量约束　$\sum_{k=1}^{N_k} X_{ik}A_i < IWA_k$, (3)

② 渠系配水能力约束　$X_i \leqslant Cap_i$, (4)

③ 最佳水资源投入约束　$ET_{ai} \leqslant ET_{mi}$. (5)

根据水量平衡原理

$$ET_a = X\eta_D\eta_t + R + \Delta S - PERC - G, \tag{6}$$

④ 配水均匀性约束 $X_{ik} < X_{\max ik}$, (7)

⑤ 水量分配方案约束

$$\sum_{k=1}^{k_H} X_{ik}A_i \leqslant Lic_H;\ \sum_{k=1}^{k_G} X_{ik}A_i \leqslant Lic_G, \tag{8}$$

⑥ 非负约束 $X_i \geqslant 0$, (9)

上述式中：X_{ik}为第i子区域作物k的年灌溉用水量，m^3/hm^2；N_k为种植作物k的子区域个数；IWA_k为作物k对应时段的灌溉可供水量，m^3；Cap_i为第i个子区域渠系最大输水量，m^3/hm^2；η_t为田间水利用系数；R为对应时段的降雨量，mm；ΔS为土壤储水增量，mm；$PERC$为渗漏量，mm；G为地表径流，mm；X_{maxi}为第i子区域作物k的最大灌溉用水量，m^3/hm^2；k_H为执行高灌溉保证率的作物个数；k_G为执行普通灌溉保证率的作物个数；Lic_H为高灌溉保证率分配的水量，m^3；Lic_G为普通灌溉保证率分配的水量，m^3.

1.2　月灌溉用水量分布式优化模型

目标函数采用Rao模型[10]，在年灌溉用水量一定的情况下，将灌溉用水在作物的不同生育阶段进行分配，使得各子区域作物产量最大.

目标函数：

$$\max C = \max Y_a/Y_m = \prod_{l_k=1}^{n_k}[1 - k_{ykl}\times(1 - ET_{akl}/ET_{mkl})], \tag{10}$$

$$\sum_{j=M_{ls}}^{M_{le}} X_{ij} = X_l, \tag{11}$$

式中：X_{ij}为决策变量，第i个子区域第j月的灌溉用水量，m^3/hm^2；n为生育阶段数；l为生育阶段序号；k为作物编号；k_{ykl}为作物k第l个生育期的水分敏感指数；M_{ls}和M_{le}分别为第l个生育阶段开始和结束的月份；X_l为第l个生育阶段的灌溉用水量. 本模型中假设在一个生育阶段内作物对水分的敏感程度相同，因此，X_l按照天数加权分配到各月份中. ET_{akl}仍通过水量平衡方程与X_{ij}建立联系.

约束条件：

① 水量平衡约束　$\sum_{j=1}^{n} X_{ij} = X_i$, (12)

② 渠系配水能力约束　$X_{ij} \leqslant CapM_{ij}$, (13)

③ 最佳水资源投入量约束　$ET_{aij} < ET_{mij}$, (14)

④ 灌水时间约束　$T_{Si} < t_i < T_{Ei}$, (15)

⑤ 月灌溉可供水量约束　$\sum_{i=1}^{N} X_{ij}A_i \leqslant IWA_j$, (16)

⑥ 非负约束　$X_{ij} \geqslant 0$, (17)

上述式中：j为月份序号；$CapM_{ij}$为第i子区域第j月渠系配水能力，m^3/hm^2；T_{Si}为作物i生育期起始月份；T_{Ei}为作物i生育期结束月份；IWA_j为第j月灌溉可供水量，m^3.

1.3　渠系工作制度多目标优化模型

该模型考虑了不同时刻上级渠道配水流量波动最小，即方差最小，以及渠系渗漏损失最小2个目标函数，更好地反映了渠系运行的实际情况以满足渠系工况的要求[11].

目标函数1：

$$\min Z_1 = \min\Big[\sum_{i=1}^{T}(Q_{si} - \overline{Q_s})^2\Big]/(T-1),\quad i = 1,2,\cdots,T, \tag{18}$$

目标函数2：

$$\min Z_2 = V_s + V_d = \sum_{i=1}^{T} W_{si}(1-\eta_s) + \sum_{j=1}^{N}\{W^*_{dj}(1-\eta_{dj})/[1+(1-\eta_{dj})]\}, \tag{19}$$

$$Q_{si} = \sum_{j=1}^{N} q_j^* f_{ij}(x),\ i = 1,2,\cdots,T, \tag{20}$$

上述式中：决策变量包括每个轮灌组下级渠道的灌水结束时间(t_{2j})和毛配水流量(q_j^*)；Z_1为轮灌期内各时刻Q_{si}的方差，(m^3/s)^2；T为轮灌周期，h；$\overline{Q_s}$为轮灌期内各时刻Q_{si}的均值，m^3/s；Q_{si}为第i时刻上级渠道净配水流量，m^3/s，等于该时刻下级配水渠道流量之和；q_j^*为第j个下级渠道的毛配水流量，m^3/s；N为一个轮灌组内的支渠个数；$f_{ij}(x)$是一个连续函数，描述轮灌期内渠道连续配水状态，如果i大于灌水开始时间小于灌水结束时间，$f_{ij}(x)=1$，

否则$f_{ij}(x)=0$；V_s为上级渠道的渗漏损失，m^3；V_d为下级渠道的渗漏损失，m^3；W_{si}为上级渠道净配水量，m^3；W_{dj}^*为第j个下级渠道毛配水量，m^3；η_s为上级渠道渠系水利用系数；η_{dj}为第j个下级渠道的渠系水利用系数.

约束条件：

① 配水连续性约束

$$0\leqslant t_{0j}\leqslant T;\ t_{2j}\leqslant T;\ t_{0j}+t_{1j}=t_{2j},\ j=1,2,\cdots,N, \tag{21}$$

② 配水量约束

$$W_{si}=Q_{si}t_{si}\times 60\times 60;\quad W_{dj}^*=q_j^*\times t_{1j}\times 60\times 60, \tag{22}$$

③ 流量约束

$$aq_j\leqslant q_j^*\leqslant bq_j;\ Q_{si}\leqslant cQ_{sd},\ j=1,2,\cdots,N, \tag{23}$$

④ 灌溉可供水量约束

$$W_{ai}\geqslant W_{si}/\eta_s,\ i=1,2,\cdots,T, \tag{24}$$

上述式中：t_{0j}为灌水开始时间，h；t_{1j}为灌溉时间，h；t_{2j}为灌水结束时间，h；t_{si}为时段i的时间步长，h；q_j为第j个下级渠道的设计流量，m^3/s；Q_{sd}为上级渠道的设计流量，m^3/s；a，b，c分别为下级渠道和上级渠道运行流量的允许阈值系数；W_{ai}为时段i灌溉可供水量，m^3.

以上3个模型分别采用线性优化、非线性优化以及遗传算法多目标优化方法进行求解.

2 计算过程

为实现灌区灌溉用水时空优化配置的连续过程，将3个数学模型进行集成，建立具有三库模式的灌区灌溉用水优化配置空间决策支持系统，即空间数据库、模型库、方法库以及人机交互系统，采用ArcOjcets技术，运用内置ArcMap的VBA进行编程，如图1所示.

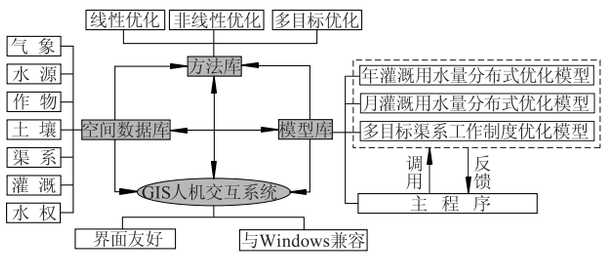


图1 灌区灌溉用水优化配置空间决策支持系统框架图

Fig. 1 System architecture diagram of decision support system for optimization allocation of water in irrigation districts

空间数据库涵盖历史、实时以及未来情景的空间数据和非空间数据，包括气象、水源、作物、土壤、渠系、灌溉和水权信息. 其中气象信息包括长系列降雨量、参考作物蒸发蒸腾量以及气象站点的分布和名称. 水源信息包括水库库容、河流径流量、下垫面参数和灌溉可供水量等水文信息. 作物信息包括作物类型、作物种植结构、种植面积、作物系数、作物产量敏感系数和生育期. 土壤信息主要为土壤类型分布图以及与土壤类型相关的参数. 渠系信息包括灌区渠系布置图、渠系断面尺寸、设计流量和渠系水利用系数等. 灌溉方式信息包括地面灌、喷灌和滴灌以及田间水利用系数. 水权信息包含不同灌溉保证率作物的灌水许可、灌溉配额及其水价. 空间数据与非空间数据通过GIS中的查询表进行连接，每个栅格对应一个编码，该栅格的所有参数和计算结果都储存在查询表中，方便模型优化时进行调用.

模型库除主程序外包括3个子模型：年灌溉用水量分布式优化模型、月灌溉用水量分布式优化模型以及多目标渠系工作制度优化模型. 主程序与子模型之间是调度与反馈的关系，同时，3个子模型受方法库的支配，模型库可通过对空间数据库的调用和参数传递实现灌区灌溉用水的时空配置，得到不同情景的渠系工作制度和灌溉制度，为灌区灌溉用水管理提供辅助决策方案.

方法库中包含线性优化、非线性优化以及多目标优化3种优化方法，用于对模型库中各子模型进行优化求解. 方法库中的优化方法采用优化软件编写，可根据需要进行修改和扩充.

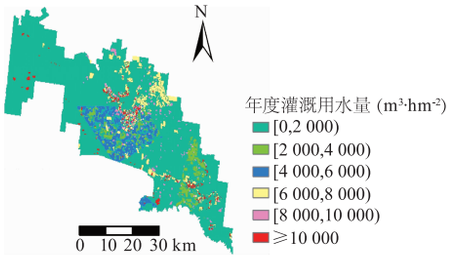
GIS人机交互系统是用户与其他各库发生决策行为的平台. 空间数据库、模型库以及方法库的各功能通过GIS人机交互系统实施人为控制和决策. 该系统的界面友好并能与Windows系统兼容.

与集总式、单一的模拟模型相比，通过集成建立的灌区灌溉用水优化配置空间决策支持系统具有如下特点. 首先，在灌区复杂时空因素影响下，采用分布式建模思路和求解方法，提高了灌区灌溉用水优化配置精度的同时，简化了求解的繁琐程度，结果展示更加直观、丰富. 其中时间因素表现为年季间气象参数的差异和作物不同生育阶段对应参数的差异；而空间因素表现为作物种植结构、土壤质地、渠系布置及其气象站点分布的差异. 第二，该系统的运行方式灵活，可以满足不同的用户需求. 3个模型既可以单独运行，又可以连续运行. 第三，该系统可以进行不同情景的模拟与分析，便于管理部

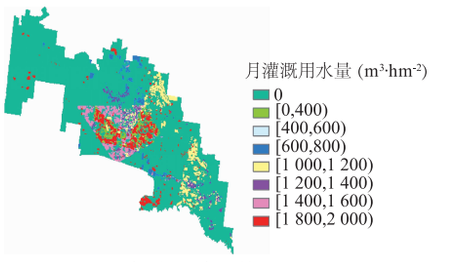
门通过方案对比进行决策. 第四，系统运行效率高，可移植性和通用性较强. 由于方法库与模型库的分离，实现了方法间的共享，减少了方法和模型的重复写入. 同时，也方便模型参数的输入，并可根据灌区的不同需求对模型进行修改.

3　实例验证

马兰比吉灌区是澳大利亚马兰比吉流域内最大的一个灌区，灌区面积 3 624 km^2. 年平均降雨量 406 mm，年平均蒸发蒸腾量 1 797 mm，栅格尺度 25 km × 25 km. 以 2006—2007 年为例，优化后年灌溉用水量分布图如 2 所示.



(a) 2006年7月至2007年6月



(b) 2006年至2007年10月

图 2　灌溉用水量分布

Fig. 2　Distribution of irrigation water

从图中可以看出，灌区灌溉用水空间分布不均，灌区中部分布相对集中，灌水量为[2 000，4 000)，[4 000，6 000)，[6 000，8 000) m^3/hm^2 的子区域分别位于灌区的东部和中南部、中南部和中北部. 灌水量大于 10 000 m^3/hm^2 的面积很小.

月灌溉用水量优化以 2006 年至 2007 年 10 月为例. 图 2b 显示 10 月灌溉用水量较大，其中大于 1 400 m^3/hm^2 的地区集中在灌区中部，东西部分地区有零散分布. 月灌溉用水量在(1 200，1 400] m^3/hm^2 的地区主要分布在灌区中南部. 灌溉用水量在[1 000，1 200) m^3/hm^2 的区域较少，分布也较分散. 灌区东北部和东部的灌溉用水量在(800，1 000] m^3/hm^2. 灌溉用水量小于 800 m^3/hm^2 的地区较少.

渠系工作制度优化以 2006 年至 2007 年 10 月的 1 次灌水为例. 优化结果如图 3 所示，灌水周期为 120 h，其中灌水时间为 83 h，停灌时间为 37 h. 支渠引水满足一次性引水约束，即某个下级渠道配水过程不间断，灌水从开始发生直到最终满足该渠道配水量要求为止，因此，最大限度地缩短了灌水时间，减小了渗漏损失，同时也减少了支渠闸门启闭次数，减轻了管理强度，提高了灌溉管理效率.

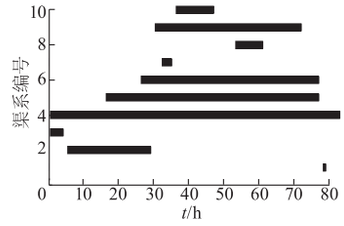
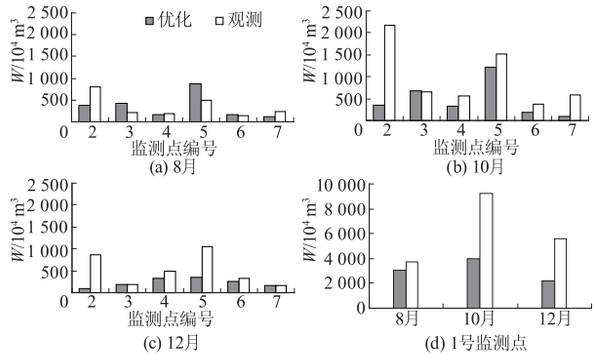
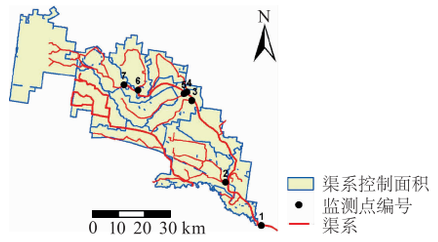


图 3　渠系工作制度(2006—2007 年 10 月的 1 次灌水)

Fig. 3　Canal scheduling (2006—2007, Oct)

以上结果经统计分析，优化后灌区年灌溉用水量配置方案灌区灌溉总用水量减少 15 339 万 m^3，产量增加 8.423 8 × 10^7 kg，水分生产率提高 0.5 kg/m^3，灌溉净效益增加 18 530.2 万元. 以 2006—2007 年 8，10，12 月为例，灌区月渠系配水量优化结果与观测值比较如图 4 所示.





(e) 监测点分布

图 4　月渠系配水量对比(2006—2007 年)

Fig. 4　Comparison of canal irrigation distribution by month (2006—2007)

由图 4 可以看出，主渠渠系引水口(1 号监测点)各月份的引水量小于观测值，表明优化后主渠引水流量减少，节约了灌水量. 监测点 2 – 7 优化后灌水高峰期出现在 10 月，与观测值相吻合，大部分

监测点的优化值小于观测值. 监测点3和5控制区域主要种植灌溉保证率较高的果树,而8,10月2个监测点的优化值高于观测值,因此,优化后配水方案具有将有限的水资源向经济价值较高的作物转移的趋势. 总之,灌区灌溉用水时空优化结果使得配水方案更加合理.

4 结 论

1) 建立的灌溉用水优化配置模型,经实例验证,优化后灌区灌溉总用水量减少29.6%,产量增加24.3%,水分生产率提高0.5 kg/m^3,灌溉净效益增大16.8%,达到了灌溉用水空间配置节水、高产、高效的目标.

2) 新方法将传统模型与GIS进行集成,简化了求解空间优化配水问题的繁琐程度,使得优化求解的尺度控制更灵活,结果表现形式更加丰富.

3) 基于空间决策支持系统的灌区灌溉用水优化配置的新方法,为港区尺度灌溉用水优化配置的建模与求解提供了新思路,同时,也为解决灌区水管理中诸多时空因子耦合的问题提供了借鉴.

参考文献(References)

[1] Wang Y, Chen Y, Peng S. A GIS framework for changing cropping pattern under different climate conditions and irrigation availability scenarios [J]. Water Resources Management, 2011, 25(13): 3073-3090.

[2] 张智韬, 刘俊民, 陈俊英,等. 基于RS、GIS和蚁群算法的多目标渠系配水优化[J]. 农业机械学报, 2010, 41(11):72-78.
Zhang Zhitao, Liu Junmin, Chen Junying, et al. Water resources allocation of canal system based on multi-objective about RS, GIS and ant colony algorithm [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(11):72-78. (in Chinese)

[3] Cakr R, Ceb U. Yield, water use and yield response factor of flue-cured tobacco under different levels of water supply at various growth stages [J]. Irrigation and Drainage, 2010, 59(4): 453-464.

[4] Zhang Yi, Feng Liping. Cropirri: A decision support system for crop irrigation management [J]. IFIP Advances in Information and Communication Technology, 2010,317:90-97.

[5] Brown P D, Cochrane T A, Krom T D. Optimal on-farm irrigation scheduling with a seasonal water limit using simulated annealing [J]. Agricultural Water Management, 2010, 97(6): 892-900.

[6] 张佳. 基于Delphi的灌溉决策支持系统研究[D]. 西安:西安理工大学水利水电学院,2010.

[7] 乔长录, 刘招, 茯苓. 基于COMGIS和Matlab的泾惠渠灌区灌溉决策支持系统[J]. 干旱地区农业研究, 2010, 28(3): 31-36, 70.
Qiao Changlu, Liu Zhao, Fu Ling. lrrigation decision support system based on COMGIS and Matlab for Jinghuiqu irrigation district[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2010, 28(3): 31-36, 70. (in Chinese)

[8] Chen Y, Yu J, Khan S. Spatial sensitivity analysis of multi-criteria weights in GIS-based land suitability evaluation [J]. Environmental Modeling and Software, 2010, 25(12): 1582-1591.

[9] Gosling S N, Arnell N W. Simulating current global river runoff with a global hydrological model: Model revisions, validation, and sensitivity analysis [J]. Hydrological Processes, 2010, 25(7): 1129-1145.

[10] Phumiphan N, Kangrang A, Sa-Ngiamvibool W. An improvement of optimal allocation water for cultivating supper chilli[J]. Australian Journal of Basic and Applied Sciences, 2011, 5(11): 744-751.

[11] Peng S, Wang Y, Khan S, et al. A simplified multi-objective genetic algorithm optimization model for canal scheduling [J]. Irrigation and Drainage, 2011, 61(3): 294-305.

(责任编辑 谈国鹏)